

Données nucléaires

- Ensemble de grandeurs utiles aux applications nucléaires
 - Sections efficaces (fission, capture de neutrons, réactions inélastiques...)
 - Taux de production (gamma, neutrons, fragments de fission...)
 - Energie libérée
 - Grandeurs différentielles / intégrales
 - ...
- Ingrédients clés pour les calculs de cœurs de réacteurs
 - Mais aussi pour l'astrophysique, la médecine nucléaire...
- Des mesures aux applications, la route est longue !
 - Analyse des données
 - Evaluation (confrontation aux modèles et à des mesures similaires)
 - Révision des bases de données évaluées
 - Prise en compte par les acteurs

Challenges:

- Travailler avec des noyaux radioactifs
- (ou trouver le moyen de s'en passer)
- Précision !

Applications ou physique fondamentale ?

- Les 2, mon capitaine !
- L'évaluation a besoin de modèles précis...
- ... qui doivent se baser sur une physique bien comprise
- Nombreuses questions ouvertes sur la fission :
 - Rôle des couches dans la fission
 - Répartition de l'énergie d'excitation
 - Evolution de la fission sur une large gamme de noyaux
 - Rôle de la dynamique dans le processus de fission
 - Quels états peuplés dans les configurations très déformées
- Les développements techniques n'ont pas frontière
- Le même système peut servir plusieurs objectifs

L'équipe « données nucléaires »

Les gens :

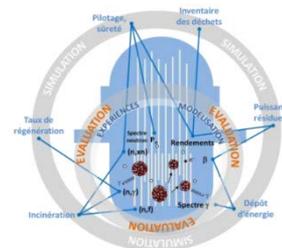
- Laurent Audouin (EC Paris-Sud)
- Diego Ramos (Post-doc, P2IO -> déc. 2018)
- *Et jusqu'à il y a peu :*
 - Laurent Tassan-Got (CNRS, retraite 2016)
 - Yonghao Chen (PhD, 2017)
 - Yiman Yan (PhD, 2016)

Activités :

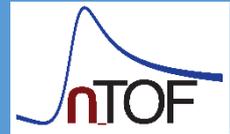
- **Sections efficaces de fission & distributions angulaires : n_TOF**
- **Production de fragments de fission : SOFIA @ GSI**
- Distribution des fragments de fission par transfert (GANIL)
- Méthode “surrogate” pour les sections efficaces de fission et de capture (CENBG, expériences à l'IPNO)

Réseau :

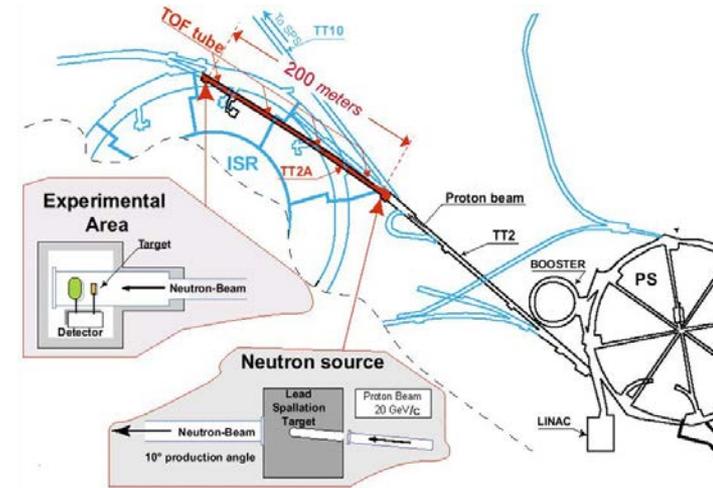
- NEEDS / NACRE



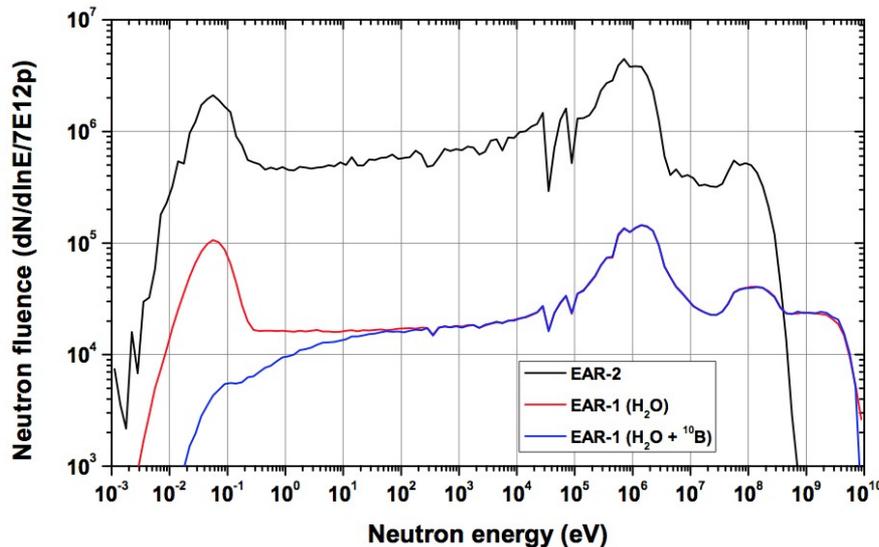
Fission induite par neutrons : n_TOF (CERN)



- (quasi-)faisceau de neutrons
- Gamme d'énergie unique : 25 meV to 1 GeV
- 2 aires expérimentales :
 - Base de vol de 200 m (résolution en énergie)
 - Base de vol de 20 m (flux)
- Optimisée pour les cibles radioactives
 - Faible cycle utile
 - Secteurs « type A »



Equipe IPNO : sections efficaces de fission

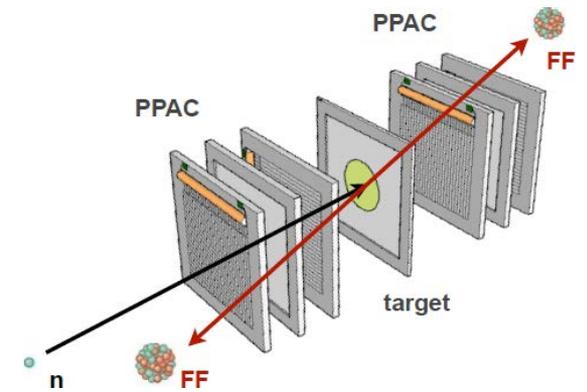


Neutron Energy	EAR2: $L_0 = 18.9 \text{ m}$	EAR1: $L_0 = 187.5 \text{ m}$
	$\Delta E/E$	$\Delta E/E$
1 eV	4.3×10^{-3}	3.0×10^{-4}
1 keV	8.5×10^{-3}	5.4×10^{-4}
1 MeV	4.1×10^{-2}	3.6×10^{-3}

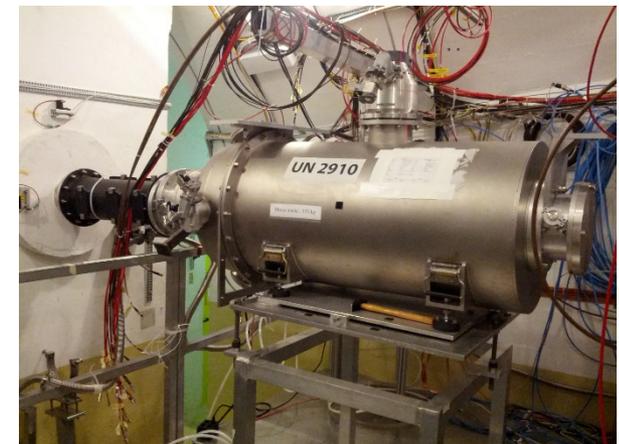
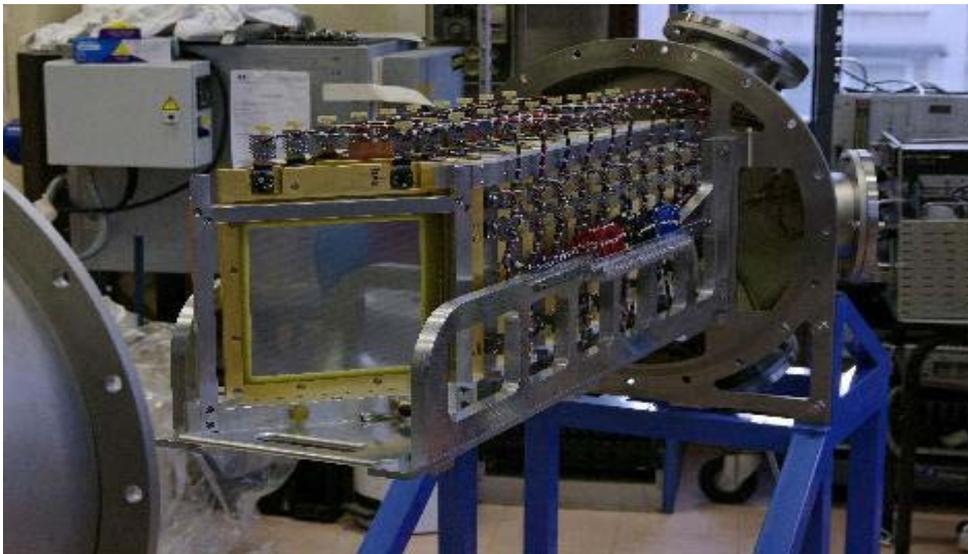
Principe des mesures, détecteurs



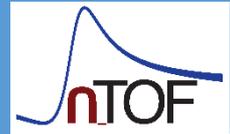
- Détection des fragments en coïncidence
 - Rejet des réactions de haute énergie
 - Localisation des fissions
- Détecteurs ultra-rapides
- Détecteurs très transparents
 - Flux non-perturbé
 - Peu sensibles au flash gamma
- Cibles larges et ultra-minces
- 9 cibles par mesure



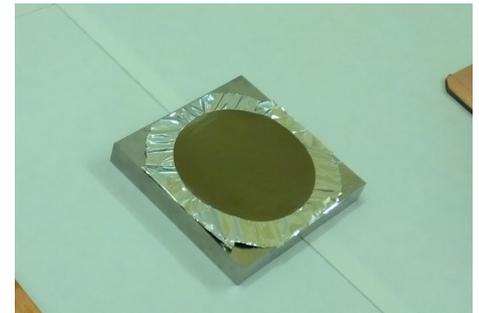
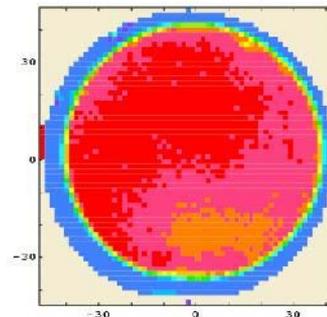
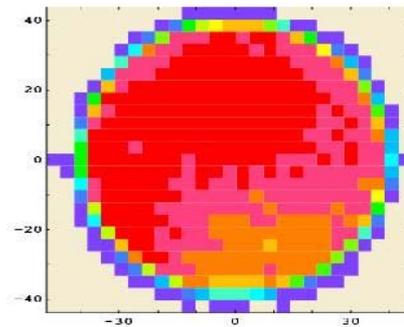
- Détecteur à plaques parallèles**
- ✓ 2 cathodes segmentées, 1 anode
 - ✓ Surface active : 20 cm x 20 cm
 - ✓ Position via ligne à retard



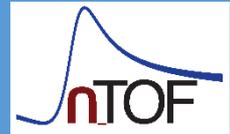
Les cibles



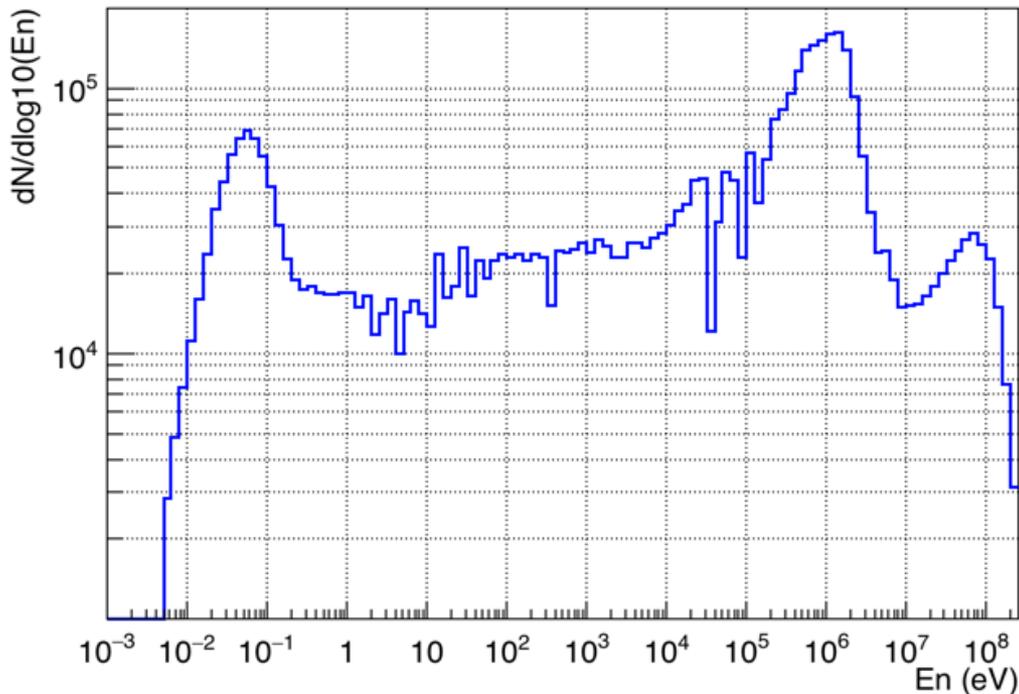
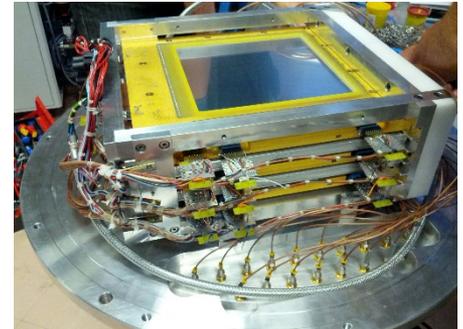
- Développées et fabriquées et Claire Le Naour (et al.)
- Electro-dépôt en milieu alcoolique
- Diamètre 8 cm et 1 cm
- Support Al 2 μm puis 0,7 μm
- Caractérisation par spectro α
 - Répartition de la matière sur la cible
 - Etat de surface
 - + Mesures RBS : abondance d'éléments légers !



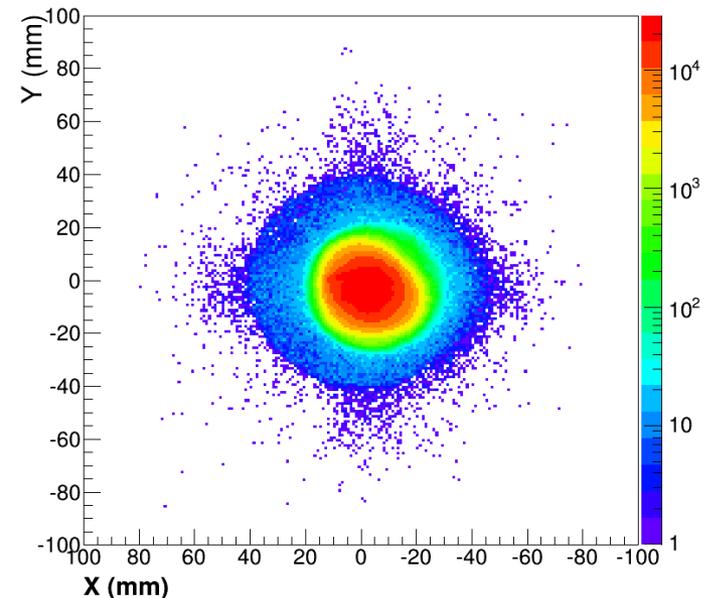
Commissioning du faisceau



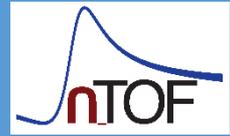
- Seul système permettant d'utiliser tout le spectre de n_TOF
- Acquisition d'une version simplifiée par la collaboration
- Caractérisation du faisceau de l'aire 2 :
 - Collimateur 2 cm en 2015
 - Collimateur 6 cm en 2016



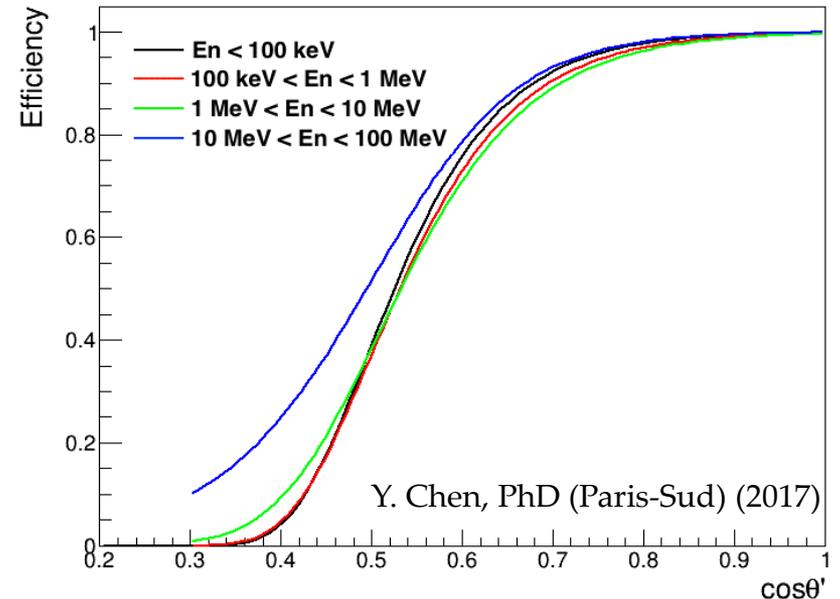
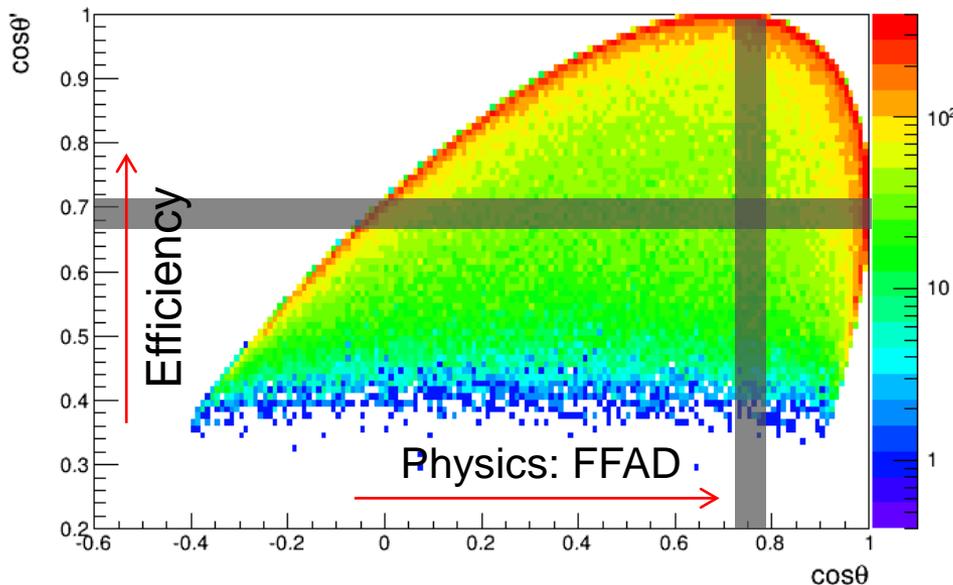
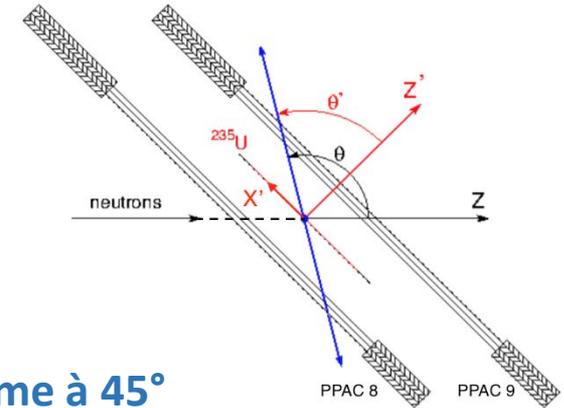
Emitting points on target1



Un dispositif conçu pour la haute précision

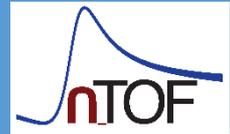


- Homogénéité du produit matière-flux ?
 - Reconstruction de la position sur la cible
 - Scan complet des cibles
- Efficacité de détection ?
 - Mesure de l'angle d'émission
- Anisotropies de fission !
 - Besoin de découpler efficacité et physique -> **système à 45°**

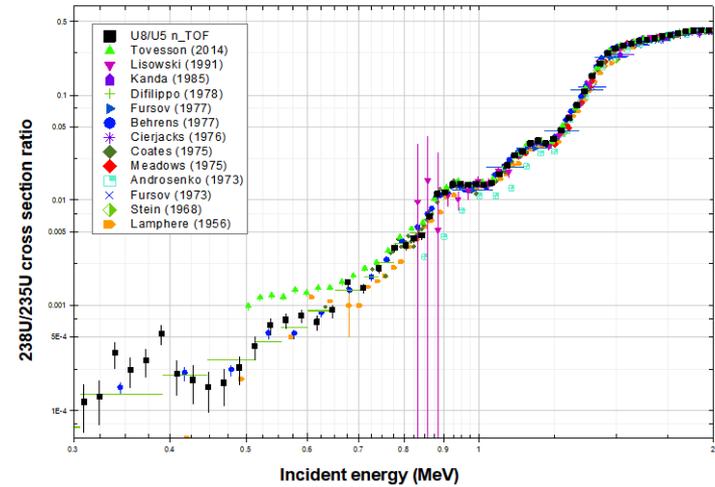
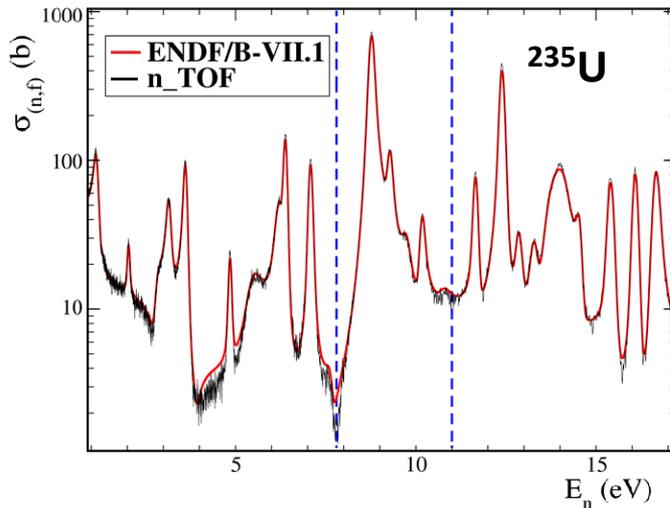


-> Incertitude systématique < 3% !

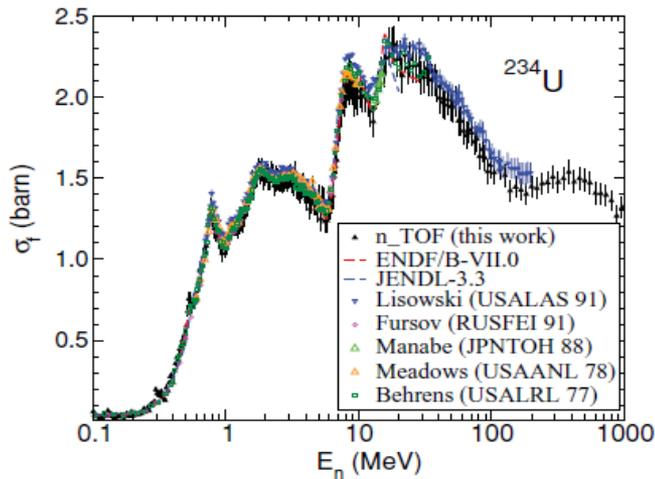
Mesures de sections efficaces



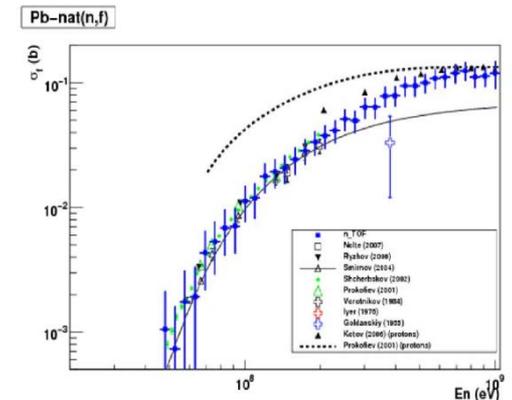
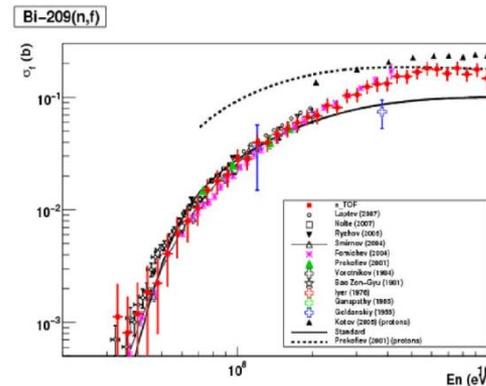
- Moisson de données : ^{209}Bi , natPb , ^{232}Th , $^{233,234,235,238}\text{U}$, ^{237}Np



C. Paradela et al., Phys Rev C 91 (2015)

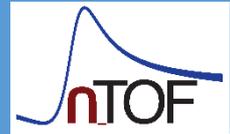


C. Paradela et al., Phys Rev C 82 (2010)

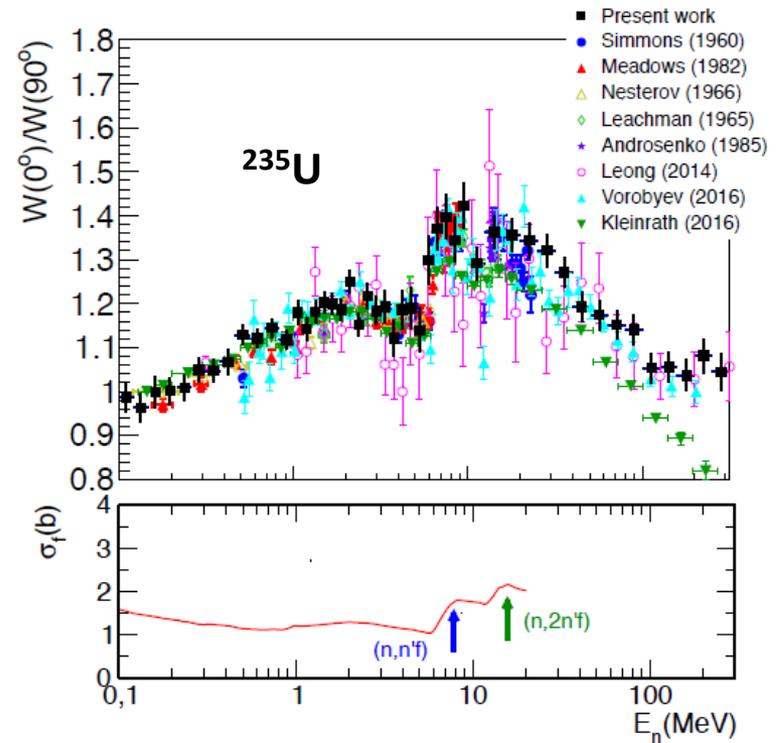
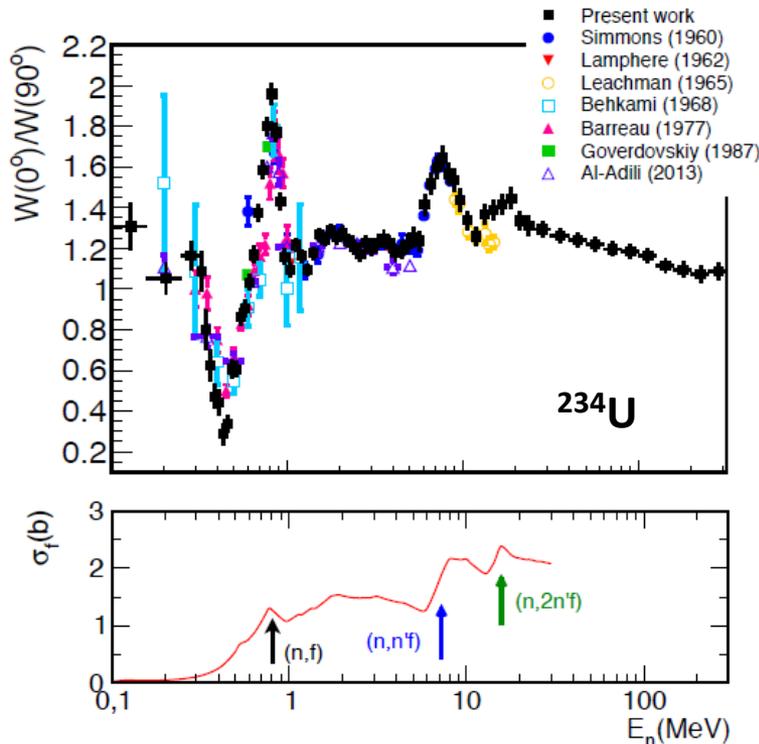
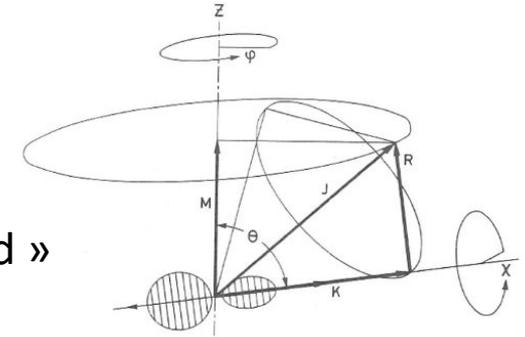


D. Tarrío et al., Phys Rev C 83 (2011)

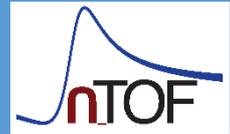
Distributions angulaires



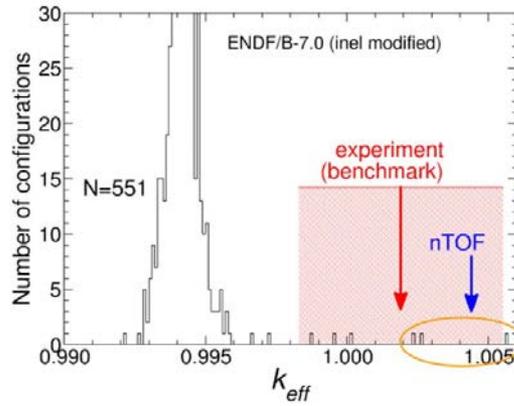
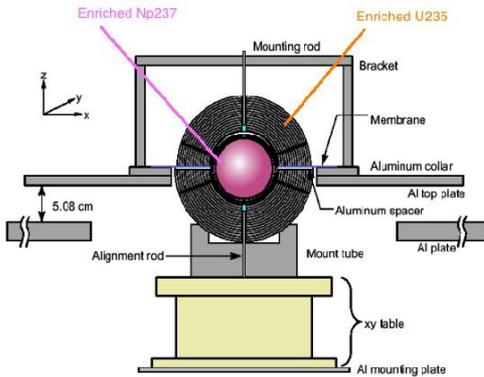
- Description de la physique...
 - Isotropie à bas E^* (s-waves)
 - \sim Isotropie si I_0 élevé (noyaux impairs)
 - Avant-arrière ($K < J$) : ouvertures de chance, E_n « grand »
 - Latérale ($K \sim J$) : avant l'ouverture de chance
- ... et influence possible sur les mesures de sections efficaces



La saga du ^{237}Np

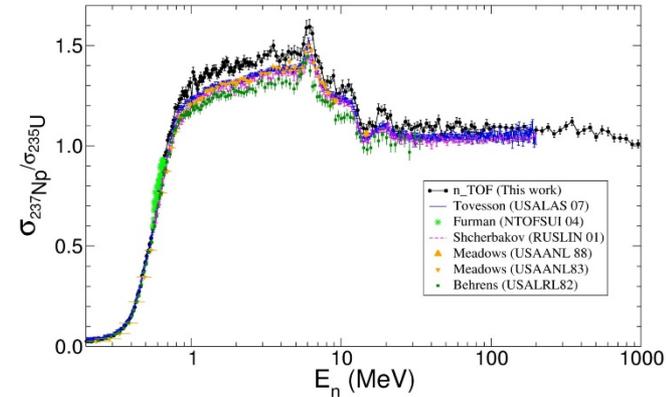


- Mesure 2010 : +6% / évaluations
- Accord avec certaines mesures différentielles
- Accord avec des mesures intégrales
- Comparaison à une expérience de criticité

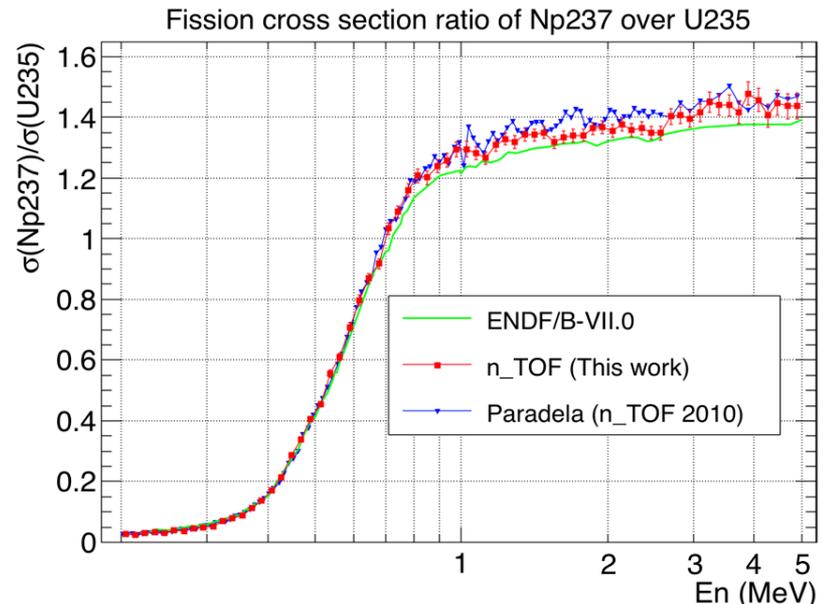


L. Leong, Phd (Paris-Sud) (2013)

- Nouvelle mesure en 2015
- Contrôle très fin de l'efficacité
- Encore 4% au-dessus des évaluations

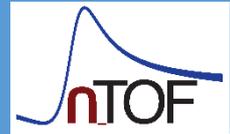


C. Paradela et al., Phys Rev C 82 (2010)

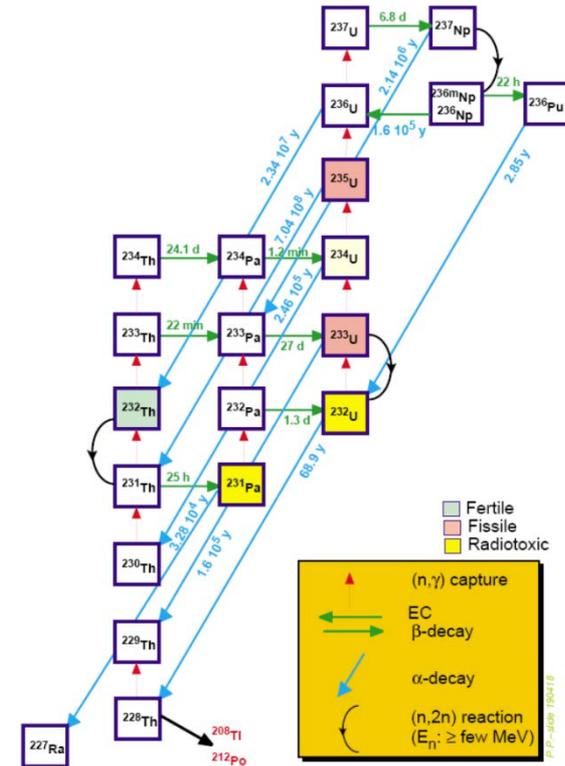
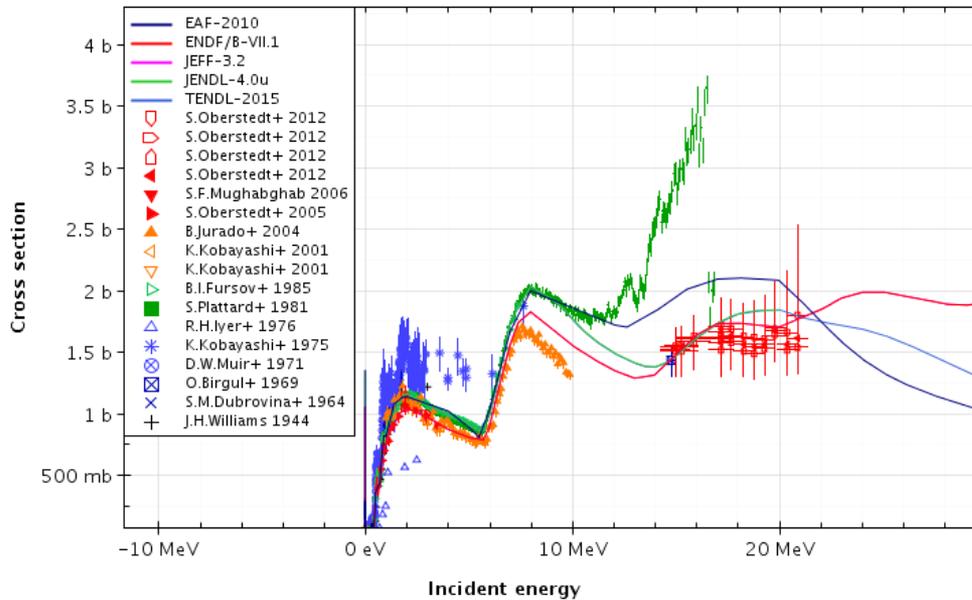


Y. Chen, PhD (Paris-Sud) (2017)

L'actualité : $^{231}\text{Pa}(n,f)$

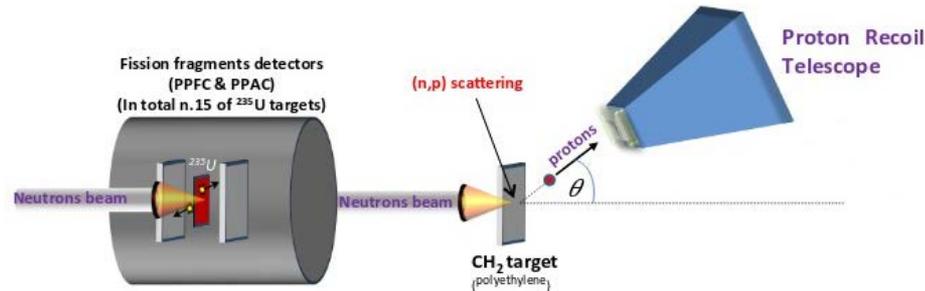


- Déchet à vie longue (32 kyr) du cycle Th/U
- Fission mal connue
- Bon test pour la méthode « surrogate »



- Cible de 1 mg maximum -> EAR2 !
- Développements mécanique + électronique
- *Expérience prévue pour avril 2018*

- « Long Shutdown » : 2019 & 2020
- Nouvelle cible de spallation
- Développement d'une normalisation (n,p)



- Mesures sur les Pu ?
 - ²³⁹Pu pour la précision sur la section efficace (<2%)
 - Etude de sensibilité au sein du groupe ?
 - Petit challenge en termes d'autorisations...
 - ²⁴⁰Pu et ²⁴²Pu pour les distributions angulaires

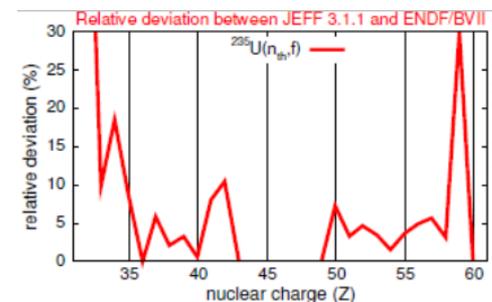
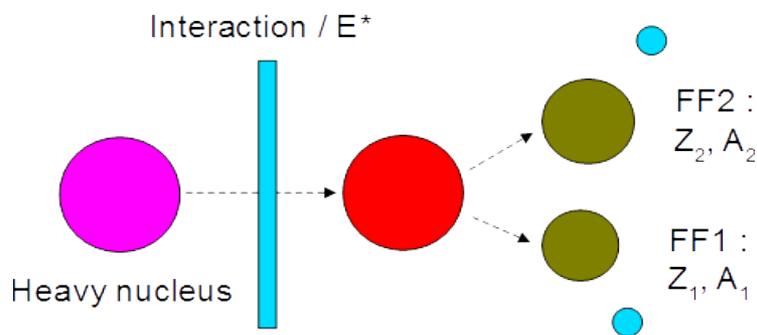
Intérêt pour les rendements de fission



- Les fragments de fission impactent la neutronique des réacteurs :
 - Source des neutrons retardés
 - Poisons neutroniques
 - Présence accrue avec les burn-up croissants (de 30 MWd/T à ~60... 90 ?)
 - Excursion de criticité : accumulation rapide des fragments
- Principale source de puissance résiduelle et de radioactivité :
 - Sûreté de l'aval du cycle
 - Rôle en cas de perte du refroidissement (LOCA)
 - Chaleur résiduelle
- Sonde remarquable de la structure nucléaire et du mécanisme de fission
 - Effet des couches (N et Z) sur la partition du noyau
 - Effets de couches aux grandes déformations
 - Influence de l'appariement : effet pair-impair dans les taux de production
 - Distribution de l'énergie de fission : sonde de la déformation des fragments
- Bonne connaissance des rendements en masse ...
- ... mais très partielle sur les charges
- Peu de données hors de la région Th - Pu

Le choix de la cinématique inverse

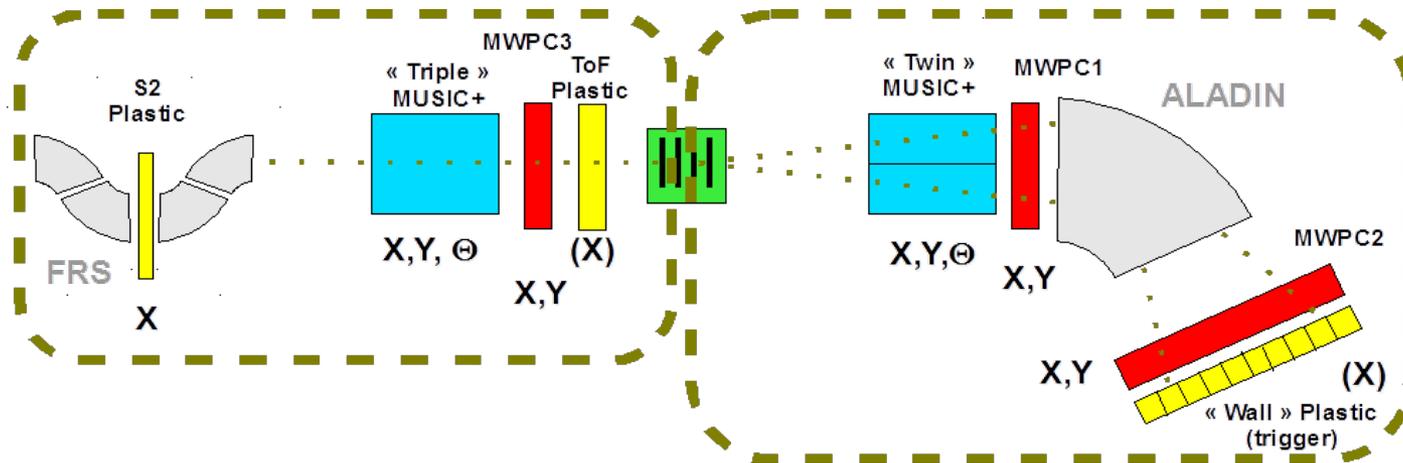
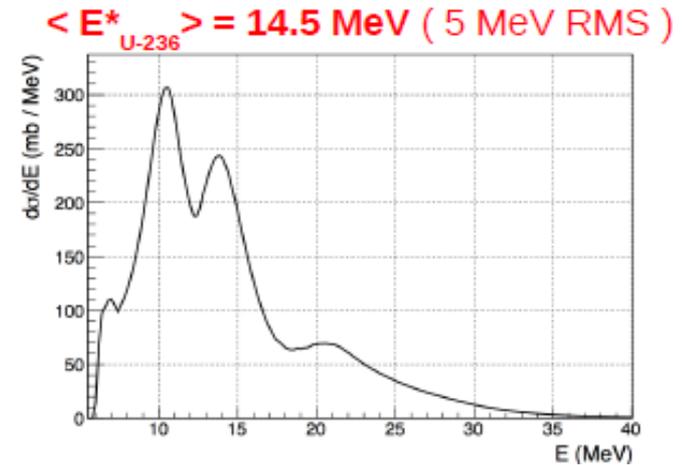
- Limitations de la cinématique directe :
 - Difficulté d'obtenir les cibles
 - Information partielle ou imprécise sur les charges



- Utiliser le système fissionnant comme (quasi-)projectile
 - Accès à une très grande variété de systèmes
 - Grande énergie cinétique des fragments : mesure de Z possible
- Expérience pionnière de K.-H. Schmidt (GSI, 1996) : Z des 2 fragments
- Expériences au FRS (GSI, ~2000) : Z et A d'un fragment
- 2010s : transfert@GANIL, SOFIA@GSI : Z et A des 2 fragments
 - Egalement ISOLDE, RIKEN...

Concept et objectifs de SOFIA

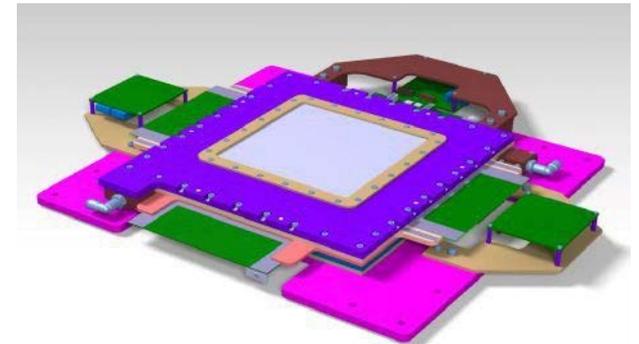
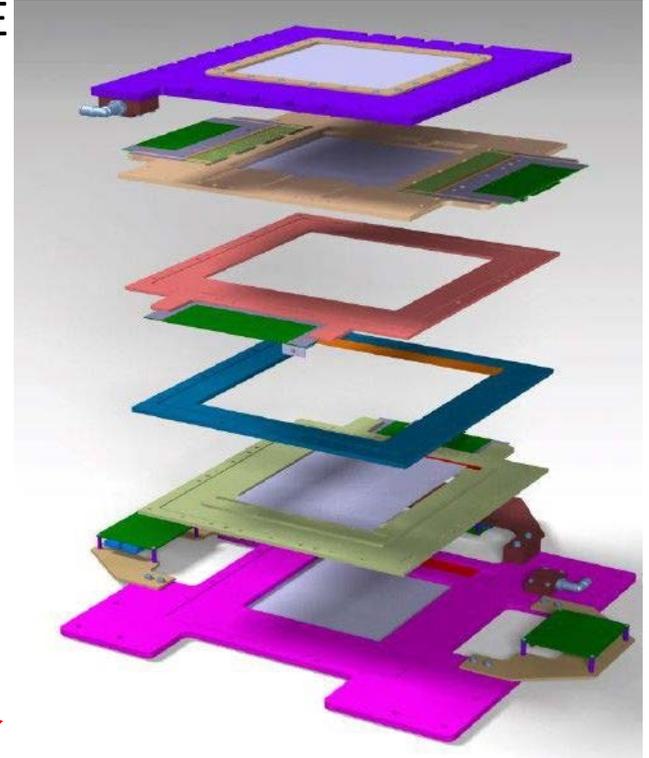
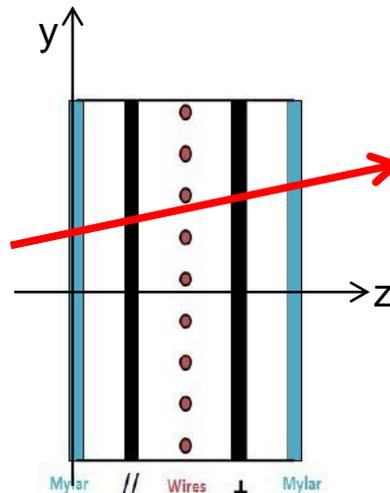
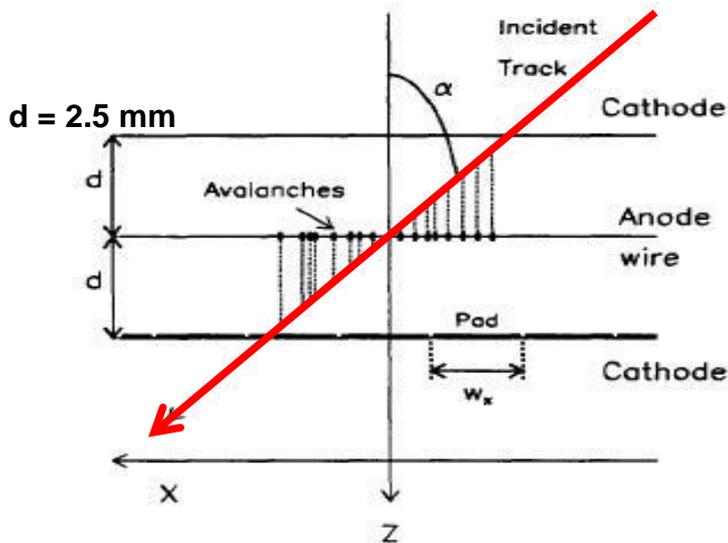
- Identification simultanée des 2 fragments : A et Z
 - Energie cinétique totale
 - Multiplicité des neutrons prompts
- Système d'intérêt : fragmentation de ^{238}U
- Fission électromagnétique
 - Large section efficace (~ 4 b)
 - Faible E^* (applications, structure)
 - E^* en moyenne seulement
- Identification : méthode $B_p - \Delta E - \text{ToF}$



Prise en charge du tracking : chambres multifils

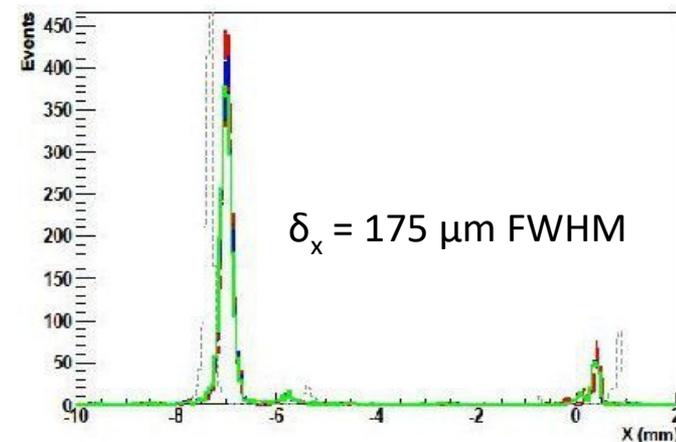
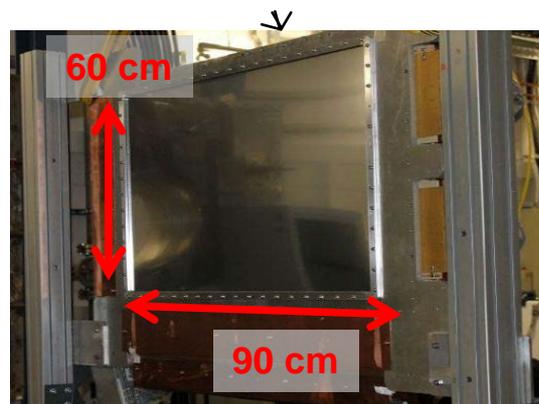
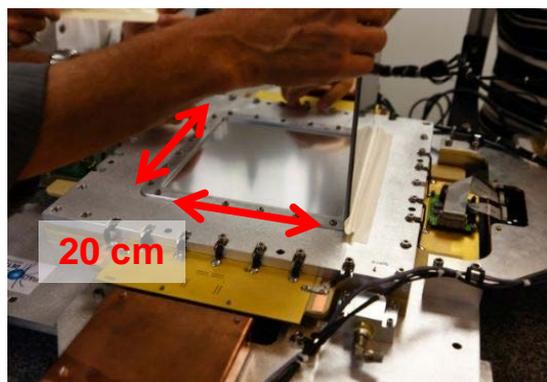
Les MWPC

- Dérivées des chambres du bras di-muon d'ALICE
- Multiplicité 2 supportée, rapides (10^5 Hz)
- X haute-résolution, Y en appoint
- Large surface utile (jusqu'à $0,5 \text{ m}^2$)
- Forte compacité dans la direction faisceau
- Très faible « budget » matière ($40 \mu\text{m}$ eq. Al)
- Gaz Ar- CO_2 @ atm.

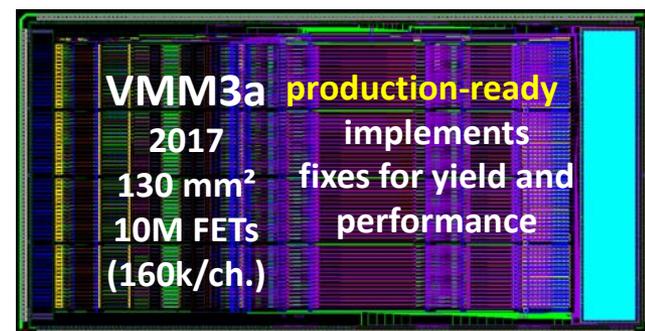


Modèles, performances, évolutions

- 2 tailles : 20x20 et 60x90 cm
- Objectif de performance atteint ($< 200 \mu\text{m}$)

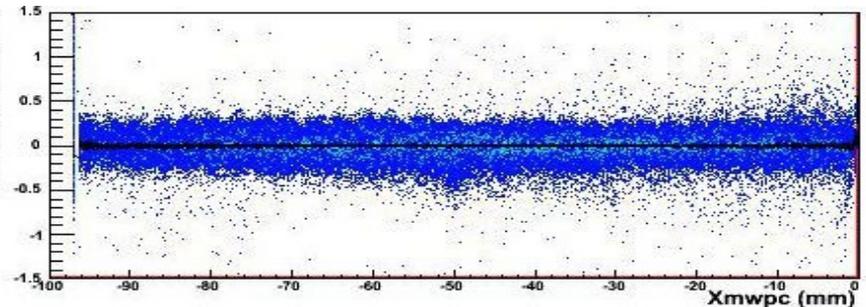
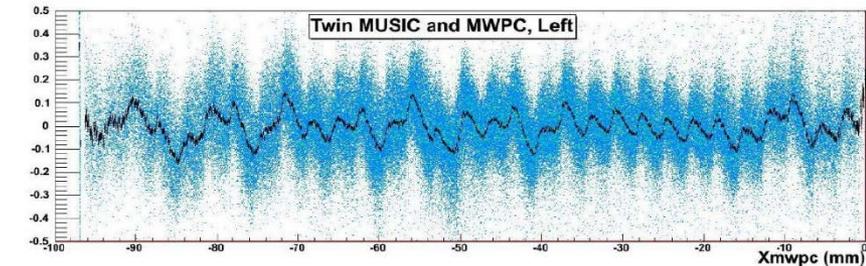
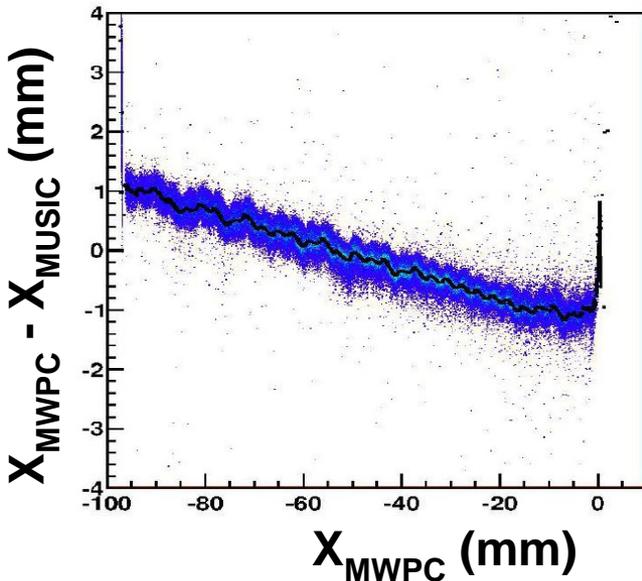
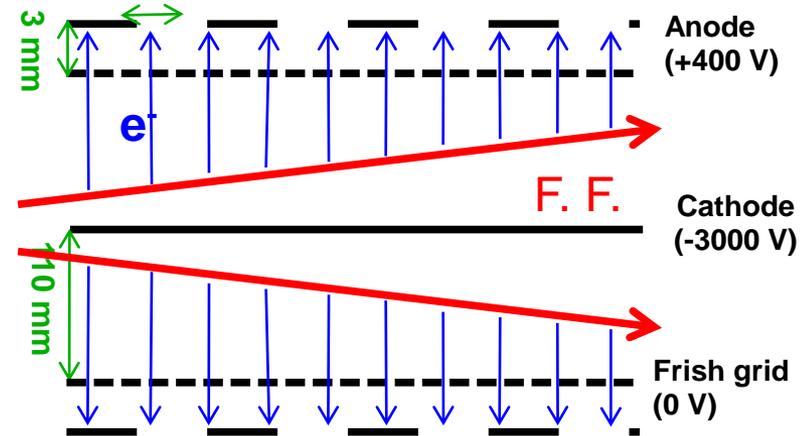


- 2011 : livraison initiale
- 2013 : 3^e chambre « faisceau »
- 2014 : révision du front-end
 - Revamp GASSIPLEX, V550-551 -> FEBEX
- 2017 : modif de la chambre « faisceau »
 - Ajout d'une 2^e dimension haute résolution
- 2018 : intégration de VMM3 en front-end
 - Programmation FPGA pour intégrer MBS



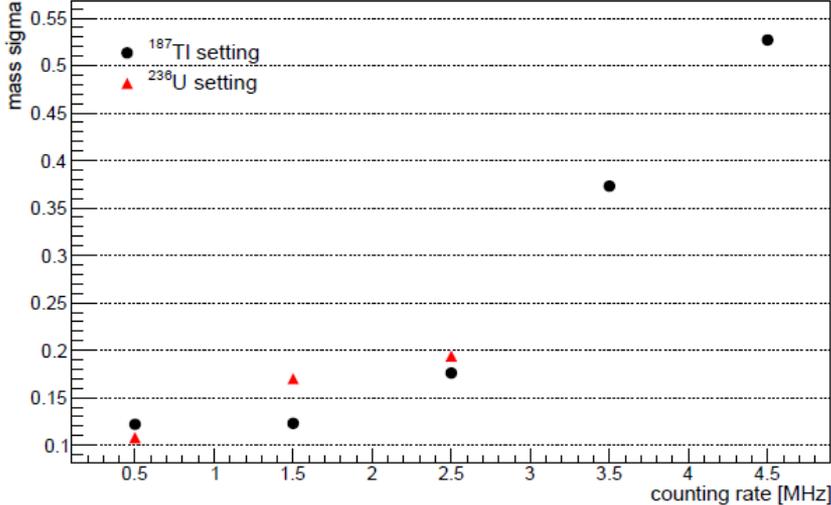
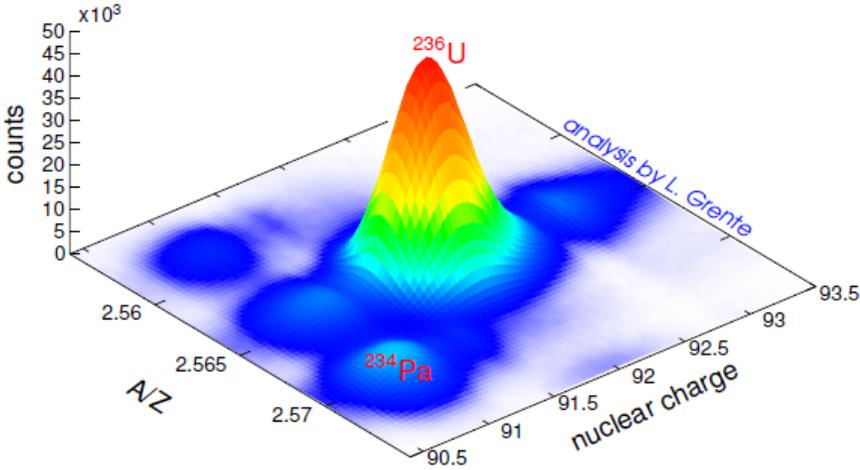
Le duo MWPC-MUSIC : symbiose

- MUSIC : tracker de précision...
- ... mais à 1D, et incalibrable
- La MWPC est autocalibrée (strips)...
- ... mais sujette à aberrations (interstrips)
- Association : parfaite linéarité
- Précision exceptionnelle : **< 50 μm FWHM !**

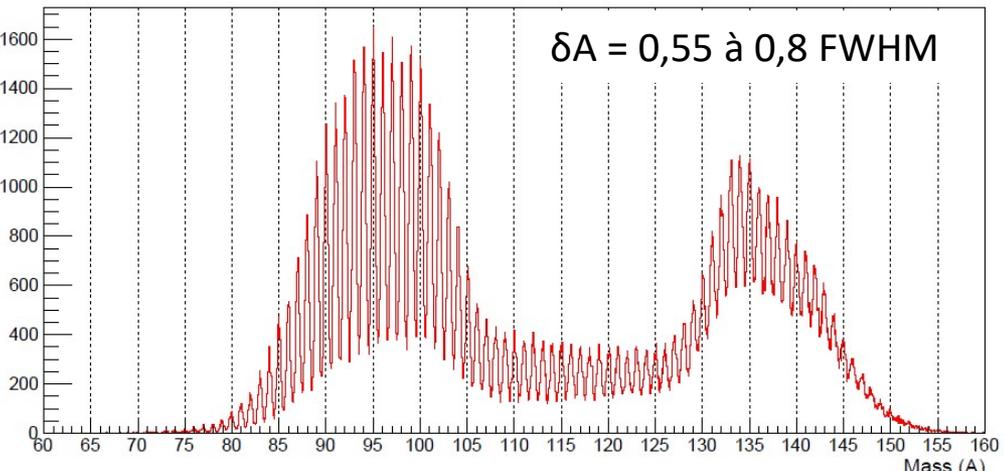
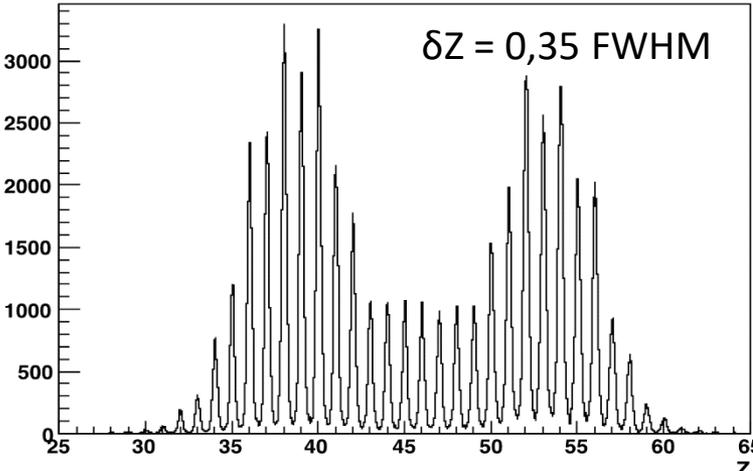


Performances

Y. Yan, PhD (Paris-Sud) (2016)



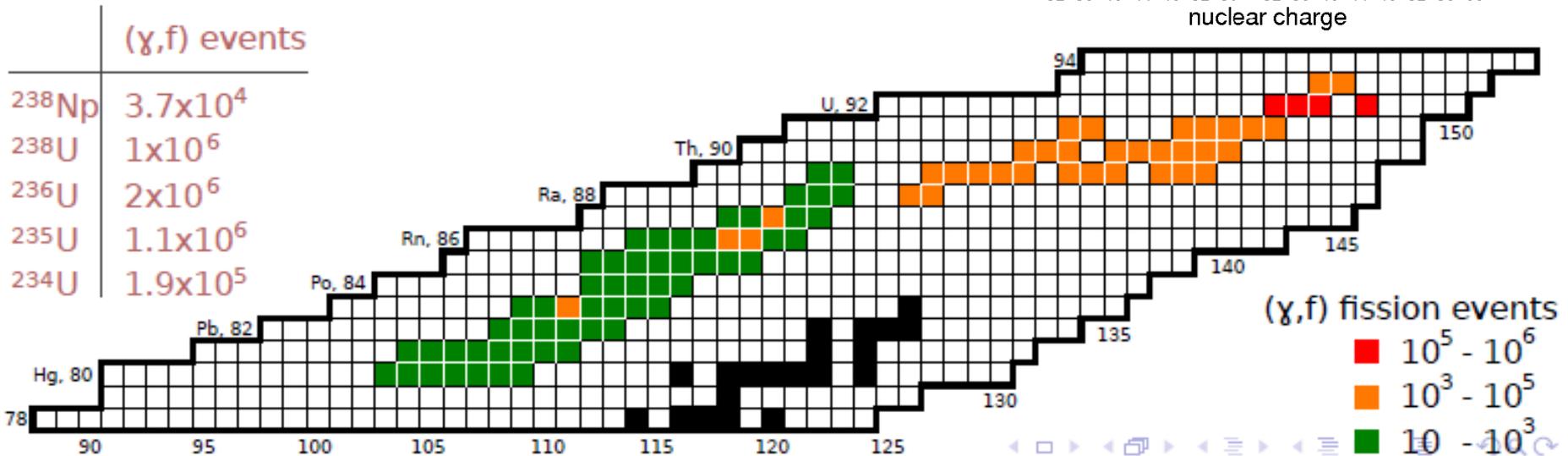
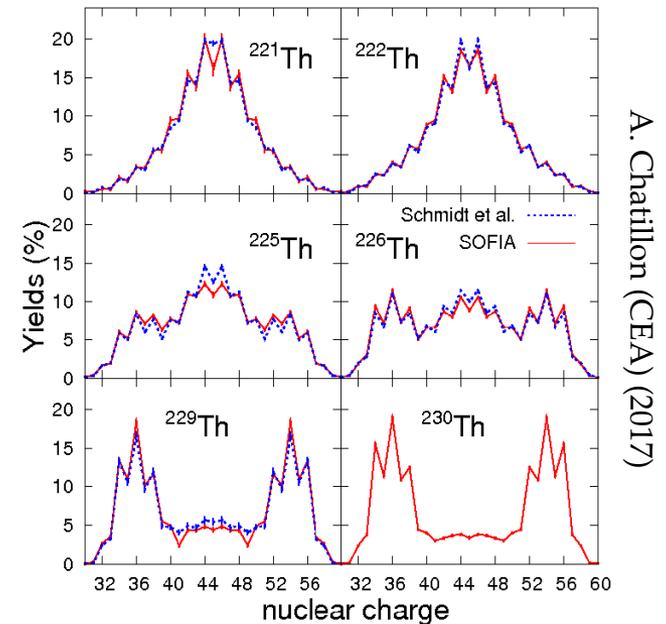
L. Grente (CEA) (2017)



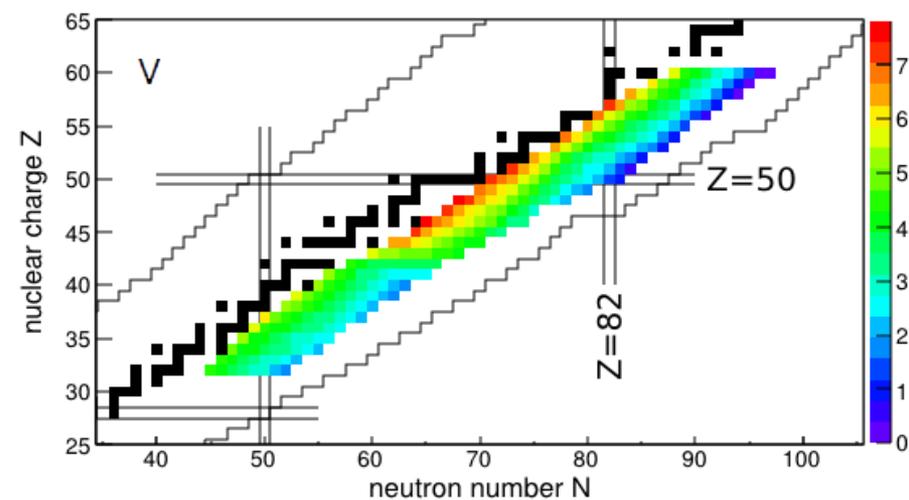
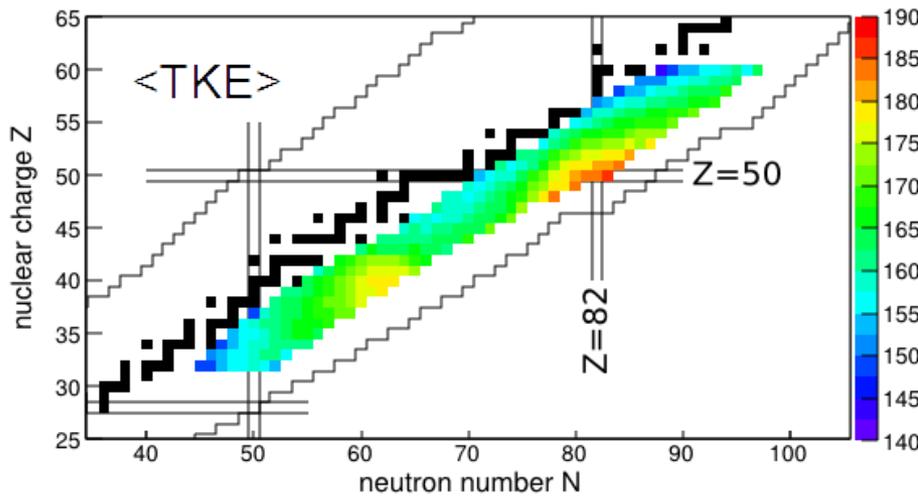
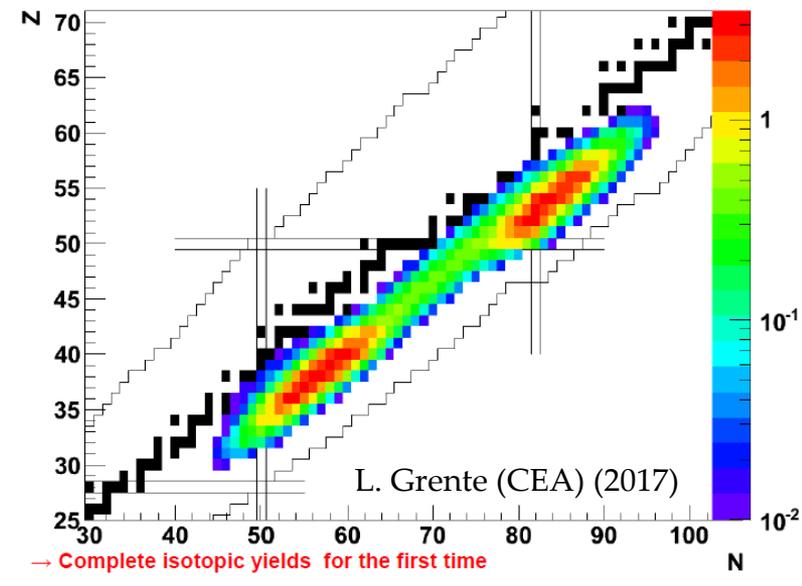
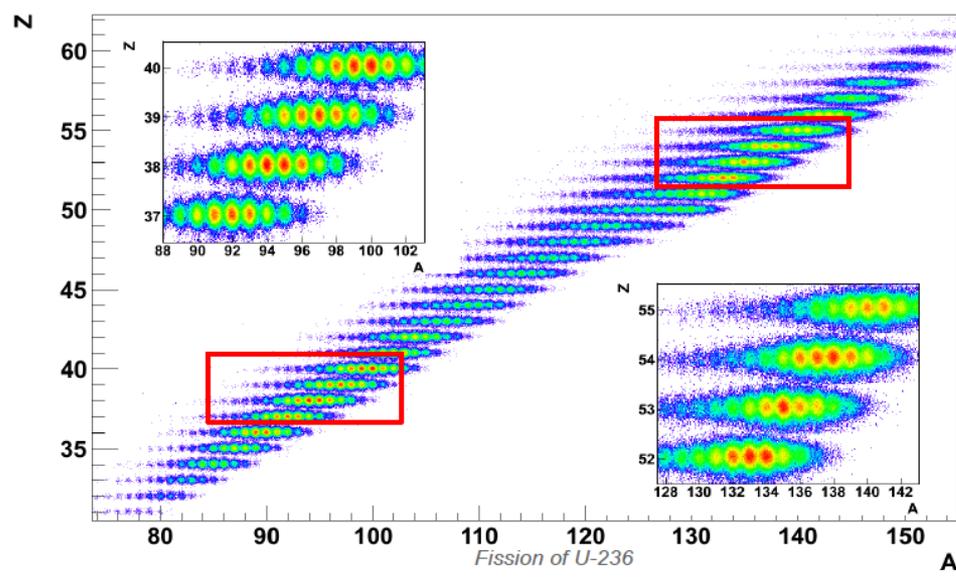
Y. Yan, PhD (Paris-Sud) (2016)

Les 2 campagnes SOFIA

- Premier run : 2012
 - Mesure de $^{234,235,238}\text{U}$ et $^{237,238}\text{Np}$
 - Transition symétrie - asymétrie : $^{221-230}\text{Th}$
 - “Coup d’œil” dans le couloir des résidus
- 2014 : objectif ^{236}U
 - Setup optimisé pour l’efficacité
→ $2 \cdot 10^6$ fissions en 20 heures !

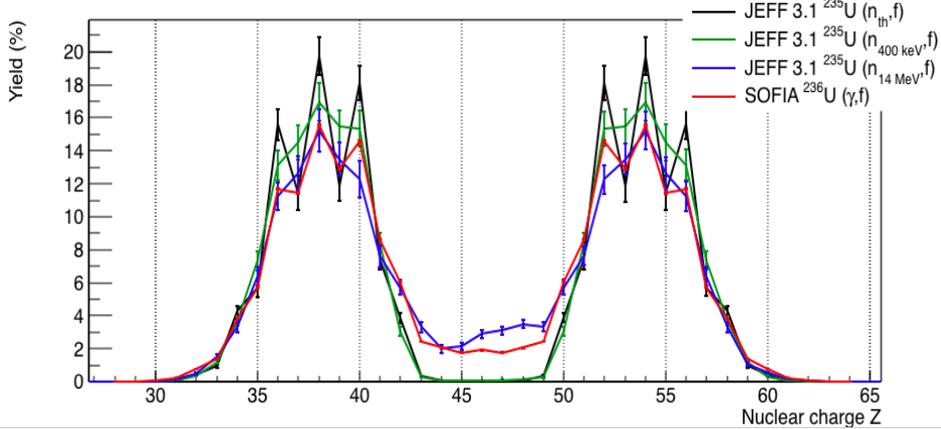
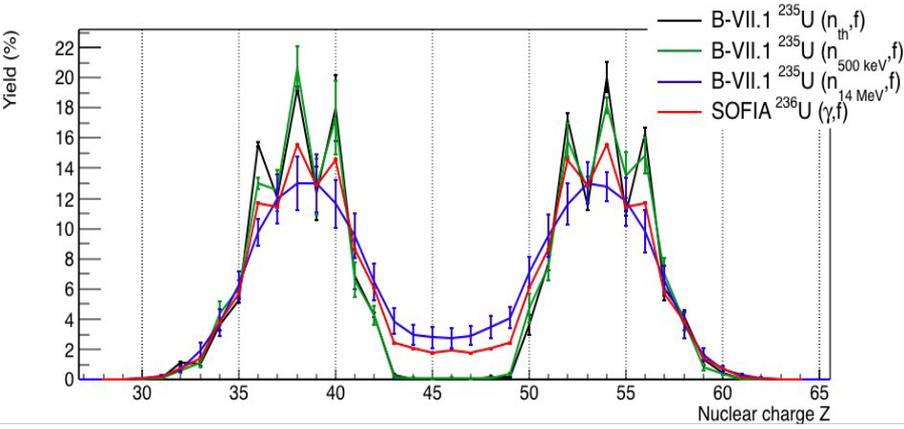


Exemple de résultats : fission de $^{236}\text{U}^*$

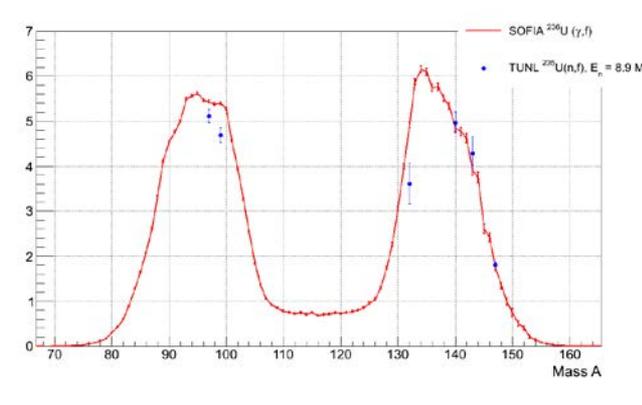
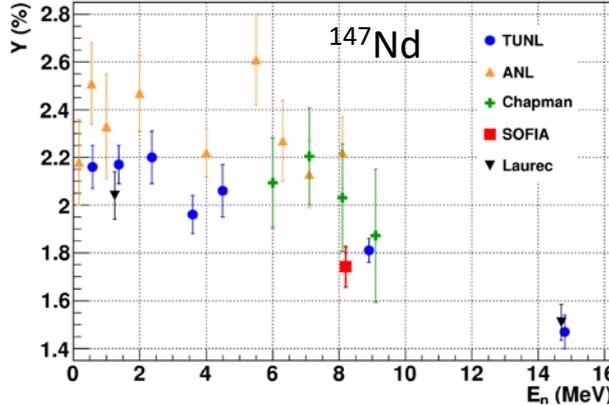
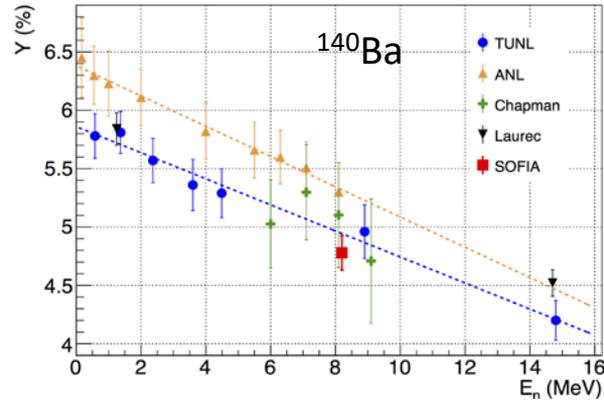


Comparaison aux données et aux bibliothèques

- Assez bon accord avec ENDF-B7, effet pair-impair trop amorti ?
- Très mauvais amortissement dans JEFF-3.1

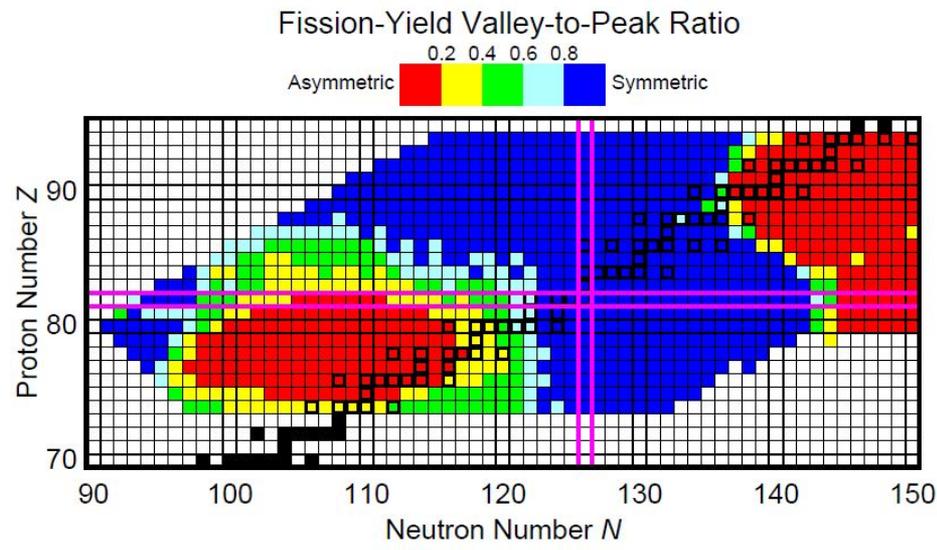
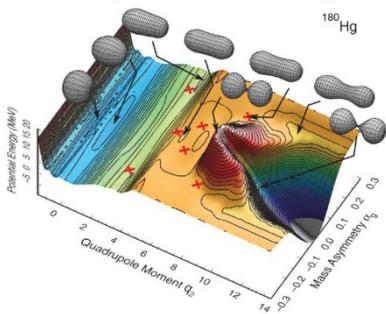


- Permet de lever des ambiguïtés sur les rares données isotopiques

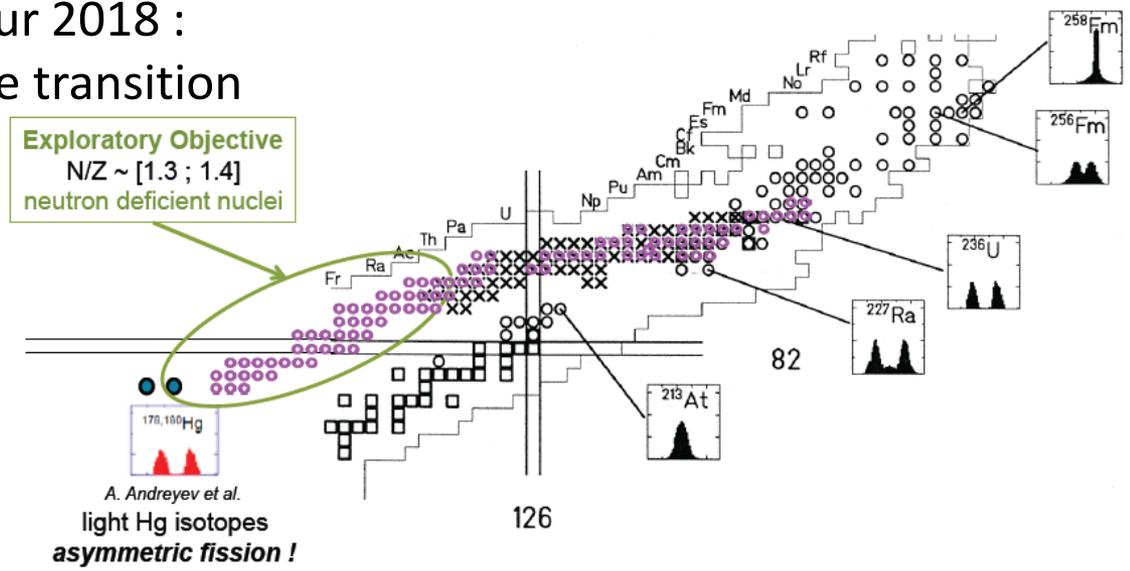


Fission des noyaux déficitaires en neutrons

- Des modèles prédisent une région de fission symétrique $A \sim 185$
- Corroboré par l'observation de l'asymétrie pour ^{180}Hg



- Expérience approuvée pour 2018 : exploration de la région de transition

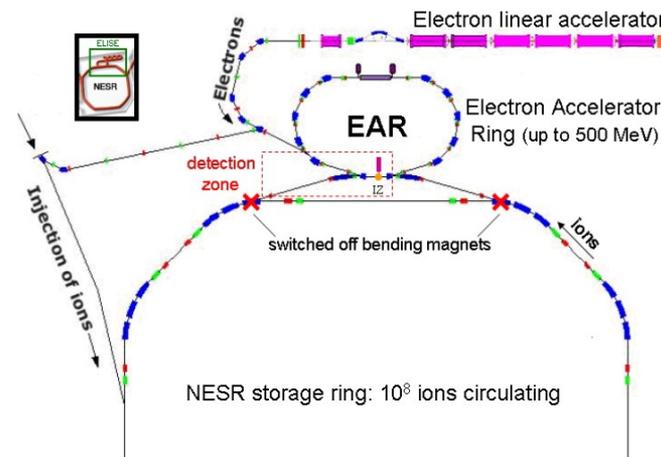
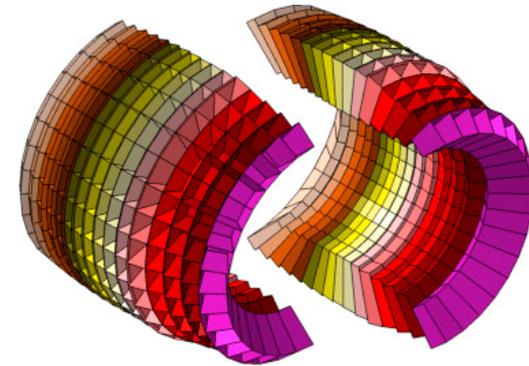


Perspectives

- Fission des actinides majeurs : $^{239}\text{U}^*$, $^{240}\text{Pu}^*$...
 - > Développement d'un faisceau de ^{242}Pu
 - Défi de radioprotection (décontamination lourde...)

- Tagging des neutrons prompts
 - > Intégration de NeuLAND au système expérimental

- Contrôle de l'énergie d'excitation
 - > Fission par (p,2p)
 - Faible section efficace
 - > Fission par électron
 - Développement sur l'ESR



Conclusions

- Activité dynamique
- Fort soutien des services techniques
- Perspectives riches sur le moyen et long terme
 - Mesure des Pu à n_{TOF}
 - Normalisation des sections efficaces par (n,p) à n_{TOF}
 - Rendements de fission en fonction de l'énergie d'excitation à GSI
- Possibilité de synergies locales importantes :
 - Evaluation, sensibilités
 - Théorie de la fission
- Mais « léger » problème de ressources humaines...
 - Soutien désormais affiché du laboratoire
 - Attitude peu compréhensible de l'IN2P3 : quels objectifs scientifiques ?