

Physique nucléaire expérimentale pour l'énergie

Introduction

Les activités expérimentales de physique nucléaire du groupe PACS se focalisent sur l'étude de la fission, avec deux objectifs : améliorer notre connaissance du mécanisme de fission, et produire des données de haute précision, à même d'intégrer les bases de données évaluées et donc d'améliorer la précision et la fiabilité des simulations de systèmes nucléaires pour l'énergie. Les deux objectifs sont très largement complémentaires : outre son intérêt scientifique intrinsèque, la compréhension du phénomène de fission est indispensable pour faire évoluer les codes de calcul décrivant les réactions (dont la mesure exhaustive est impossible), tandis que les données de haute précision aident à contraindre ces codes et réduisent les barres d'erreurs des bibliothèques utilisées pour les applications.

La fission est parfois qualifiée de « laboratoire nucléaire », du fait de son extrême complexité. Si les grands traits du phénomène sont bien connus, sa reproduction précise demeure un challenge hors de portée des modélisations actuelles. La mesure est dès lors indispensable, les modèles ayant pour mission de combler le mieux possible les « trous » que les expérimentateurs ne peuvent combler.

Dans la mesure où la fission concerne presque exclusivement des noyaux radioactifs, la réalisation d'expériences suppose soit de disposer de cibles radioactives (avec toutes les contraintes de manipulation et de caractérisation que cela implique), soit de trouver les réactions nucléaires idoines pour former et étudier « en vol » les noyaux d'intérêt. Une des forces de l'équipe d'Orsay est d'être performante dans les deux approches, et de disposer en local d'un ensemble de support technique et scientifique unique, qu'il s'agisse de chimie des actinides, d'un service de radioprotection suffisamment dimensionné, et d'un important service de détecteurs (mécanique et électronique).

Historiquement, l'activité « données nucléaires » est apparue à Orsay à la fin des années 90, avec les expériences de spallation en cinématique inverse auprès du FRS, à GSI. Ces mesures, motivées par la perspective des cibles de spallation pour les ADS, produisaient déjà des données de fission (à très haute énergie d'excitation). L'activité spallation est à présent terminée mais l'expertise que le groupe a développée a permis une implication dans le développement de SOFIA, également à GSI, qui reprend la technique de la cinématique inverse pour l'appliquer à la mesure des rendements de fission. Auparavant, au tournant du millénaire, le groupe avait participé à la mise en place de la ligne de neutrons n_TOF au CERN, et développé pour cette installation un ensemble de détection dédié à la fission, toujours en usage (avec quelques évolutions), et dont les performances restent inégalées. Outre ces 2 activités principales, les membres du groupe participent également de manière régulière à d'autres activités de mesure de fission, au GANIL (fission induite par transfert, en cinématique inverse) et au Tandem d'Orsay (méthode « surrogate », dont l'équipe du CENBG est pilote).

Fission induite par neutrons à n_TOF

Les bibliothèques de sections efficaces induites par neutron sont les données d'entrée de première importance pour la simulation des réacteurs nucléaires. Elles sont produites par un processus d'évaluation qui cherche à contraindre les modèles phénoménologiques de chacun des noyaux. La qualité des sections évaluées est donc très variable d'un isotope à l'autre, et à la fin des années 90 les mesures expérimentales (qui permettent de contraindre les évaluations) étaient souvent rares voire absentes au-delà du domaine thermique ou épithermique. La perspective du développement de réacteurs innovants à spectre rapide et/ou dédiés à la transmutation, a renouvelé l'intérêt pour des mesures précises d'une grande variété d'isotopes et pour une extension en énergie des mesures.

Un large effort expérimental a eu lieu au cours des deux dernières décennies dans ce domaine. L'installation n_TOF, mise en service en 2000 au CERN, en est un des symboles (figure 1). Elle offre à la fois un flux de neutrons relativement élevé (jusqu'à 10^7 /cm²/s), une bonne résolution en énergie des neutrons, un spectre blanc d'une largeur sans équivalent (du domaine thermique

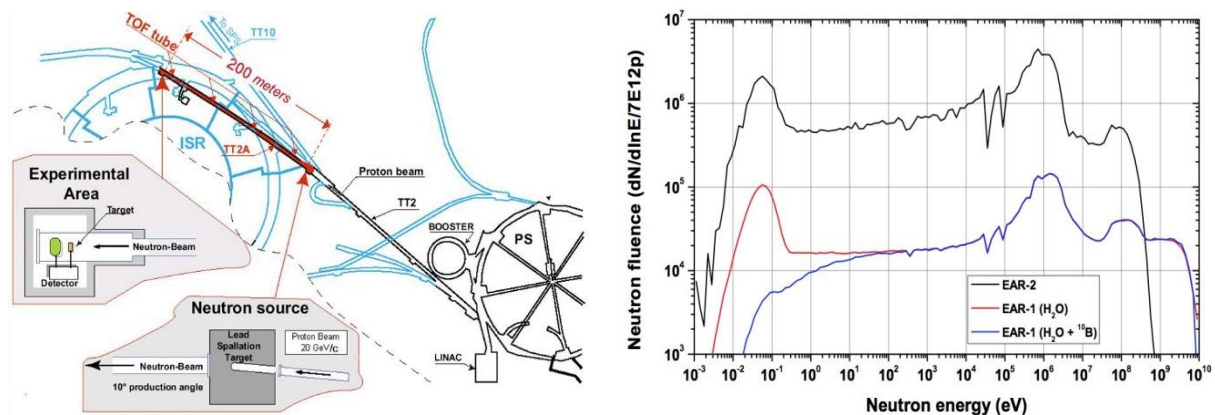


Figure 1 : vue générale de l'installation n_TOF (gauche) et flux de neutrons sur les deux aires (droite)

jusqu'au GeV), et un très faible cycle utile qui la rend particulièrement adaptée aux mesures sur des noyaux radioactifs [1]. En 2014, une seconde ligne de neutrons a été ouverte, avec une base de vol réduite (20 m au lieu de 180), résultant en un flux multiplié par un facteur 20 environ, et donnant donc accès à des mesures sur des échantillons de quelques centaines de microgrammes [2].

Mesures avec les PPACs

Afin de réaliser des mesures de fission de haute précision, un dispositif spécifique a été développé à Orsay [3]. Il repose sur la méthode de la coïncidence : une fission est identifiée de manière non-ambiguë par la détection simultanée des deux fragments. Cette méthode, plus complexe à mettre en œuvre que les habituelles chambres d'ionisation (où un seul fragment est détecté) permet une réjection optimale des alphas issus de la radioactivité des échantillons, et aussi de discriminer très efficacement les réactions de haute énergie. Grâce à l'utilisation de détecteurs à plaques parallèles (PPACs), très rapides et très transparents, il est possible de mesurer l'ensemble de la gamme d'énergie des neutrons, des thermiques au GeV. Il est assez remarquable que près de 20 ans après leur développement, ce système reste le seul capable d'utiliser pleinement le spectre de n_TOF ! Autre avantage de cette transparence, il est possible de mesurer simultanément plusieurs cibles (en l'occurrence, 9) sans perturber le flux de neutrons, et donc de s'affranchir de la question de la normalisation de la mesure par le flux : le rapport des comptages associé à 2 cibles est égal au rapport « absolu » des sections efficaces entre les deux noyaux correspondants (moyennant, bien

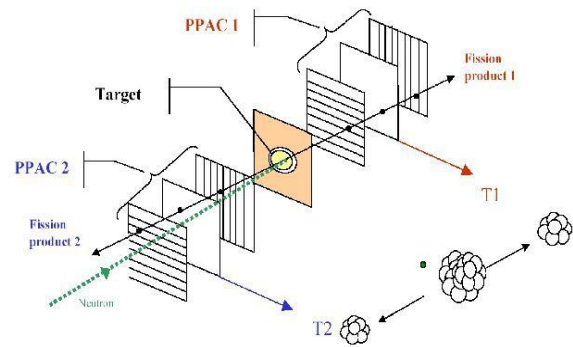
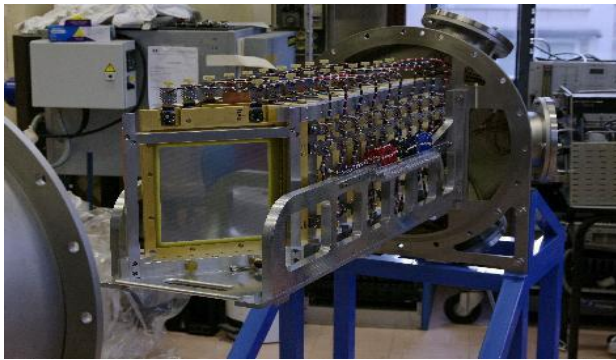


Figure 2 : vue d'ensemble des 10 PPACs dans leur berceau (gauche) et principe de détection en coïncidence associant 2 PPAC autour d'une cible (droite)

sûr, la parfaite connaissance des quantités de matière et de l'efficacité de détection). Le dispositif de mesure consiste ainsi en une chambre de grande dimension, remplie de C_3F_8 à 5 mbar, laquelle contient 10 détecteurs et 9 cibles intercalées (figure 2).

Les PPACs permettant de mesurer la position des fragments qui les atteignent : il est ainsi possible de localiser la fission sur chaque cible et de déterminer l'angle d'émission des fragments. La première information permet de tenir compte des inévitables inhomogénéités des cibles, tandis que la seconde a un double intérêt : le contrôle de l'efficacité de détection, qui varie fortement avec l'angle (le risque qu'un fragment ne sorte pas de la cible augmente drastiquement avec l'inclinaison à la normale de sa trajectoire), et l'accès à une mesure directe de la distribution angulaire des fragments de fission. Cette dernière information offre un éclairage unique sur l'état du système fissionnant. De plus, si elle n'est guère pertinente pour les applications, elle reste importante pour les données nucléaires car elle peut impacter l'efficacité de détection. Sa connaissance fait donc partie des critères permettant d'atteindre de très hautes précisions sur les mesures de sections efficaces.

Notons que dans le cas d'un système où les détecteurs sont perpendiculaires au flux de neutrons, l'efficacité de détection et les variations de distributions angulaires sont totalement intriquées ; de plus la gamme angulaire couverte est limitée (du fait de l'augmentation de la distance effective parcourue dans l'épaisseur de cible avec l'angle à la normale, la probabilité de perdre un des fragments, et donc la fission, augmente drastiquement dans la région de 60°). Une solution est d'incliner les détecteurs par rapport à l'axe du faisceau. On dispose alors de deux référentiels distincts, l'un perpendiculaire au détecteur dans lequel les variations de comptage avec l'angle résultent de l'efficacité intrinsèque, et l'autre perpendiculaire au faisceau dans lequel les fluctuations reflètent les distributions angulaires. La chambre à réaction utilisée depuis 2010 est ainsi dotée de berceaux inclinés à 45° , ce qui maximise la couverture angulaire effective [4].

A ce jour, un grand nombre d'isotopes ont été mesurés à l'aide du dispositif PPACs : ^{nat}Pb , ^{209}Bi , ^{232}Th , $^{233,234,235,238}U$ et ^{237}Np . La plupart des mesures ont fait l'objet de publications [4]–[10] (certains résultats, notamment ^{233}U , sont encore en attente de finalisation). Il faut souligner que l'ensemble des résultats publiés est disponible sur EXFOR. Des mesures dédiées aux distributions angulaires des fragments de fission ont été également réalisées pour ^{232}Th (figure 3) et ^{234}U .

Dans notre programme, le ^{237}Np est un cas particulier puisqu'il a fait l'objet de deux mesures. La première expérience, réalisée avec un système orthogonal au faisceau (ne permettant donc pas de contrôler parfaitement l'effet des fluctuations angulaires), a produit des données présentant un fort désaccord (6% environ) avec les librairies [5] (figure 3, gauche). Ces valeurs étaient cependant cohérentes avec des mesures intégrales et certaines données expérimentales [11], ce qui a motivé une seconde mesure afin de tenter de lever l'ambiguïté. Cette fois, un dispositif incliné et un mix de

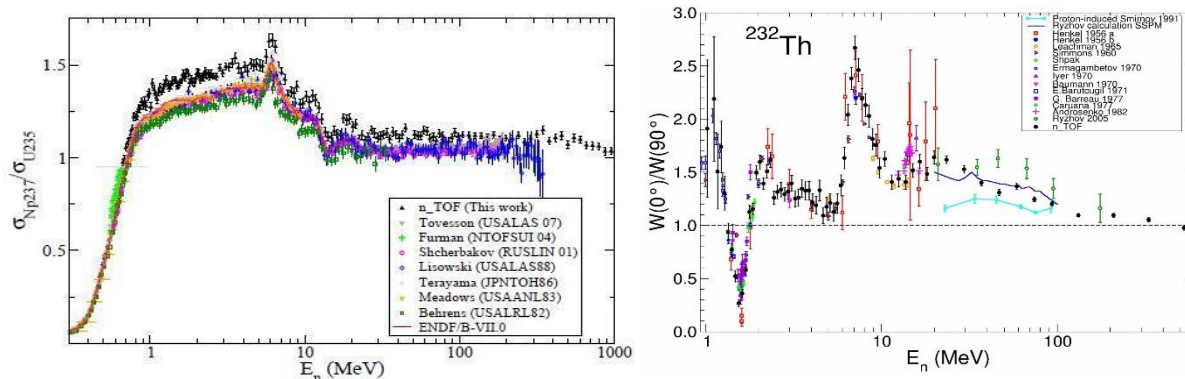


Figure 3 : résultats de la mesure $^{237}\text{Np}(n,f)$ réalisée en 2010 (gauche), et distribution angulaire des fragments dans la réaction $^{232}\text{Th}(n,f)$ mesurée en 2012 (droite).

cibles issues de la première mesure et de cibles réalisées sur un support ultra-mince (0,7 microns) ont été utilisés. L'expérience a eu lieu en 2015-2016 ; les résultats préliminaires, obtenus dans le cadre de la toute récente thèse de Yonghao Chen après une analyse détaillée de l'efficacité, indiquent que les distributions angulaires ont bien eu un impact sur la mesure initiale. Néanmoins, il subsiste un écart avec les bibliothèques, de l'ordre de 3%. Cela peut paraître faible, mais dans la mesure où ^{237}Np a fréquemment été utilisé comme référence pour des mesures de sections efficaces, toute évolution de sa propre section efficace peut avoir, en cascade, des répercussions significatives sur les données évaluées.

^{237}Np est également intéressant car il illustre la richesse du groupe PACS et la synergie pratique de ses diverses composantes. Comme pour tout le reste du programme, les cibles ont été réalisées par Claire Le Naour, « notre » radiochimiste. Mais la confrontation des données du Np aux mesures intégrales et la discussion des résultats ont été grandement facilitées par la présence dans le groupe de spécialistes de neutronique.

Monitoring du flux pour EAR2

La possibilité de mesurer la position des réactions et la couverture de l'ensemble du spectre d'énergie font des PPACs un détecteur de choix pour la caractérisation du flux de n_TOF. Un dispositif réduit (3 détecteurs à 90°) a ainsi été acquis par la collaboration pour servir de référence sur l'aire 2 lors de certaines expériences. Le premier usage a été de caractériser le faisceau de cette aire jusqu'à 300 MeV, ce qu'aucun autre détecteur ne pouvait faire (cf. figure 4). Deux cartographies

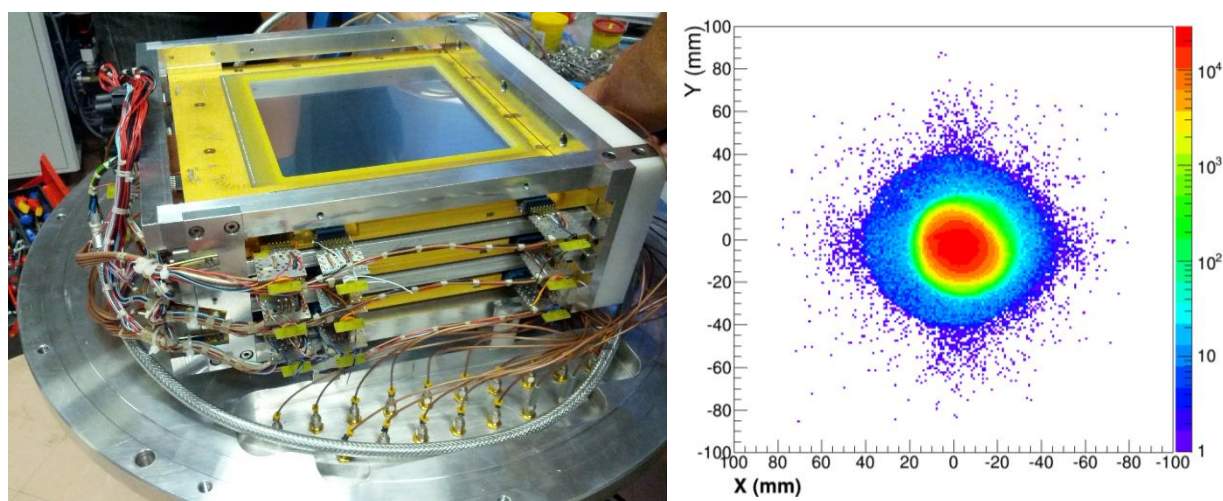


Figure 4 : vue du moniteur faisceau (3 PPACs et 2 cibles) et cartographie du faisceau de l'aire 2 réalisée en 2015.

du faisceau ont été réalisées par notre groupe en 2015 et 2016 respectivement, une avec un petit collimateur de neutrons et une seconde avec un collimateur plus large. Ce travail a mis en évidence l'important halo de neutrons présent sur cette ligne de faisceau, qui résulte du design du collimateur, optimisé pour maximiser l'intensité du faisceau.

Perspectives

La prochaine expérience de mesure de fission est prévue cette année. La cible principale sera ^{231}Pa , un des déchets du cycle Th/U3 (produit principalement par réaction $(n,2n)$ sur ^{232}Th), extrêmement mal connu aujourd'hui (cf. Figure 5). Sa durée de vie de 32 kyr en fait un noyau de forte radiotoxicité pour le cycle thorium, dont il est souhaitable d'estimer la production avec une certaine précision. Il est également à noter que ce noyau offre un test intéressant pour la méthode surrogate, qui a été employée pour estimer sa section efficace de fission [12].

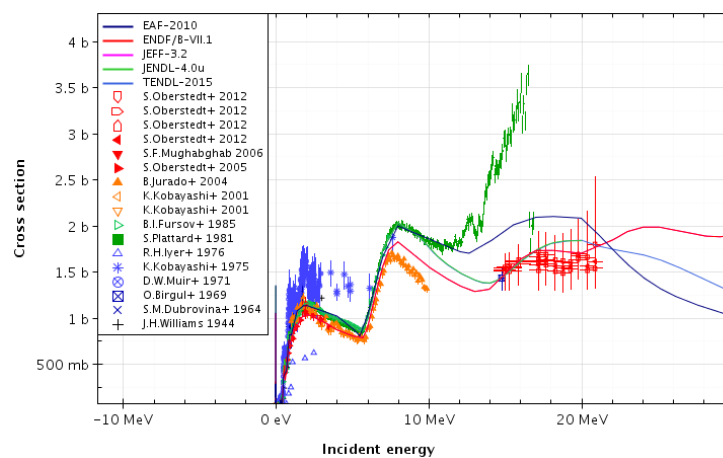


Figure 5 : section efficace de $^{231}\text{Pa}(n,f)$ en fonction de l'énergie du neutron incident. On remarque le désaccord significatif entre la mesure par méthode surrogate et la mesure directe au-delà de 6 MeV.

Pour cette mesure, la présence de Claire Le Naour est une nouvelle fois décisive puisqu'elle a su développer un protocole d'électro-dépôt pour cet élément, qui n'existait pas jusqu'alors. Du fait de sa période relativement courte, seules des cibles ne dépassant pas le mg peuvent être fabriquées. La mesure doit être réalisée à l'aire 2 afin de bénéficier d'un flux de neutrons élevé et compenser la très faible masse des cibles. L'aire 2 se caractérise par une extrême compression en temps du paquet de neutrons : il a donc été nécessaire de réviser l'électronique des PPACs afin de réduire le temps de propagation des signaux dans les lignes à retard. Le développement des lignes et l'adaptation des préamplis est en cours de réalisation.

Il est intéressant de noter que la période du ^{231}Pa est similaire à celle de ^{239}Pu (24 kyr). Ainsi, si l'expérience de 2018 se passe bien, il sera parfaitement envisageable de procéder à une mesure de cet isotope essentiel de l'électronucléaire.

De manière générale, les sections efficaces de fission sont nettement mieux connues qu'il y a 20 ans, quand une nouvelle impulsion a été donnée aux programmes de mesure. Si le défi de la précision subsiste dans une optique strictement applicative, elle est d'autant plus nécessaire que le noyau concerné joue un rôle majeur. Une mesure de très haute précision de ^{239}Pu (nous parlons d'une incertitude totale inférieure à 3%), a fortiori sur une gamme d'énergie aussi large (du thermique aux centaines de MeV) pourrait offrir aux bases de données une contrainte inédite. Notons que, comme la plupart des installations du CERN, n_TOF va être mis en sommeil 2 ans à l'occasion du Long Shutdown prévu pour améliorer la chaîne d'accélération ; l'expérience pourrait donc être prévue en 2021 – un délai qui ne sera sans doute pas inutile pour obtenir la matière, réaliser des cibles, et

préparer un transport, compte-tenu du caractère extrêmement sensible de cet isotope. Les isotopes 240 et 242 pourraient également faire l'objet de mesures, autant motivées par les distributions angulaires que par une perspective strictement applicative.

Au chapitre des perspectives, nous collaborons également au sein de n_TOF pour développer un système de normalisation basé sur la réaction (n,p). Les premiers tests ont eu lieu l'an passé, le développement se poursuivra cette année et le système pourrait être opérationnel en 2021, pour la reprise des mesures. La perspective de mesurer, non plus des rapports de sections efficaces, mais bien des grandeurs normalisées sur une réaction extrêmement bien connue, est évidemment particulièrement intéressante.

Rendements de fission isotopiques à GSI

Parmi les observables de la fission, les grandeurs directement liées aux fragments figurent en bonne place : taux de production, énergie de recul, neutrons émis. Comme pour les sections efficaces, ces informations sont des sondes précieuses pour comprendre la physique, et ont un impact direct dans le domaine applicatif, qu'il s'agisse de l'énergie prompte libérée dans le réacteur, de la chaleur résiduelle, ou encore de la production de noyaux radiotoxiques ou neutrophages. Or, si les rendements en masse sont souvent bien connus, la connaissance des rendements en charge est, elle, au mieux parcellaire. La mesure des charges nucléaires est en effet excessivement difficile dans les expériences classiques de fission : elle n'est, de fait, réalisée que pour le groupe des fragments légers, avec une résolution limitée. Il faut toutefois préciser qu'une technique basée sur la spectrométrie gamma a été développée avec un certain succès pour l'identification en charge dans le pic lourd [13]. La collaboration SOFIA s'est donc donnée pour objectif de mesurer, pour la première fois, la charge et la masse des deux fragments de fission, en coïncidence, et de manière pratiquement simultanée avec la fission puisque l'identification est réalisée en quelques dizaines de nanosecondes.

Principe général

Les expériences SOFIA ont lieu à GSI, seul laboratoire au monde à proposer des faisceaux d'uranium jusqu'à 1A GeV. Elles se basent sur la cinématique inverse : le système fissionnant fait office de projectile. Cette technique présente deux avantages décisifs : elle permet de mesurer la fission de n'importe quel système, puisque le noyau d'intérêt est produit par une première réaction nucléaire, puis sélectionné « en vol » à l'aide d'un spectromètre de recul, le FRS ; et elle permet l'identification en charge en conférant aux fragments de fission une énergie cinétique élevée, principalement celle du centre de masse.

Dans le cas de SOFIA, la fission est déclenchée par interaction coulombienne, résultant en une énergie d'excitation de 14 MeV en moyenne, soit l'équivalent d'un neutron de 8 MeV environ (figure 6). Ce choix est imposé par la nature relativiste du faisceau

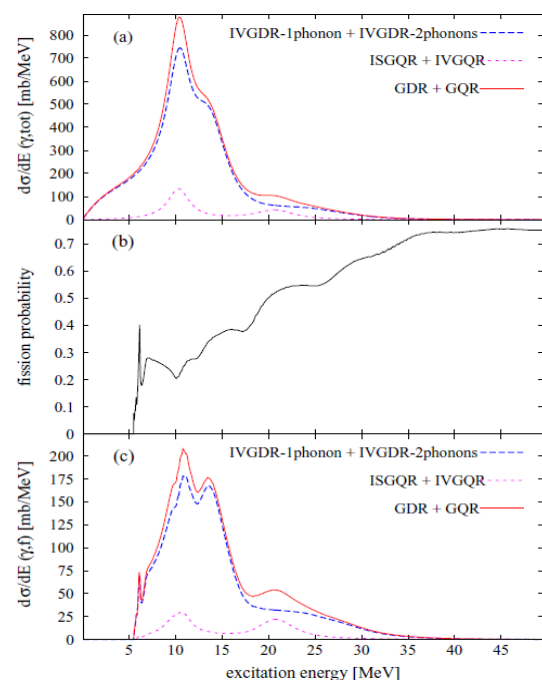


Figure 6 : spectre d'excitation, section efficace d'interaction et section efficace différentielle en fonction de l'énergie d'excitation lors d'une interaction coulombienne entre 2 noyaux d'uranium à 600A MeV.

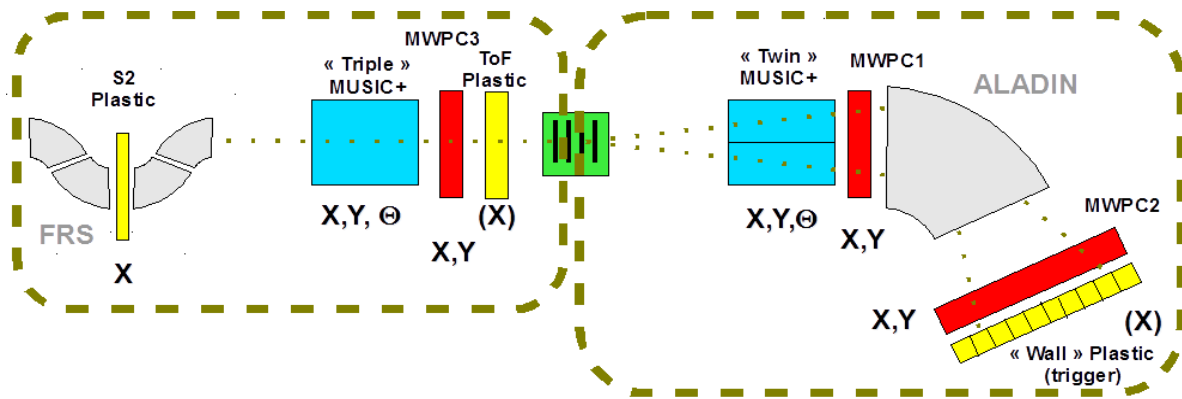


Figure 7 : schéma général de SOFIA : la partie gauche correspond à la sélection et à l'identification du faisceau secondaire ; la partie droite est associée aux fragments. En bleu, les chambres d'ionisation, en jaune, les plastiques, et en rouge, les MWPC.

secondaire (une interaction nucléaire avec les projectiles de 600A MeV conduirait à des dizaines voire des centaines de MeV d'excitation) et par le besoin de compenser la faible intensité du faisceau secondaire par une section efficace d'interaction élevée ; l'inconvénient est que l'énergie d'excitation n'est pas connue événement par événement, seulement en valeur moyenne.

SOFIA combine 9 détecteurs (cf. figure 7) afin de suivre et identifier le faisceau secondaire et les fragments de fission. L'identification repose sur une même technique : la charge est déterminée par une chambre d'ionisation, et la masse par la combinaison de la charge, de la déviation dans un champ magnétique et de la vitesse (obtenue par mesure de temps de vol). La forte impulsion de recul due à la fission génère une large ouverture angulaire des trajectoires des fragments : un aimant à grande acceptance est donc nécessaire. Lors des expériences de 2012 et 2014, il s'agissait d'ALADIN qui sera remplacé par GLAD, aimant de nouvelle génération. Aux énergies relativistes, la mesure de la charge est moins délicate que celle de la masse, du fait des temps de vol très courts. Une des performances techniques de SOFIA est de réaliser les mesures de temps de vol avec une résolution de 20 ps (FWHM) : c'est la clé du succès pour l'obtention des masses.

Apport de l'IPNO

Aux côtés du CEA-DAM Bruyères-le-Châtel et de GSI, l'IPNO est fortement impliqué dans SOFIA puisque nous sommes responsables de 3 des 9 détecteurs, en l'occurrence des chambres multifils à projection (MWPC). Entièrement conçus et réalisés à l'IPN, elles sont utilisées pour les mesures de position X et Y. Ils présentent une résolution en X de 200 microns (FWHM). Ce développement est

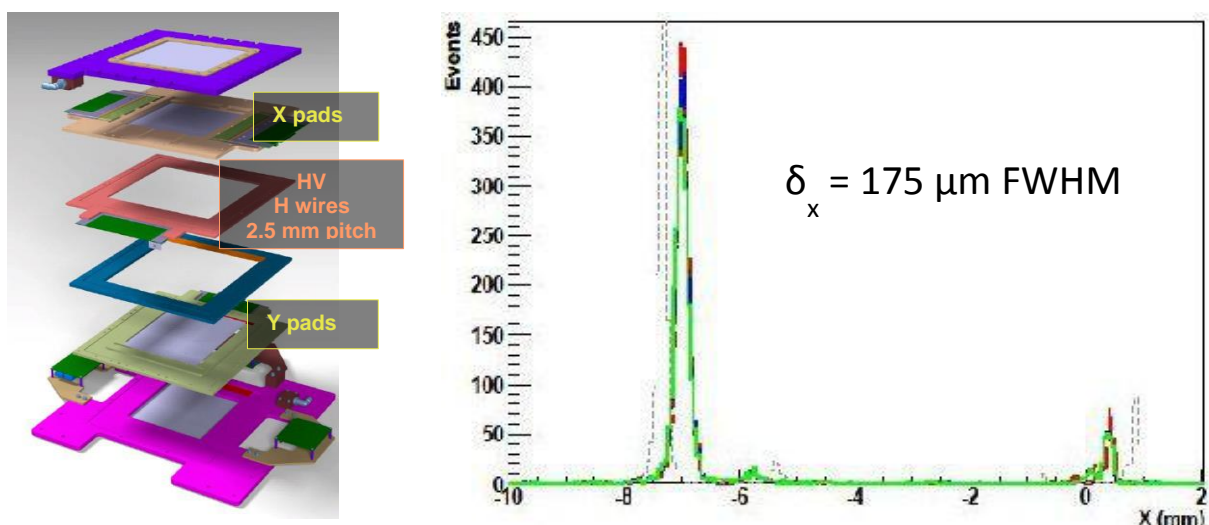


Figure 8 : éclaté d'une MWPC réalisée à l'IPN et mesure de la résolution en position X de ces chambres. 2 MWPC ont une surface utile de 20x20 cm, la 3e de 60x90 cm.

d'autant plus conséquent que les détecteurs évoluent fortement à chaque expérience : après l'expérience de 2012, l'électronique de lecture a été entièrement remplacée et la 3e chambre fabriquée ; en préparation de celle de 2018, c'est tout le front-end qui est en cours de remplacement par des ASIC de dernière génération (VMM3), et la MWPC dédiée au faisceau secondaire voit son design modifié pour disposer d'une seconde dimension de haute résolution.

Campagnes 2012 et 2014 : aperçu des résultats et discussion

En 2012, la première expérience SOFIA a permis de mesurer la fission électromagnétique d'une variété de noyaux, avec de fortes statistiques pour ^{238}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}Np . Dans les faits, la cible prioritaire était ^{236}U , qui est l'analogue de $^{235}\text{U}+n$; mais ce noyau a été « manqué » à la suite d'une erreur de réglage du FRS. Cette première expérience a cependant permis de valider la méthode et la capacité du système à identifier les fragments en masse et en charge avec une excellente résolution [14]. Une série de mesures ont également été effectuées pour de nombreux isotopes déficients en neutrons du thorium et de l'actinium afin d'étudier la transition de la fission symétrique vers la fission asymétrique. Une première validation de la méthode et de la précision des données est obtenue par la comparaison avec les seules mesures antérieures de distribution en charge [15] : l'accord est absolument remarquable (cf. figure 9).

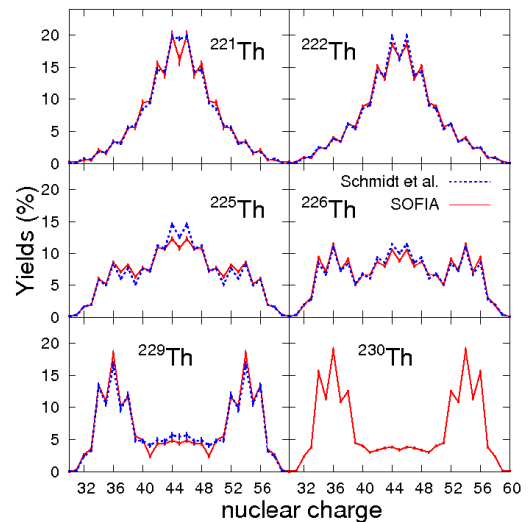


Figure 9 : comparaison (FRS vs SOFIA) des rendements en charge de plusieurs isotopes du Th

En 2014, la seconde expérience a cette fois bien mesuré la fission de $^{236}\text{U}^*$; on peut au passage souligner l'extrême efficacité du dispositif, puisque la statistique de 2 millions de fissions a été obtenue en à peine 2 shifts ! Lors de l'expérience de 2014, les performances du dispositif ont été encore accrues, pour atteindre une résolution de 0,31 (FWHM) pour les charges (soit en pratique une séparation pratiquement totale), et de 0,55 à 0,8 (FWHM) pour les masses (figure 10).

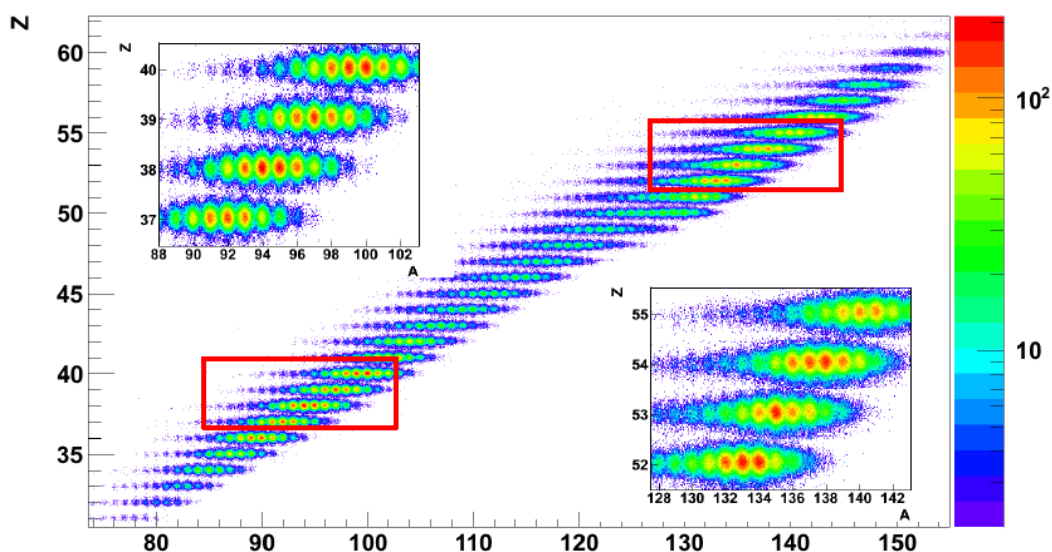


Figure 10 : matrice d'identification (A,Z) pour la réaction $^{236}\text{U}(g,f)$. La séparation en charge est pratiquement totale. On remarque le changement brutal de valeur moyenne du nombre de neutrons des fragments à $Z=50$, signature d'un changement de mode de fission.

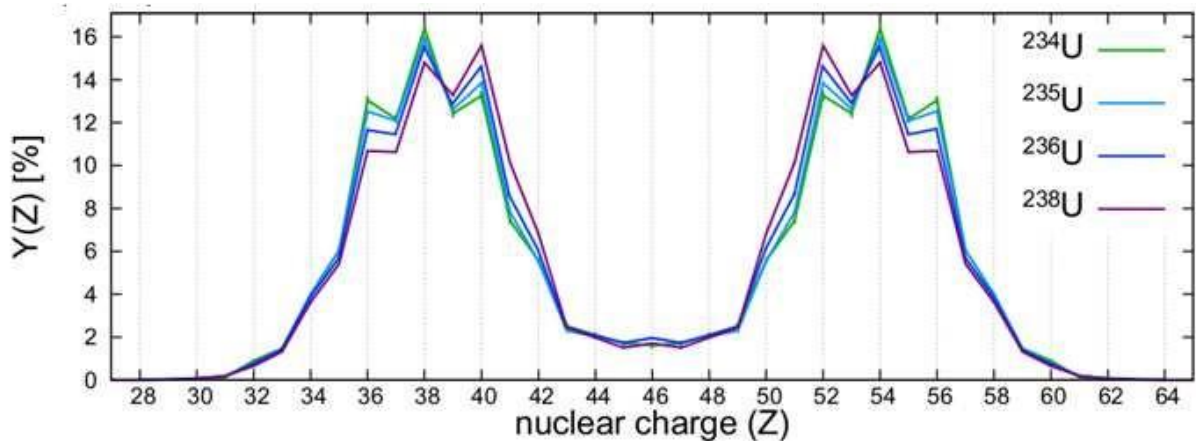


Figure 11 : rendements en charge pour 4 isotopes de l'uranium. Les barres d'erreur ne sont pas visibles (1% pour les noyaux les plus produits, 3% pour les plus rares)

La combinaison des différentes mesures sur les isotopes de l'uranium permet par exemple d'étudier la polarisation en charge en fonction du nombre de neutrons du système fissionnant (figure 11). On constate que les combinaisons de charge les plus éloignées sont de plus en plus produites (et inversement) avec la diminution du nombre de neutrons. L'effet pair-impair est clairement visible.

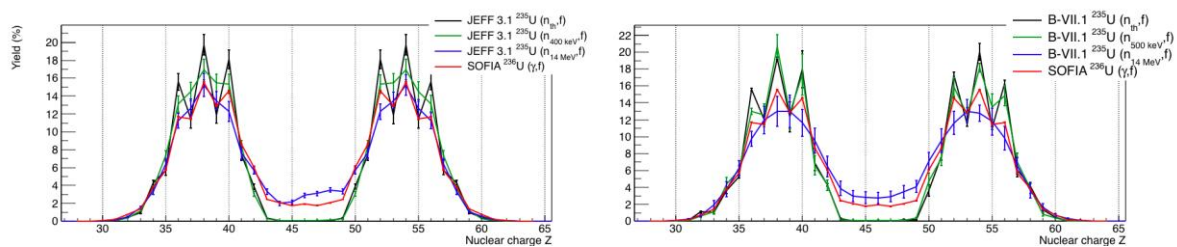


Figure 12 : comparaison des rendements en charge de $^{236}\text{U}(g,f)$ aux bibliothèques JEFF 3.1 (gauche) et ENDF-B7 (droite).

La comparaison aux bibliothèques des données obtenues pour ^{236}U (figure 14) révèle des incohérences, qu'il s'agisse de JEFF 3.1 ou d'ENDF-B7 (figure 12). Dans le premier cas, l'évolution avec l'énergie d'excitation est incompatible avec nos données, et une sous-production de fission symétrique est visible pour les Z voisins de 44. Dans le second cas, l'amortissement de l'effet pair-impair avec l'énergie semble excessif.

La question de l'origine de la stabilisation en masse du pic lourd dans la fission des noyaux de la région des uranium-plutonium est habituellement interprétée comme le résultat de l'influence de la couche sphérique $N=82$ et de la couche déformée $N=88$. Toutefois, K.-H. Schmidt a bousculé cette explication grâce aux premières mesures de rendement de fission : il avait mis en évidence une extrême stabilité du nombre de protons autour de la valeur 54. Ce résultat reste difficile à interpréter en termes d'effets de couche, aucun modèle ne prévoyant un tel effet à cette valeur. Les données de SOFIA permettent d'éclaircir cette question, puisqu'il est possible d'extraire les taux de production, non pas en fonction de A ou même de Z, mais de N. La comparaison des rendements pour les 3 isotopes de l'uranium révèle que l'excès

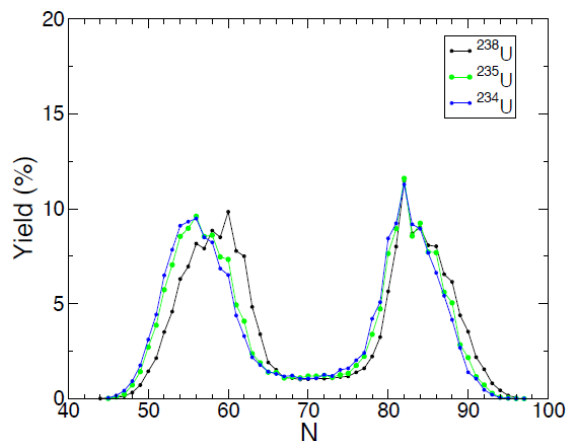


Figure 13 : rendements de fission de 3 isotopes de l'uranium en fonction du N du fragment.

de neutrons entre les systèmes de masses 234 et 238 va en majorité vers le fragment léger : la position moyenne du groupe lourd passe de 82,2 à 83,7, soit 1,5 neutrons pour 4 neutrons de plus dans le système fissionnant, là où une partition pure conduirait à 2,5 neutrons supplémentaires. Il semble donc bien que la couche neutrons joue un rôle significatif dans la partition du système.

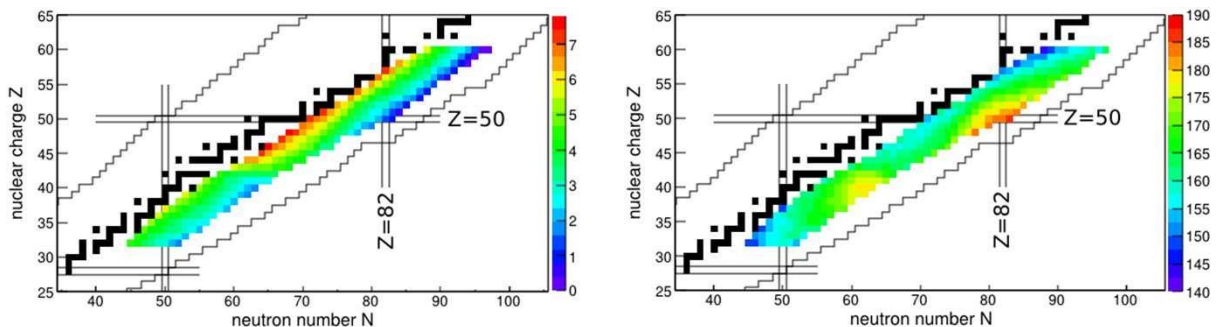


Figure 14 : nombre de neutrons émis (gauche) et énergie cinétique totale des fragments (droite)

La mesure de la masse des deux fragments et la connaissance de celle du système fissionnant permet de déduire le nombre de neutrons prompts. De plus, la reconstruction complète de la trajectoire des fragments permet de mesurer leur énergie cinétique avec une bonne précision. Ces deux grandeurs sont visibles sur la figure 12 dans le cas de $^{235}\text{U}(g,f)$. L'énergie cinétique est fortement liée à la sphéricité d'un des noyaux : un noyau sphérique va se trouver plus proche de son partenaire à la scission, résultant en une énergie cinétique élevée. On retrouve comme attendu une forte énergie cinétique pour les fragments proches de ^{132}Sn , doublement magique. L'autre conséquence de cette sphéricité est une absence d'énergie de déformation, ce qui conduit à une faible émission de neutrons. On constate toutefois que cette très faible émission de neutrons est également associée aux fragments lourds les plus riches en neutrons. En imaginant que la totalité des neutrons provient du fragment lourd (nous ne déterminons que le nombre total de neutrons, ceux-ci ne sont pas associés à l'un ou l'autre des fragments), on reconstruit une zone de fragments pré-évaporation plus étroite et éloignée de la stabilité, mais d'une largeur significative (8 nucléons environ), et où l'énergie d'excitation augmente très fortement avec la diminution du rapport N/Z .

Après avoir mesuré en détail les rendements de fission dans la région d'intérêt applicatif, la collaboration se tourne vers une question plus fondamentale, celle d'un nouveau mécanisme de fission, mis au jour par l'observation d'une fission asymétrique du ^{180}Hg [16]. Une expérience visant à cartographier la région des préactinides déficitaires en neutrons a été acceptée par le PAC de GSI et devrait avoir lieu à l'automne. L'objectif est de mesurer les rendements d'une cinquantaine de noyaux, afin d'étudier finement la région de transition entre fission symétrique et fission asymétrique.

Une perspective plus lointaine, mais particulièrement excitante, est de mesurer les rendements de fission de l'autre système majeur de l'électronucléaire : $^{240}\text{Pu}^*$. Pour cela, il faudrait disposer d'un faisceau de ^{242}Pu qui permettrait de créer $^{240}\text{Pu}^*$ par fragmentation. L'idée semble faire son chemin au GSI, le défi n'est évidemment pas tant technique qu'au niveau de la radioprotection. Une décontamination lourde de l'accélérateur serait à prévoir après l'expérience, mais le jeu en vaut probablement la chandelle. D'autres groupes pourraient d'ailleurs vouloir profiter d'une opportunité tout à fait unique d'utiliser un tel faisceau.

Au chapitre des perspectives de plus long terme, l'utilisation des anneaux de stockage pour les mesures de fission est en phase de développement actif. Deux pistes sont explorées à GSI : la

méthode surrogate sur un anneau de basse énergie (CRYRING) et la fission induite par électron (initialement imaginée sur le NESR, mais qui pourrait finalement être réalisée sur l'actuel ESR).

Conclusions et réflexions plus personnelles

Le groupe PACS est moteur sur deux activités expérimentales : les mesures directes de fission auprès de n_TOF, et les mesures de rendement de fission à GSI. Nous n'avons pas détaillé dans ce rapport les collaborations nouées avec les autres équipes de l'IN2P3 et/ou du CEA, principalement le programme de fission à GANIL et les expériences surrogate au TANDEM d'Orsay. Il est en revanche clair que les perspectives sont nombreuses et excitantes pour ces deux lignes de recherche.

Ce dynamisme et la profusion de projets est cependant à mettre en regard des forces humaines permanentes correspondantes : un enseignant-chercheur, soit un demi ETP de recherche ! Le soutien à distance de Laurent Tassan-Got, retraité hyper-actif, et la présence d'un post-doc de haut vol, Diego Ramos, permettent pour le moment de maintenir les activités, mais il est difficile d'imaginer que cette situation puisse être durable.

La faiblesse actuelle des effectifs directement en prise avec l'activité expérimentale est d'autant plus paradoxale que l'IPNO rassemble un éventail tout à fait unique de compétences en lien direct avec les données et les études de fission : les services techniques bien sûr, mais aussi la neutronique, la radiochimie, et même la théorie, puisque la fission est depuis quelques années un des thèmes de ce groupe, notamment avec Denis Lacroix. Aucun laboratoire de l'IN2P3 ne présente une telle diversité scientifique et donc un tel potentiel de synergie et d'échanges. Ce sont bien les données nucléaires qui sont à l'intersection de toutes ces activités et l'activité pourrait permettre une animation scientifique forte pour l'ensemble du laboratoire, bien au-delà du groupe. Pour assurer une production scientifique à la hauteur de nos ambitions et de notre savoir-faire, pour que les collaborations effectives se nouent, il faut que les forces humaines permettent de faire autre chose que simplement courir à perdre haleine après l'urgence suivante...

- [1] C. Guerrero *et al.*, « Performance of the neutron time-of-flight facility n_TOF at CERN », *Eur. Phys. J. A*, vol. 49, n° 2, févr. 2013.
- [2] C. Weiß *et al.*, « The new vertical neutron beam line at the CERN n_TOF facility design and outlook on the performance », *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.*, vol. 799, p. 90-98, nov. 2015.
- [3] C. Paradela, I. Duran, D. Tarrío, L. Audouin, L. Tassan-Got, et C. Stephan, « Fission measurements with PPAC detectors using a coincidence technique », 2011, p. 1-5.
- [4] D. Tarrío *et al.*, « Measurement of the angular distribution of fission fragments using a PPAC assembly at CERN n_TOF », *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.*, vol. 743, p. 79-85, avr. 2014.
- [5] C. Paradela *et al.*, « Neutron-induced fission cross section of U 234 and Np 237 measured at the CERN Neutron Time-of-Flight (n_TOF) facility », *Phys. Rev. C*, vol. 82, n° 3, sept. 2010.
- [6] L. Audouin *et al.*, « Neutron-induced fission cross sections measurements at n_TOF », 2007.
- [7] E. Leal-Cidoncha *et al.*, « Fission Fragment Angular Distribution measurements of ²³⁵U and ²³⁸U at CERN n_TOF facility », *EPJ Web Conf.*, vol. 111, p. 10002, 2016.
- [8] D. Tarrío *et al.*, « Neutron-induced fission cross section of nat Pb and Bi 209 from threshold to 1 GeV: An improved parametrization », *Phys. Rev. C*, vol. 83, n° 4, avr. 2011.
- [9] C. Paradela *et al.*, « High-accuracy determination of the U 238 / U 235 fission cross section ratio up to ≈ 1 GeV at n_TOF at CERN », *Phys. Rev. C*, vol. 91, n° 2, févr. 2015.

- [10] C. Paradela *et al.*, « High accuracy $^{235}\text{U}(n,f)$ data in the resonance energy region », *EPJ Web Conf.*, vol. 111, p. 02003, 2016.
- [11] L. S. Leong *et al.*, « Criticality experiments for validation of cross sections: The neptunium case », *Ann. Nucl. Energy*, vol. 54, p. 36-42, avr. 2013.
- [12] M. Petit *et al.*, « Determination of the $^{233}\text{Pa}(n,f)$ reaction cross section from 0.5 to 10 MeV neutron energy using the transfer reaction $^{232}\text{Th}(^3\text{He},p)^{234}\text{Pa}$ », *Nucl. Phys. A*, vol. 735, n° 3-4, p. 345-371, mai 2004.
- [13] A. Bail *et al.*, « Isotopic yield measurement in the heavy mass region for ^{239}Pu thermal neutron induced fission », *Phys. Rev. C*, vol. 84, n° 3, sept. 2011.
- [14] E. Pellereau *et al.*, « Accurate isotopic fission yields of electromagnetically induced fission of ^{238}U measured in inverse kinematics at relativistic energies », *Phys. Rev. C*, vol. 95, n° 5, mai 2017.
- [15] K.-H. Schmidt *et al.*, « Relativistic radioactive beams: A new access to nuclear-fission studies », *Nucl. Phys. A*, vol. 665, n° 3-4, p. 221-267, févr. 2000.
- [16] A. N. Andreyev *et al.*, « New Type of Asymmetric Fission in Proton-Rich Nuclei », *Phys. Rev. Lett.*, vol. 105, n° 25, déc. 2010.