

Projet NEEDS

Fission Yields and Spin distributions for the fuel Cycle Studies

Atelier Bilan NEEDS
7-8 Janv. 2015

A. Chebboubi, G. Kessedjian, S. Julien-Laferrière, C. Sage, O. Méplan

LPSC, Université Grenoble-Alpes, CNRS/IN2P3, F-38026 Grenoble, France

H. Faust, U. Köster, A. Blanc, P. Mutti

Institut Laue-Langevin, F-38042 Grenoble, France

O. Serot, O. Litaize, D. Bernard

CEA, DEN, DER, SPRC, Cadarache, Physics Studies Laboratory, F-13108 Saint-Paul-lès-Durance, France

A. Letourneau, T. Materna, M. Rapala

CEA, DSM, IRFU, Saclay, SPhN, F-91191 Gif-sur-Yvette, France



plan

1- La problématique des rendements de fission

2- Programme de mesures de rendements de fission induites par neutrons

3- Projets en cours à l'ILL

3-1- Mesures de rendements en masse et en charge $\rightarrow {}^{233}U(n,f)$ & ${}^{239}Pu(n,f)$ & ${}^{241}Pu(n,f)$

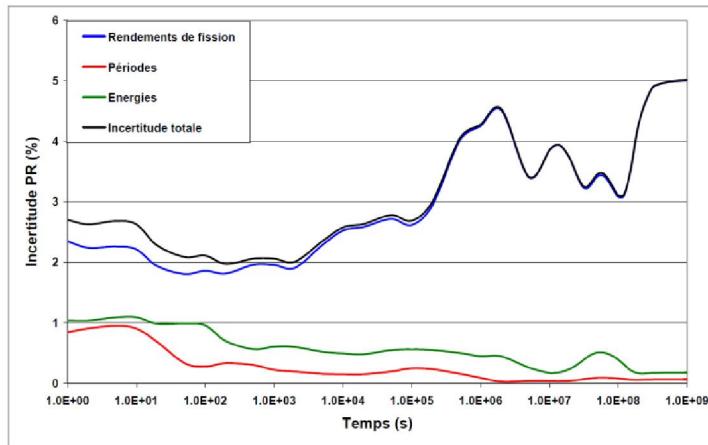
3-2- Mesures de rapports isomériques comme sonde de $P(E^,J) \rightarrow {}^{233}U(n,f)$ & ${}^{241}Pu(n,f)$*

3-3- Etude expérimentale et modélisation des GFM comme filtre de fragments de fission

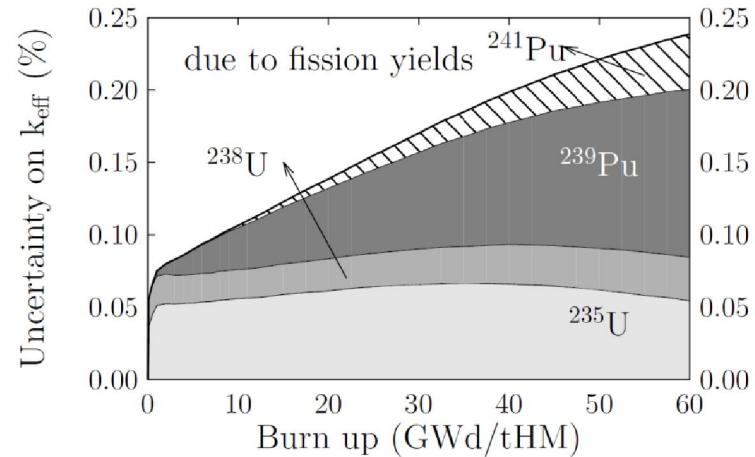
4- Perspective : projet de futur instrument FIPPS

1- La problématique des rendements de fission

- Impact des études de rendements dans les cycles du combustible
 - Inventaires de fin de cycle : compositions isotopiques
 - Puissance résiduelle : produits de fission et actinides mineurs
 - Radiotoxicité du combustible usé
 - Etudes expérimentales de combustibles : Rendements cumulés et sections efficaces de réactions nécessaires pour la comparaison Calculs/Expériences ($A=125, 134 \dots$)
 - Modélisation des γ prompts émis par le combustible (Fifrelin, GEF...)



J.C. Benoit, Thesis (2012)



Validité des calculs ? -> bibliothèques de données complètes + Covariances ??

1- La problématique des rendements de fission

- Impact des études de rendements dans les cycles du combustible
 - Inventaires de fin de cycle : compositions isotopiques
 - Puissance résiduelle : produits de fission et actinides mineurs
 - Radiotoxicité du combustible usé
 - Etudes expérimentales de combustibles : Rendements cumulés et sections efficaces de réactions nécessaires pour la comparaison Calculs/Expériences ($A=125, 134 \dots$)
 - Modélisation des γ prompts émis par le combustible (Fifrelin, GEF...)
- Etude du processus de fission
 - Compréhension de l'impact de la **dynamique** dans la **modélisation** du processus
 - Distribution de spin
 - Rendements symétriques et très asymétriques sont très sensibles au mécanisme de fission : signatures de modes dans les distributions en énergie
 - $Y(A,Z,E^*,J\pi)$
 - Tester le **pouvoir de prédiction** des **modèles** pour les **évaluations** (dépendance en énergie neutron)
 - Désaccords entre les **modèles effectifs** (e.g. Wahl)/**évaluation** et les mesures dans la **région des fragments lourds et symétriques** → Polarisation de charges nucléaires

2- Programme de mesures de rendements de fission induite par neutrons

$$Y(A, Z, E_k, J, \pi) = Y(A) \cdot P(Z|A) \cdot P(E_k|A, Z) \cdot P(J, \pi|A, Z, E_k)$$

Mass Charge Kinetic energy

spin

➤ distributions



Chambre d'ionisation
→ + spectro gamma
+ TOF (en cours)

Description complète des analyses

- Evaluations / mesures : pas de covariances disponibles
- Masse = \sum Isotope
- $\text{Variance}(\text{Masse}) = \sum \text{Var}(\text{Isotope}) + \dots + \sum \text{Cov}$
(Isotopes) $\text{Variance}(\text{Masse}) > \text{Var}(\text{Isotope majeur})$

} Impossible :
Mesures en masse sont plus disponibles, complètes et précises que les rendements isotopiques

2- Programme de mesures de rendements de fission induite par neutrons

$$Y(A, Z, E_k, J, \pi) = Y(A) \cdot P(Z|A) \cdot P(E_k|A, Z) \cdot P(J, \pi|A, Z, E_k)$$

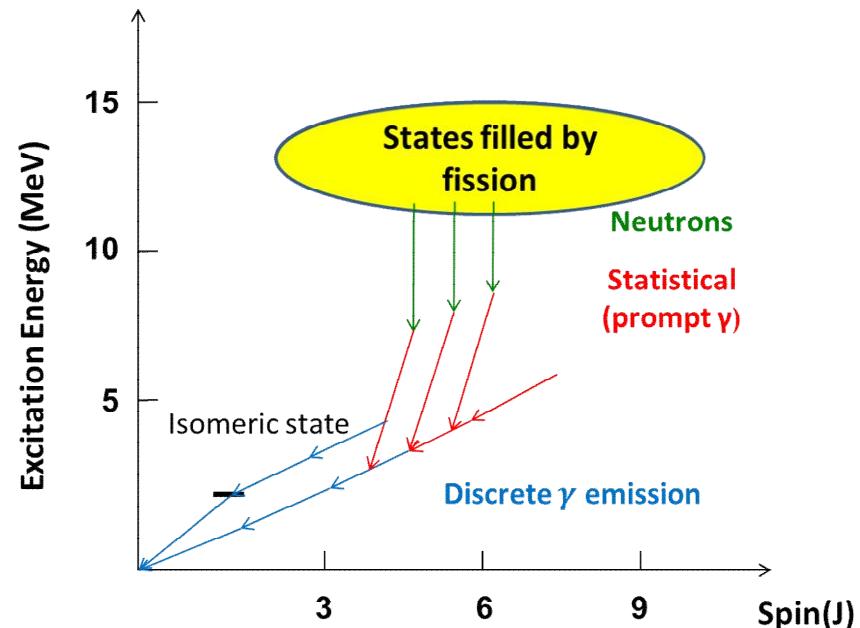
Mass Charge Kinetic energy spin ➤ distributions



$P(J, \pi|A, Z, E_k, IR)$ $P(J, \pi|A, Z, E_k, \gamma_{prompt})$
Spectrométrie gamma (BEGe - HPGe)

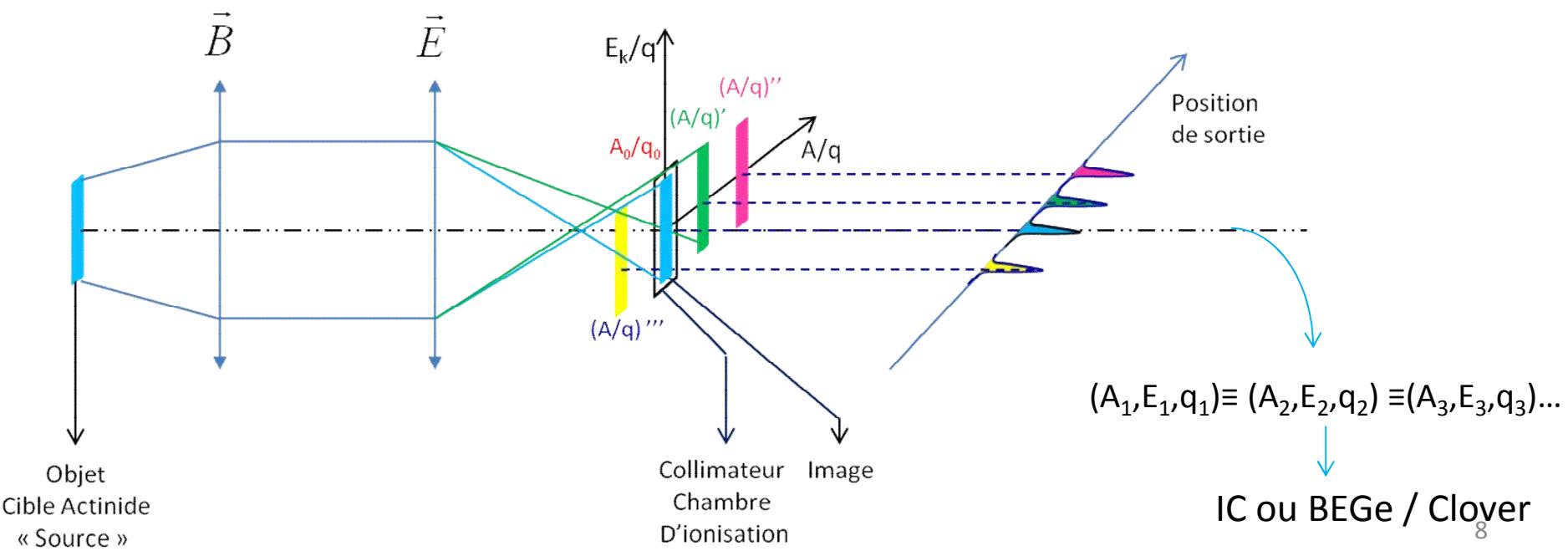
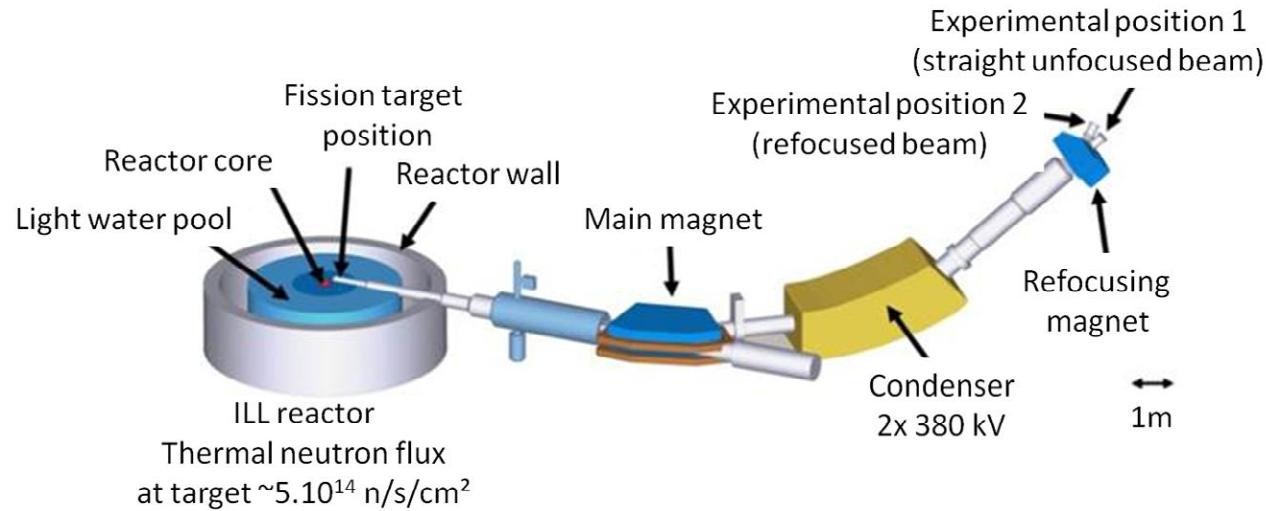
Description complète des analyses

- Evaluations / mesures : pas de covariances disponibles
- Masse = \sum Isotope
- $\text{Variance}(\text{Masse}) = \sum \text{Var}(\text{Isotope}) + \dots + \sum \text{Cov}$
(Isotopes) $\text{Variance}(\text{Masse}) > \text{Var}(\text{Isotope majeur})$



3- Projets en cours à l'ILL

3- Le spectromètre Lohengrin



3-1- Mesures de rendements en masse et en charge → $^{233}\text{U}(n,f)$

- région des fragments lourds

- refonte du protocole de mesure et d'analyse
- évaluation des corrections systématiques et des biais de l'instrument
- développement d'une méthode d'analyse indépendante de toute normalisation extérieure que ce soit pour les mesures :
 - en masse où il « suffit » de couvrir une région de masse → **mesures absolues**
 - en charge

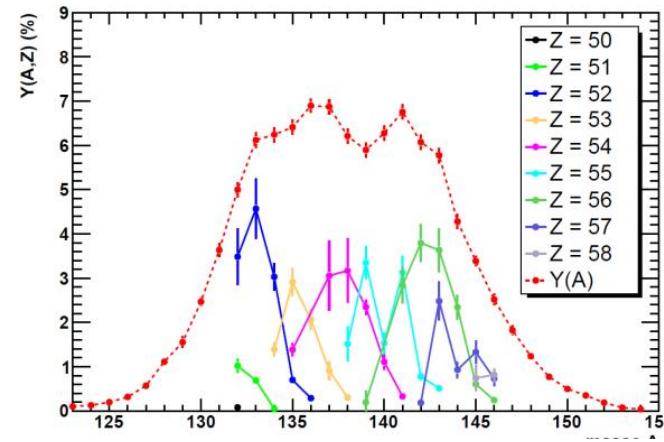
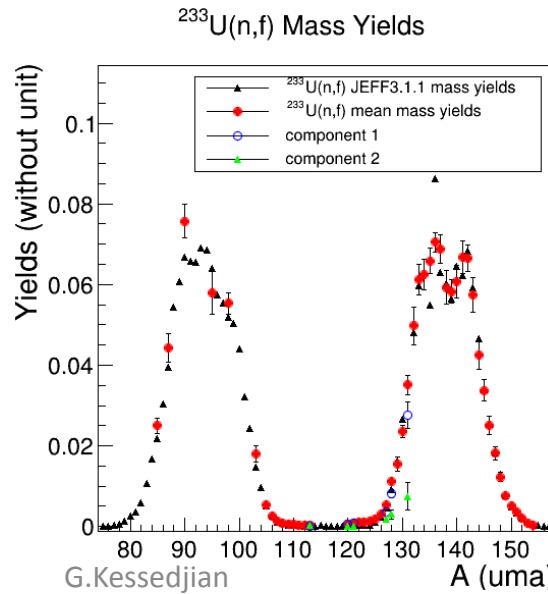
→ identifier une masse où l'ensemble des isotopes est identifiable en spectrométrie γ
 → normaliser toutes autres mesures isotopiques sur le rendement en masse

Thèses de

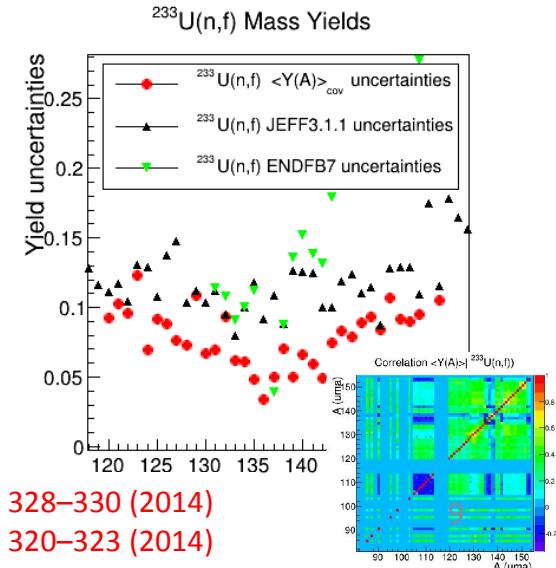
F.Martin (2010-2013) +

A.Chebboubi (2012-2015) +

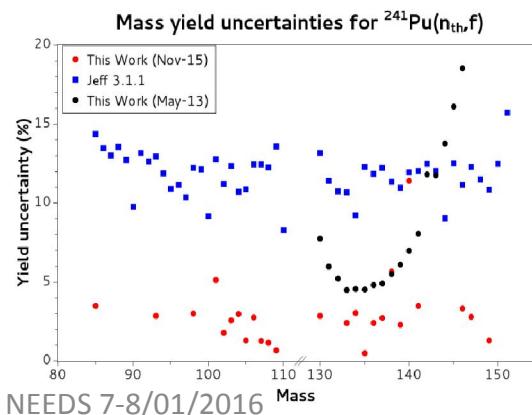
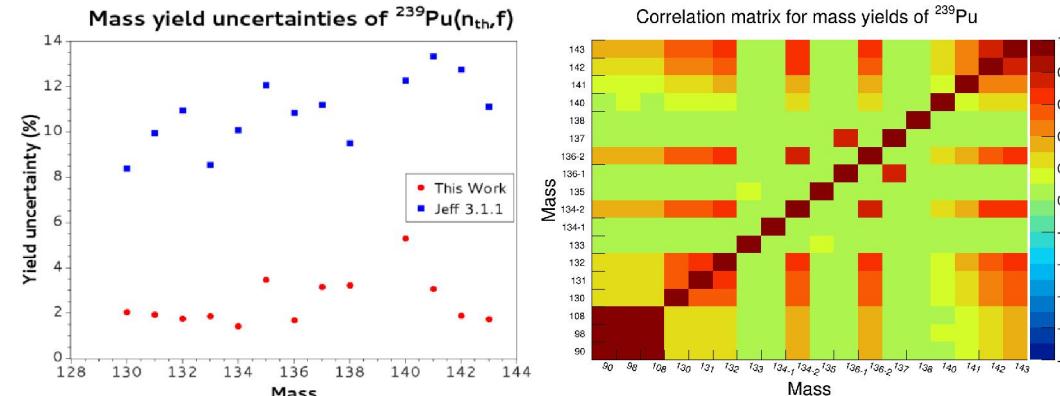
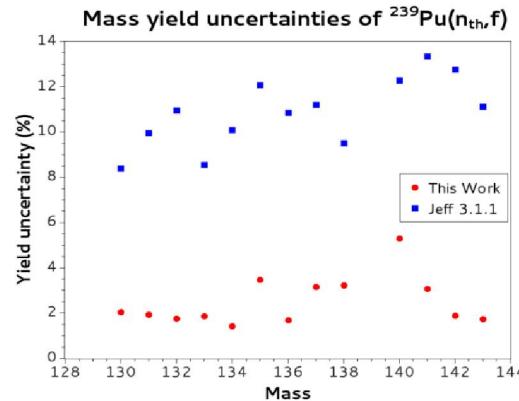
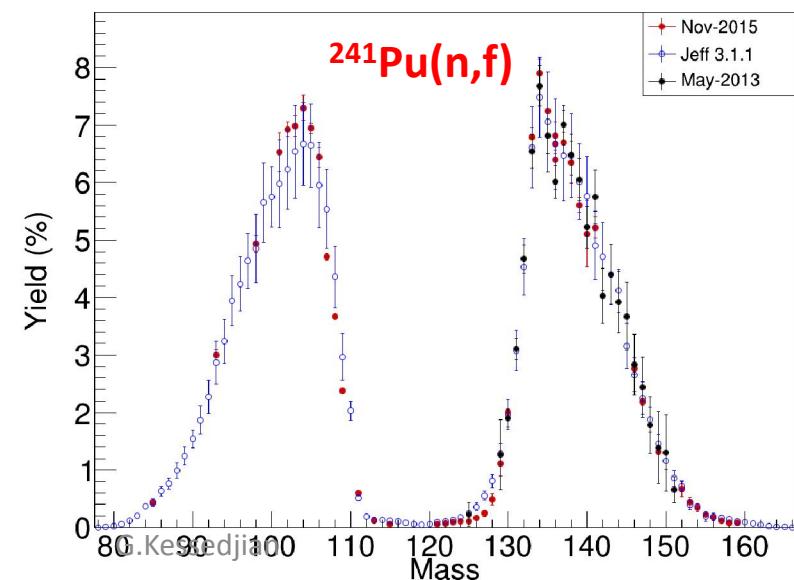
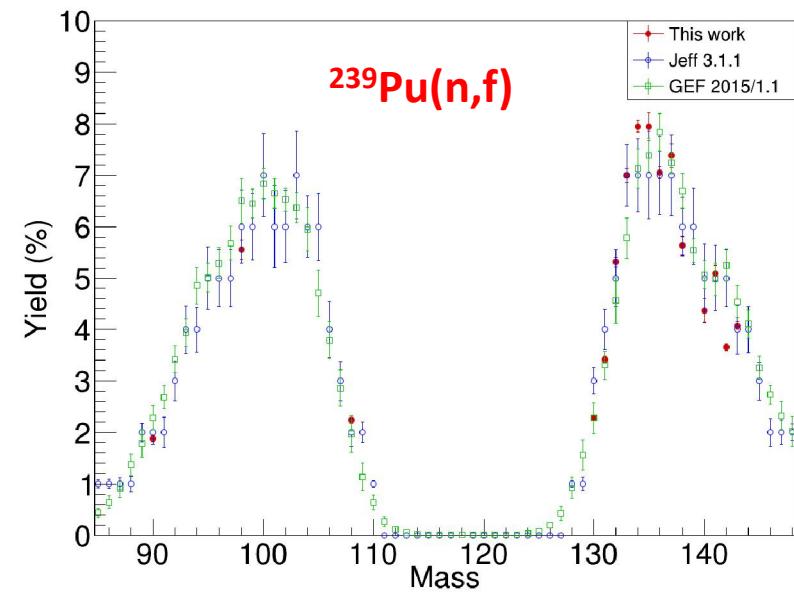
S. Julien-Laferrière (2015-2018)



Nuclear Data Sheets, Volume 119, May 2014, Pages 328–330 (2014)
 Nuclear Data Sheets, Volume 119, May 2014, Pages 320–323 (2014)



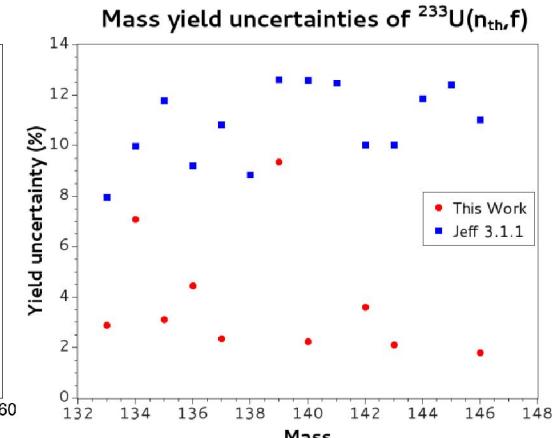
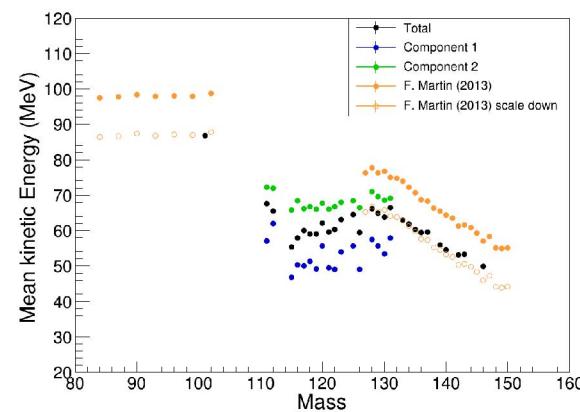
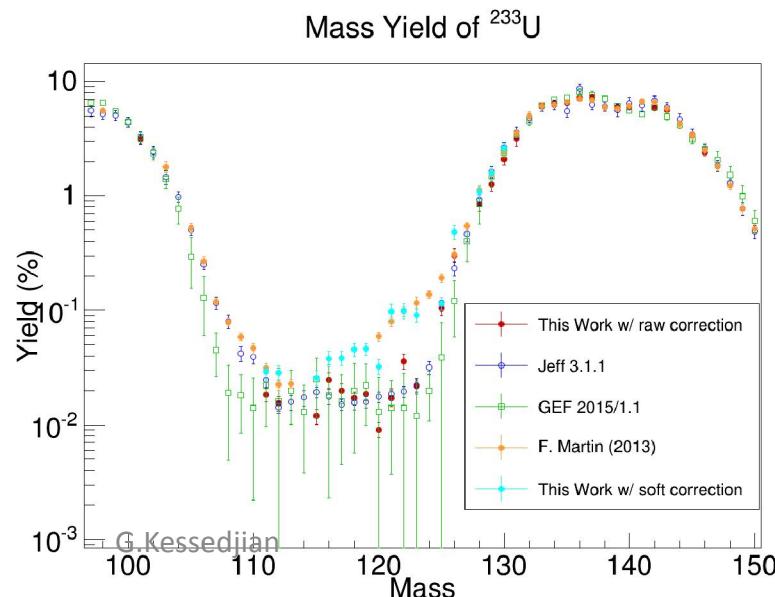
3-1- Mesures de rendements en masse et en charge → $^{239, 241}\text{Pu}(n,f)$



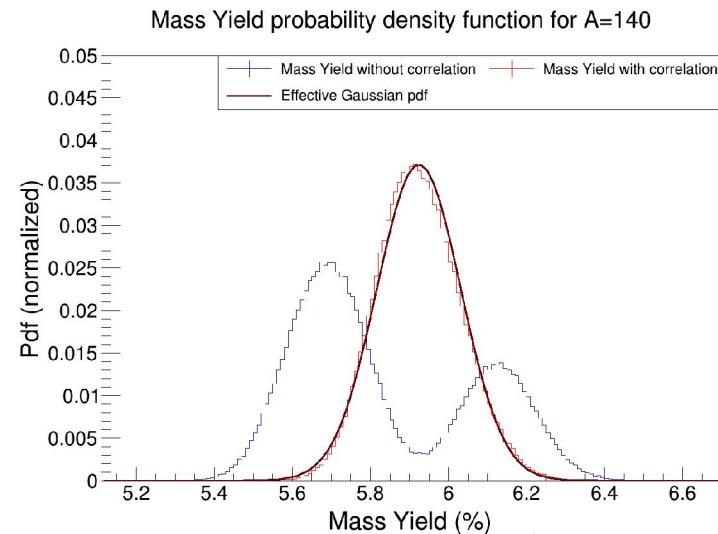
*Preliminary results
S. Julien-Laferrière
PhD Student (2015-2018)*

3-1- Mesures de rendements dans la région des masses symétriques $\rightarrow {}^{233}\text{U}(n,f)$

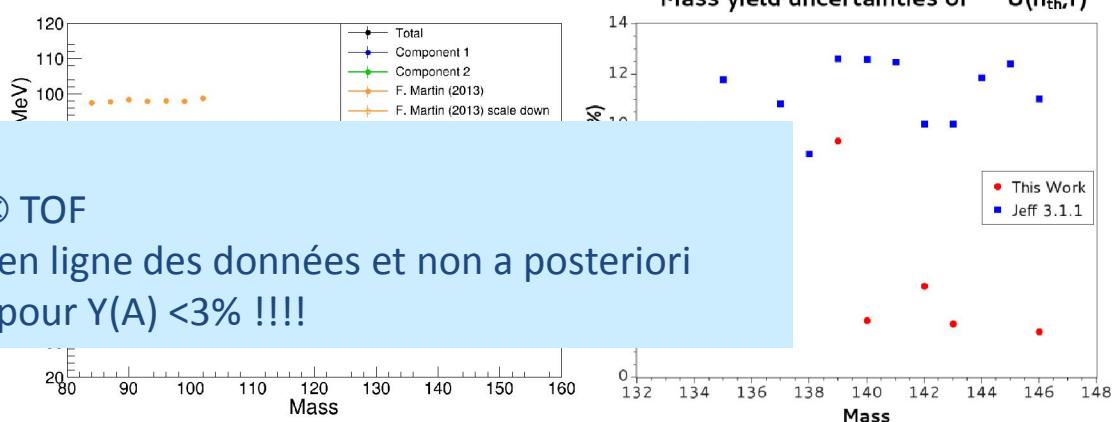
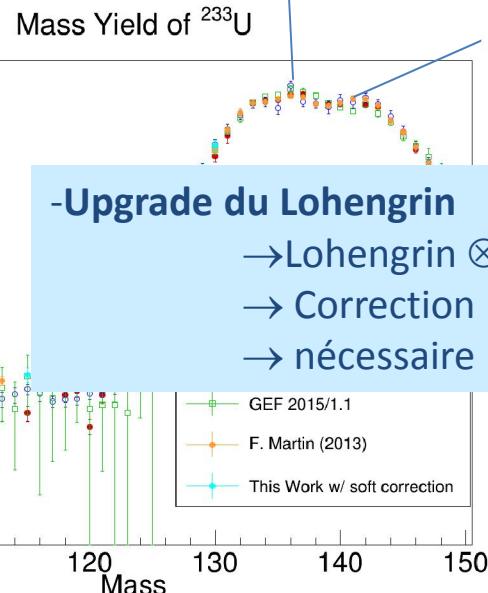
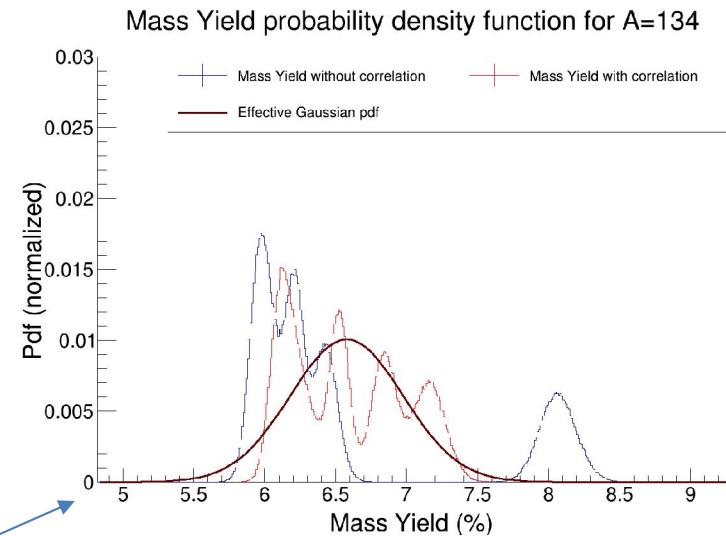
- Compréhension des **limites de l'instrument** actuel dans le cadre des **mesures de précision**
- **Identifier l'existence ou non de modes dans la fission de basse énergie** dans le but de valider des modèles phénoménologiques (GEF) et/ou microscopiques utiles à l'évaluation
 - Actuellement les **évaluations** se basent principalement sur les mesures existantes en « comblant les manques » par l'approche de **Wahl**
 - hp : conservation de la densité de charge nucléaire
 - + correction de l'effet de polarisation en charge
 - Projet d'évaluation de type **bayésienne** en prenant en compte les **modèles validés comme prior** à l'analyse e.g. **GEF** code type modèle de Brosa



3-1- Mesures de rendements dans la région des masses symétriques $\rightarrow {}^{233}\text{U}(n,f)$



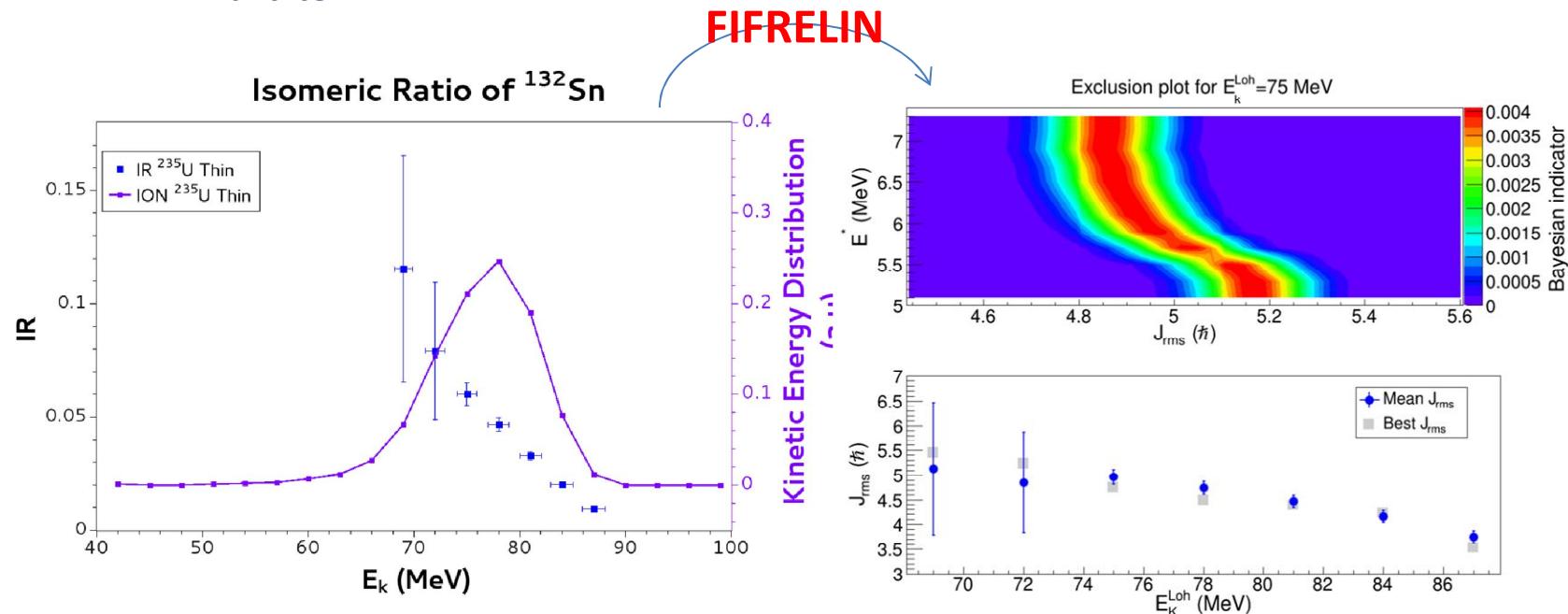
m, σ
 PDF des mesures
Meta-analyse



Thèses de A.Chebboubi (2012-2015)
 Article en cours de rédaction

3-2- Mesures de rapports isomériques comme sonde de $P(E^*, J) \rightarrow {}^{233}U(n,f)$ & ${}^{241}Pu(n,f)$

- (re-)construction d'une bibliothèque de mesures de rapports isomériques avec l'objectif de **pérenniser les données** : conserver les résultats sur les taux de comptage avant corrections des fichiers de structures nucléaires
→ permettre de réinterpréter les données à long terme (e.g. ${}^{132}Te$)
- couverture d'une large échelle de temps : isomères métastables, μ s et ns isomères
→ possibilité de réaliser un test global sur le plus grand nombre d'isotopes afin d'identifier les modèles « non-rejetés » avec leur plage de validité



3-3- Etude expérimentale et modélisation des GFM comme filtre de fragments de fission

- Pouvoir de séparation des spectromètres magnétiques gazeux (GFM)

- programme de mesures sur les spectromètres/séparateurs de type « Gas Filled Magnet » (GFM) auprès du spectromètre Lohengrin = ici source de fragments de fission
 - mesure de résolution en masse et en charge
 - mesure de la dépendance de l'énergie initiale sur le champ optimal
 - mesure de dépendance trajectoire / perte d'énergie
 - charges ioniques effectives, probabilité de changement de charges

- Développement d'un programme de simulation des trajectoires

- paramètres déterminés sur une première série de données
($A=98$, $EK=90$ MeV)
 - prédictivité de la simulation testée dans la région des fragments légers

- Etude des performances des GFM pour le projet FIPPS + instrumentation adéquate

3-3- Etude expérimentale et modélisation des GFM comme filtre de fragments de fission

- Pouvoir de séparation des spectromètres magnétiques gazeux (GFM)

- programme de mesures sur les spectromètres/séparateurs de type « Gas Filled Magnet » (GFM) auprès du spectromètre Lohengrin = ici source de fragments de fission
 - mesure de résolution en masse et en charge
 - mesure de la dépendance de l'énergie initiale sur le champ optimal
 - mesure de dépendance trajectoire / perte d'énergie
 - charges ioniques effectives, probabilité de changement de charges

- Développement d'un programme de simulation des trajectoires

- paramètres déterminés sur une première série de données
($A=98$, $EK=90$ MeV)
- prédictivité de la simulation testée dans la région des fragments légers

- Etude des performances des GFM pour le projet FIPPS + instrumentation adéquate

- Etude de faisabilité du Projet FIPPS@ILL :

- spectromètre γ (Clover Ge) couplé à un filtre de fragments de fission
- Utilisation du filtre de fragments de fission sur d'autres installations (NFS, IPNO ...)

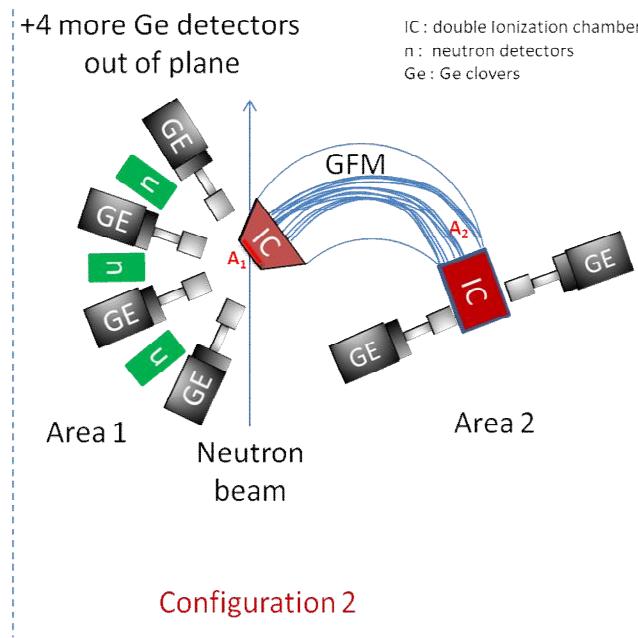
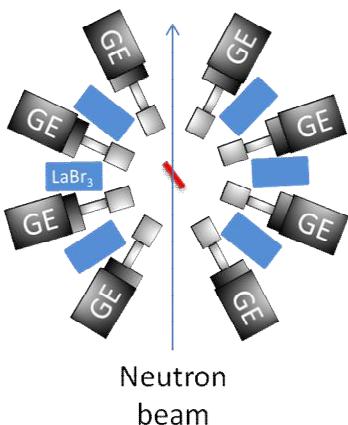
- Upgrade du Lohengrin → Lohengrin \otimes GFM : → Chanda Project

- obtention de faisceaux quasi-isobariques (pureté >95%)
- possibilité de développer un projet de mesures différentielles de puissance résiduelle

4- Perspective : projet de futur instrument FIPPS

4- Perspective : projet de futur instrument FIPPS

- Projet FIPPS : spectromètre γ (Clover Ge) couplé à un filtre de fragments de fission

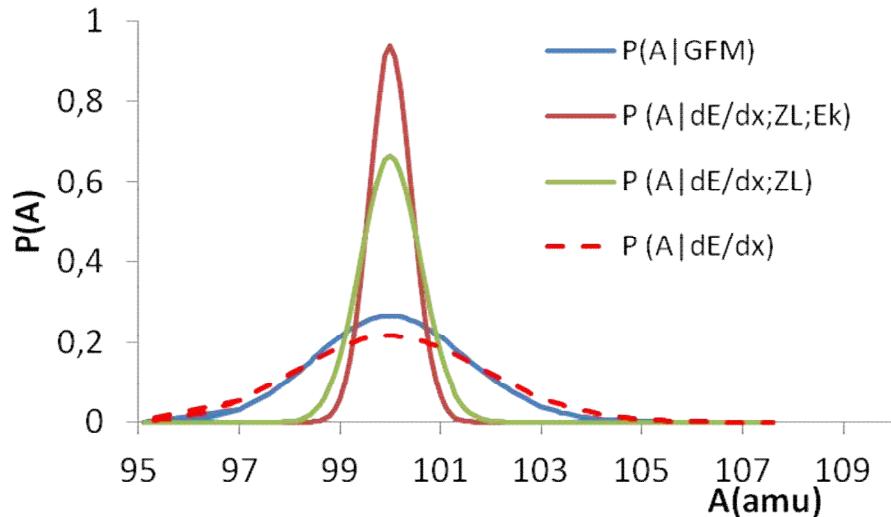


- $(\gamma \otimes \text{Filtre FF}) \otimes \gamma_{discret}$
- upgrade envisagé: TPC dans l'entrefer → gap de l'aimant Lxh = 40x 20 cm²

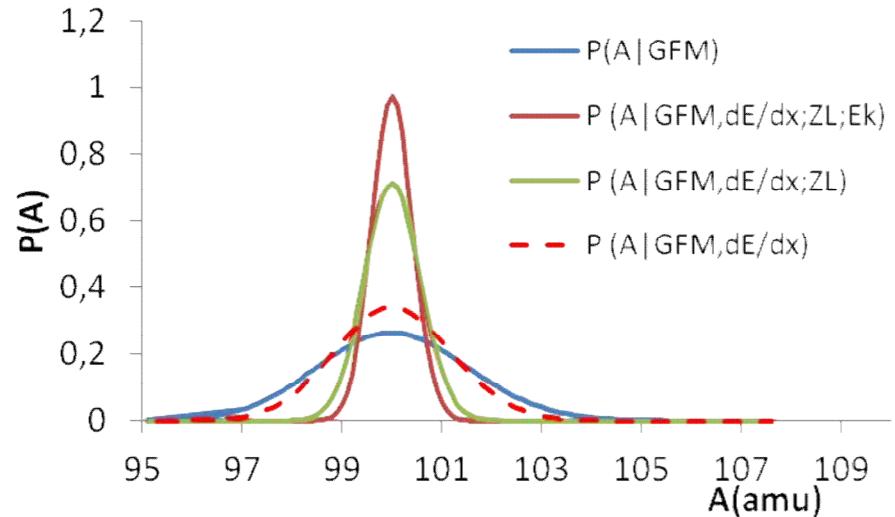
4- Perspective : projet de futur instrument FIPPS

Pouvoir de séparation et efficacité du filtre de fragments de fission

Résolution de l'instrumentation



Résolution attendue pour FIPPS



	$P(A GFM)$	$P(A dE/dx;ZL;Ek)$	$P(A dE/dx;ZL)$	$P(A dE/dx)$
moyenne	100	100	100	100
écartype %	1,5	0,4	0,6	1,8
FWHM	3,5	1,0	1,4	4,3

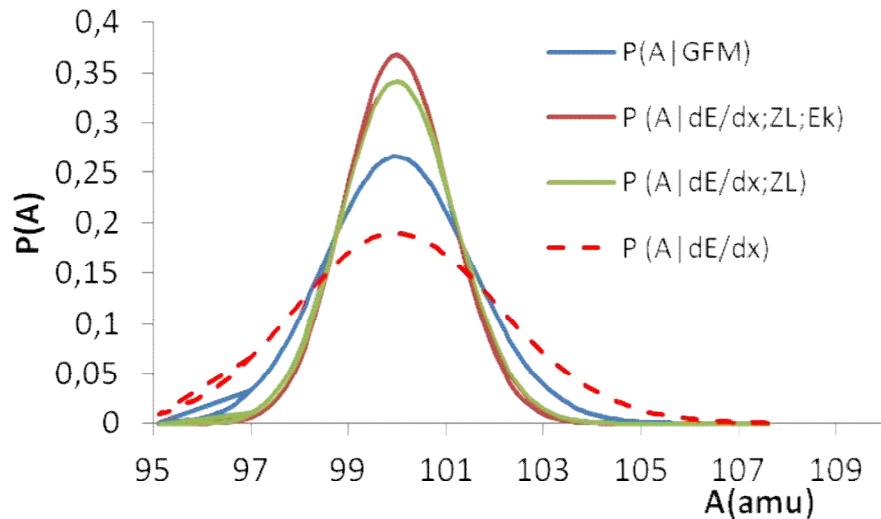
	$P(A GFM,dE/dx;ZL;Ek)$	$P(A GFM,dE/dx;ZL)$	$P(A GFM,dE/dx)$
100	100	100	100
0,4	0,4	0,6	1,2
1,0	1,0	1,3	2,8

$$P(A|\vec{B}, \frac{dE}{dx}, Z, E_k, \eta) = P(A|\vec{B}, E_k, \eta) \otimes P(A|\frac{dE}{dx}, Z, E_k, \eta)$$

4- Perspective : projet de futur instrument FIPPS

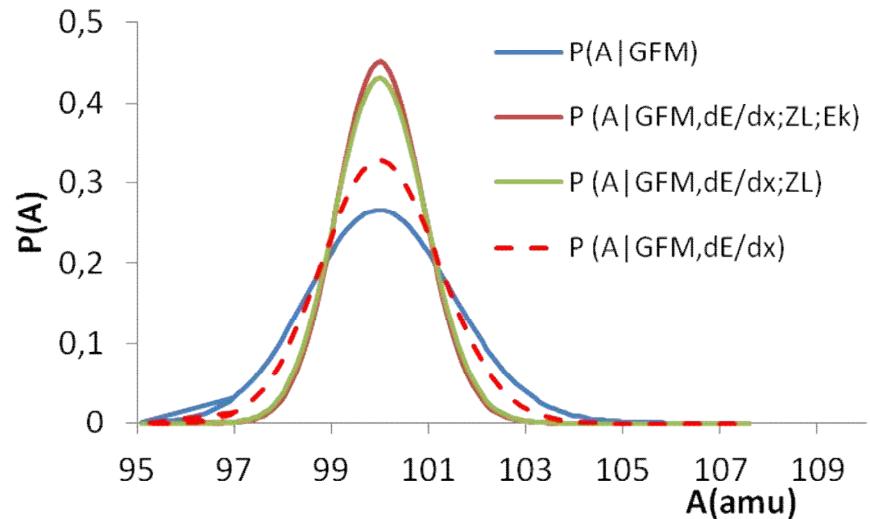
Pouvoir de séparation et efficacité du filtre de fragments de fission

Résolution de l'instrumentation



Nuisances de 1% (pression, T,)

Résolution attendue pour FIPPS



	P(A GFM)	P(A dE/dx;ZL;Ek)	P(A dE/dx;ZL)	P(A dE/dx)
moyenne	100	100	100	100
ecartype %	1,5	1,1	1,2	2,1
FWHM	3,5	2,6	2,8	4,9

P(A GFM,dE/dx;ZL;Ek)	P(A GFM,dE/dx;ZL)	P(A GFM,dE/dx)
100	100	100
0,9	0,9	1,2
2,1	2,2	2,9

$$P(A|\vec{B}, \frac{dE}{dx}, Z, E_k) = \int_{\eta} \rho(\eta) \cdot (P(A|\vec{B}, E_k, \eta) \otimes P(A|\frac{dE}{dx}, Z, E_k, \eta)) d\eta$$

Conclusion (1/3)

- outils d'analyse statistique développés dans le groupe :

- Théorie des perturbations : $Y(A)$, $Y(A,Z)$, Sections efficaces
 - Construction des covariances expérimentales
- Total Monte Carlo : IR, GFM
- métá-analyse : $P(E)$ région symétrique
- Inférences bayésiennes : $P(E^*J)$, RPC (ns isomer) , sections efficaces de diffusion
- inférences fréquentistes : paramètres de barrières de fission

- Projets

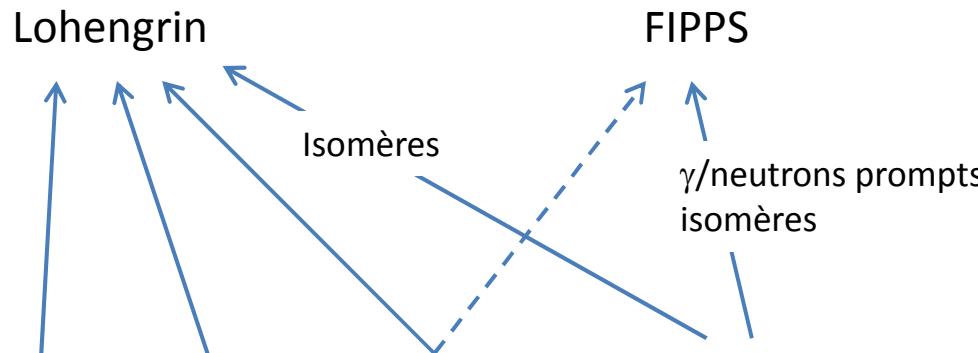
- Aller de l'expérience jusqu'à l'évaluation en considérant les benchmarks
- Des mesures différentielles aux mesures intégrales
 - rendements de fission
 - γ /neutrons prompts & $P(E^*,J,\pi)$
 - énergie β/γ par fission et par masse

Conclusion (2/3)

- Programme sur les mesures-évaluées des rendements dans la région des fragments lourds
 - *Rendements* en masse et en charge + corrélations expérimentales
 - *Projet* d'ouverture du programme sur la question des *mesures différentielles de la puissance résiduelle*
- Projet de bibliothèque de données indirectes pour la déduction des distributions de spin et du partage de l'énergie d'excitation des fragments de fission
 - *Pérennisation des données* : conserver l'information avant normalisation
 - mise en œuvre d'outils performant pour évaluer les paramètres des modèles et/ou *tester leurs hypothèses*
 - Développement d'un projet dédié à l'analyse des particules promptes :
FIPPS nouvel instrument porté par l'ILL et complémentaire au spectromètre Lohengrin
- Projet de mesures dans la région des fragments symétriques pour tester les modèles
 - *développement d'évaluation* utilisant comme *prior* les modèles validées
 - être force de proposition au JEFF meeting sur de nouvelles évaluations considérant les corrélations des données comme des modèles
 - Projet NEEDS de la communauté

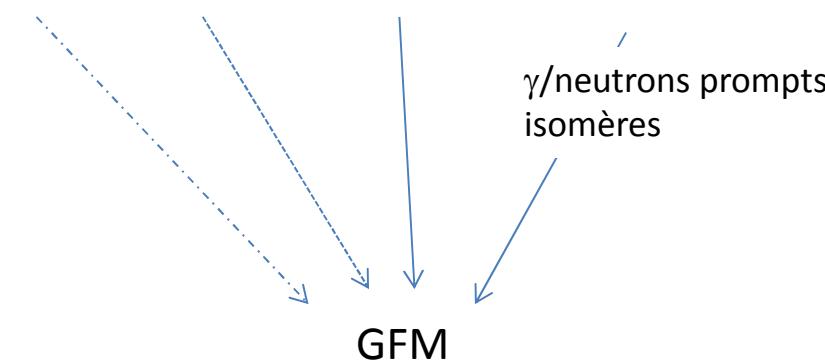
Conclusion (3/3)

Spectre de neutrons thermiques



$$Y(A, Z, E_k, J, \pi) = Y(A) \cdot P(Z|A) \cdot P(E_k|A, Z) \cdot P(J, \pi|A, Z, E_k)$$

Mass Charge Kinetic energy spin ➤ distributions

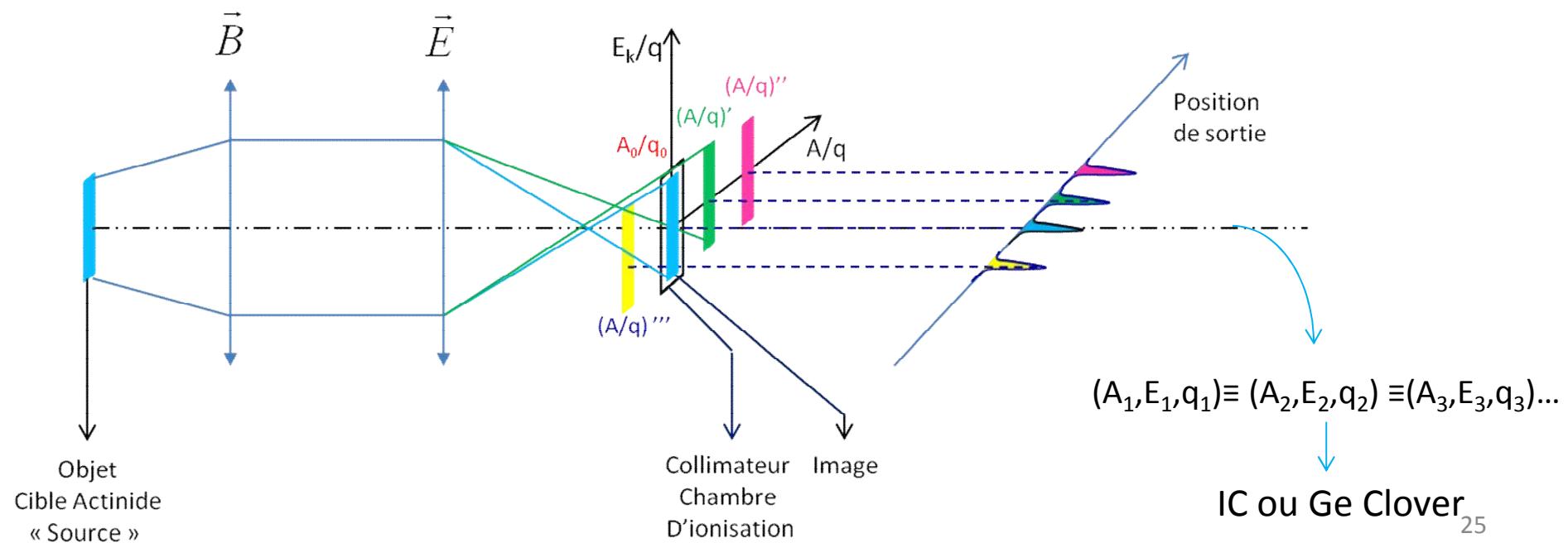
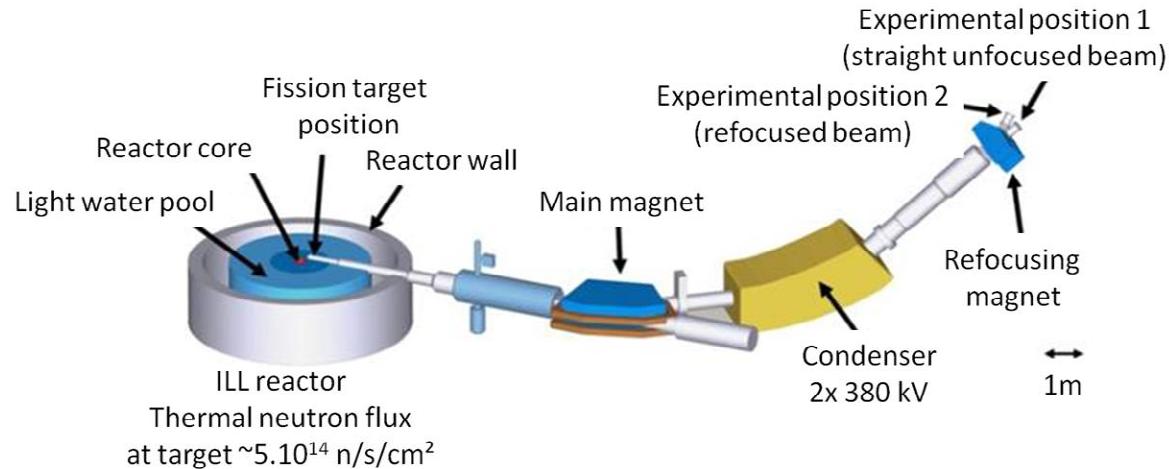


Spectre de neutrons rapides

Backup

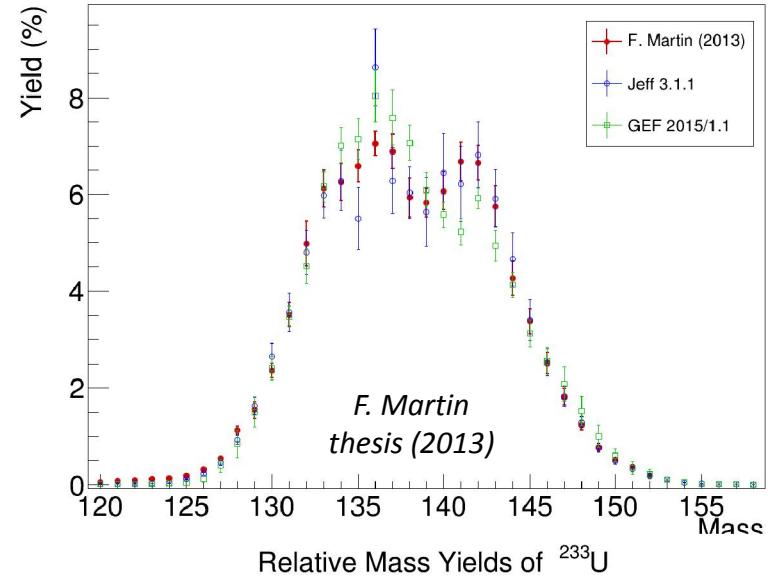
Backup... j'ai dit

3- Le spectromètre Lohengrin



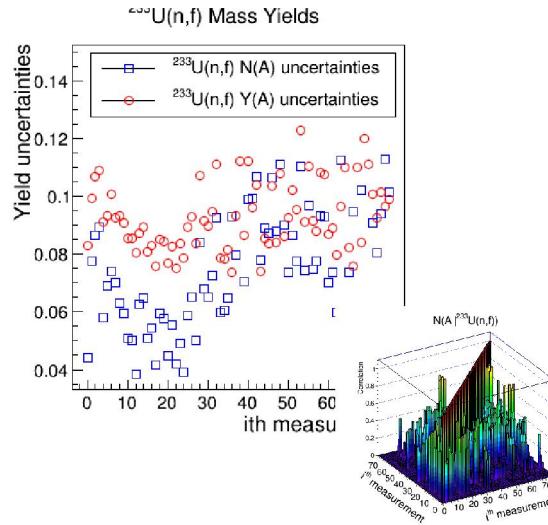
Highlight of the results $^{233}\text{U}(n_{th}, f)$

Mass Yield of ^{233}U

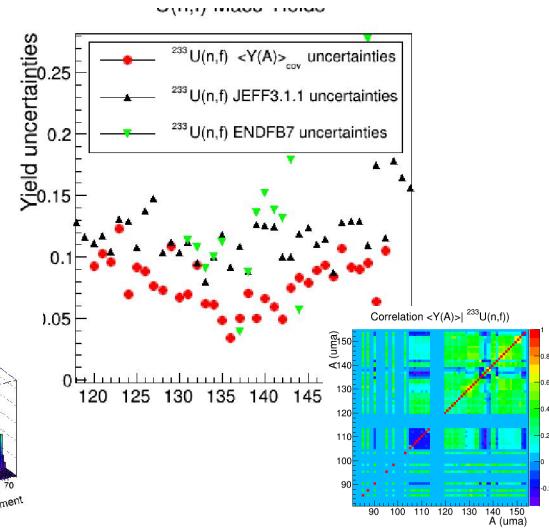


G.Kessedjian

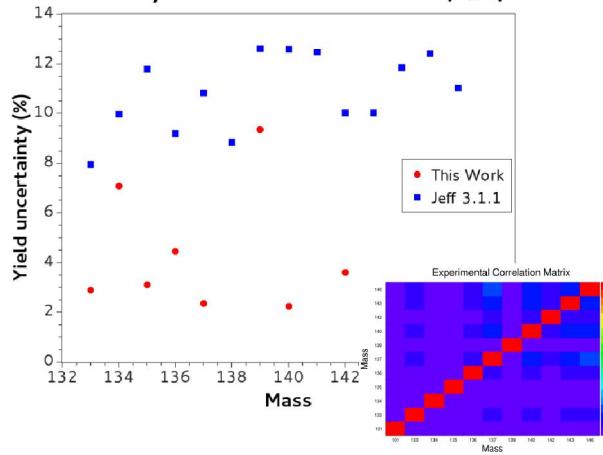
Impact of normalization



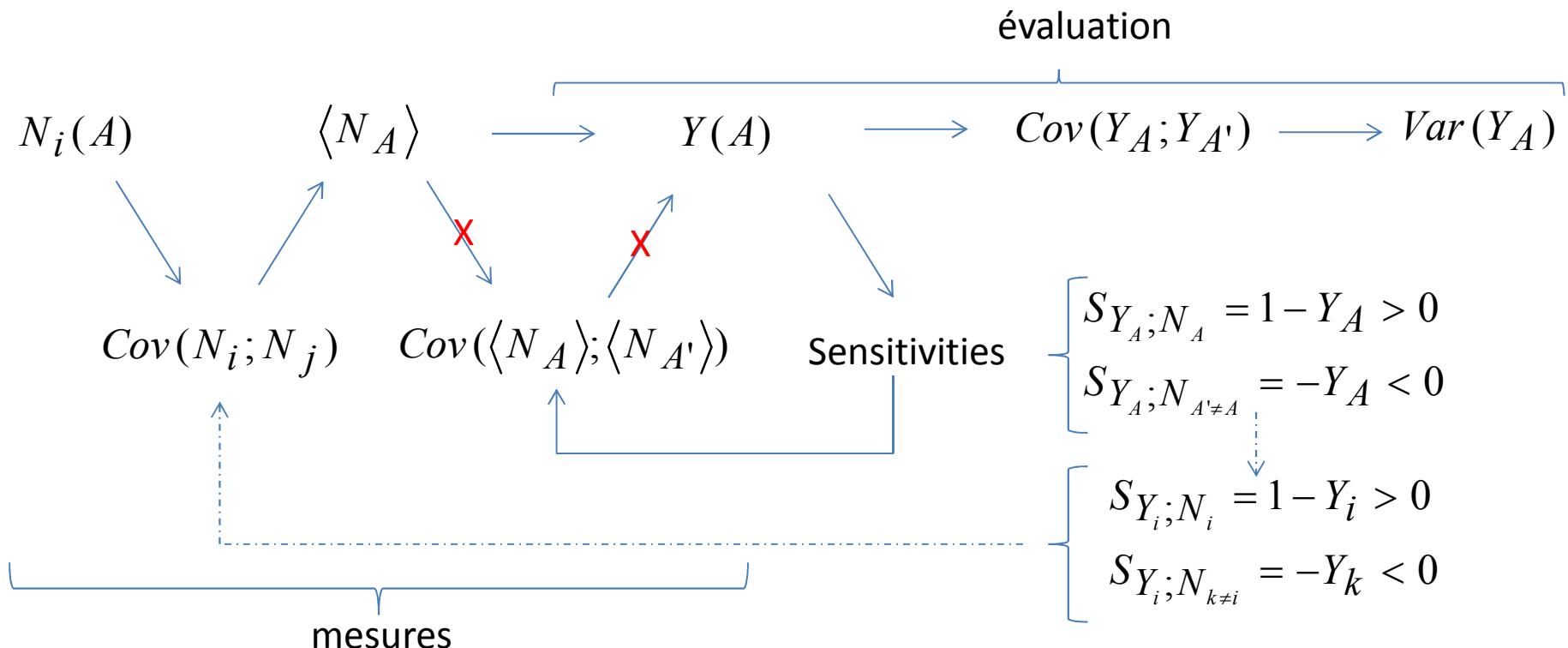
Yield uncertainties



Mass yield uncertainties of $^{233}\text{U}(n_{th}, f)$



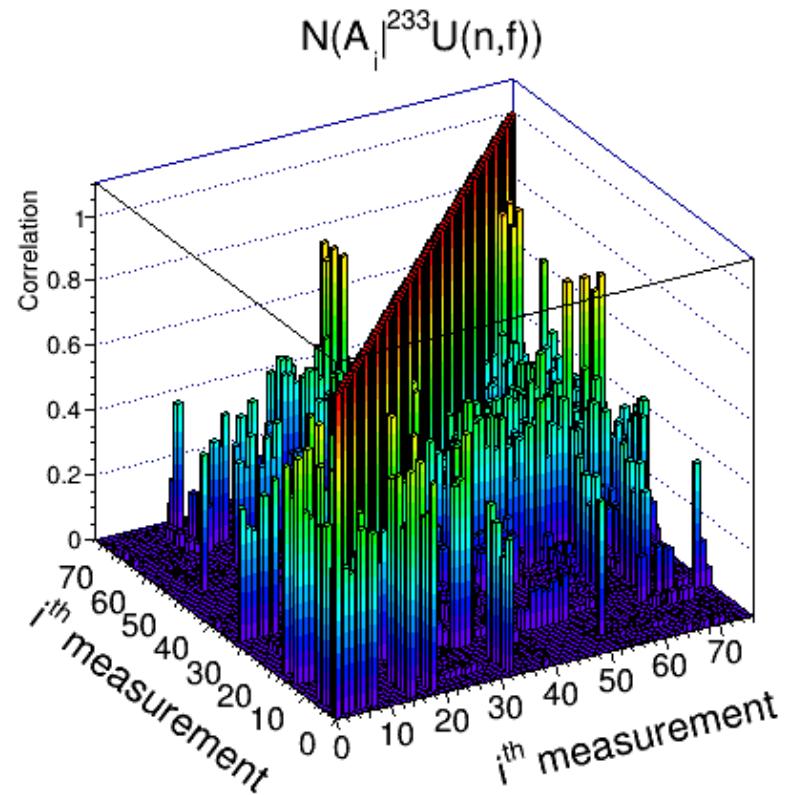
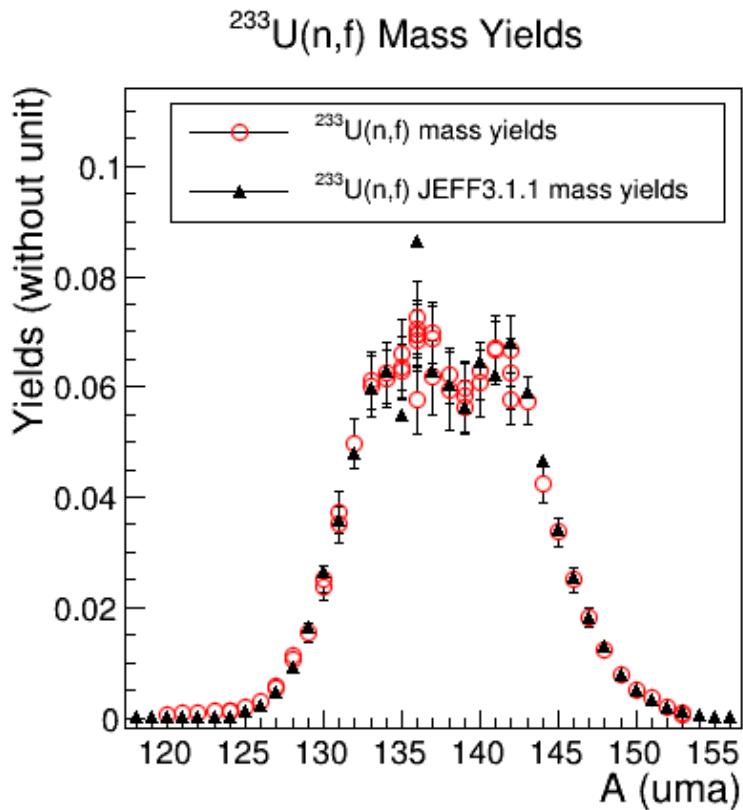
4- ND Directes : De la mesure à l'évaluation des rendements en masse



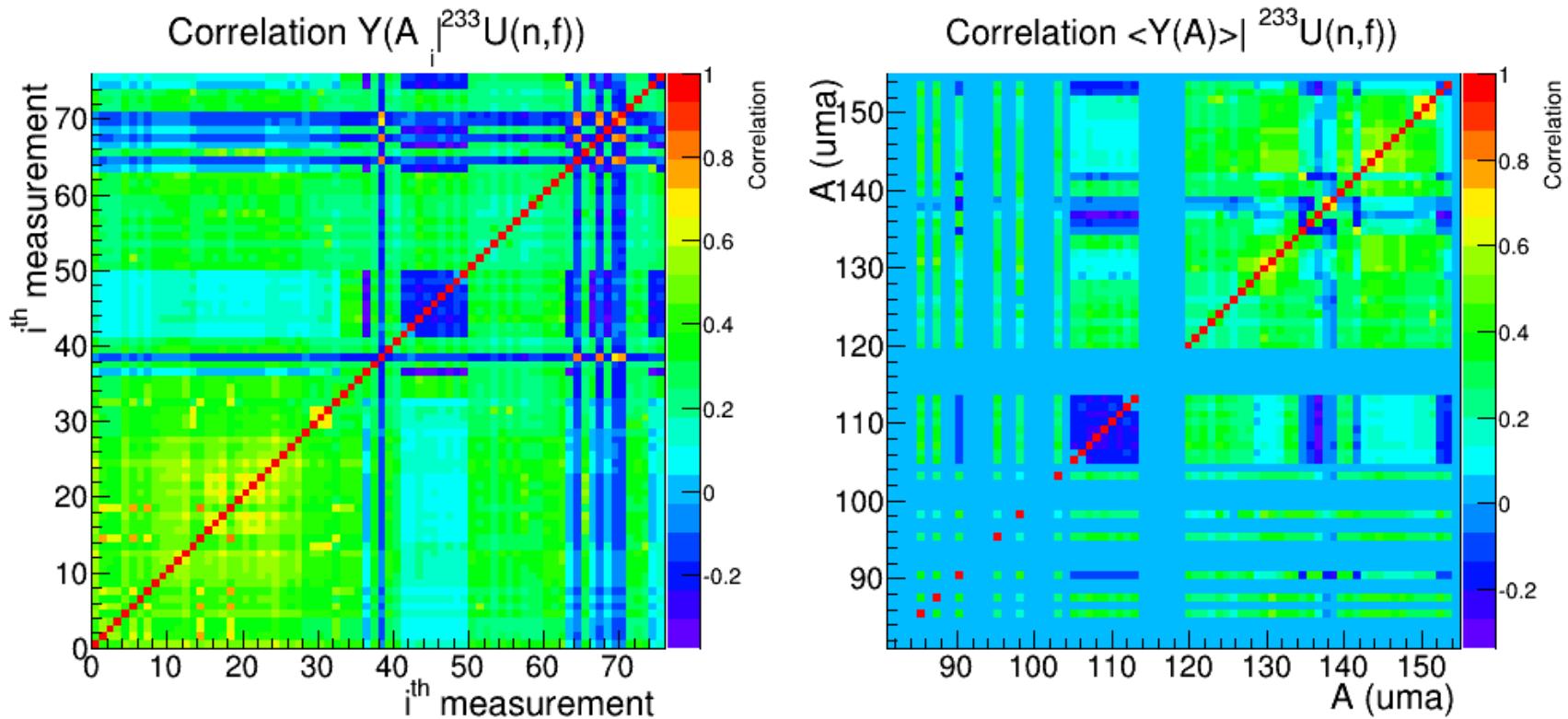
$N_A \rightarrow$ Low acceptance \rightarrow Binomial distribution

$Y_A \rightarrow$ constraint \rightarrow multinomial distribution

$$\sum_{\text{Heavy } A} Y(A) = 1$$



4- ND Directes : De la mesure à l'évaluation des rendements en masse



- La corrélation des rendements est une combinaison de termes positifs dus aux incertitudes systématiques et de termes négatifs dus à l'auto-normalisation
 - Ce travail permet de conclure sur la forme caractéristique des matrices de covariances des rendements i.e. structure autour de zéro
- Néanmoins, cette matrice est l'image des choix de l'analyse :
 - caractérise la spécificité du travail

2- La problématique des rendements de fission

$$Y(A, Z, E_k, J, \pi) = Y(A) \cdot P(Z|A) \cdot P(E_k|A, Z) \cdot P(J, \pi|A, Z, E_k)$$

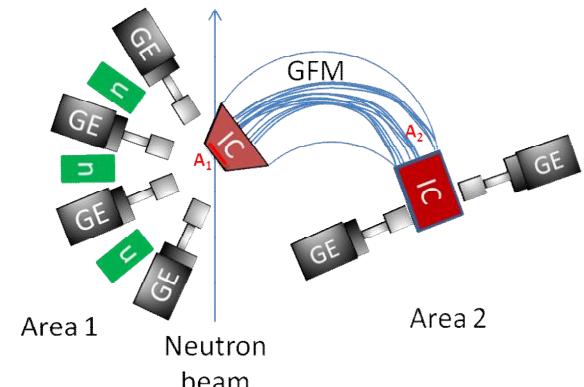


- **Rapports Isomériques : Mesures sur Lohengrin**

- Min/s isomères : ^{136}I , ^{132}Sb , ^{130}Sb , ^{129}Sn , ^{99}Nb , ^{98}Y
- μs isomères : ^{136}Xe , ^{132}Te , ^{132}Sn , ^{129}Sb , $^{94,98,99}\text{Y}$, ^{88}Br
- ns isomères : tous les isotopes dans la région des fragments lourds

+4 more Ge detectors
out of plane

IC : double ionization chamber
n : neutron detectors
Ge : Ge clovers



- **Objectif de FIPPS :**
 - Mesures directes des particules promptes (γ et neutron)
 - Spectroscopies des noyaux riches en neutrons
 - Isomères de courtes durées de vie (ps, ns)
 - Partage d'énergie d'excitation dans la fission

Backup... j'ai dit