

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-Lafferrière, 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

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 $\rightarrow {}^{233}\text{U}(n,f)$ & ${}^{239}\text{Pu}(n,f)$ & ${}^{241}\text{Pu}(n,f)$

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

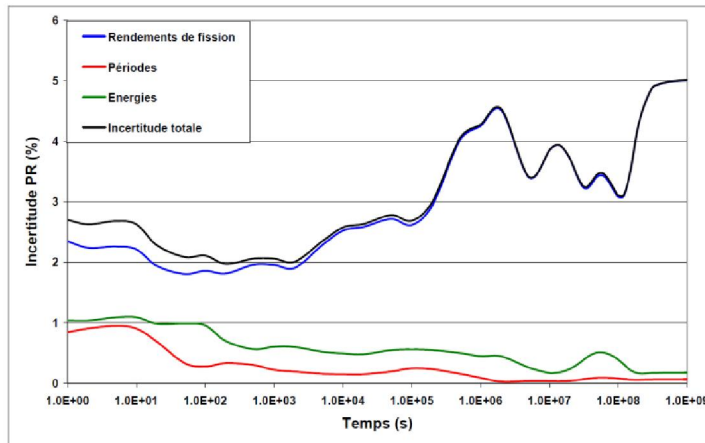
3-3- Etude expérimentale et modélisation des GFM comme filtre de fragments de fission

4- Perspective : projet de futur instrument FIPPS

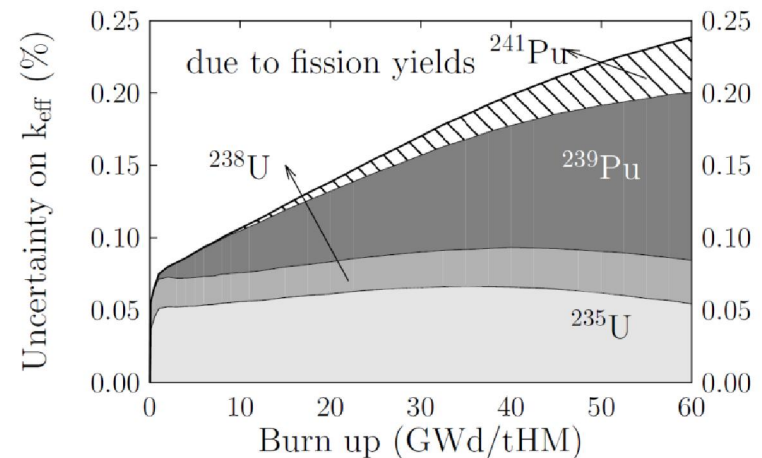
1- La problématique des rendements de fission

- 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 utilisé
- **Etudes expérimentales de combustibles** : Rendements cumulés et sections efficaces de réactions nécessaires pour la comparaison Calculs/Expériences (A=125, 134 ...)
- **Modélisation des γ prompts** émis par le combustible (Fifrelin, GEF...)



J.C. Benoit, Thesis (2012)



D.F. da Cruz, Nucl. Data Sheets, 118 (2014)

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 utilisé
 - Etudes expérimentales de combustibles : Rendements cumulés et sections efficaces de réactions nécessaires pour la comparaison Calculs/Expériences (A=125, 134 ...)
 - 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
- Variance(Masse) = \sum Var(Isotope) + ... + \sum Cov (Isotopes) Variance(Masse) > Var(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

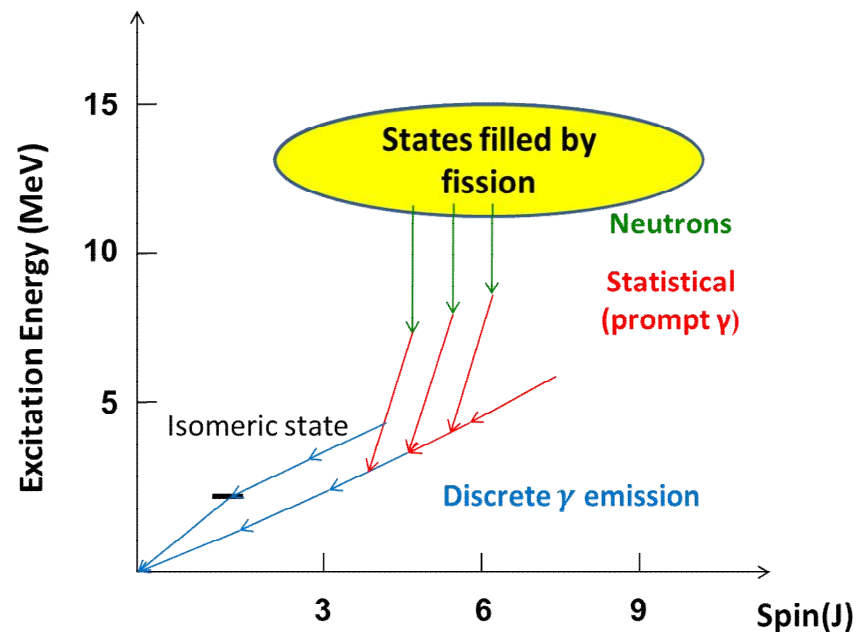


$$P(J, \pi|A, Z, E_k, IR) \quad P(J, \pi|A, Z, E_k, \gamma_{prompt})$$

Spectrométrie gamma (BEGe - HPGe)

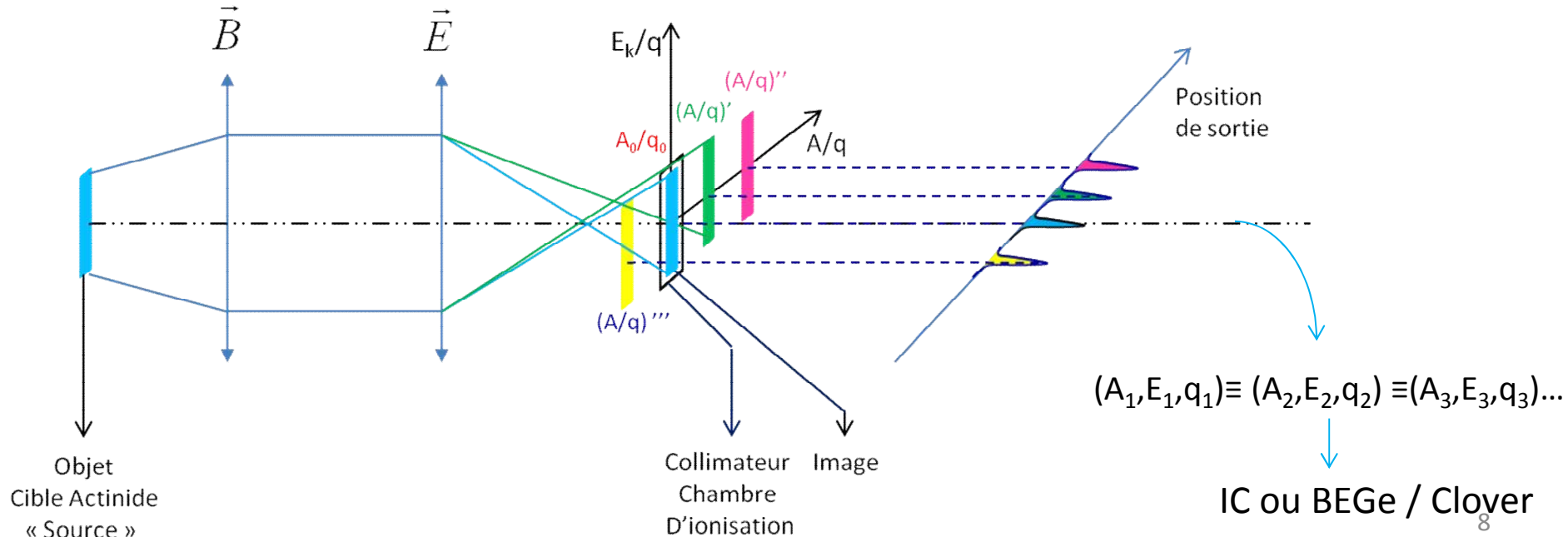
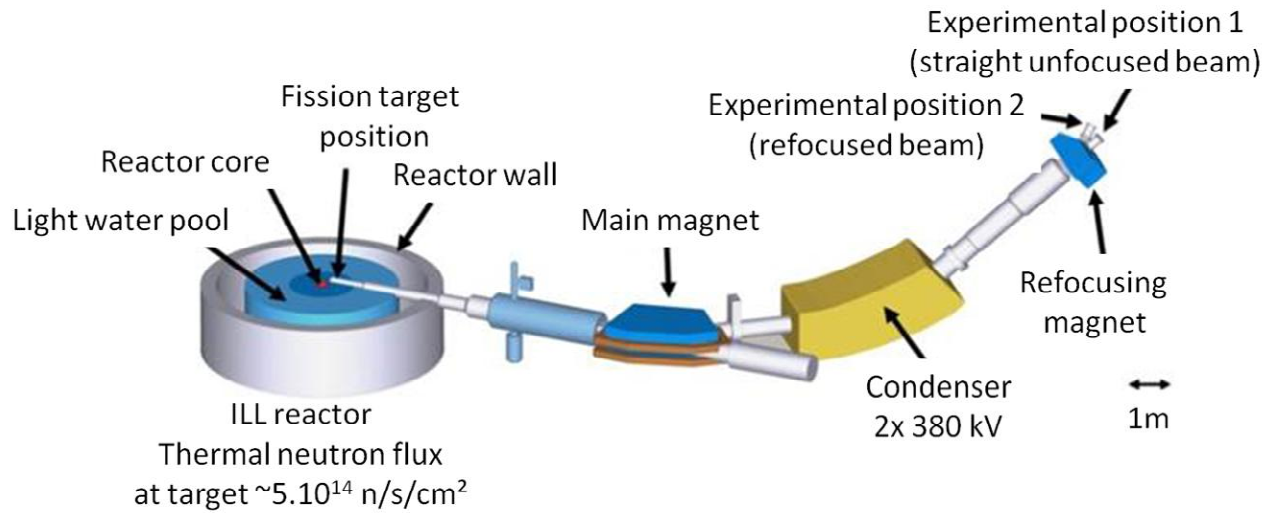
Description complète des analyses

- Evaluations / mesures : pas de covariances disponibles
- Masse = \sum Isotope
- Variance(Masse) = \sum Var(Isotope) + ... + \sum Cov
(Isotopes) Variance(Masse) > Var(Isotope majeur)



3- Projets en cours à l'ILL

3- Le spectromètre Lohengrin



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

• 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 :

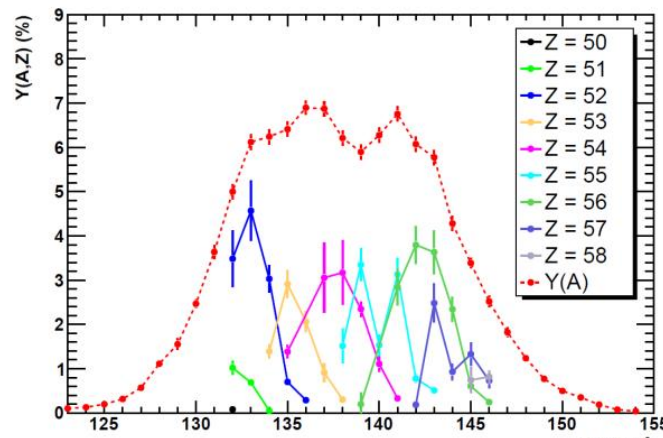
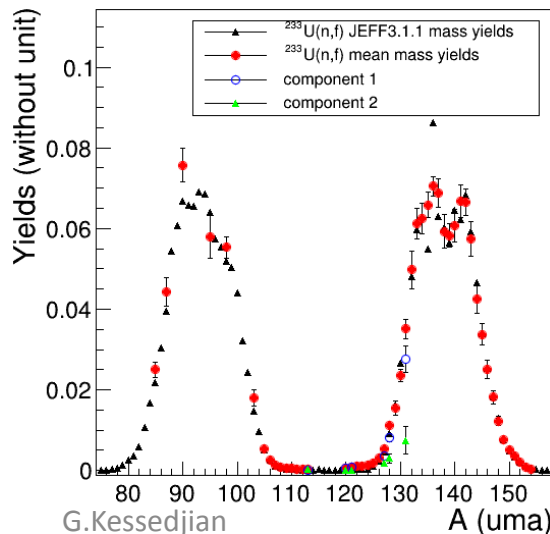
- en masse où il « suffit » de couvrir une région de masse \rightarrow **mesures absolues**
- en charge

\rightarrow identifier une masse où l'ensemble des isotopes est identifiable en spectrométrie γ

\rightarrow normaliser toutes autres mesures isotopiques sur le rendement en masse

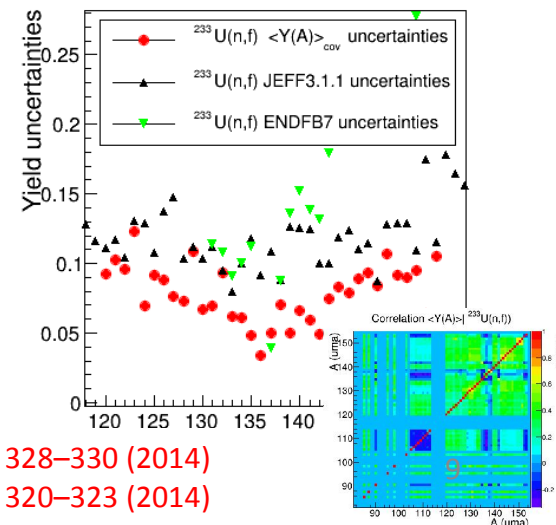
Thèses de
F.Martin (2010-2013) +
A.Chebboubi (2012-2015) +
S. Julien-Laferrrière (2015-2018)

${}^{233}\text{U}(n,f)$ Mass Yields

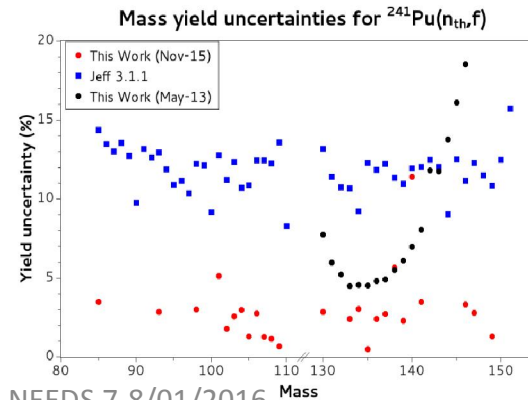
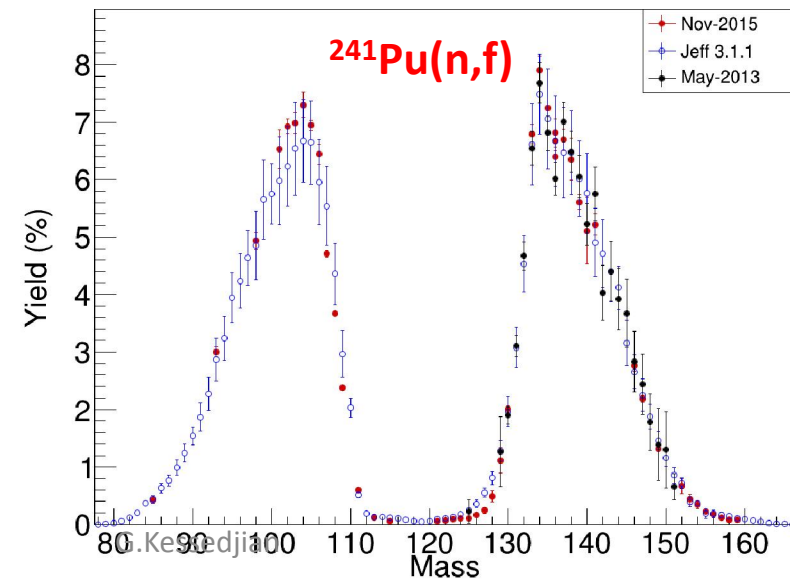
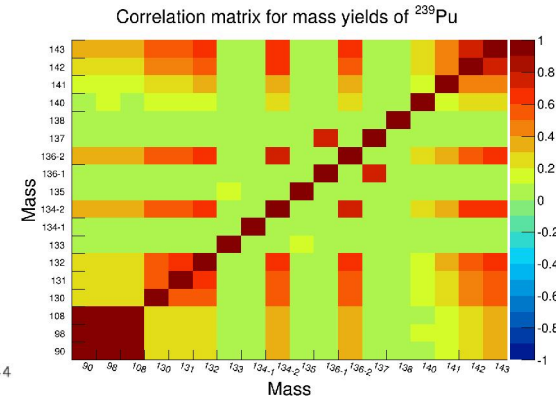
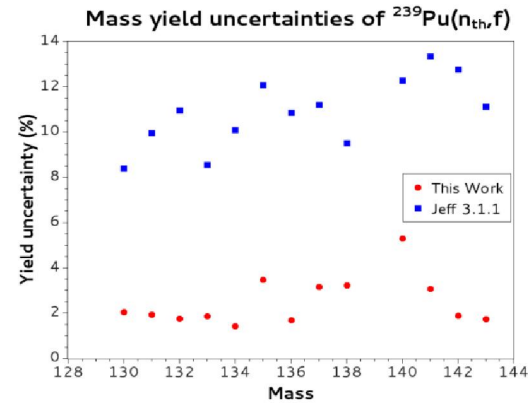
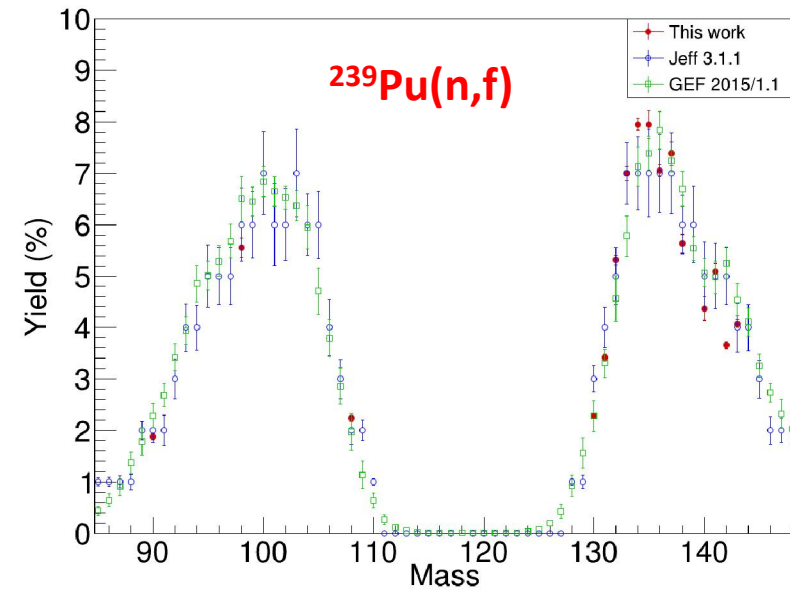


Nuclear Data Sheets, Volume 119, May 2014, Pages 328–330 (2014)
Nuclear Data Sheets, Volume 119, May 2014, Pages 320–323 (2014)

${}^{233}\text{U}(n,f)$ Mass Yields



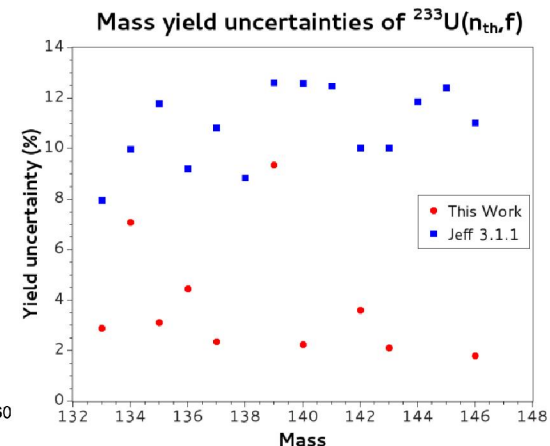
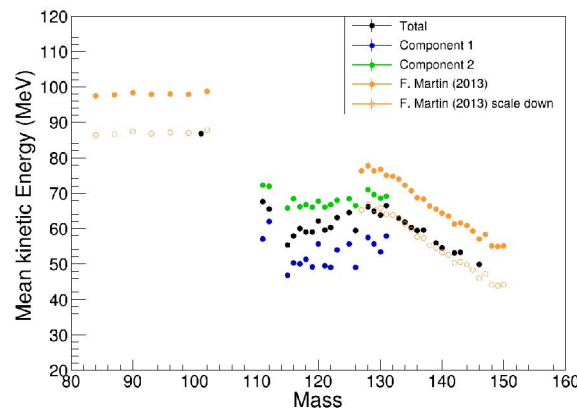
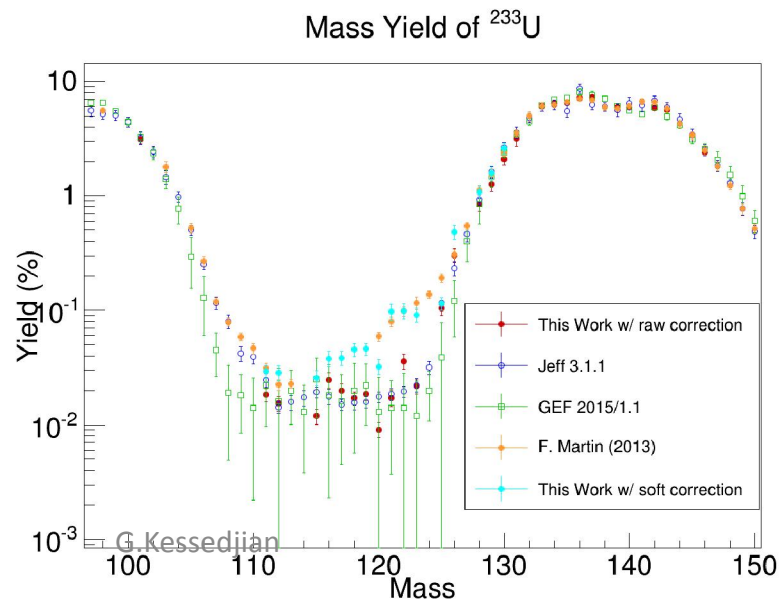
3-1- Mesures de rendements en masse et en charge $\rightarrow {}^{239,241}\text{Pu}(n,f)$



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

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

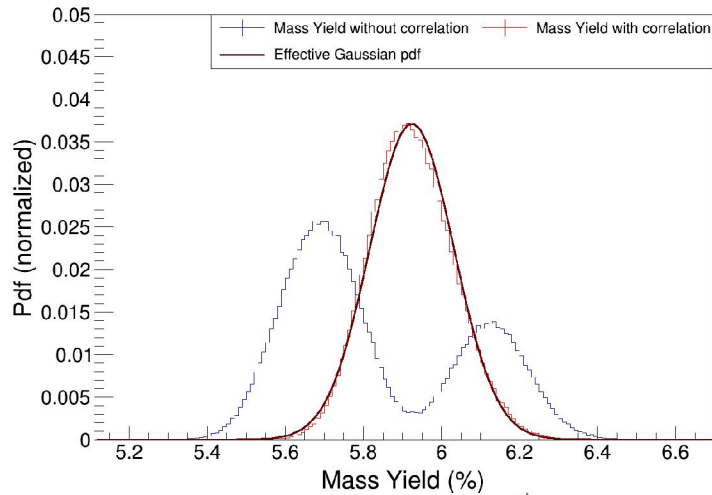
- Compréhension des **limites de l'instrument** actuel dans le cadre des **mesures de précision**
- **Identifier l'existence ou non de modes dans la fission de basse énergie** dans le but de valider des modèles phénoménologiques (GEF) et/ou microscopiques utiles à l'évaluation
 - Actuellement les **évaluations** 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



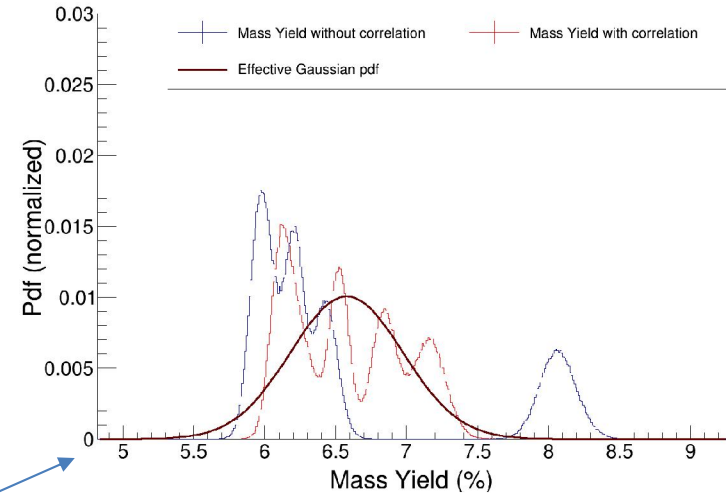
Thèses de A.Chebboubi (2012-2015)
Article en cours de rédaction

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

Mass Yield probability density function for A=140



Mass Yield probability density function for A=134

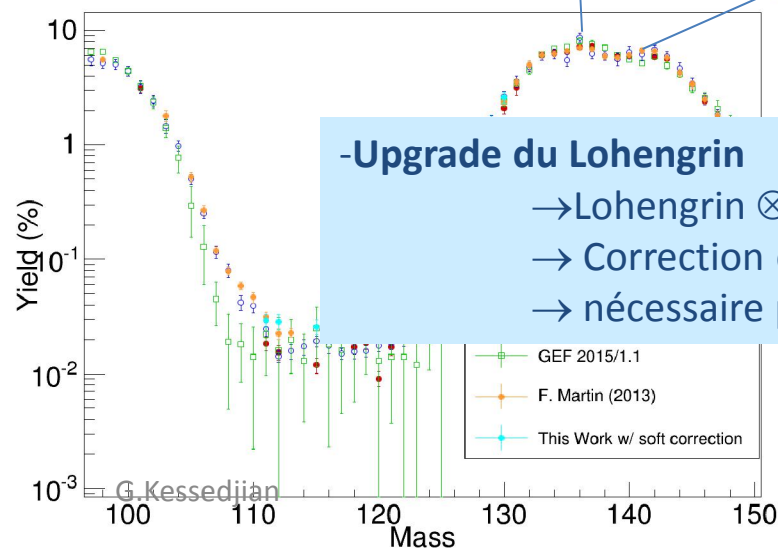


m, σ

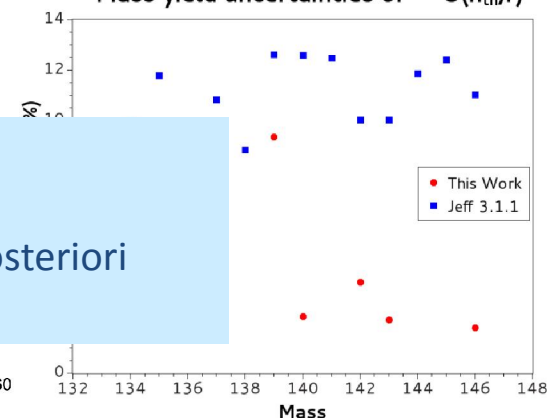
PDF des
mesures

Meta-analyse

Mass Yield of ${}^{233}\text{U}$



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



-Upgrade du Lohengrin

\rightarrow Lohengrin \otimes TOF

\rightarrow Correction en ligne des données et non a posteriori

\rightarrow nécessaire pour $Y(A) < 3\%$!!!!

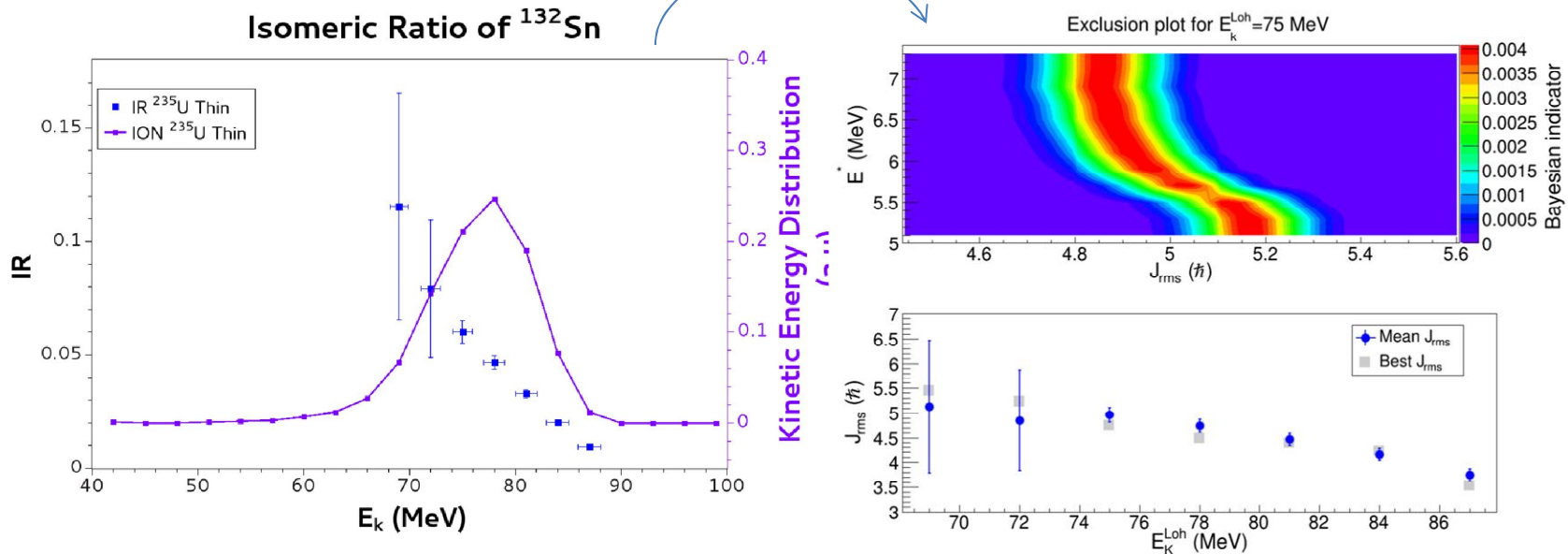
Thèses de A.Chebboubi (2012-2015)

Article en cours de rédaction

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

- (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. ${}^{132}\text{Te}$)
- couverture d'une large échelle de temps : isomères métastables, μs 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

FIFRELIN



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 ...)

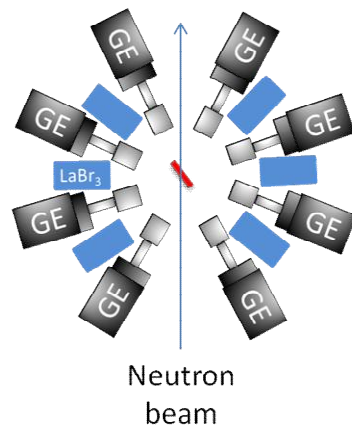
- *Upgrade du Lohengrin → Lohengrin \otimes GFM : → Chanda Project*

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

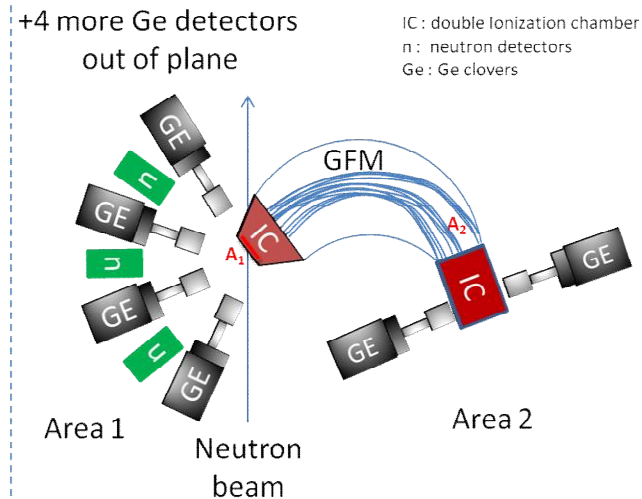
4- Perspective : projet de futur instrument FIPPS

4- Perspective : projet de futur instrument FIPPS

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



Configuration 1



Configuration 2

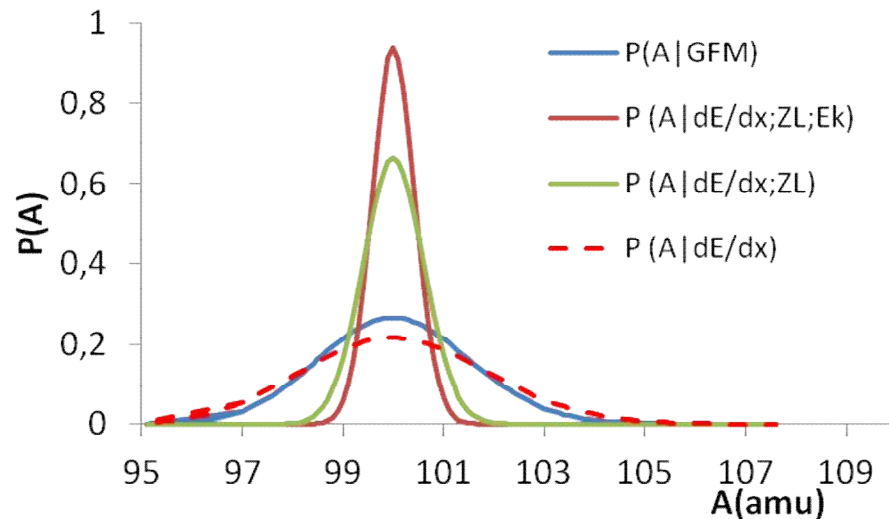
→ $(\gamma \otimes \text{Filtre FF}) \otimes \gamma_{\text{discret}}$

→ upgrade envisagé: TPC dans l'entrefer → gap de l'aimant Lxh = 40x 20 cm²

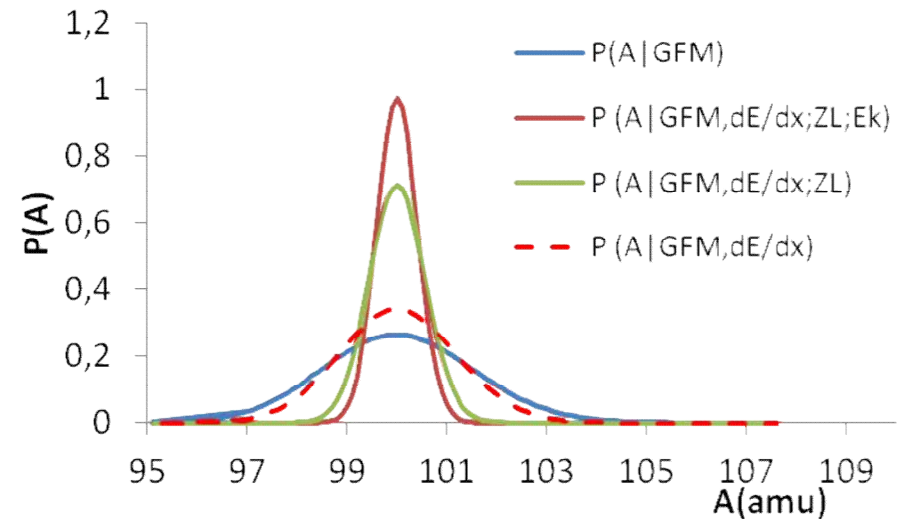
4- Perspective : projet de futur instrument FIPPS

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
ecartype %	1,5	0,4	0,6	1,8
FWHM	3,5	1,0	1,4	4,3

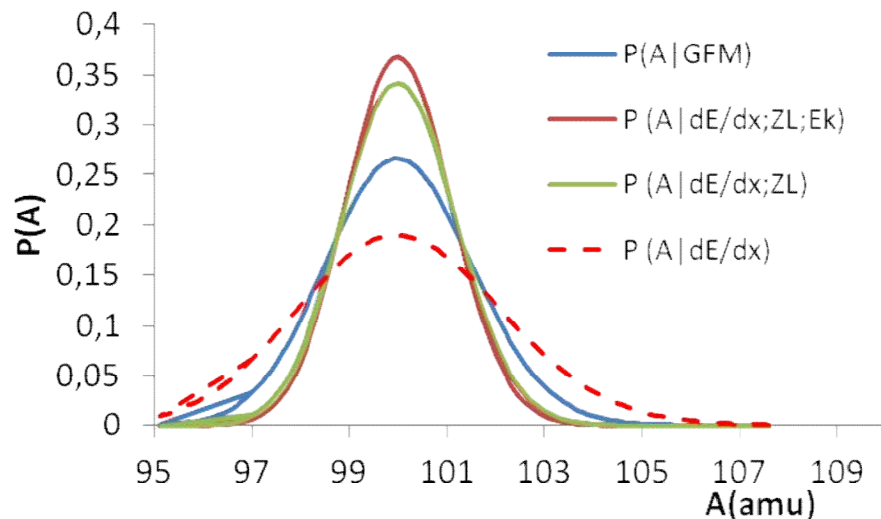
P(A GFM,dE/dx;ZL;Ek)	P(A GFM,dE/dx;ZL)	P(A GFM,dE/dx)
100	100	100
0,4	0,6	1,2
1,0	1,3	2,8

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

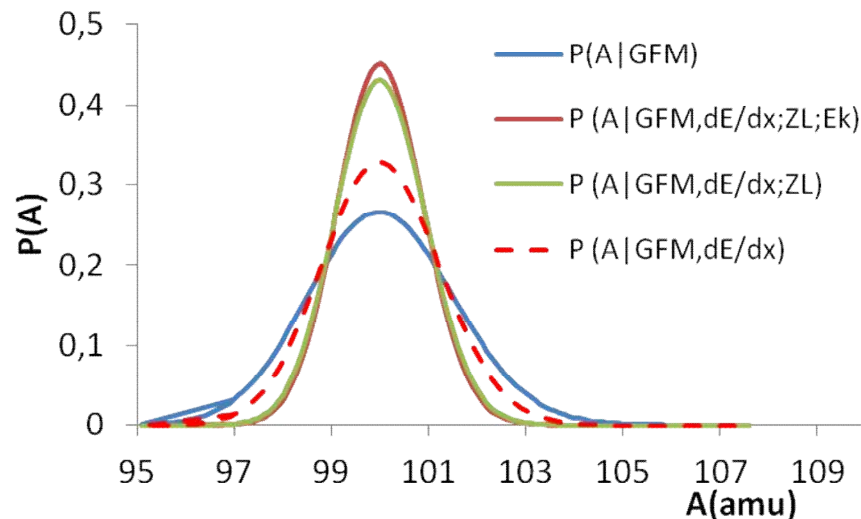
4- Perspective : projet de futur instrument FIPPS

Pouvoir de séparation et efficacité du filtre de fragments de fission

Résolution de l'instrumentation



Résolution attendue pour FIPPS



Nuisances de 1% (pression, T,)

	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

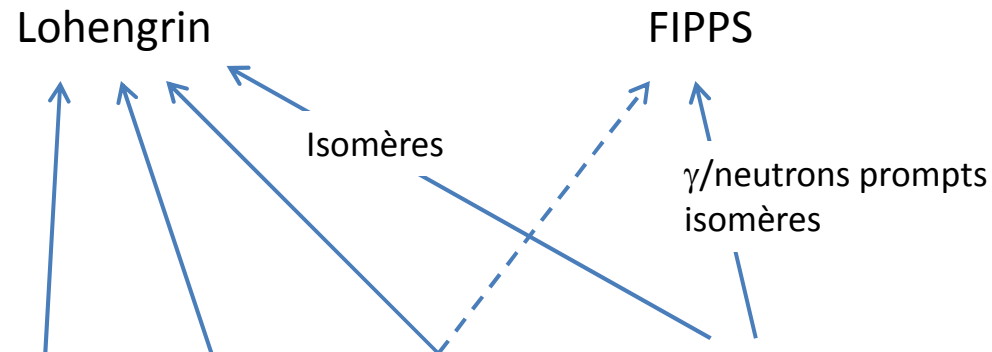
P(A GFM,dE/dx;ZL;Ek)	P(A GFM,dE/dx;ZL)	P(A GFM,dE/dx)
100	100	100
0,9	0,9	1,2
2,1	2,2	2,9

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

- **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
 - méta-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

- 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

Spectre de neutrons thermiques



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

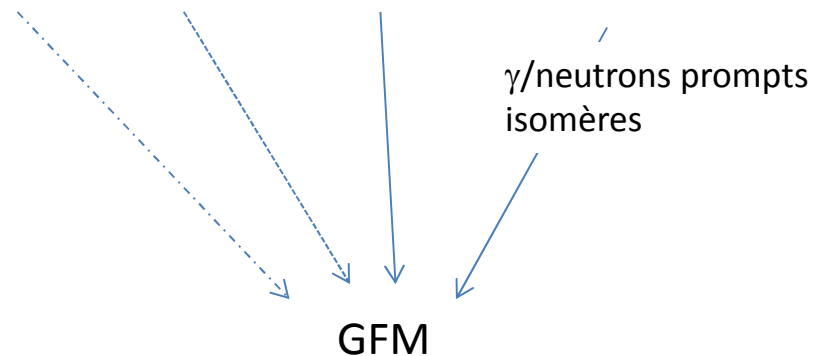
Mass

Charge

Kinetic
energy

spin

► distributions

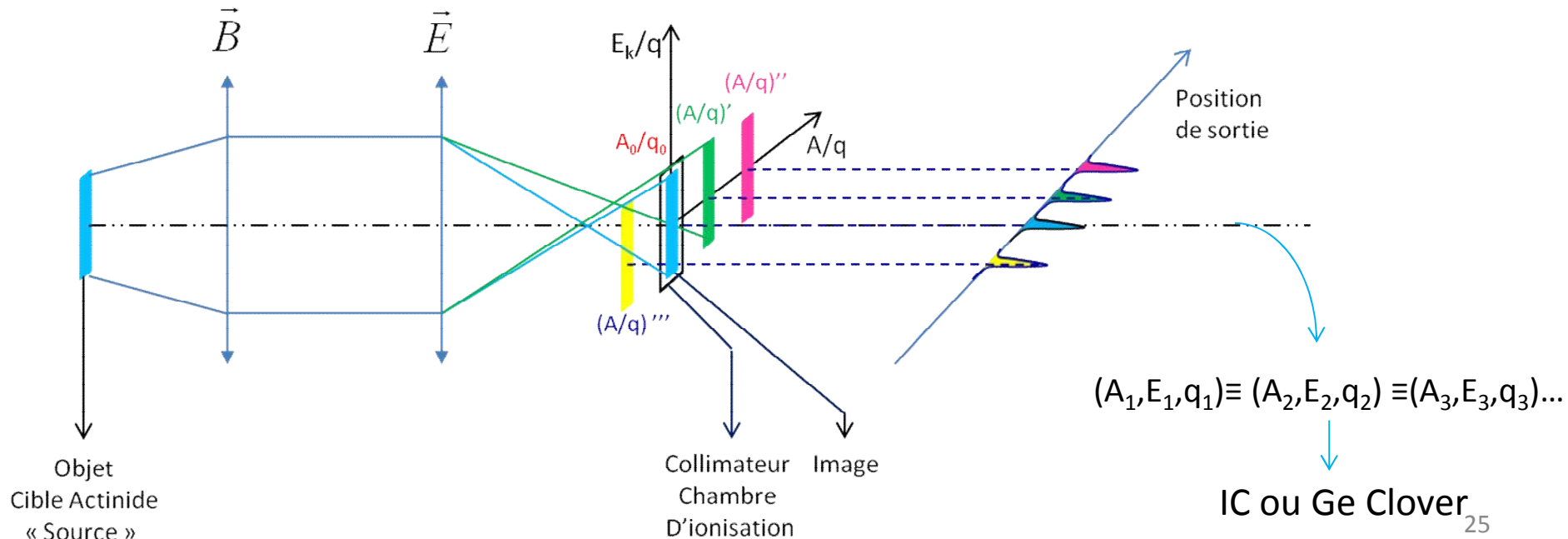
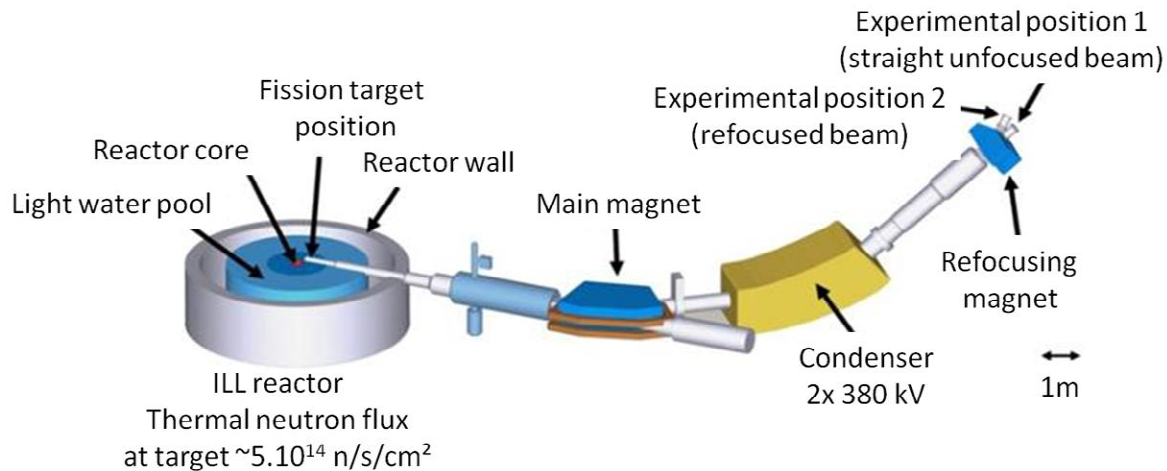


Spectre de neutrons rapides

Backup

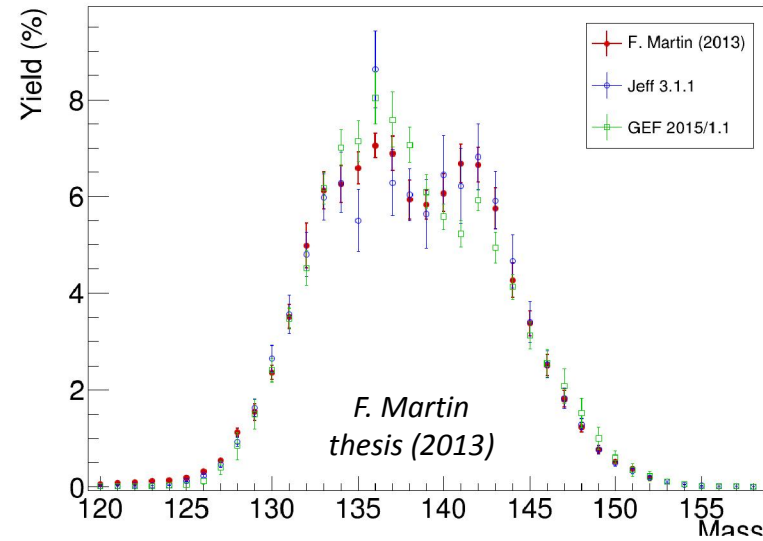
Backup... j'ai dit

3- Le spectromètre Lohengrin

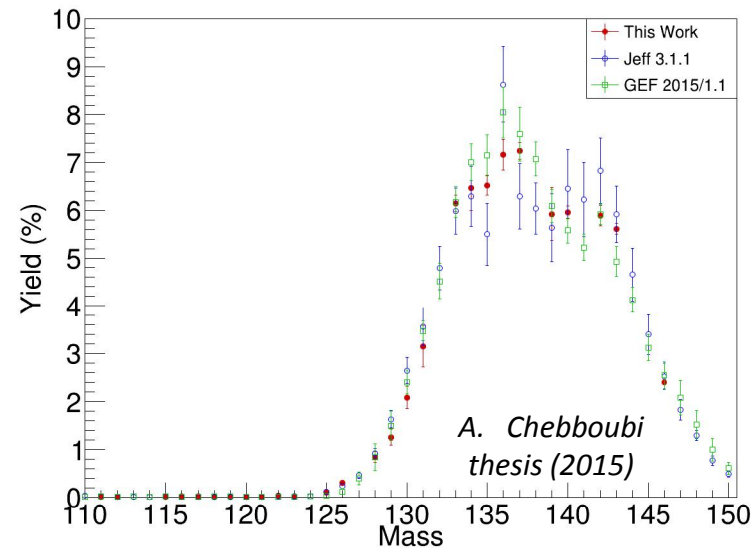


Highlight of the results $^{233}\text{U}(n_{th}, f)$

Mass Yield of ^{233}U

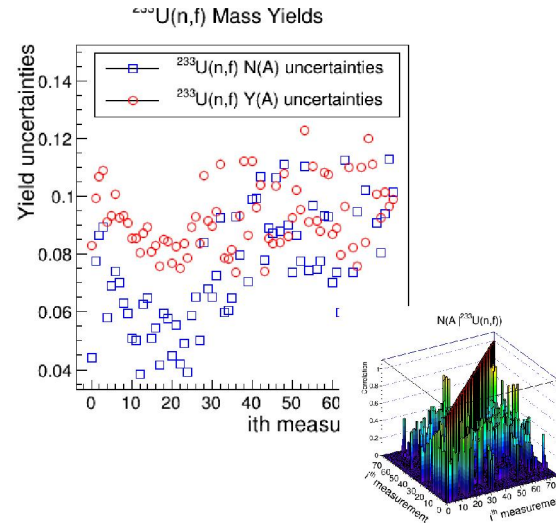


Relative Mass Yields of ^{233}U

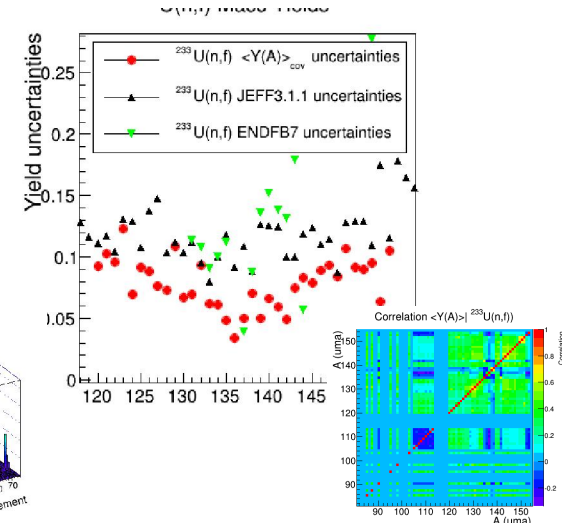


G.Kessedjian

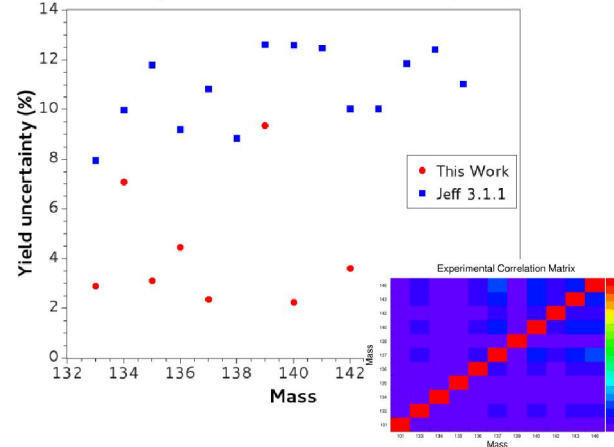
Impact of normalization



Yield uncertainties



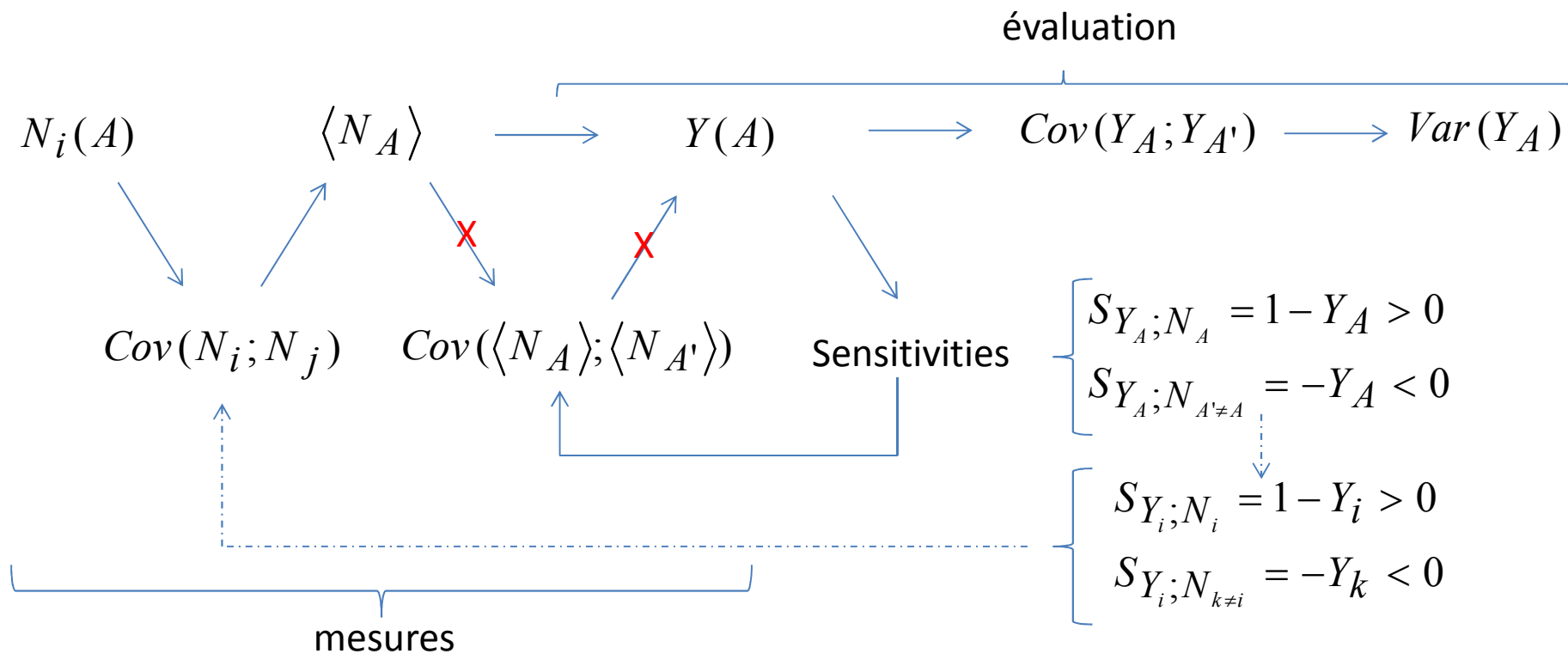
Mass yield uncertainties of $^{233}\text{U}(n_{th}, f)$



NEEDS 7-8/01/2016

26

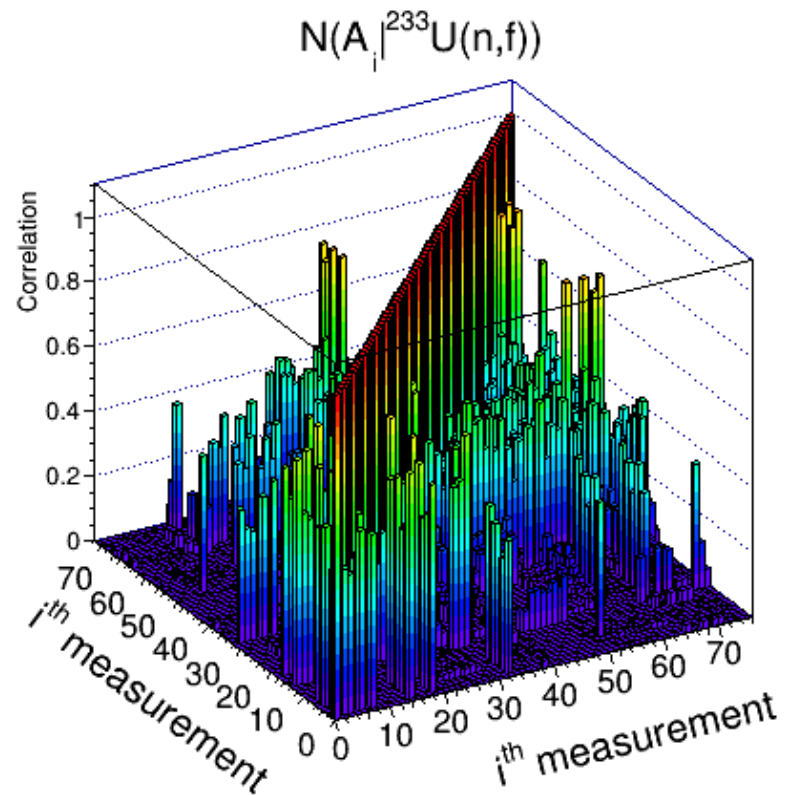
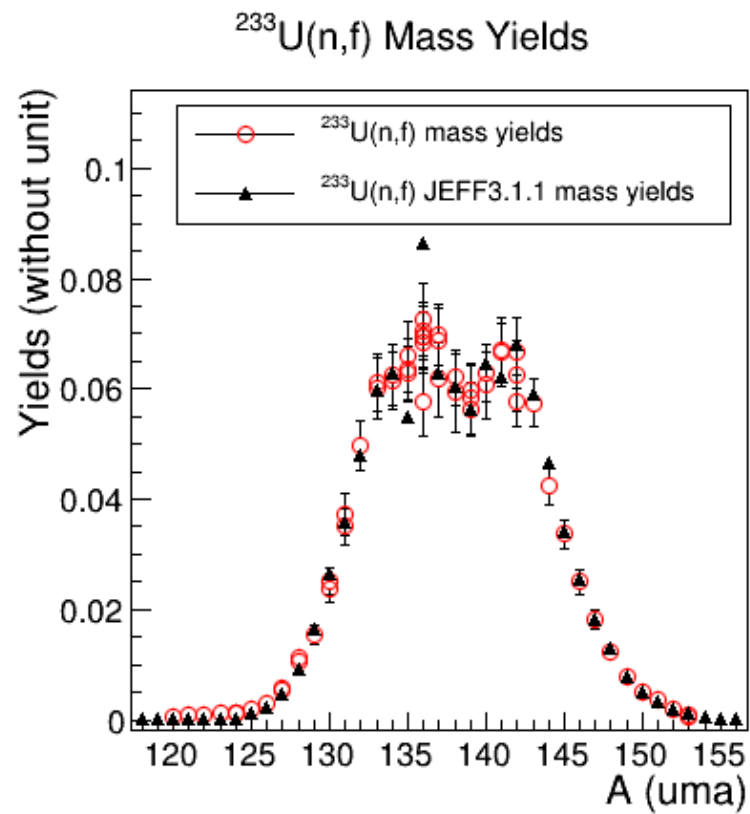
4- ND Directes : De la mesure à l'évaluation des rendements en masse



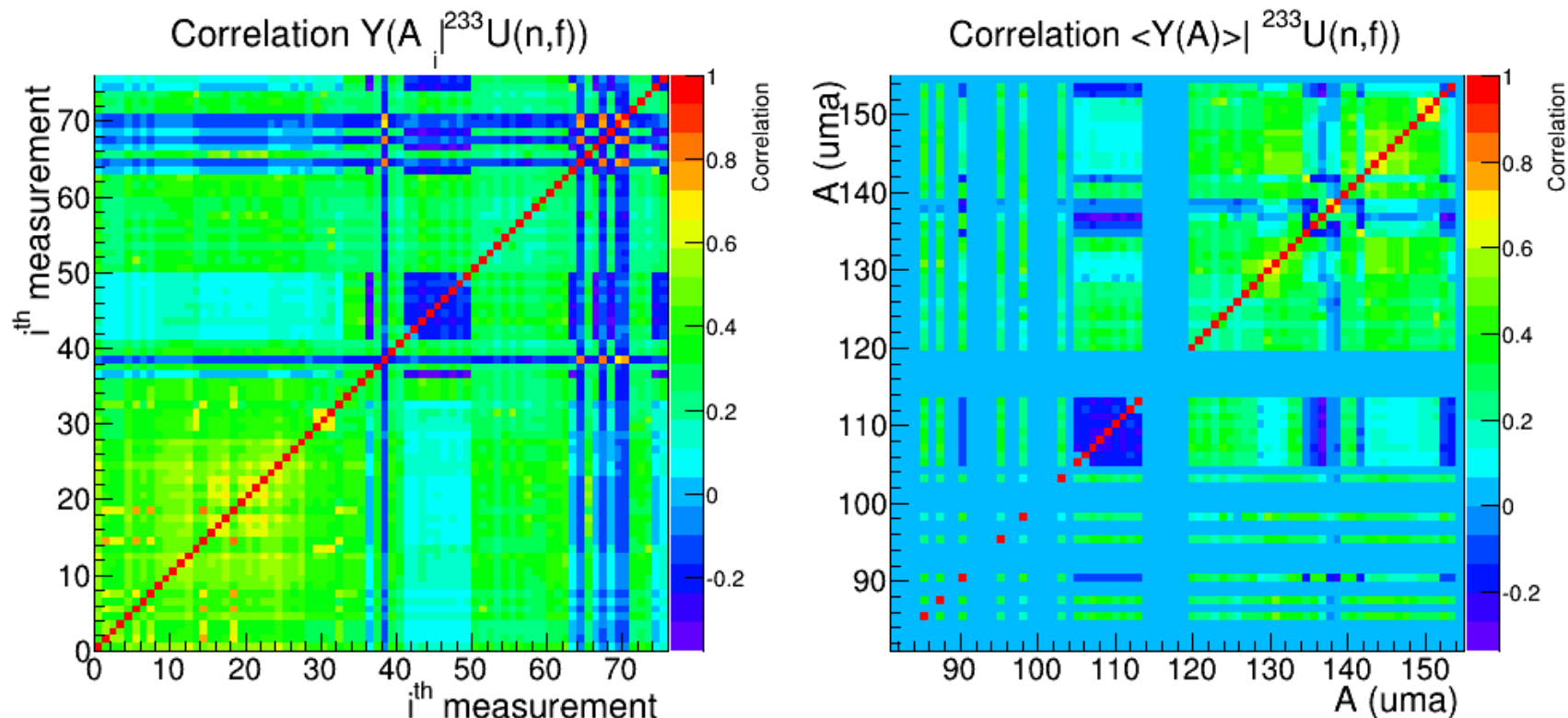
$N_A \rightarrow \text{Low acceptance} \rightarrow \text{Binomial distribution}$

$$Y_A \rightarrow \text{constraint} \rightarrow \text{multinomial distribution}$$

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



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

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

Mass

Charge

Kinetic
energy

spin

➤ distributions

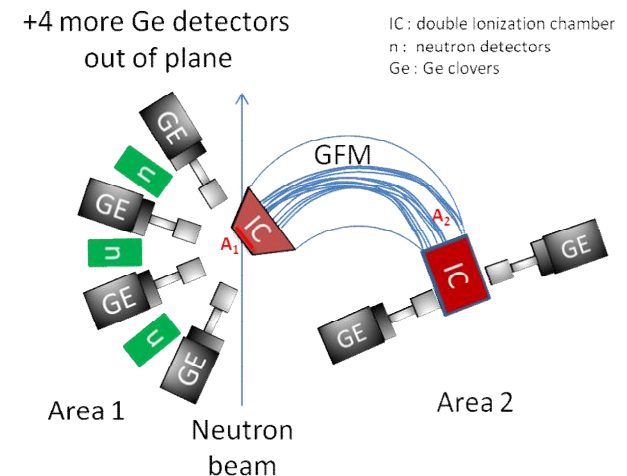
$$P(J, \pi|A, Z, E_k, IR)$$

$$P(J, \pi|A, Z, E_k, \gamma_{prompt})$$

• *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

- **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