

## ***Comment arriver à une description complète de la fission nucléaire?***

L. Audouin<sup>1</sup>, G. Bélier<sup>2</sup>, L. Bonneau<sup>3</sup>, O. Bouland<sup>4</sup>, A. Chatillon<sup>2</sup>, O. Dorvaux<sup>5</sup>, N. Dubray<sup>2</sup>, C. Ducoin<sup>6</sup>, J. Dudouet<sup>6</sup>, D. Durand<sup>7</sup>, M. Estienne<sup>8</sup>, M. Fallot<sup>8</sup>, B. Jurado<sup>3</sup>, G. Kessedjian<sup>9</sup>, D. Lacroix<sup>1</sup>, B. Laurent<sup>2</sup>, X. Ledoux<sup>10</sup>, A. Lemasson<sup>10</sup>, P. Marini<sup>3</sup>, L. Mathieu<sup>3</sup>, O. Méplan<sup>9</sup>, P. Morfouace<sup>2</sup>, N. Pillet<sup>2</sup>, M. Ramdhane<sup>9</sup>, D. Ramos<sup>10</sup>, M. Rejmund<sup>10</sup>, C. Sage<sup>9</sup>, C. Schmitt<sup>5</sup>, O. Serot<sup>4</sup>, L. Stuttgé<sup>5</sup>, I. Tsekhanovich<sup>3</sup>, J. Taieb<sup>2</sup>, J. Wilson<sup>1</sup>

(1) IPNO, (2) CEA-Arpajon, (3) CENBG, (4) CEA-Cadarache, (5) IPHC, (6) IP2I Lyon, (7) LPC Caen, (8) Subatech, (9) LPSC Grenoble, (10) GANIL

La fission nucléaire est un phénomène complexe qui résulte d'un mouvement collectif de grande amplitude au cours duquel un noyau lourd se déforme de plus en plus jusqu'à ce qu'il se scinde en deux noyaux plus légers. La fission représente un riche laboratoire pour l'étude des propriétés nucléaires et de phénomènes physiques en général. L'évolution progressive du système de l'état fondamental jusqu'à sa désintégration au point de scission fournit des informations précieuses sur les propriétés dynamiques de la matière nucléaire et sur la structure nucléaire en fonction de la déformation. Lors de cette évolution se décident le réarrangement des protons et des neutrons, le transfert de chaleur ainsi que la génération et le partage du moment angulaire entre les fragments, phénomènes qui sont régis par les lois de la mécanique quantique et de la mécanique statistique.

La fission joue aussi un rôle essentiel dans la compréhension du processus de capture rapide (processus r) de nucléosynthèse puisqu'elle détermine où s'achève le processus r et a un impact très important sur les observables associées. La fission nucléaire est également une source d'énergie importante et est largement utilisée pour la production d'électricité, tout spécialement en France. Les exigences de sûreté et la perspective de nouveaux concepts de réacteurs appellent une précision accrue de certaines données pour une variété de noyaux.

Les chercheurs français contribuent de manière significative aux recherches sur la fission par des expériences et des études théoriques de grande qualité. Le processus de fission est encore loin d'être compris et il n'existe pas de théorie microscopique « universelle » qui englobe par exemple la fission spontanée et celle induite par différentes particules incidentes, et qui décrit l'ensemble des nombreuses observables de fission. Les progrès théoriques sont tributaires de la mise à disposition d'observations expérimentales de plus en plus complètes, qui donnent accès simultanément au plus grand nombre possible d'observables avec une bonne résolution, et ceci sur une large gamme de noyaux fissionnants, d'énergie d'excitation et de moment angulaire. Notre but est de définir une stratégie française commune qui permette d'avancer vers une description complète de la fission.

### **1. Projets expérimentaux**

Nos projets se regroupent en deux axes :

#### **1.1. Etude de l'évolution de l'état fondamental à la barrière de fission**

La traversée de la barrière de fission est la première étape cruciale où se décide si le noyau fissionne. Deux observables sont particulièrement bien adaptées pour l'étude de cette étape : les sections efficaces de fission induites par neutrons et les probabilités de fission.

**Mesures en cinématique directe** : Les sections efficaces induites par neutrons sont essentielles pour l'astrophysique et les applications. Plusieurs équipes effectuent des mesures de sections efficaces. Le CENBG réalise de mesures de précision entre 0.5 et 2 MeV auprès de l'installation **AIFIRA du CENBG** et au **CEA-DAM-DIF** [1, 2]. La spécificité de ces mesures est que le flux de neutrons est mesuré avec

un détecteur à protons de recul, permettant une meilleure précision et une plus grande indépendance du résultat aux données nucléaires existantes. Cette technique est bien maîtrisée pour des énergies de neutron supérieures à 1 ou 2 MeV, mais nécessite encore des études pour être aussi performante en dessous. Des mesures précises de sections efficaces de fission jusqu'à 40 MeV avec pour référence la section efficace de diffusion (n,p) seront entreprises à **NFS au GANIL**. L'IPNO réalise des études précises sur une gamme en énergie beaucoup plus large de 1 eV à 1 GeV à **n-TOF (CERN)** [3], en utilisant des détecteurs à plaques parallèles (PPAC). Sur cette dernière installation, la normalisation par protons de recul n'est qu'au stade du développement; l'observable est donc un rapport de sections efficaces, impliquant en général un noyau considéré comme standard ( $^{235}\text{U}$  ou  $^{238}\text{U}$ ). L'excellente résolution en énergie permet une description fine du seuil de fission. La distribution angulaire des fragments, qui offre des informations spectroscopiques uniques, est également mesurée; il faut noter que sa connaissance est très utile pour abaisser les barres d'erreur sur les sections efficaces en-dessous de 3% [4]. Dans la prochaine décennie, nous profiterons des excellentes performances du système expérimental actuel pour mesurer les sections efficaces des réactions  $^{231}\text{Pa}(n,f)$  et  $^{239,240,242}\text{Pu}(n,f)$  (la première en lien fort avec les applications, les deux autres plutôt pour leur distribution angulaire de fragments). Les sections efficaces des réactions  $^{239,240,241,242}\text{Pu}(n,f)$  seront également mesurées par le CEA-DAM-DIF sur l'installation **LANSCE/WNR du Los Alamos National Laboratory** en profitant des développements expérimentaux français récents sur des chambres à fission de haute efficacité [5]. Ces mesures avec des neutrons incidents d'énergie entre 1 et 800 MeV comme à n-Tof sont relatives à un standard, n-TOF ayant l'avantage de descendre jusqu'à 1 eV. Au delà de 1 MeV, l'accès à des installations différentes avec des dispositifs expérimentaux différents permettra des mesures indépendantes en termes d'incertitudes systématiques.

Les réactions induites par neutrons ne permettent pas d'étudier le seuil de fission pour des noyaux fissiles dont l'énergie de séparation de neutron est supérieure à la barrière de fission et donnent accès seulement à un nombre réduit de noyaux pour lesquels des cibles sont disponibles. Pour surmonter ces limitations, le CENBG, en collaboration avec l'IPNO et le CEA, mène depuis plusieurs années un programme de mesures de probabilités de fission induites par des réactions directes auprès du Tandem de l'installation **ALTO** à Orsay [6, 7, 8, 9]. De nouvelles mesures avec des cibles de  $^{242,244}\text{Pu}$  sont envisagées pour les prochaines années.

**Mesures en cinématique inverse :** Au **GANIL**, des mesures de probabilité de fission ont été initiées auprès du spectromètre **VAMOS** mettant à profit les atouts de la cinématique inverse grâce au faisceau de grande qualité d' $^{238}\text{U}$  fourni par les accélérateurs du GANIL [10]. Pour aller au-delà, les **anneaux de stockage** produisent des faisceaux d'ions lourds radioactifs d'une qualité exceptionnelle. Une collaboration menée par le CENBG travaille également sur le développement d'un projet de mesures en cinématique inverse auprès de l'anneau de stockage **CRYRING de GSI/FAIR** [11]. Ce projet futur permettra de mesurer avec une très bonne précision non seulement la probabilité de fission, mais aussi les probabilités des voies de désexcitation en compétition avec la fission, notamment l'émission de rayonnements gamma et de neutrons, et ceci pour un grand nombre de noyaux, dont des noyaux à très courte durée de vie qui ne sont pas accessibles en cinématique directe. Ces expériences pourraient se poursuivre à **HIE-ISOLDE** ou au **GANIL** où la possibilité d'installer un anneau de stockage est à l'étude (voir contribution à ces perspectives sur les installations nationales). Ces deux installations fournissent des faisceaux radioactifs lourds et riches en neutrons qui ne sont pas accessibles à FAIR.

## 1.2. Etude de l'évolution de la barrière jusqu'au point de scission et de l'accélération et la désexcitation des fragments

Après la barrière de fission, les propriétés individuelles des fragments émergents se définissent de mieux en mieux, jusqu'à la scission où ils se séparent sous l'effet de la répulsion coulombienne. Cette

dernière leur confère des déformations et des énergies cinétiques importantes. Lorsque la distance entre les fragments augmente, de la répulsion coulombienne diminue, les fragments adoptent leur déformation d'équilibre, et l'énergie de déformation se transforme alors en énergie d'excitation. Les fragments libèrent celle-ci par l'émission prompte de neutrons et de rayons gamma. Les rendements des fragments permettent d'étudier comment les nucléons sont partagés entre les fragments lors de l'évolution jusqu'à la scission. Les énergies cinétiques des fragments et les multiplicités et distributions des neutrons et gammas donnent des informations précieuses sur la déformation à la scission, le partage de l'énergie d'excitation ainsi que la génération et le partage du moment angulaire à la scission. Toutes ces observables sont corrélées entre elles et leur mesure simultanée dans une même expérience est essentielle pour contraindre les modèles théoriques.

**Mesures en cinématique directe :** Le programme de mesures des produits de fission auprès du spectromètre de masse **Lohengrin à l'ILL** est ciblé sur la fission induite par neutrons thermiques. Celle-ci permet de déterminer précisément l'état initial du système (énergie d'excitation, spin) et ainsi d'étudier l'impact des noyaux fissionnants sur les structures des fragments de fission. La très grande résolution du spectromètre permet d'identifier la masse usuellement jusqu'à  $A \geq 150$ . L'identification en charge nucléaire est réalisée par une double chambre d'ionisation à grille de Frisch pour les fragments légers ou par spectrométrie gamma pour l'ensemble des noyaux produits. Aujourd'hui, les mesures de rendements de fission en masse issues de cet instrument constituent une référence pour tester les modèles fission comme pour les applications. De plus, le développement des outils d'analyses statistiques et la maîtrise des effets systématiques de l'instrument, une des machines les plus puissantes dans son domaine au niveau mondial, ont permis de renouveler le programme expérimental. Les perspectives d'études actuelles portent sur trois axes principaux :

- La détermination des distributions en énergie cinétique des fragments dans la région de la fission symétrique.
- L'étude des structures hyperfines en énergie cinétique de fragments de fission spécifiques. Ces structures sont la signature de l'émission neutrons. Ce programme implique des cibles hyperfines de différents isotopes fissiles.
- Le développement d'une base de données de rapports isomériques et isotopiques en fonction de l'énergie cinétique des fragments de fission. Ces données sont cruciales pour comprendre et tester les mécanismes de génération du moment angulaire [12].

Concernant la mesure des spectres de neutrons prompts de fission, le CEA-DAM-DIF a amélioré ces dernières années un dispositif expérimental associant une chambre à fission haute efficacité et le multi-détecteur neutron ChiNu du **LANSCE/WNR à Los Alamos**. Des mesures de spectres de neutrons prompts de fission dans la réaction  $^{239}\text{Pu}(n,f)$  ont été faites en 2017 avec une précision inégalée entre 0.7 et 700 MeV d'énergie incidente [13], et la multiplicité moyenne de neutrons par fission a été extraite sur la même gamme en énergie. Des mesures sur la réaction  $^{235}\text{U}(n,f)$  sont réalisées en 2019 et le programme se poursuivra dans la décennie avec l' $^{238}\text{U}$  et des isotopes du Pu. Des mesures des spectres de neutrons fission avec les distributions en masse de fragments en coïncidence seront entreprises sur l'installation NFS pour des énergies neutron jusqu'à 40MeV.

Le spectromètre hybride **nu-ball2**, upgrade de nu-ball, sera construit à **ALTO** en 2021. Il combine 24 détecteurs Germanium clovers avec leurs anti-Comptons en BGO avec les 72 cristaux Phoswich de **PARIS** [14] pour faire un spectromètre avec une couverture angulaire proche de  $4\pi$  et une efficacité totale très élevée. Nu-ball2 permettra d'effectuer une spectroscopie complète des réactions de fission induites par les neutrons rapides produits par la source **LICORNE**. Des nouvelles observables seront accessibles comme les distributions de multiplicité et d'énergie des gammas et neutrons prompts, ainsi que le spectre gamma sur une large gamme pour des fragments identifiés par leurs gammas de décroissance. Il est aussi envisagé de coupler nu-ball2 avec des chambres d'ionisation

segmentées abritant des sources de fission spontanée comme le  $^{252}\text{Cf}$  et  $^{248}\text{Cm}$  permettant d'accéder à l'énergie cinétique, l'angle d'émission et la masse des fragments avant et après émission des neutrons. La mesure de l'angle d'émission permettra une correction Doppler précise des gammas.

**Etude spécifique des neutrons de scission et de l'anisotropie dynamique :** Un aspect particulier de la fission à très basse énergie et assez pointu suscite un très vif intérêt de la communauté. Diverses expériences ont montré une divergence dans les distributions angulaires des neutrons en considérant uniquement une focalisation cinématique due à la vitesse des fragments. Les origines possibles de cette divergence sont l'existence de neutrons de scission et l'émission anisotrope (anisotropie dynamique) des neutrons dans le centre de masse des fragments, ou bien la coexistence de ces deux processus. Les études menées à ce jour n'ont pas encore permis de répondre à cette question, ni au niveau théorique ni expérimentalement. La difficulté réside dans le fait que les deux effets recherchés sont très faibles, se situent au même endroit dans la distribution angulaire des neutrons et agissent en sens opposé, ce qui rend leur mise en évidence très difficile. Des mesures précises et avec une statistique élevée sont indispensables. La collaboration CORA a mené une première étude dédiée à la fission spontanée du  $^{252}\text{Cf}$ , où les deux aspects, neutrons de scission et anisotropie dynamique, ont été sondés simultanément dans une même expérience à l'IPHC associant le multi-détecteur de neutrons **DEMON** à la chambre de fission **CODIS** du GSI. Les résultats obtenus [15] sont très prometteurs et la campagne de l'IPHC est amenée à se poursuivre dans les années à venir. L'étude de ces phénomènes est non seulement importante pour la compréhension du processus de fission, mais également pour l'évaluation de sections efficaces de fission précises et entrant en jeu dans les calculs des réacteurs de nouvelle génération.

**Mesures en cinématique inverse :** La masse élevée et la faible énergie cinétique des fragments produits en cinématique directe constituent un obstacle majeur à la détermination directe des charges des fragments, qui serait idéalement faite simultanément avec la mesure de la masse. La combinaison de la cinématique inverse et de spectromètres de recul à large acceptation a permis dans la décennie écoulée de réaliser les premières mesures en A et Z, sur de larges gammes d'actinides (y compris de très courtes durées de vie), avec des précisions remarquables. La communauté française est clairement motrice dans ces percées expérimentales, étant au cœur des deux programmes majeurs dans le domaine que sont SOFIA à GSI et Fission@VAMOS au GANIL.

Les **expériences SOFIA** [16, 17] au **GSI/FAIR** reposent sur l'utilisation d'un faisceau relativiste de  $^{238}\text{U}$ , dont la fragmentation permet de produire une très large gamme de faisceaux secondaires. Ceux-ci sont identifiés en masse et en charge par le spectromètre FRS, puis envoyés dans le dispositif SOFIA, qui s'apparente à un spectromètre de recul à large acceptation, identifiant en masse et en charge les deux fragments avec une précision exceptionnelle. Les rendements isotopiques sont obtenus avec une précision meilleure que 1%, et l'identification complète des fragments permet de déterminer le nombre de neutrons émis pour chaque événement. La fission est déclenchée par interaction coulombienne, qui a l'avantage de présenter une grande section efficace dont la fonction d'excitation est distribuée sur une large gamme autour de 14 MeV. L'inconvénient de la méthode actuelle est l'absence de détermination précise de l'excitation événement par événement. Deux campagnes SOFIA ont été réalisées avec succès (sur la fission de  $^{236}\text{U}^*$ , équivalent de  $^{235}\text{U}+n$  ; et sur la fission d'une variété d'isotopes d'U et de Th). Une alternative possible est l'utilisation de réactions (p,2p) qui permettent de déterminer l'énergie d'excitation, au prix d'une section efficace fortement réduite.

La campagne de 2020 a pour objectif l'étude de la transition vers la fission asymétrique dans les préactinides déficitaires en neutrons, une région qui permet de tester très fortement les modèles de fission. Ce sera également l'occasion de tester le déclenchement de la fission par la réaction (p,2p). On peut identifier plusieurs perspectives claires pour les prochaines années :

- le couplage du spectromètre SOFIA avec le mur de neutrons NeuLAND, qui permettra d'assigner les neutrons à leur fragment, et donc d'obtenir une estimation directe de l'énergie d'excitation des fragments ;
- le développement d'un faisceau de  $^{242}\text{Pu}$ , qui permettra de mesurer des réactions clés pour les applications, notamment  $^{239}\text{Pu}+n$  ;
- le développement des faisceaux radioactifs de FAIR (SIS100 + Super-FRS), qui offriront la possibilité d'explorer de nouvelles régions de la carte des noyaux, notamment la région des noyaux riches en neutrons autour du Th/Ac pour laquelle strictement aucune information n'existe.

Le programme de fission auprès du **spectromètre VAMOS (GANIL)** est complémentaire à celui de SOFIA car il permet d'étudier des noyaux fissionnants au-delà de l'uranium qui ne peuvent pas encore être étudiés avec SOFIA. Ce programme repose sur l'envoi d'un faisceau de  $^{238}\text{U}$  à une énergie proche de la barrière coulombienne sur des cibles légères, formant par transfert différents systèmes qui sont identifiés via la détection de l'éjectile léger dans le télescope silicium SPIDER. La mesure de l'angle et de l'énergie de l'éjectile permet de déterminer l'énergie d'excitation du noyau fissionnant événement par événement. Les rendements isotopiques de fission et les informations sur l'énergie cinétique des fragments sont obtenus via l'identification de ces derniers dans le spectromètre VAMOS++ [18, 19, 20, 21, 22, 23]. Ce programme présente aujourd'hui trois objectifs majeurs :

- A court terme, l'ambition est de réaliser la détection simultanée des deux fragments; cela permettra de remonter aux distributions isotopiques avant évaporation des neutrons et à une détermination complète de la cinématique, donc de connaître la configuration du système au moment de la scission. La multiplicité des neutrons, directement corrélée à la partition de l'énergie d'excitation entre les fragments, pourra également être déterminée.
- A moyen terme, le programme doit intégrer le détecteur de rayons gamma **PARIS** auprès de VAMOS pour jouer le rôle à la fois de calorimètre gamma, filtre de multiplicité gamma (et dans une certaine mesure, neutrons) et détecteur gamma de moyenne résolution. Le couplage PARIS+VAMOS offrira la sélectivité de la voie de sortie nécessaire pour l'étude détaillée de la compétition neutron-gamma lors de la désexcitation des fragments de fission, et ainsi le partage de l'énergie d'excitation et la génération du moment angulaire à la scission. De telles mesures exclusives sont tout à fait novatrices. Cette physique est étudiée en parallèle avec PARIS à LICORNE à l'IPNO pour une région complémentaire de l'espace de phase énergie d'excitation-moment angulaire, et avec une sélectivité de la voie de fission limitée pour l'instant.
- Enfin, sur le long terme, la mise à niveau du détecteur SPIDER en lien avec la collaboration GRIT [24] donnera accès à une identification isotopique de l'éjectile jusqu'à l'Oxygène et une résolution en énergie d'excitation de l'ordre quelques centaines de keV et permettra de maîtriser les conditions initiales des systèmes fissionnants aux énergies proches de la barrière [10].

De plus l'utilisation de faisceaux de  $^{232}\text{Th}$  au GANIL doit permettre d'étudier de nouveaux systèmes fissionnants exotiques, mais également des systèmes accessibles avec  $^{238}\text{U}$  dans différentes conditions initiales. A plus long terme, le développement des faisceaux radioactifs produits par fusion évaporation auprès de SPIRAL1 offrira la possibilité d'explorer les distributions de fragments de fission en charge atomique de nouvelles régions de la carte des noyaux, notamment la région des noyaux déficients en neutrons.

Les chercheurs français sont impliqués depuis bon nombre d'années dans les expériences de **fusion-fission/quasi-fission** menées au JINR, Dubna et plus récemment au GANIL. Ces études permettent d'étendre le domaine de noyaux fissionnants étudiés et d'explorer d'autres régions d'énergie d'excitation et moment angulaire. Un programme de mesures basé sur le couplage du détecteur de fragments russe **CORSET** au détecteur **PARIS** a été récemment initié à l'IPNO en collaboration avec le

JINR. Deux expériences ont eu lieu récemment [25, 26]. Les études se poursuivront durant les 10 ans à venir, profitant pour les expériences IPNO d'un détecteur PARIS de plus en plus efficace. En effet, le spectromètre PARIS, en plus d'être très efficace à la détection gamma sur une grande plage en énergie, est actuellement caractérisé pour la détection de neutrons (en multiplicité, distribution angulaire et distribution en énergie). Si les résultats sont concluants, mesurer à la fois l'énergie totale des fragments avec un dispositif tel que CORSET ou **VAMOS** couplé à un second bras, les gammas et les neutrons de façon simultanée serait un dispositif unique qui permettrait de déterminer l'énergie de déformation au point de scission et caractériser l'état du système au point de scission, ce qui serait une grande avancée dans la description du processus de fission.

## 2. Projets théoriques

En parallèle des programmes expérimentaux, les théoriciens de plusieurs laboratoires français développent (ou contribuent au développement) de modèles reconnus et distribués au niveau international. Différentes stratégies, allant des approches fondamentales aux plus empiriques, sont poursuivies [27].

Plusieurs modélisations concourent à la reproduction des sections efficaces et probabilités de fission décrites dans l'axe 1.1. Dans le domaine des résonances résolues énergétiquement, la théorie supportant la modélisation est celle de la **matrice R** [28], laquelle est mathématiquement exacte mais incapable de prédire la position et la largeur des résonances (états propres). A plus haute énergie, les résonances font place à un continuum (neutronique) qui est décrit par une **théorie statistique (Hauser-Feshbach)** [29] qui contient la voie compétitive de désexcitation du noyau composé par fission. La modélisation « routinière » de la section efficace de fission est encore à ses balbutiements avec une représentation à une dimension de la barrière de fission et une description ad hoc des « barrières » fondamentales ainsi que de leurs états de transition (au sens de A. Bohr) [30]. Les états [31] dans le second et (éventuellement) troisième puits sont rattachés essentiellement aux fluctuations observées dans les mesures. Peu de calculs théoriques à ce propos sont actuellement utilisés en support à ces calculs « de production » pour l'industrie nucléaire. La perspective à moyen terme est de réaliser des calculs de sections efficaces à plusieurs dimensions ou en fonction d'une abscisse curviligne correspondant au chemin de moindre action du noyau vers la fission [32]. Il est attendu que ces calculs soient soutenus alors par des calculs microscopiques de type **champ moyen auto-cohérents avec corrélations d'appariement** [33, 34] ou macro-microscopiques (voir paragraphe suivant) de structure nucléaire, couplés à un **modèle collectif de type hamiltonien de Bohr** [35], pour imposer sans ajustement l'énergie des états d'excitation collectifs et individuels du noyau se superposant à la surface d'énergie potentielle de l'état fondamental.

La description de la seconde étape du processus de fission de l'axe de recherche 1.2 est étudiée avec des approches microscopiques très ambitieuses. Les **théories dynamiques de champ moyen dynamique TDHF** ont fortement progressé ces dernières années avec l'inclusion de l'appariement (TDHFB) et des calculs sans symétrie spatiale [36, 37]. Un effort est toutefois nécessaire dans les prochaines années pour mettre à disposition un code TDHFB standardisé ouvert à la communauté. Ces méthodes ont l'avantage, contrairement à la plupart des autres approches microscopiques utilisées pour la fission, de ne pas supposer une évolution lente, adiabatique et d'inclure la dissipation à un corps. En contrepartie ces méthodes ne traitent pas correctement le mélange de configurations, ce qui peut être bien pris en compte par l'approche **Time-Dependent Generator-Coordinate Method TDGCM** [38]. Des études très prometteuses pour dépasser la limite d'adiabaticité dans l'approche TDGCM en incluant les excitations à deux quasi-particules ont déjà été entreprises [39] et seront poursuivies dans le futur. Un autre défi important pour les années à venir est de combiner les approches dynamiques non-adiabatiques TDHFB avec la TDGCM.

Afin de limiter les ressources de calcul inhérentes aux modèles purement microscopiques, une **approche macro-microscopique** -établie comme tout à fait compétitive pour des observables spécifiques- est également mise en œuvre en France. Elle combine le modèle macroscopique du noyau de la goutte liquide et des corrections microscopiques. Les chercheurs de l'IPHC participent au développement de telles approches pour décrire notamment les propriétés des fragments mentionnées dans l'axe 1.2 [40, 41]. A plus haute énergie d'excitation, une approche macroscopique de théorie de transport basée sur la résolution de **l'équation classique multi-dimensionnelle de Langevin** du mouvement est adoptée pour décrire la dynamique du processus de fission, depuis la formation du noyau fissionnant jusqu'au point de scission, incluant les aspects liés aux axes de recherche 1.1 et 1.2 ci-dessus. Les calculs de type Langevin au sein de la communauté française contribuent à approfondir notre connaissance des propriétés dynamiques de la matière nucléaire. Axés sur la fusion-fission durant la dernière décennie [42], le projet à court et moyen terme est de mettre ces calculs à profit pour la quasi-fission, projet que nous venons d'initier tout récemment [43]. Afin de rendre moins empiriques ces approches, il serait aussi intéressant d'approfondir les connections entre ces approches et les théories plus microscopiques[44].

Enfin, la communauté française développe, ou contribue intensément au développement, de modèles statistiques et/ou semi-empiriques de fission. Une motivation principale réside dans la mise à disposition de codes rapides ayant un pouvoir prédictif le plus élevé possible au domaine des applications de la fission (notamment pour les calculs nécessaires aux installations (présentes et futures) produisant de « l'énergie nucléaire » et retraitant les déchets).

**Le code de fission GEF** [45] se base sur l'utilisation des informations expérimentales combinées à des concepts, théorèmes et lois générales de physique. Cette stratégie permet d'éviter la complexité des calculs nécessaires aux modèles microscopiques. GEF est unique pour deux raisons, tout d'abord GEF donne des prédictions fiables et précises pour pratiquement toutes les observables de fission (probabilités de fission, distributions isotopiques des fragments, énergies cinétiques des fragments, nombre et spectre en énergie des neutrons et  $\gamma$  prompts, rapports isomériques, spectre antineutrino, etc.) ainsi que pour les corrélations entre les différentes observables et ceci pour un grand nombre de noyaux fissionnants allant de l'osmium jusqu'à l'élément  $Z=120$  et pour des énergies d'excitation jusqu'à 100 MeV. En outre GEF prédit de manière consistante l'influence de toutes les quantités qui définissent l'état initial du noyau fissionnant (mass, charge, énergie d'excitation et moment angulaire) sur les observables de fission. Ces deux aspects permettent l'utilisation de GEF pour l'interprétation de toutes les mesures décrites dans la section 1. L'évaluation du code GEF à partir d'une comparaison très exhaustive avec les données existantes décrite dans [45] montre que l'accord entre GEF et les données expérimentales est très satisfaisant. Par ailleurs, l'étude des prédictions de GEF des observables comme les spectres en énergie des antineutrinos des réacteurs, la puissance résiduelle et les fractions de neutrons retardés a permis également d'ajuster plus finement les paramètres de GEF et de tester les différents jeux de données mesurées [46]. A court et moyen terme, nos travaux consistent à exploiter les données uniques mesurées par SOFIA et auprès de VAMOS pour améliorer les prédictions de GEF aux extrêmes. Les premiers résultats SOFIA ont démontré être utiles pour investiguer la compétition entre les différents modes de fission proches de la symétrie [47]. Les données VAMOS en cours de finalisation d'analyse laissent déjà entrevoir leur potentiel pour affiner la compréhension de l'influence de l'énergie d'excitation et de l'isospin dans la région des actinides ainsi que pour sonder l'origine de la fission asymétrique dans la région autour du Pb dont la compréhension fait l'objet d'une vive controverse. Nous prévoyons également d'améliorer la modélisation des probabilités de fission en utilisant les probabilités mesurées en cinématique inverse (ceci est essentiel pour prendre en compte l'influence de la fission de deuxième et troisième chance sur toutes les observables) et d'étendre nos études sur le partage d'énergie d'excitation entre les fragments à plus haute énergie.

**Le code Monte-Carlo FIFRELIN** [48, 49] consiste à simuler la génération et la désexcitation des fragments de fission primaires (avant émission des neutrons prompts). Ce code permet ainsi de calculer un grand nombre d'observables de fission (spectres et multiplicités des neutrons et gammas prompts, énergies relâchées par fission...) et d'étudier les corrélations entre ces observables. La phase qui vise à définir les caractéristiques des fragments de fission (masse, charge, énergie d'excitation, spin et parité), repose à l'heure actuelle sur des modèles très phénoménologiques que nous souhaitons affiner par une approche plus microscopique. C'est le cas, par exemple, lorsque le code gère le partage de l'énergie d'excitation disponible à la scission entre les deux fragments naissants, mais aussi lors de l'attribution du spin de chaque fragment. La phase de désexcitation des fragments s'effectue, quant à elle, en construisant le schéma de niveaux de chaque fragment puis en calculant la probabilité d'émettre un neutron, un gamma ou un électron. Ces schémas de niveaux sont élaborés à partir d'informations expérimentales disponibles qui sont complétées par des modèles de densités de niveaux. La probabilité de décroissance d'un état initial vers un état final se calcule à partir des modèles de fonctions force gamma et des coefficients de transmission neutrons. Tous ces modèles (densités de niveaux, fonctions force gamma...) actuellement utilisés dans le code sont empiriques et/ou phénoménologiques. Là encore, nous ambitionnons de les substituer par des calculs microscopiques plus physiques et a priori plus fiables.

Au-delà de la motivation originelle, de tels codes et les modèles microscopiques s'enrichissent mutuellement. Par exemple, GEF et FIFRELIN peuvent servir de guide pour les modèles microscopiques, et les modèles microscopiques permettent de comprendre l'origine des concepts utilisés dans GEF et FIFRELIN.

En conclusion, le riche programme expérimental développé plus haut montre l'expertise des chercheurs français, ainsi que les atouts uniques des techniques et d'installations spécifiques qu'ils développent. En parallèle, la communauté théorique développe des modèles de pointe dans le domaine, dédiés en particulier à l'interprétation des données expérimentales. Il est à noter qu'une intense collaboration existe entre expérimentateurs et théoriciens français. L'ensemble constitue un véritable potentiel, compétitif au niveau international, pour arriver à la compréhension de la globalité du processus de fission.

- 
- [1] G. Kessedjian et al. Phys. Rev. C 85 (2012) 044613
  - [2] P. Marini et al., Phys. Rev. C 96 (2017) 054604
  - [3] E. Chiaveri et al., Journal of the Korean Physical Society, vol. 59, no. 2(3), 2011, pp. 1620
  - [4] D. Tarrío et al., Nuclear Instrum. Meth. A 743 (2013) 79-85
  - [5] J. Taieb, B. Laurent, G. Bélier, A. Sardet and C. Varignon. Nucl. Instrum. Meth. A 833 (2016) 1
  - [6] G. Kessedjian et al., Phys. Lett. B 692 (2010) 297
  - [7] Q. Ducasse et al. Phys. Rev. C 94 (2016) 024614
  - [8] R. Perez et al., Nucl. Instrum. Meth A 933 (2019) 63
  - [9] R. Perez et al., to be submitted to Phys. Rev. Lett.; R. Perez, PhD Thesis U. Bordeaux (2019)
  - [10] C. Rodriguez-Tajes et al, Phys. Rev. C 89 (2014) 024614
  - [11] A. Henriques et al., Proceedings of the IX conference on Nuclear Physics in Astrophysics (2019)
  - [12] A. Chebboubi, et al., Phys. Lett. B 775 (2017) 190
  - [13] P. Marini et al., submitted to PRC, arXiv:1902.07951
  - [14] A. Maj et al., Acta Phys. Pol. 40 (2009) 565
  - [15] A. Chietera, L. Stuttgé et al. EPJA (2018) 54 :98.
  - [16] E. Pellereau et al., Phys. Rev. C 95 (2017) 054603
  - [17] A. Chatillon et al., Phys. Rev. C 99 (2019) 054628
  - [18] M. Caamano et al. Phys. Rev. C 88 (2013) 024605
  - [19] D. Ramos et al. Phys. Rev. C 97 (2018) 054612
  - [20] D. Ramos et al. Phys. Rev. C 99 (2019) 024615
  - [21] D. Ramos et al. Phys. Rev. Lett. 123 (2019) 092503



- 
- [22] M. Caamano et al. Phys. Rev. C 92 (2015) 034606
- [23] M. Caamano and F. Farget Phys. Lett. B 770 (2017) 72
- [24] GRIT (Granularity, Resolution, Identification, Transparency) Collaboration : <http://grit.in2p3.fr>
- [25] E.M.Kozulin et al., Eur.Phys.J. A 52, 293 (2016)
- [26] I. Harca in preparation
- [27] K.-H. Schmidt and B. Jurado, Rep. Prog. Phys. 81 (2018) 106301 (64pp)
- [28] A. M. Lane and R. G. Thomas, Rev. Mod. Phys. 30 (1958) 257
- [29] W. Hauser and H. Feshbach, Phys. Rev. 87 (1952) 366
- [30] O. Bouland, J. E. Lynn and P. Talou, Phys. Rev. C 88 (2013) 054612
- [31] J. E. Lynn and P. Talou, and O. Bouland, Phys. Rev. C 97 (2018) 064601
- [32] P. Tamagno, PhD Thesis, U. Bordeaux (2015)
- [33] L. Bonneau, P. Quentin, and D. Samsoen, Eur. Phys. J. A 21 (2004) 391.
- [34] M. H. Koh, L. Bonneau, P. Quentin, T. V. N. Hao, H. Wagiran, Phys. Rev. C 95 (2017) 014315
- [35] M. Rebhaoui, M. Imadalou, D. E. Medjadi, and P. Quentin, J. Phys. G 45 (2018) 115102
- [36] G. Scamps, C. Simenel, and D. Lacroix, Phys. Rev. C 92 (2015) 011602
- [37] Y. Tanimura, D. Lacroix, and S. Ayik, Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 152501
- [38] D. Regnier, N. Dubray, and N. Schunck, Phys. Rev. C 99 (2019) 024611
- [39] R. Bernard, H. Goutte, D. Gogny, W. Younes, Phys. Rev. C 84 (2011) 044308
- [40] C. Schmitt et al., Phys Rev. C 95 (2017) 034612
- [41] P. Moller et al., EPJ A 53 (2017) 7
- [42] C. Schmitt et al., Phys. Rev. C 97 (2018) 014616 and therein
- [43] C. Schmitt et al., accepted for publication in PRC (2019).
- [44] Yusuke Tanimura, Denis Lacroix, and Guillaume Scamps, Phys. Rev. C 92, 034601 (2015)
- [45] K.-H. Schmidt, B. Jurado, C. Amouroux and C. Schmitt, Nuclear Data Sheets 131 (2016) 107-221
- [46] K.-H. Schmidt, M. Estienne, M. Fallot, B. Jurado, K. Kern and Ch. Schmitt, "Contribution to the IAEA Technical Meeting on Nuclear Data for Anti-neutrino spectra and applications" (2019).
- [47] C. Schmitt, K.-H. Schmidt, B. Jurado, Phys. Rev. C 98 (2018) 044605
- [48] O. Litaize, O. Serot and L. Berge, Eur. Phys. J. A (2015) 51: 177
- [49] D. Regnier, O. Litaize and O. Serot, Computer Physics Communications 201 (2016) 19–28