

Atelier bilan – 15-16 décembre 2016

Projet structurant

le Noyau Au Cœur du RéactEur:

*** Bilan scientifique WP2-**

Les produits de la réaction de fission

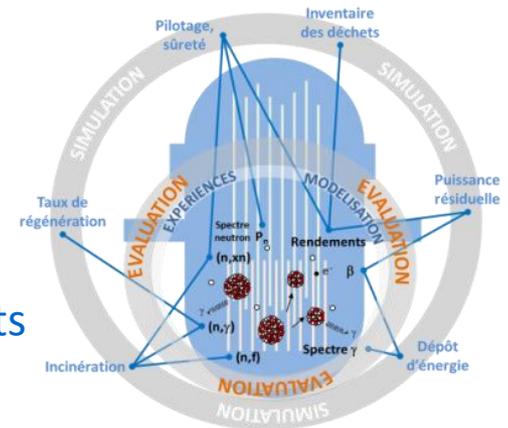
Olivier SEROT
pour la collaboration



WP2 : les Produits de la Réaction de Fission

Produits de la Réaction de Fission: de leur création à leur décroissance

- **Données nucléaires concernées:** Rendements de fission, Spectres/Multiplicités neutrons/gammas, Données de décroissance radioactive des produits de fission...
- **Applications réacteur:** burnup, bilan matière, perte en réactivité, puissance résiduelle, production des relâchements gazeux, fluence cuve, échauffements en réacteur....



Stratégie NACRE :

- Mettre en place des programmes expérimentaux ambitieux fournissant un ensemble d'observables très complet, sur une grande systématique de noyaux
- Augmenter significativement la fiabilité des modèles d'évaluation

WP2 : les Produits de la Réaction de Fission

Actions 2.1: Mesures et caractérisation des fragments de fission

- 2.1.1 Programme à ILL
- 2.1.2 Programme à GSI: SOFIA
- 2.1.3 Programme à GANIL : VAMOS
- 2.1.4 Programme à NFS/GANIL : FALSTAFF

Actions 2.2: Mesures des propriétés de décroissance des produits de fission

Actions 2.3: Des tests des modèles à l'évaluation

- 2.3.1 Développements et améliorations des outils d'évaluation des observables de fission
- 2.3.2 Validation des données évaluées des propriétés radioactives et de structure nucléaire des produits de fission

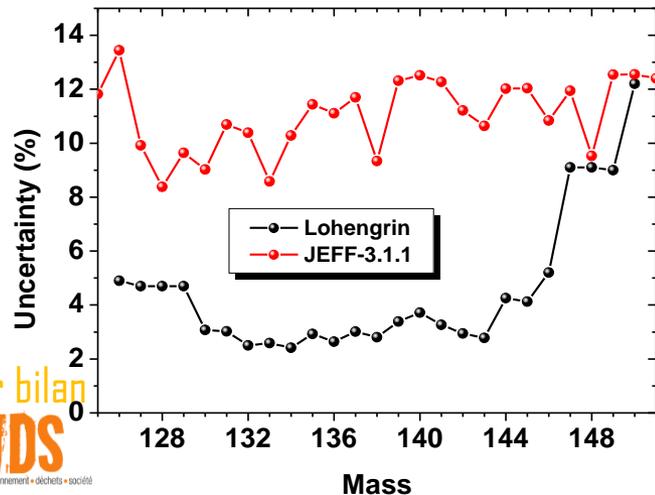
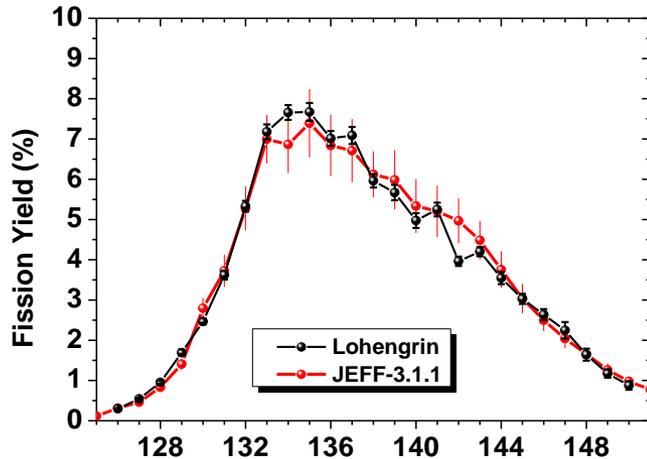
Actions 2.4: Prospectives

WP2.1: Mesures et caractérisation des fragments de fission

2.1.1 Programme ILL

LPSC, CEA/DEN, CEA/DSM

Spectromètre de masse Lohengrin



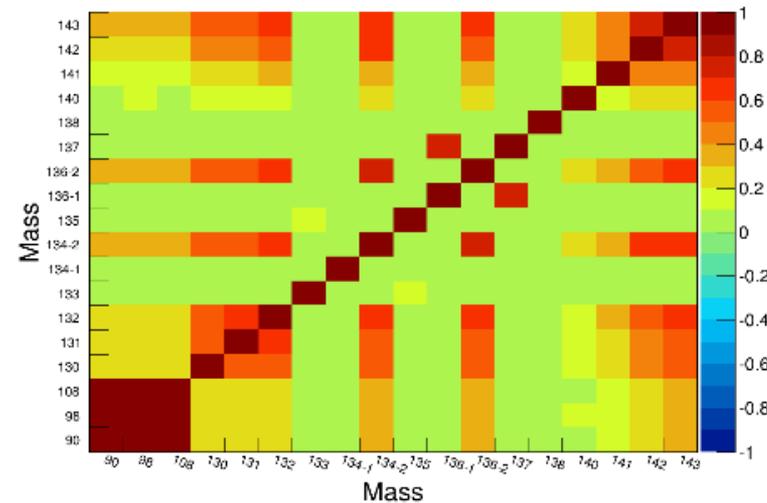
Les défis relevés:

- Mesures de rendements en masse de grandes précisions (généralement < 5 %) avec la description des matrices de covariances expérimentales,
- Mesures de rendements dans la région des masses symétriques: **Challenge expérimental (faible statistique, présence de contaminants)**



$^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$ & $^{241}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$

Correlation matrix for mass yields of ^{239}Pu

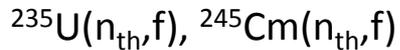


WP2.1: Mesures et caractérisation des fragments de fission

2.1.1 Programme ILL

Programme: 2017-

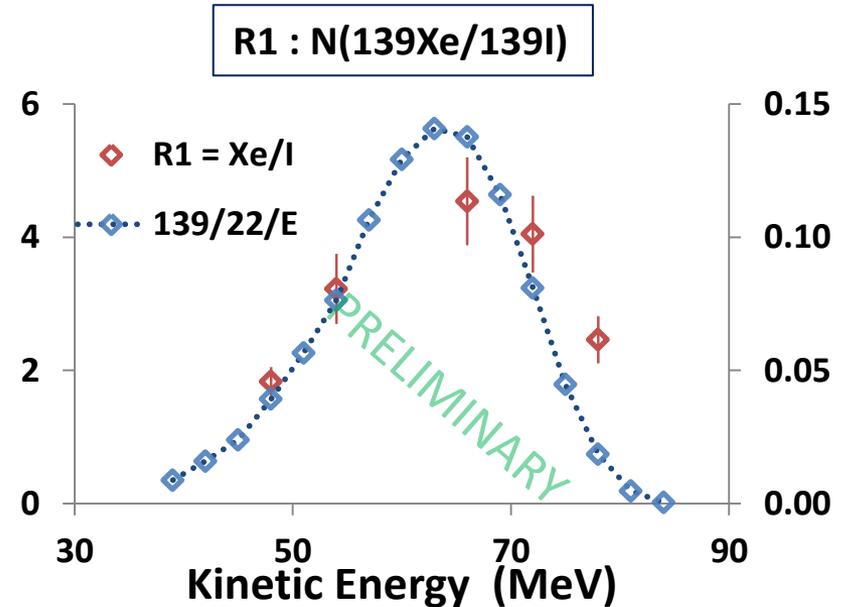
- Nouveau programme expérimental: Mesures de la dépendance en énergie cinétique des distributions isotopiques et isomériques



➔ **Amélioration des modèles de fission implémentés dans le code FIFRELIN**

- Evaluation des rendements de fission: En intégrant les données expérimentales ILL et les calculs issus des codes Monte Carlo (FIFRELIN, GEF)

➔ **Réduction des incertitudes + matrice de variance-covariance**

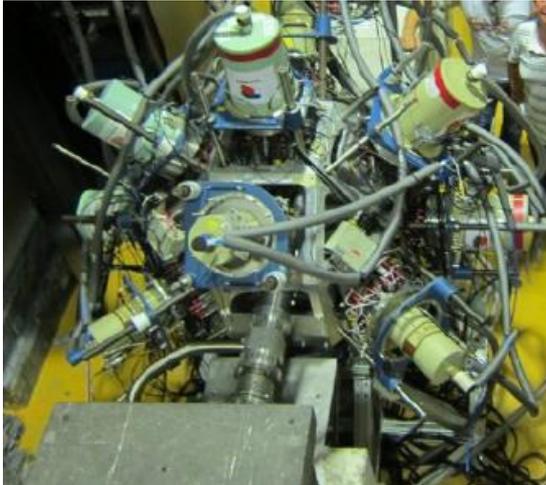


- *S. Julien-Laferrière, thèse (2015-2018)*
- *Nouvelle thèse prévue en 2017*

WP2.1: Mesures et caractérisation des fragments de fission

2.1.1 Programme ILL

Expérience EXILL



Principe

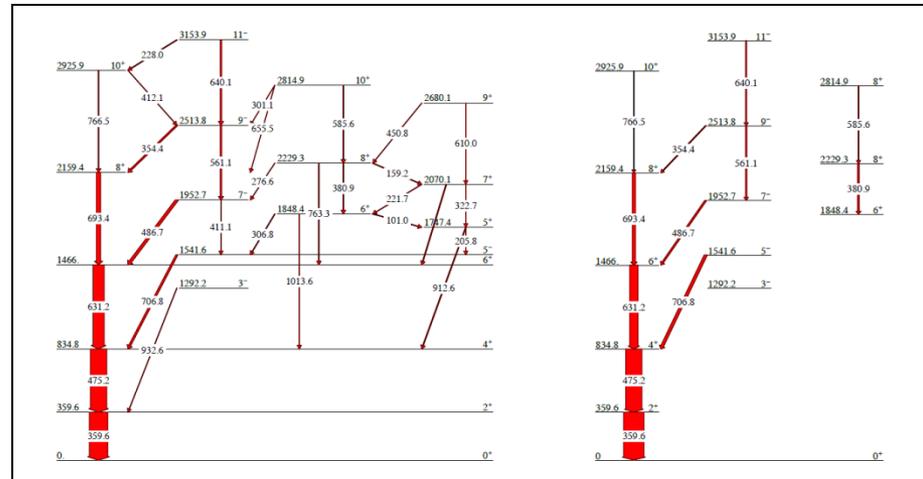
- Détection de l'ensemble des gammas prompts de fission émis lors d'une réaction de fission induite par neutrons thermiques (cible d'U235 et cible de Pu241): Expérience réalisée en 2012

Analyse en cours

- Analyse effectuée par le CEA/DRF (Thèse en cours CEA-DRF+CEA-DEN: Michal RAPALA)
- Objectif: caractériser les cascades de désexcitation de fragments parfaitement identifiés

Comparaison avec FIFRELIN

- Meilleure connaissance du schéma de structure



Cascade γ du ^{142}Ba issue de la réaction $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}f)$ simulée par FIFRELIN (gauche) et mesurée par EXILL (droite) (T. Materna et al., ND2016)

WP2.1: Mesures et caractérisation des fragments de fission

2.1.2 Programme SOFIA

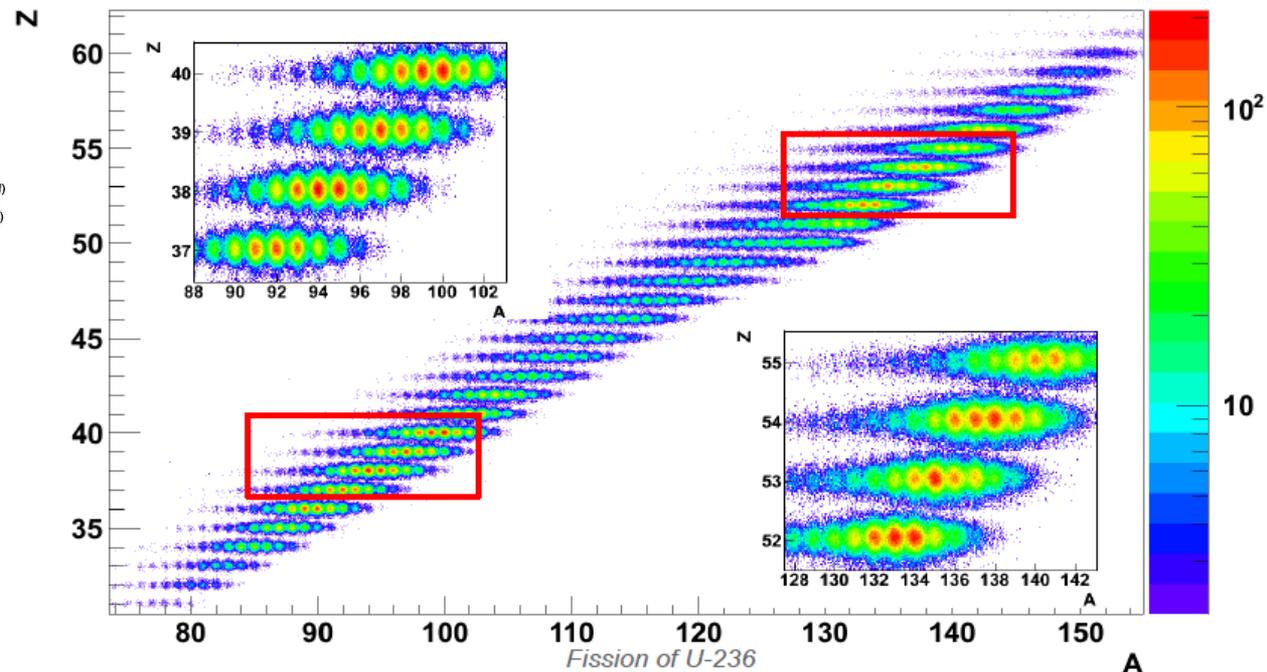
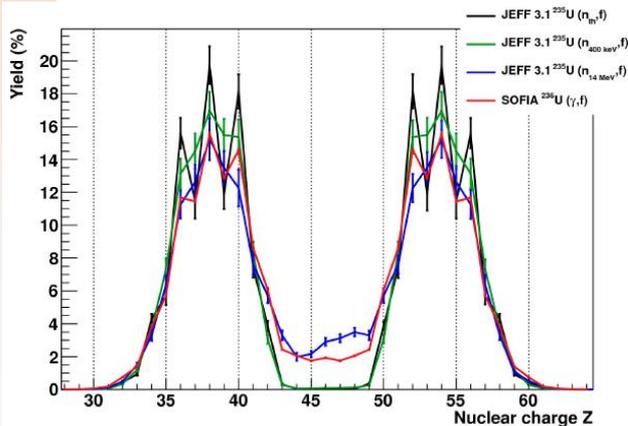
CEA/DAM, IPNO, CENBG, GANIL

Bilan 2016

$^{236}\text{U}(\gamma, f)$

Analyse complexe terminée

- Identification isotopique complète (en cours de finalisation)
- Prise en compte de la contribution due à l'excitation coulombienne
- Excellent accord calculs-mesures concernant l'énergie d'excitation



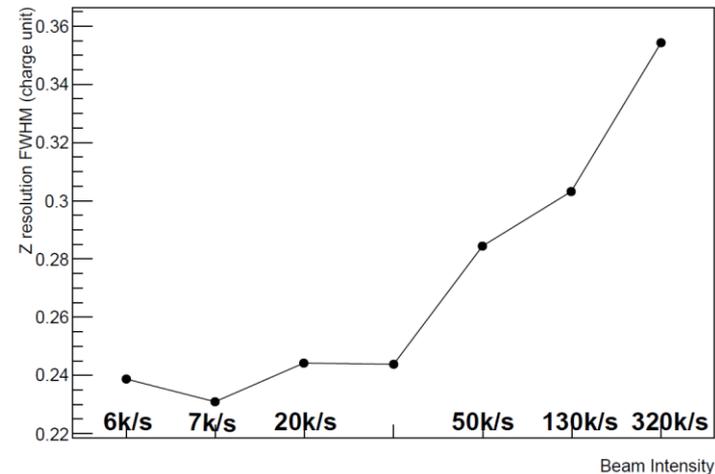
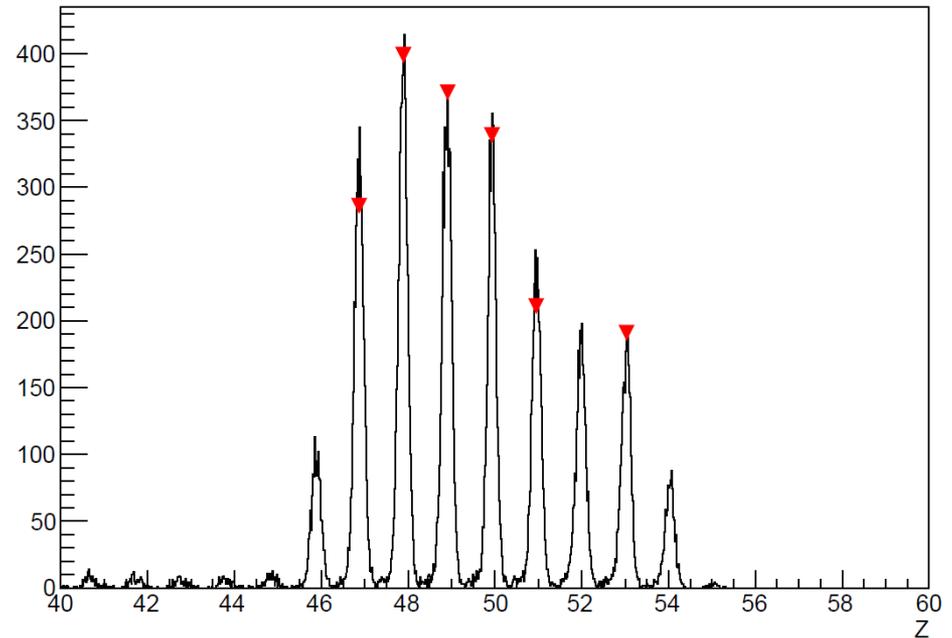
L. Grente, EPJ Web of conferences 122, 01006
A. Chatillon, EPJ Web of Conferences 111, 08001

WP2.1: Mesures et caractérisation des fragments de fission

2.1.2 Programme SOFIA

SOFIA : objectif 2018

- Préparation d'une nouvelle mesure pour 2018 (redémarrage de GSI)
- Etude de la fission dans la région des noyaux déficitaires en neutrons (tests inédits des modèles de fission)
- Développements techniques en cours: nouvelle électronique pour les chambres à fil
- Tests des nouveaux ADC pour les chambres à ionisation (juin/juillet 2016): Résolution en charge est descendue à 0,25 charge FWHM sur toute la gamme entre Al et Xe → **unique au monde !**
- Rédaction du premier article SOFIA



WP2.1: Mesures et caractérisation des fragments de fission

2.1.3 Programme GANIL: VAMOS

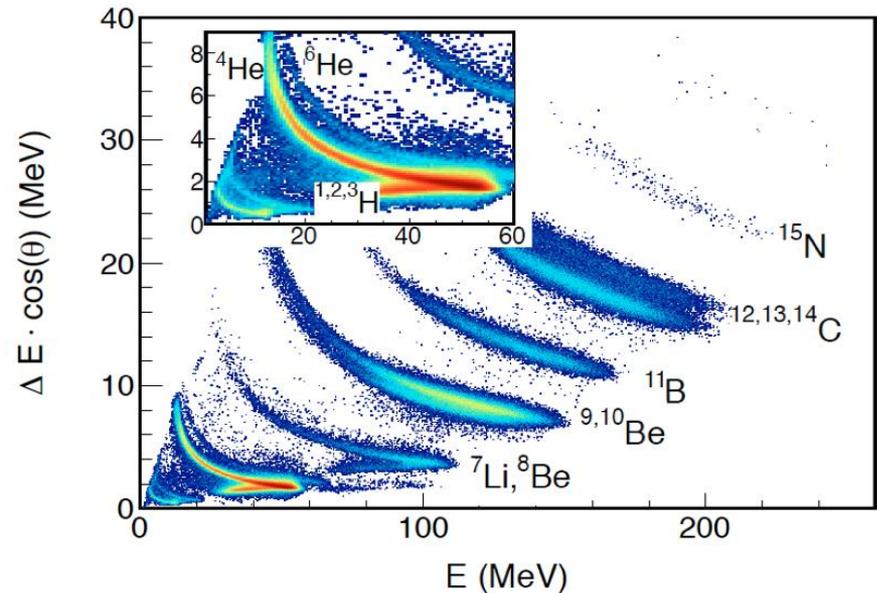
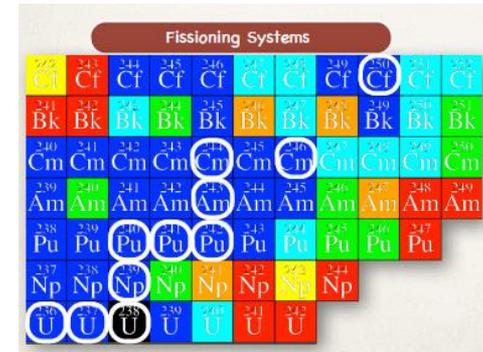
GANIL, l'IPNO, CENBG, CEA/DRF et l'Université de Saint Jacques de Compostelle

Travaux déjà réalisés

- Mesure des rendements isotopiques de plusieurs actinides produits par réactions de transfert en cinématique inverse ($^{238}\text{U} + ^{12}\text{C}$): Spectromètre VAMOS (GANIL)
- Rendements isotopiques obtenus en fonction de l'énergie d'excitation (utiles pour réacteurs à neutrons rapides de 4ème génération)

Défis à relever

- Améliorer le dispositif expérimental pour une meilleure identification des noyaux fissionnants



D. Ramos et al., EPJ Web of Conferences 111, 10001 (2016)

WP2.1: Mesures et caractérisation des fragments de fission

2.1.4 FALSTAFF@ NFS/GANIL

(Four arm cLover for the Study of Actinide Fission Fragments)

CEA/DSM, GANIL, LPC

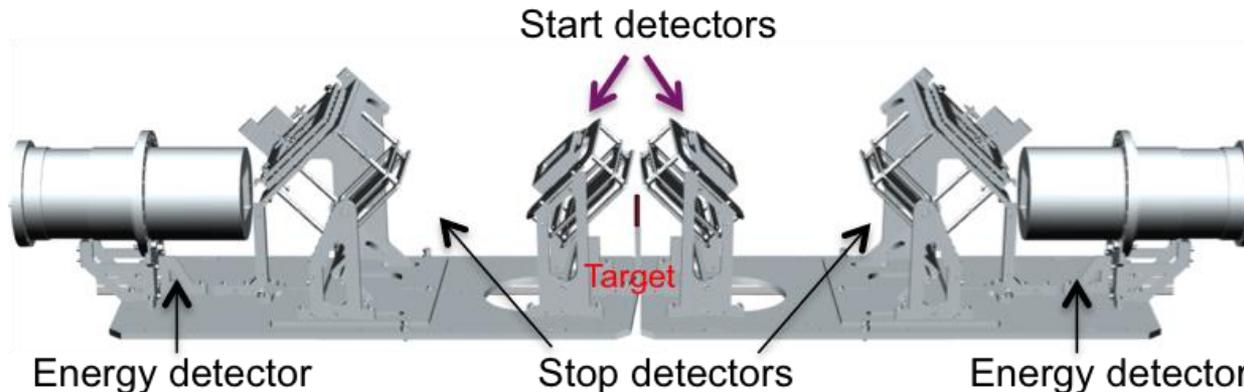
Principe

- Détection des deux fragments de fission en coïncidence par la méthode '2E-2V' pour en déduire leur:
 - Energie Cinétique
 - Masse AVANT et APRES évaporation (fournit la multiplicité des neutrons prompts)
 - Charge Nucléaire (via le profil dE)
- Masse avant évaporation → méthode 2V
TOF : Bonne résolution en temps de vol (<150 ps)
- Masse après évaporation → méthode EV (Energie + TOF)
 - Bonne résolution en énergie (~1%)

Mesures prévues sur NFS en 2018:

^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th ,
 ^{237}Np , ^{239}Pu ...

(Thèse: L. Thulliez;
Post-Doc: A. Chietera)

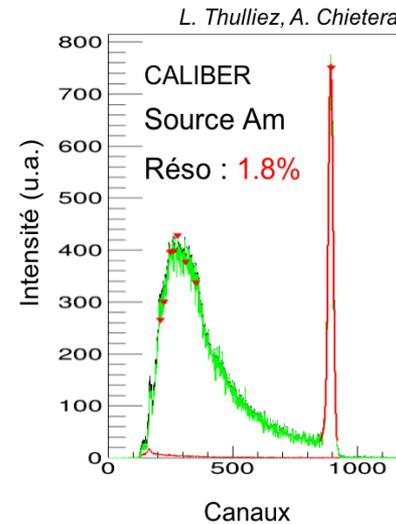
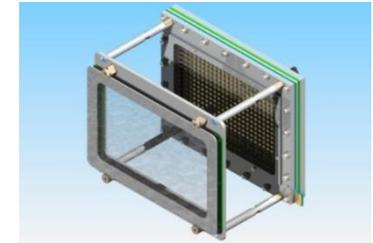
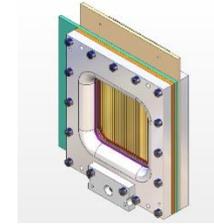


WP2.1: Mesures et caractérisation des fragments de fission

2.1.4 FALSTAFF@ NFS/GANIL

Mise en place du premier bras (2016)

- Livraison de la chambre à ionisation axiale **CALIBER**: Premiers tests avec des alpha et des fragments de fission du ^{252}Cf en cours
- Premiers tests d'un bras complet (avec l'ancienne chambre à réaction)
- Livraison de la nouvelle chambre à réaction (début 2017)
- Livraison système de pompage
- Nouveaux détecteurs TOF bientôt testés au GANIL.
- Système d'acquisition: OK
- Etude homogénéité des feuilles émissives des détecteurs TOF: Effets sur les observables physiques étudiés



Start and Stop detectors



Caliber



CALIBER dans l'ancienne chambre à réaction

WP2.1: Mesures et caractérisation des fragments de fission

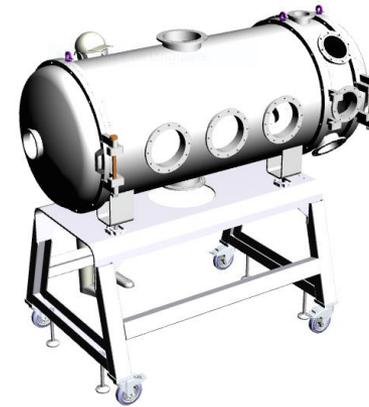
2.1.4 FALSTAFF@ NFS/GANIL

Vers la mise en place du second bras (2017)

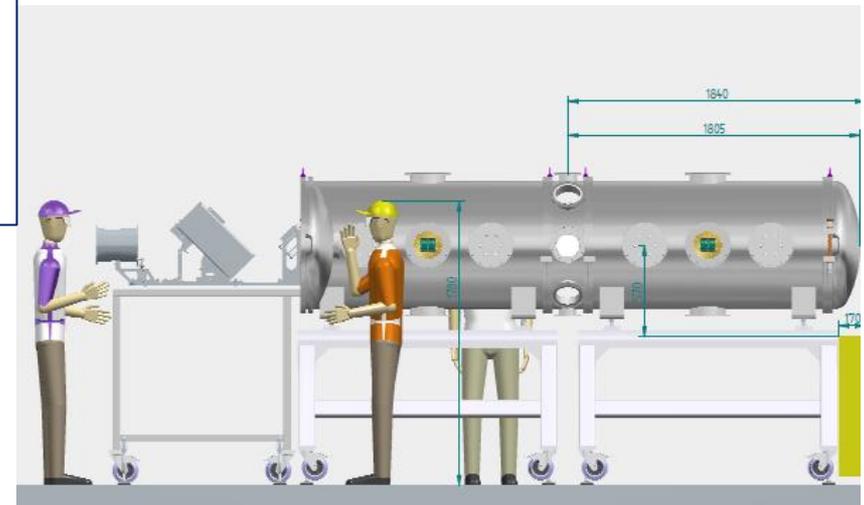
- Test et étalonnage de la chambre à ionisation (probablement à l'IPNO) au premier trimestre 2017
- Analyse des données avec ^{252}Cf . (comparaison avec les simulations GEANT4)

➔ **Devrait permettre la validation de la faisabilité de l'expérience avec 2 bras**

Premières expériences à NFS avec 2 bras prévues en 2018



Nouvelle chambre à réaction pour un bras



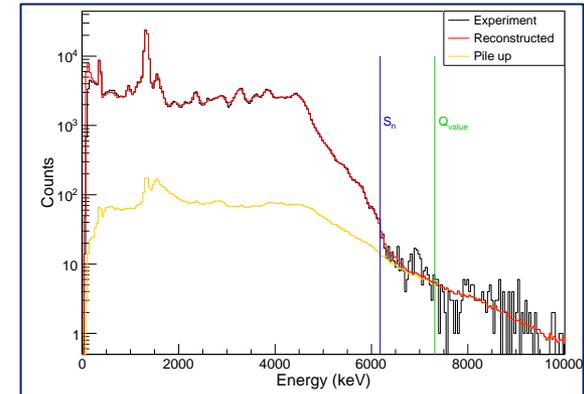
Chambre à réaction pour les deux bras

WP2.2: Mesures des propriétés de décroissance des produits de fission

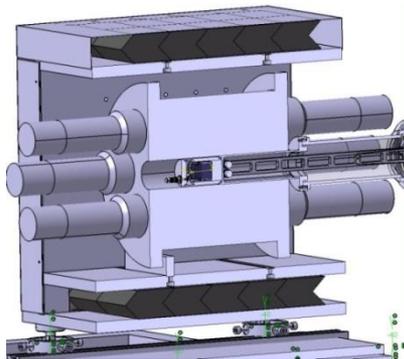
Analyse et Impact des données Jyvaskyla

SUBATECH, CEA/DAM, CEA/DSM, GANIL

- Analyse de l'expérience à Jyväskylä (2014) en cours:
 - 11 noyaux d'intérêt pour la puissance résiduelle et
 - 12 noyaux pour les antineutrinos (thèse: L. Le Meur)
- Collaboration avec théoriciens CEA DAM et SphN (comparaison calculs QRPA avec les résultats expérimentaux)
- Analyse de l'impact des nouveaux résultats obtenus sur la puissance résiduelle et sur le spectre des antineutrinos (développement code)



Analyse des données TAS du ^{142}Cs , L. Le Meur



Mécanique de support du TAS pour l'exp. à ALTO (G. Bouvet, A. Cadiou)

Développements instrumentaux

- Adaptation de la mécanique du TAS (Total Absorption Spectrometer) pour ALTO par Subatech: en cours, expérience prévue mi-2017)
- Développement d'un détecteur d'électrons pour mesures de spectres β à Jyväskylä par Subatech : design en cours, construction en 2017, tests et expérience fin 2017 – mi 2018

WP2.3: Des tests des modèles à l'évaluation

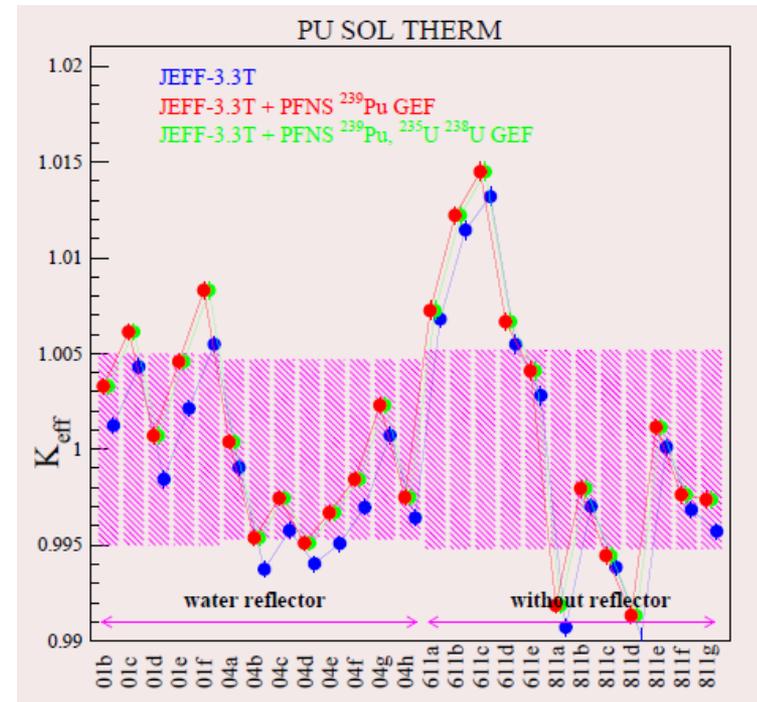
2.3.1 Développements et améliorations des outils d'évaluations des observables de fission

CEA/DEN, LPSC, CEA/DAM, CEA/DSM, CENBG, IPNO, IRMM

code GEF

Programme 2016

- Etude des spectres et multiplicités des neutrons prompts de fission prédits par le code GEF (K-H. Schmidt, B. Jurado)
- Tests de ces spectres combinés avec les sections efficaces évaluées de JEFF3.3 pour le ^{239}Pu sur différents benchmarks thermiques et rapides (CEA-DAM)
- Résultats encourageants: le k_{eff} d'une trentaine d'assemblages en spectre rapide et d'une vingtaine d'assemblages en spectre thermique sont reproduits de façon satisfaisante



B. Morillon et al., JEF-Doc-1781, Nov. 2016

Programme 2017

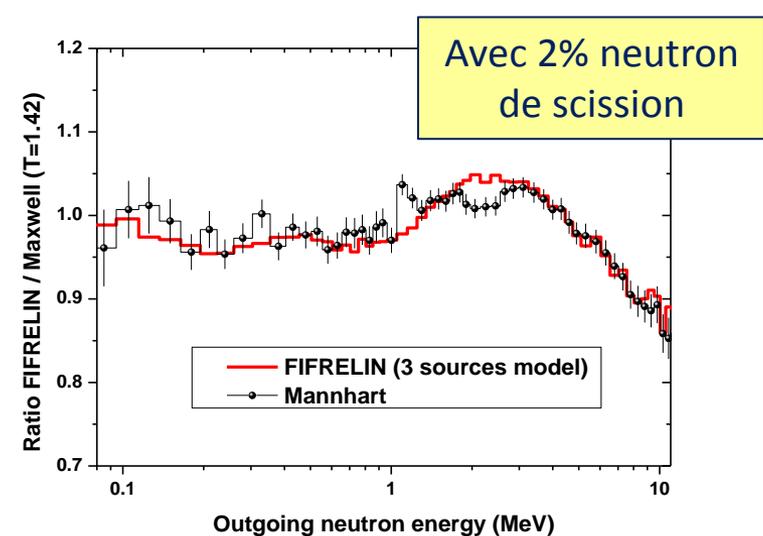
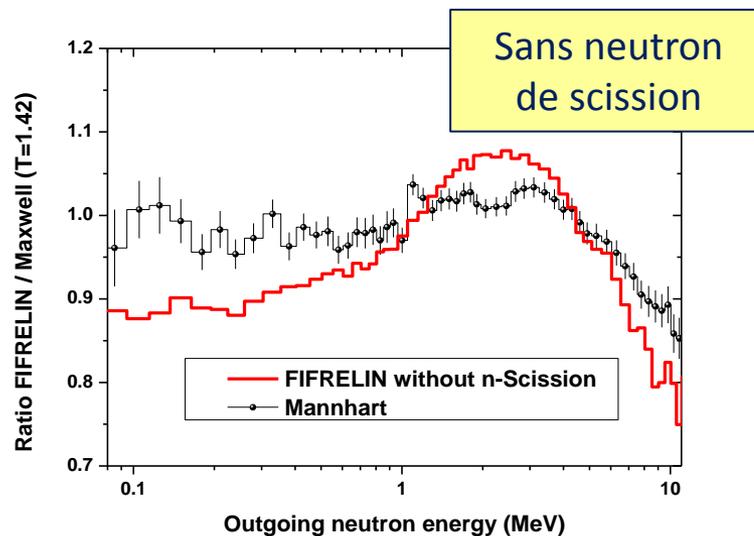
- Travail similaire pour ^{235}U et ^{238}U

WP2.3: Des tests des modèles à l'évaluation

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

code FIFRELIN

- Création et analyse d'arbres d'évènements (post-doc: Abdelaziz CHEBBOUBI): étude des corrélations entre les différentes observables de fission
- Calcul de la multiplicité des neutrons retardés (nouvelle fonctionnalité): Calculs des rendements via FIFRELIN + base de données RIPL-3-2015 pour la probabilité P_n (Premiers résultats très encourageants)
- Introduction des neutrons de scission pour le calcul des spectres



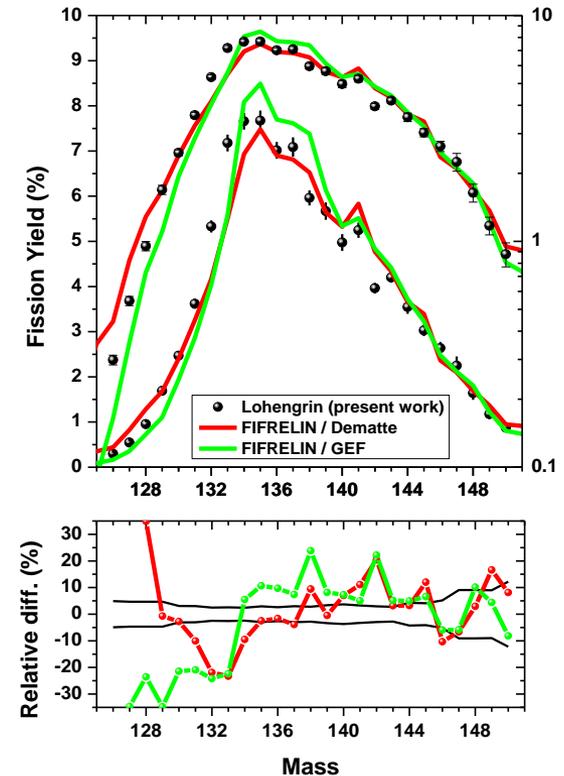
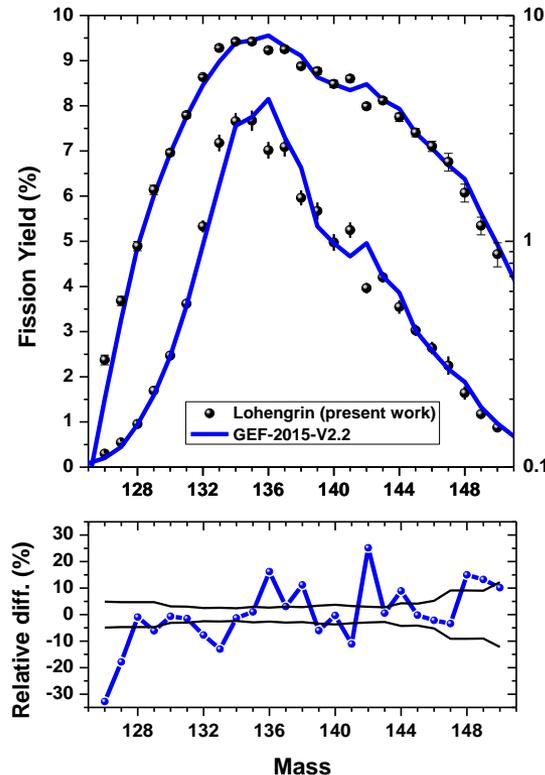
Présentés à ND-2016

WP2.3: Des tests des modèles à l'évaluation

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

Comparaison rendements en masse calculés via GEF et FIFRELIN avec les données 'Lohengrin'

- Calculs GEF: courbe bleue
- Calculs FIFRELIN (avec données pre-neutron de Demattè): courbe rouge
- Calculs FIFRELIN (avec données pre-neutron de GEF): courbe verte



JEF-doc 1795, nov. 2016

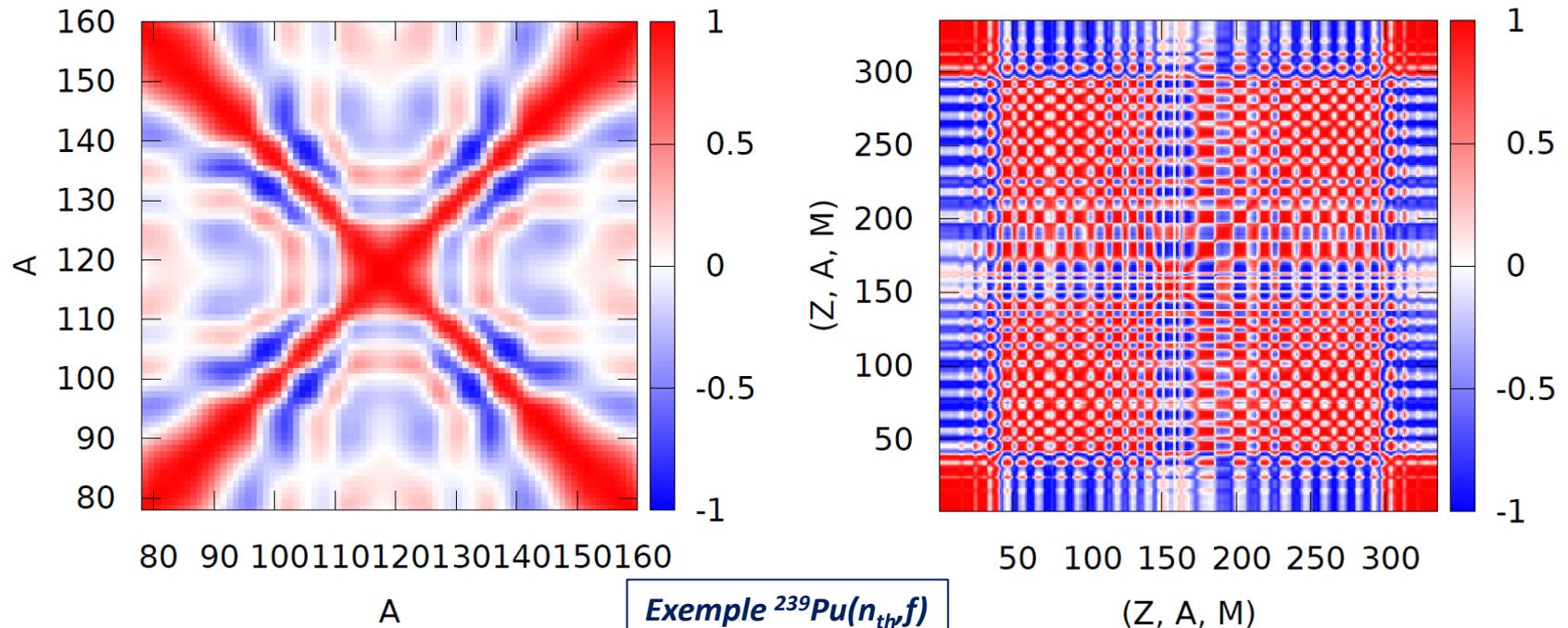
WP2.3: Des tests des modèles à l'évaluation

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

Matrices de variance-covariance associées aux rendements de fission de JEFF-3.1.1

(Thèse Nicholas TERRANOVA, CEA-Cadarache + Université Bologne, soutenue en 2016)

- Fondée sur modèles de fission (Brosa, Walh, Madland England,...)
- Utilisation du code CONRAD (Cadarache)
- Noyaux étudiés: ^{235}U (thermal, fast), ^{239}Pu (thermal, fast), ^{241}Pu (thermal, fast), ^{238}U (fast)



WP2.3: Des tests des modèles à l'évaluation

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

SUBATECH, CEA/DEN, CEA/DRT/LNHB

- Résultats TAS (Subatech) envoyés aux évaluateurs:

- Déjà inclus dans la bibliothèque JEFF-3.3/Decay Data

JEFF-3.1.1	TAGS	JEFF-3.1.1	TAGS
Mean gamma energy (keV)		Mean beta energy (keV)	
170 (9)	464 (14)	3639 (28)	3496 (105)

^{92}Rb

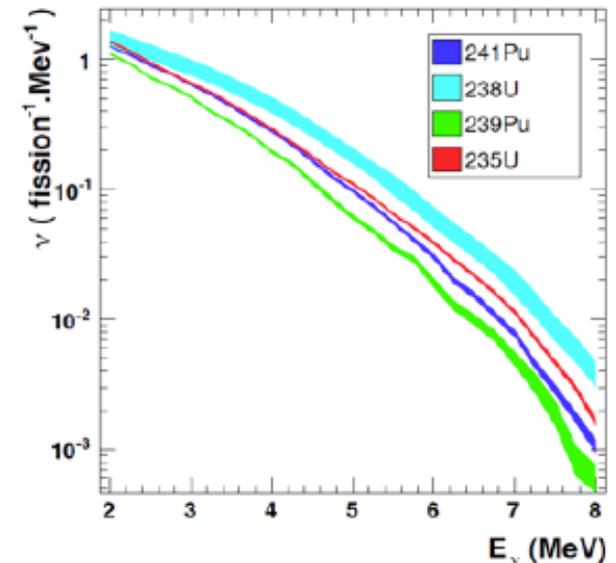
- Vont être utilisés pour calculer les rendements de fission cumulés (bibliothèque JEFF-3.3/Fission Yield)

- Développements d'outils pour la propagation des erreurs dues aux rendements de fission et aux données de décroissance sur les spectres d'antineutrinos et la puissance résiduelle

- Participation CRP de l'AIEA sur les émetteurs de neutrons retardés (2017) : inclusion des données TAS dans EXFOR

Calcul du spectre d'antineutrinos par sommation:

$$N(E_\nu) = \sum_n Y_n(Z, A, t) \cdot \sum_i b_{n,i}(E_0^i) P_\nu(E_\nu, E_0^i, Z)$$



Mesures de fission en cinématique inverse dans des ANNEAUX DE STOCKAGE

Année 2016

Première mission au GSI avec pour but:

- Participer à une expérience menée dans l'anneau de stockage ESR.
- Se familiariser avec la technologie des anneaux de stockage
- Initier une collaboration



Experimental Storage Ring (ESR) @ GSI

Année 2017

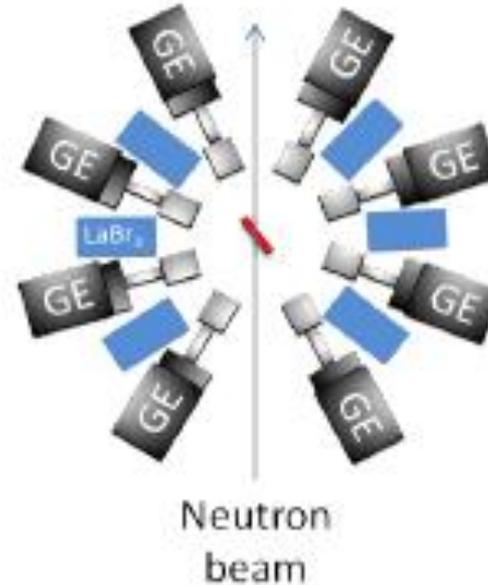
- Mise en place d'une collaboration plus formelle avec les experts de la technologie des anneaux de stockage en vue d'une future mesure par la méthode de substitution en cinématique inverse
- Poursuite des expériences à l'ESR

Projet FIPPS @ ILL

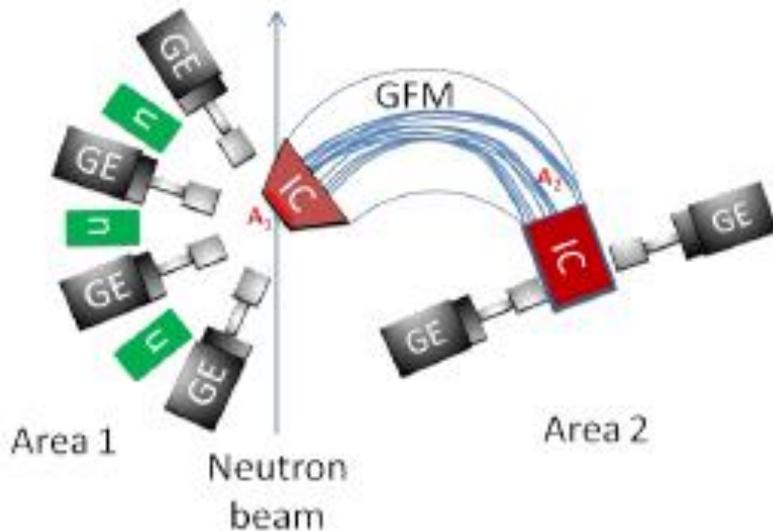
(Fission Product Prompt γ -ray Spectrometer)

FIPPS / Phase I (2015-2018)

- Achat des détecteurs Germanium
- Devrait être opérationnel en 2017
- Appel à proposition d'expérience dès Février 2017



FIPPS/Phase I



FIPPS/Phase II

FIPPS / Phase II (2018-2023) à l'étude:

- Couplage FIPPS/Phase I avec aimant (Gaz Filled Magnet)
- Objectif: filtrer en masse l'un des fragments pour l'obtention des spectres de gamma/neutrons prompts par isotope et l'étude de la structure nucléaire des noyaux riches en neutrons.

TOSCA (The Orsay Subatech Calorimeter Array)

Réalisation d'un détecteur combinant la haute efficacité des détecteurs TAS + meilleure résolution en énergie (utilisation de cristaux de LaBr₃) + mesure des neutrons: Détection simultanée des 3 émissions bêta-gamma-neutron des noyaux radioactifs d'intérêt pour les cycles actuels et futurs.



Projet en standby en 2016

Discussions prévues en 2017

Conclusions

NACRE WP2

LPSC, CENBG, GANIL, IPNO, CSNSM, INPL, CEA/DRF, DEA/DEN, CEA-DAM, GSI, ILL, Université de Chalmers, Université de Santiago de Compostela

Grace à NEEDS, des avancées significatives ont vu le jour:

- Mesures toujours plus nombreuses avec maîtrise des incertitudes (ILL, SOFIA, Jyväskylä)
- Collaborations renforcées entre Expérimentateurs / Théoriciens
- Construction et/ou mise à niveau de nouveaux instruments (FALSTAFF@NFS-GANIL, Détecteur électrons @Jyväskylä, SOFIA (pour le redémarrage de GSI - 2018), TAS auprès d'ALTO)
- Améliorations des codes d'évaluation: GEF, FIFRELIN, Code de calcul de spectres d'antineutrinos et de puissance résiduelle avec propagation des erreurs

Quelques 'trous dans la raquette':

- Mesures des spectres et multiplicités des neutrons et gamma prompts de fission
- Mesures et évaluations des caractéristiques des neutrons retardés (spectre, multiplicité, incertitudes)

Quelques workshops !

- Workshop « Données nucléaires associées aux neutrons retardés », Cadarache, 9 déc. 2016
- Workshop NACRE-WP2 prévu à Saclay: 23-24 Mars 2017
- 'Mini-workshop' Données de décroissance, prévu en Mars 2017 à Nantes
- 6eme Workshop on Fission and Fission Product Spectroscopy, Chamrousse, 2017