

Activités autour de l'énergie

Groupe PACS

Physique de l'Aval du Cycle et de la Spallation

<http://ipnweb.in2p3.fr/~pacs/>

S. David

sdavid@ipno.in2p3.fr

Comité AERES

IPN Orsay

3-4 Novembre 2008



In2p3



Groupe PACS

Physique de l'Aval du Cycle et de la Spallation

- **Permanents**

- L. Audouin, MdC Paris XI
- C.O. Bacri, 50% CNRS CR1, 50% ministère
- S. David, CNRS CR1
- O. Méplan, UJF Grenoble, délégation CNRS
- L. Tassangot, CNRS DR2
- J. Wilson, CNRS CR1

3,5 CNRS permanents
+ 1 CNRS en prêt
(jusqu'à fin 2008)
1 MdC Paris XI

- **Doctorants**

- N. Capellan, 2006 – 2009
- J. Brizi, 2007 – 2010
- 5 thèses soutenues depuis 2004

2 doctorants

- **ITA**

- S. Pierre

1 ITA

- **Secrétariat**

- J. Rue

- **« Collaborateurs bénévoles »**

- C. Stéphan
- V. Mastrangelo

- **Post-doc et chercheurs associés : 1 à 2 en moyenne**

Contexte général

Contexte général

Contexte énergétique général

- Besoin croissant en énergie dans le monde
- Ressources en combustibles fossiles limitées
- Lutte contre les émissions de gaz à effet de serre



Besoins croissants de nucléaire dans le siècle à venir

Contexte nucléaire

- Ressources en uranium
- Gestion des matières fissiles et des déchets (loi française 2006)
- Prolifération
- Aspects économiques
- Aspects sociétaux (acceptabilité, processus de décision, ...)
- Formation d'ingénieurs et techniciens



Besoin de systèmes innovants pour assurer la durabilité du nucléaire
Simulation
Données nucléaires

Travaux du groupe PACS

- Etude de systèmes innovants de 3^{ème} et 4^{ème} génération : neutronique, sûreté (simulation MURE)
- Etude des scénarios associés
- Mesure de données nucléaires pour la simulation de systèmes innovants
- Groupe de réflexion physiciens/sociologues
- Forte participation à l'enseignement
- Implication ministère : chargé de mission déchets nucléaires à la DGRI

Groupe PACS

Réacteurs innovants et scénarios associés

*S. David, O. Méplan, J. Wilson,
J. Brizi, N. Capellan,*

Responsabilité projet IN2P3 « Systèmes et scénarios » AV0

Développement du code de simulation **MURE**
MCNP Utility for Reactor Evolution

2004-2007 : responsabilité projet FIND (ACI
Energie Conception Durable)

Equipe MURE

LPSC Grenoble (A. Bidaud, A. Nuttin, P. Guillemin), réacteurs Candu, scénarios
Subatech Nantes (M. Fallot, L. Giot, A. Guertin, N. Thiollières), neutrinos pour la prolifération, ADS

Mesure de données nucléaires

*L. Audouin, C.O. Bacri,
L. Tassan-Got*

Etude expérimentale de la spallation

Mesure des sections efficaces de fission
d'actinides

Collaboration nToF@CERN

Réacteurs innovants et scénarios

Equipe MURE

- En charge des études CNRS/Universités sur les réacteurs à combustible solide
- Systèmes évolutionnaires ou innovants, partant de technologies existantes ou envisageables dans les décennies à venir

Réacteurs étudiés à l'IPNO :

- Réacteurs à Eau Pressurisée (type EPR)
- Réacteurs à Eau Bouillante (Advanced Boiling Water Reactor ABWR)
- Réacteurs à Neutrons Rapides refroidis au sodium

Cycle du combustible envisagé

- Cycle Uranium avec transmutation des actinides mineurs : RNR-Na
- Cycle thorium (Th/²³³U, Th/Pu) : ABWR, RNR-Na

Scénarios associés

- Scénarios « régénération pure » : transition EPR → RNR-Na
- Scénarios « multi-strate » : couplage de différentes technologies EPR/RNR-NA/ABWR

Etudes de sûreté des systèmes innovants

- Couplage neutronique / thermohydraulique

Analyse de sensibilités et d'incertitudes de données nucléaires

Benchmark sur SNEAK-7B : Pu-fuelled fast critical assemblies experiments (Karlsruhe)

4 publications (2004-2008)

11 Proceedings (2004-2008)

Nombreuses publications techniques, « grand public », conférences, séminaires

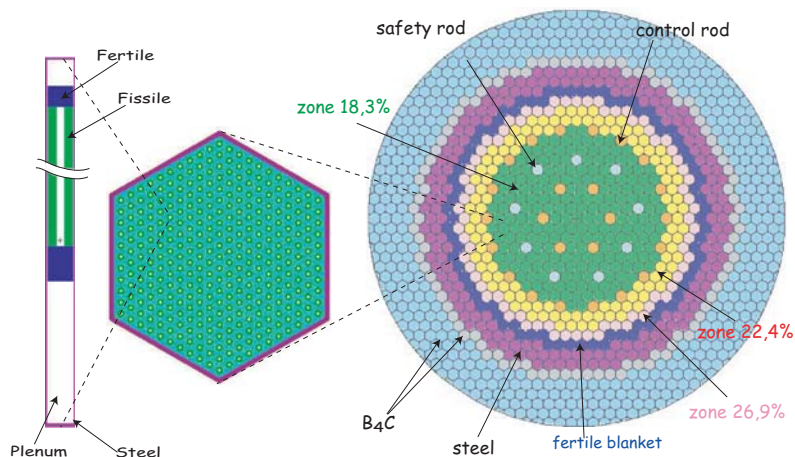
Réacteurs innovants et scénarios : MURE

Code MURE

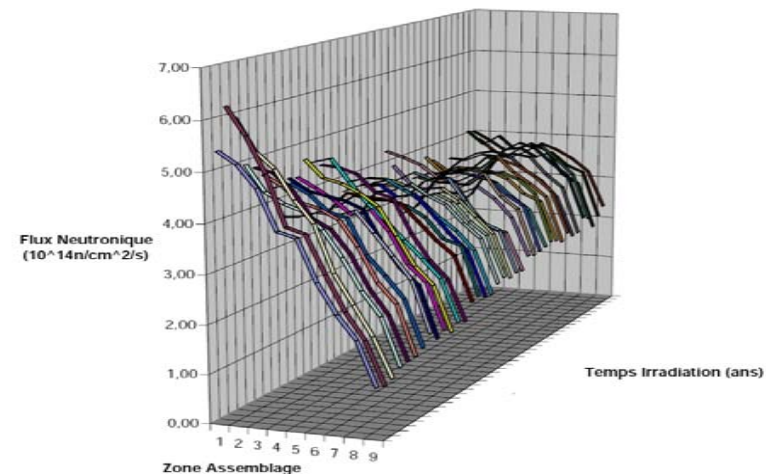


- Portabilité, amélioration continue
- Ensemble d'outils écrits en C++, programmation objet, développé par ~5 personnes, utilisé dans ~15 labos (CEA, EDF R&D, Europe, USA, Corée)
- Utilise le code Monte Carlo validé MCNP pour les calculs de neutronique statique
- Interface performante pour gérer des géométries complexes les plus exactes possibles
- Gestion des bases de données (librairies, température) : coefficients de sûreté
- Calcul de l'évolution du combustible
 - prise en compte de l'évolution du spectre neutronique et des sections efficaces moyennes
 - optimisation des pas de calculs
 - nouvelle méthode implémentée en 2008 : **gain d'un facteur 30 en temps de calcul**

Exemple de géométrie : du crayon au cœur d'un RNR



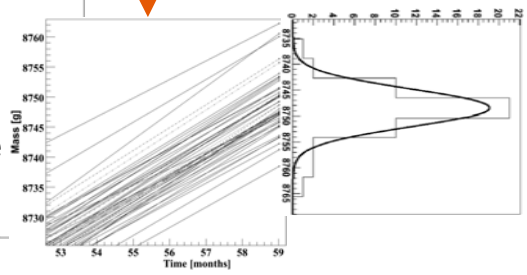
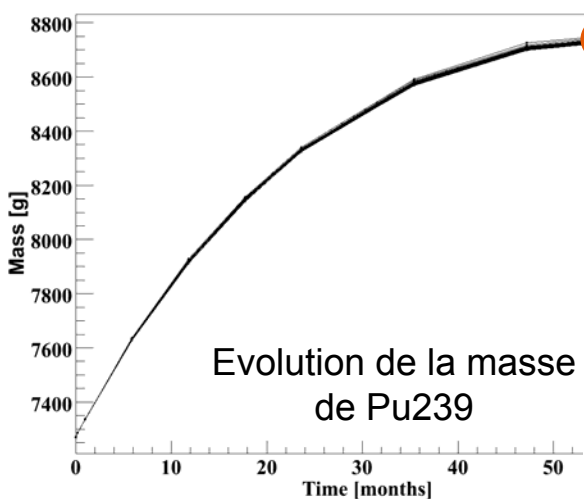
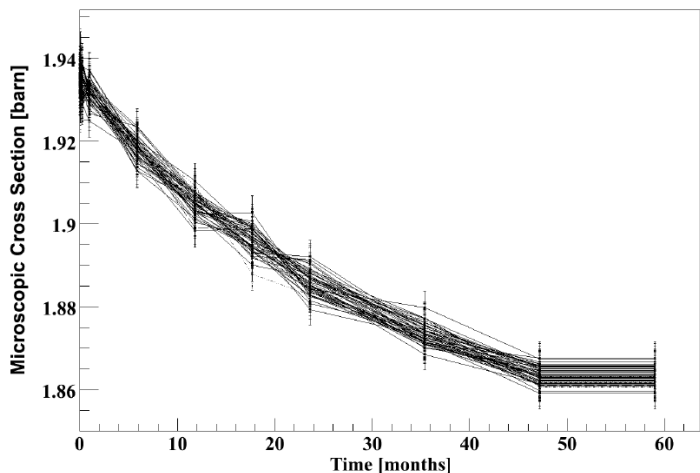
Evolution du Flux moyen par zone d'assemblage



Réacteurs innovants et scénarios : MURE

Validation de la méthode de simulation

Prise en compte de la variation du spectre et des sections efficaces moyennes

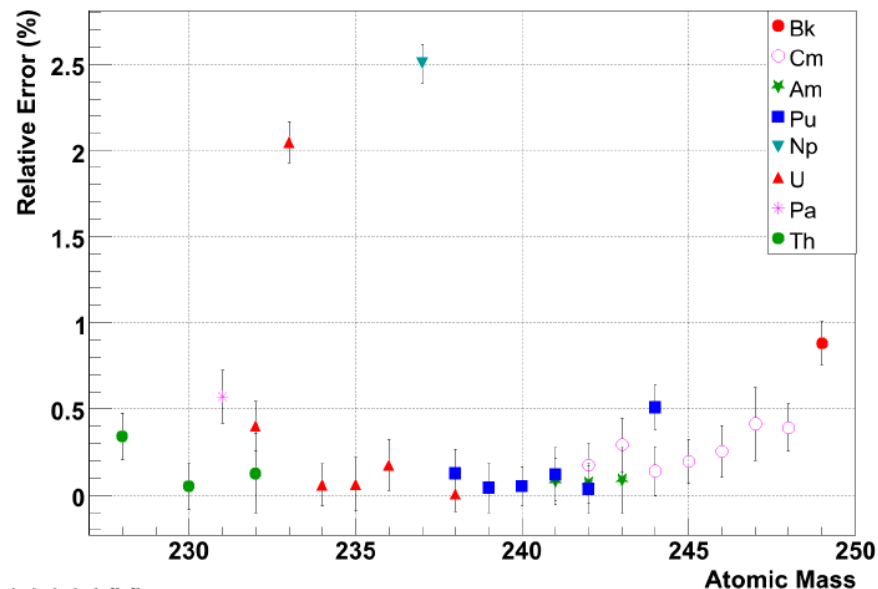


Quantification de la propagation des erreurs statistiques propres à la méthode Monte Carlo

Ex: Calcul d'évolution RNR-Na

$T = 5 \text{ ans}$

erreurs < 0,5%



Réacteurs innovants et scénarios : MURE, RNR-Na

Thèse J. Brizi

RNR-Na

Benchmark RNR-Na de référence

Concept SFR
CNRS/IPNO

CEA Cadarache/ LEDC

	ρ (pcm) t = 0	ρ (pcm) t = 5 ans
	MURE (CEA)	MURE
Référence	-18 (0)	465
Coefficient de vide	1486 (1379)	2308

Act.	U/Pu	Th/U
Min.	kg/(GWe.an)	kg/(GWe.an)
^{231}Pa	-	0.28
^{237}Np	0.44	0.84
^{238}Pu	-	0.23
^{241}Am	2.54	-
^{243}Am	2.29	-
^{244}Cm	0.74	-

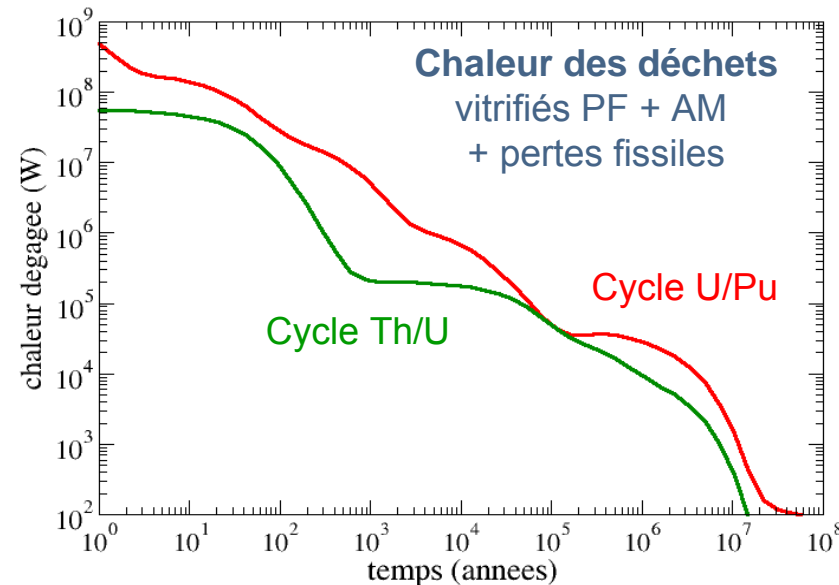
Déchets
(sans
transmutation
d'AM)



Configurations IPNO

Th/U – Th/Pu avec ou sans couverture

Configuration	Coefficient de vide (t=0 / t = 5 ans)
Th/U	688 / 1146
Th/U + couv. axiales	-707 / + 211
Th/Pu	2100 / 1686



Réacteurs innovants et scénarios : scénarios 3 strates

Scénarios innovants : couplage de différentes technologies

Une fois effectuée l'étude de neutronique d'un réacteur donné, il faut intégrer les résultats dans un scénario

Critères de comparaison multiples et complexes (parfois subjectifs...)

- Consommation minerai naturel
- Déchets – production continue, accumulée
- Inventaires de matières fissiles en réacteur + retraitement
- Flux de matière au retraitement
- Caractéristique du combustible en usine de retraitement / fabrication
- Simplicité/complexité technologique
- Souplesse : expliciter les options condamnées ou laissées ouvertes
- Aspects économiques

IPNO : Cycle uranium + transmutation Actinides Mineurs, Cycle thorium

Optimiser la consommation de minerai et minimiser la production de déchets en utilisant des technologies viables

Réacteurs étudiés :

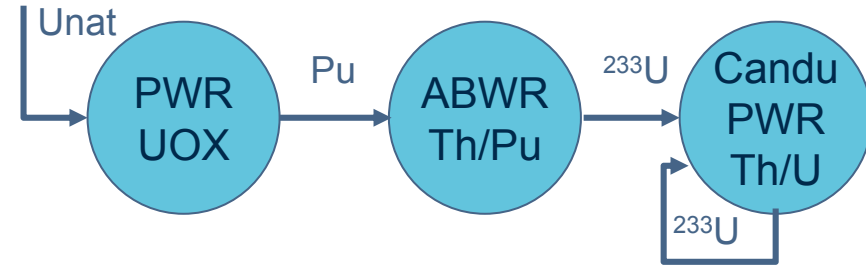
- Réacteurs à Eau Pressurisée (type EPR)
- Réacteurs à Eau Bouillante (Advanced Boiling Water Reactor ABWR)
- Réacteurs à Neutrons Rapides refroidis au sodium

Cycle du combustible envisagé

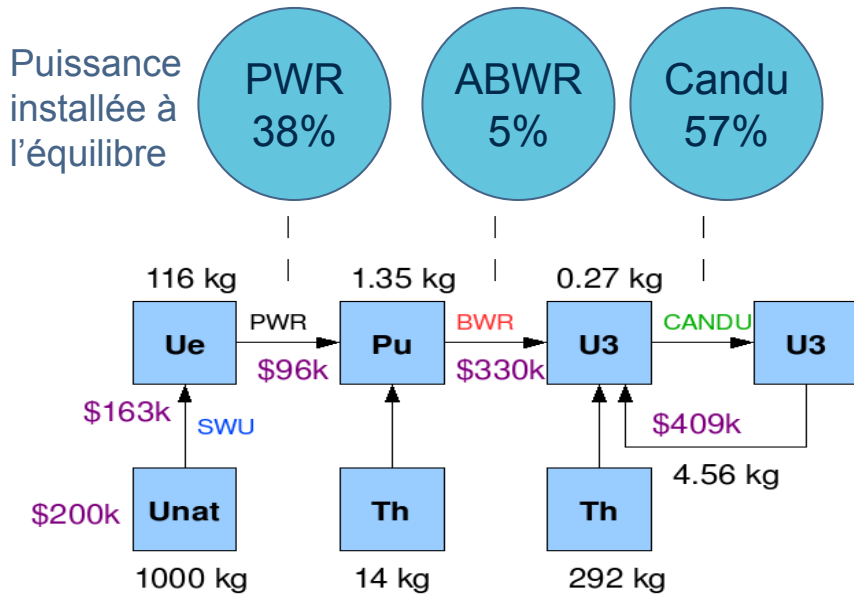
- Cycle Uranium avec transmutation des actinides mineurs : RNR-Na
- Cycle thorium (Th/233U, Th/Pu) : ABWR, RNR-Na

Réacteurs innovants et scénarios : scénarios 3 strates

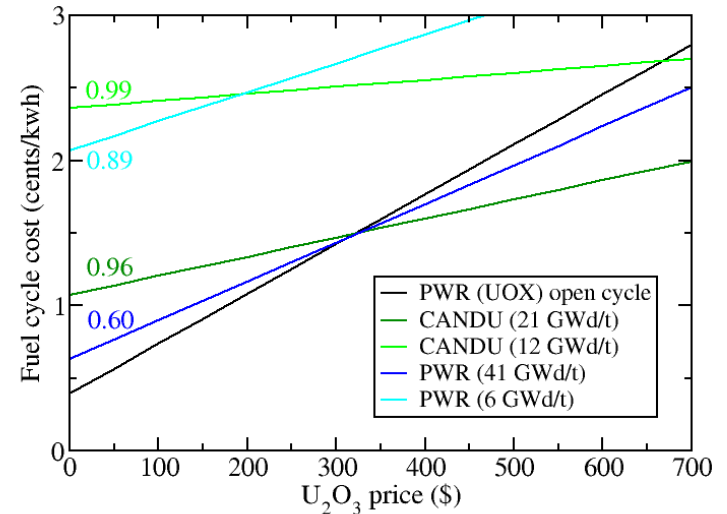
Analyse simplifiée neutronique / économique d'un scénario à 3 composants utilisant uniquement des réacteurs à eau à l'équilibre



Les réacteurs à eau sont en général sous générateurs
 Pour augmenter le taux de régénération, il faut réduire le temps d'irradiation (empoisonnement PF), et ainsi multiplier les déchargements/retraitement/fabrication
 → Optimum à trouver en fonction du coût de la matière première et du coût du retraitement



Consommation Unat réduite de 62%



Un tel scénario devient intéressant pour un prix de l'uranium > à 300\$/kg

Réacteurs innovants et scénarios : sûreté

Thèse N. Capellan

Les études de sûreté nécessitent un suivi précis des températures (combustible, modérateur) en fonction du temps

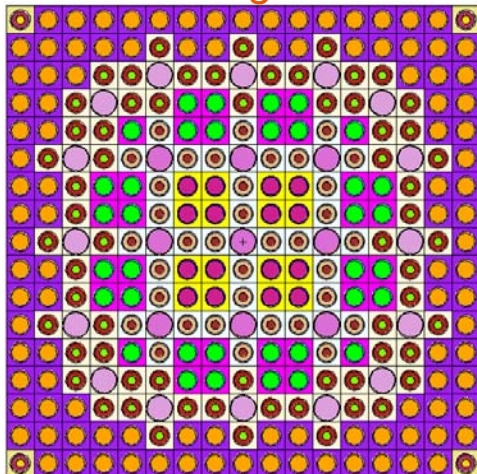
La neutronique dépend des températures du combustible et du modérateur (effet Doppler, bosse thermique, ...) thermo-hydraulique → neutronique



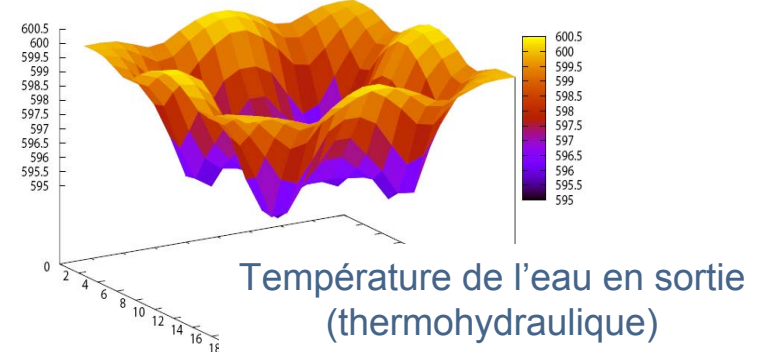
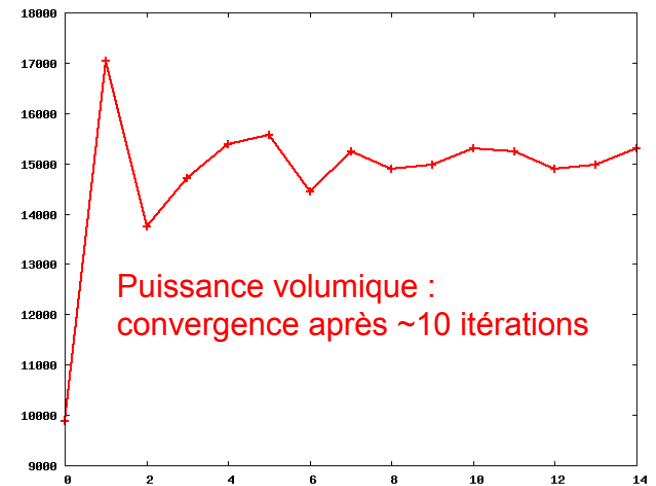
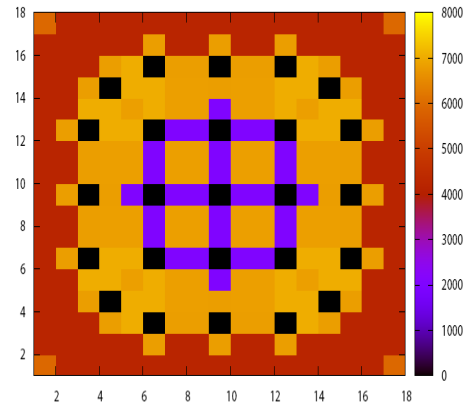
Les températures dépendent de la distribution de puissance neutronique → thermo-hydraulique



Benchmark sur un PWR
Assemblage très hétérogène



Dépôt de puissance (neutronique)



- **Réactions de spallation**
 - Matériaux de structure et cible de spallation d'un ADS
 - Mesures à GSI en cinématique inverse
 - Programme expérimental et d'analyse achevé, publications encore en cours
- **Sections efficaces de fission des actinides**
 - Actinides pour la transmutation et les cycles innovants
 - Mesures à nTOF (CERN), détection des fragments de fission en coïncidence

2004-2008

Spallation : 5 publications (+ 8 de la collaboration)

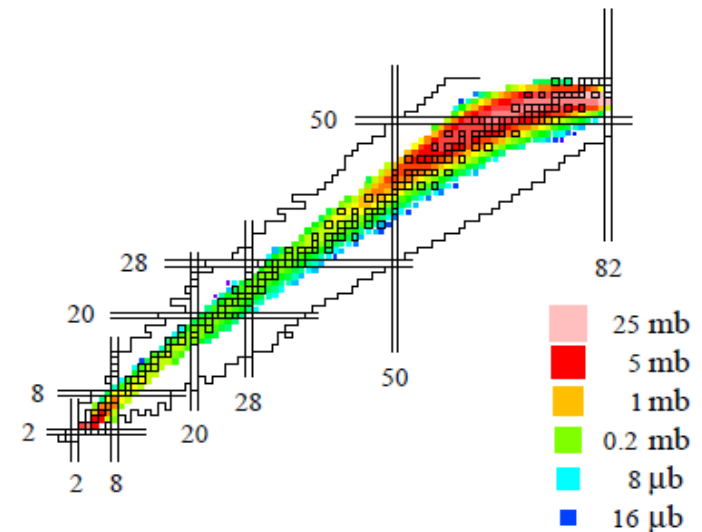
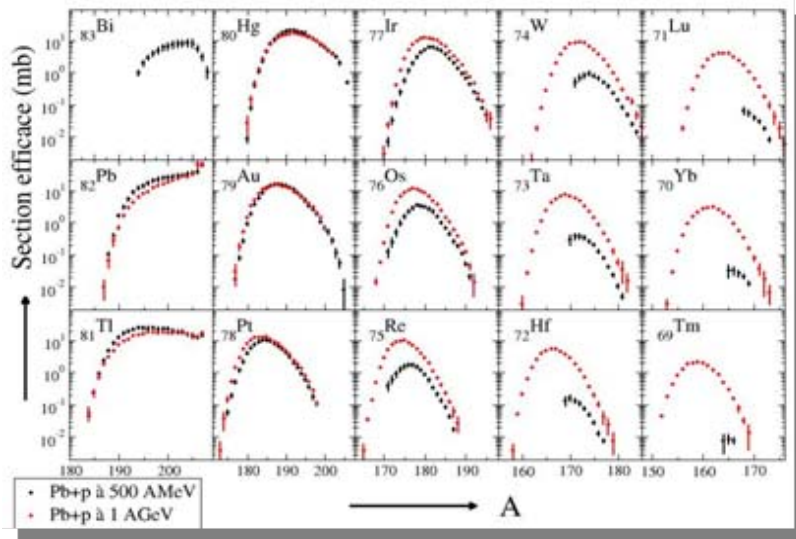
Ntof-fission : 2 publications en cours de finalisation (+publications collaboration nTOF)

Fission (théorie microscopique, IPNO/IFIN) : 3 publications

Autres 1 publication + 2 en cours (thermochronologie)

Données nucléaires : réactions de spallation

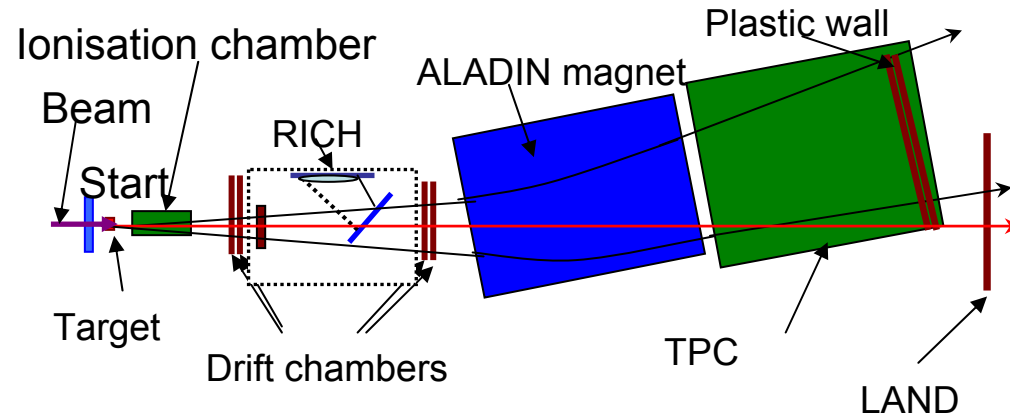
- Réactions particule-noyau $E > \sim 100$ MeV : **source de neutrons des ADS**
- Mesure des sections efficaces de production des résidus de spallation :
 - Compréhension des mécanismes de réaction
 - Amélioration des codes microscopiques
 - Radiotoxicité, tenue des matériaux
- Systèmes étudiés : ^{208}Pb (1 GeV et 500 MeV),
 - ^{238}U (1 GeV), ^{56}Fe (300 à 1500 MeV),
 - ^{136}Xe (200 MeV à 1 GeV) sur cibles p et d



Données nucléaires : SPALADIN

Mesures exclusives des réactions de spallation:

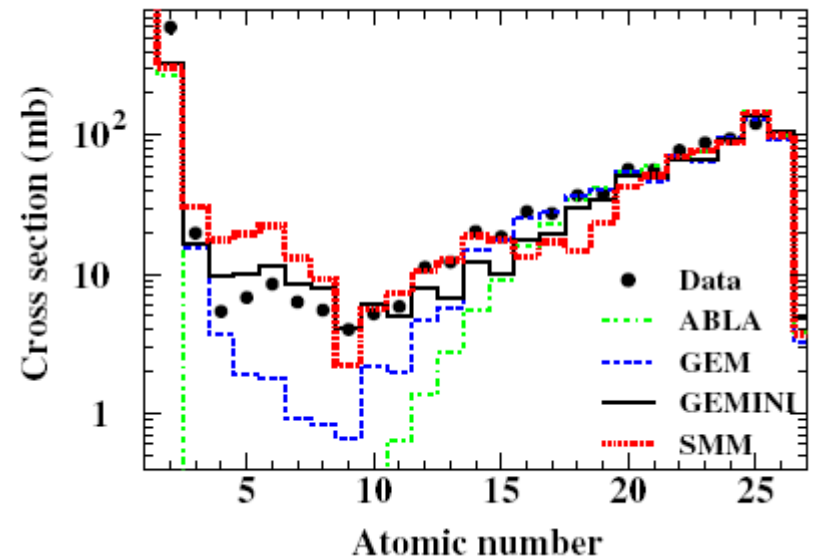
- Résidus en coïncidence avec les particules légères chargées
- Corrélations
- Séparation des phases de cascade et de désexcitation



système étudié: ^{56}Fe (1 A.GeV) + p

Collaboration GSI, SPhN/Saclay, ITU Munich

- ✓ **Système léger**
 - ⇒ pas de compression
 - ⇒ peu de moment angulaire
 - ⇒ désexcitation séquentielle
- ✓ thèse de A.Lafriakh (12/2005)



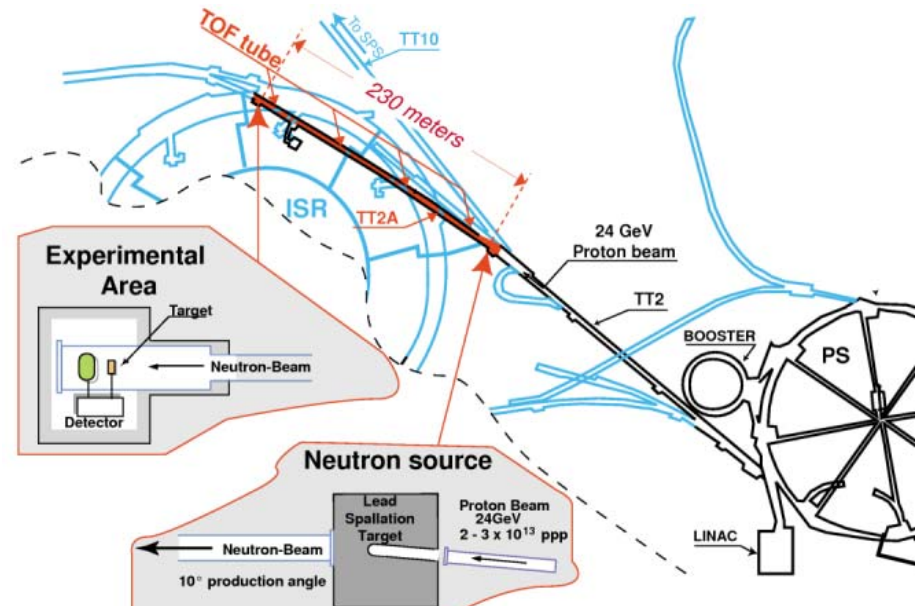
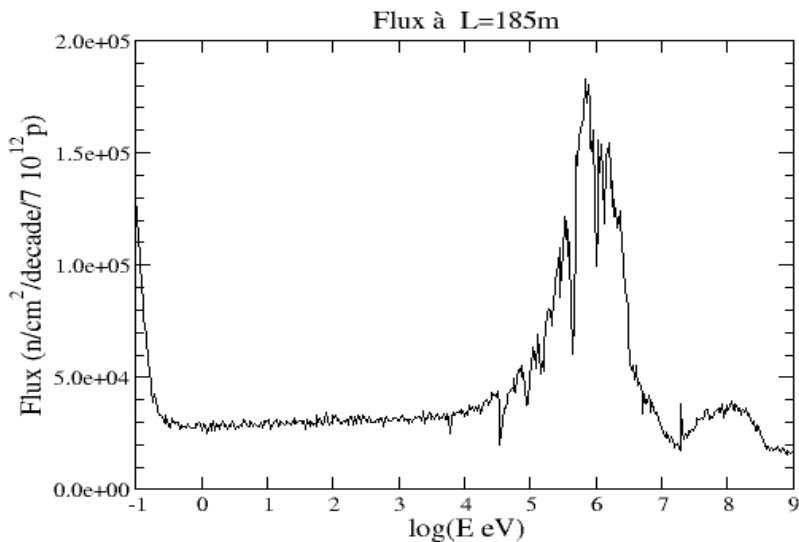
Motivations pour mesures de sections efficaces de fission

- Besoin de précision sur les sections efficaces des actinides, notamment pour la fission :
 - candidats à l'incinération : ^{237}Np
 - implication dans le cycle thorium : ^{232}Th , ^{233}U , ^{234}U
- Mesure sur large spectre énergétique des neutrons pour couvrir le domaine de la spallation qui intervient dans les ADS
- Détection des 2 fragments en coïncidence pour signer la fission par rapport à d'autres voies qui apparaissent à haute énergie (spallation)

Données nucléaires : NTOF

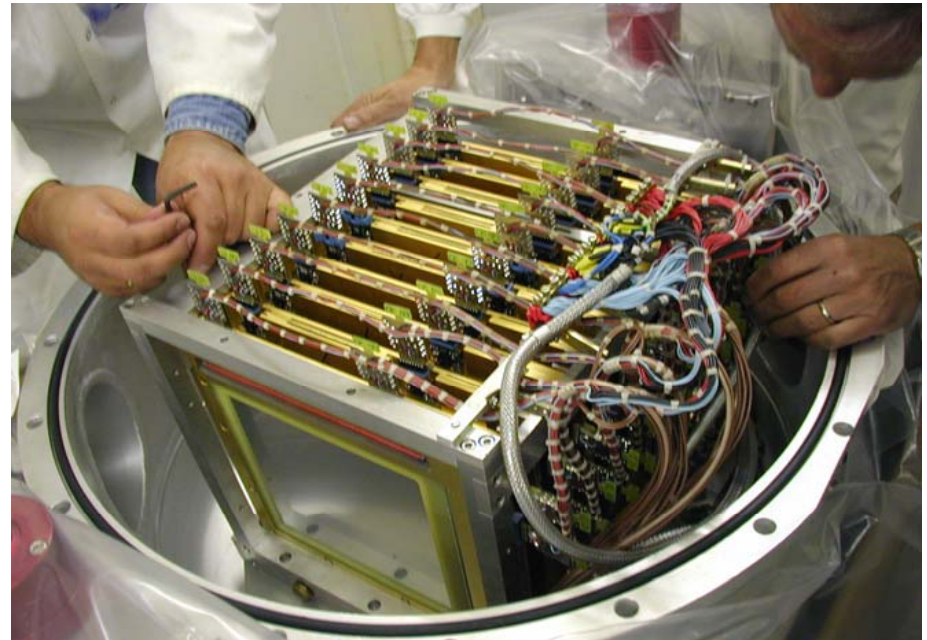
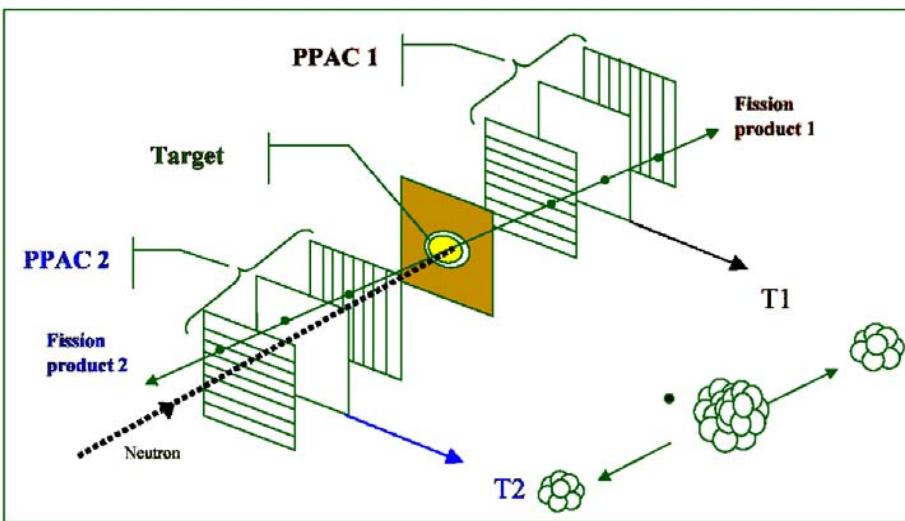
L'installation nTOF au CERN

- Haut flux instantané ($5 \cdot 10^6$ n/burst sur cible de fission)
- faible cycle utile (quelques ms / 2 s)
(réduction du bruit de fond de radioactivité)
- Très large spectre en énergie (depuis le thermique jusqu'à 1 GeV)
- Excellent energy resolution (6% @ 1 GeV 10^{-4} @ 1 eV)
 - 185 m de base de vol
 - 7 ns de largeur de paquet de protons



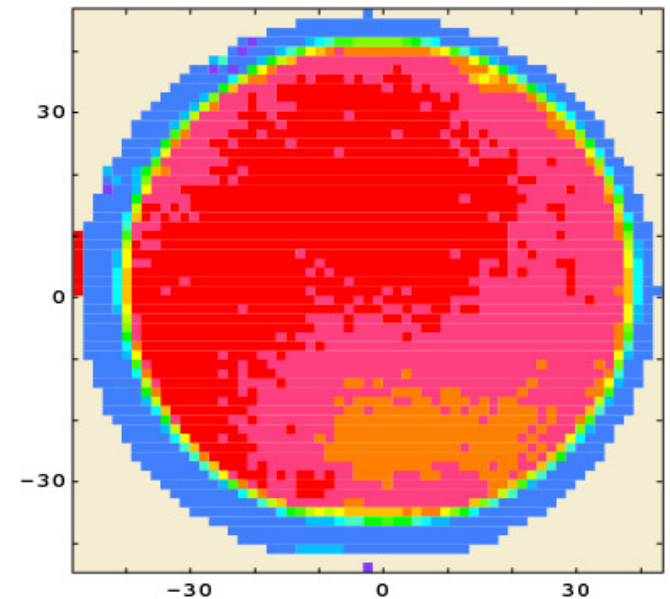
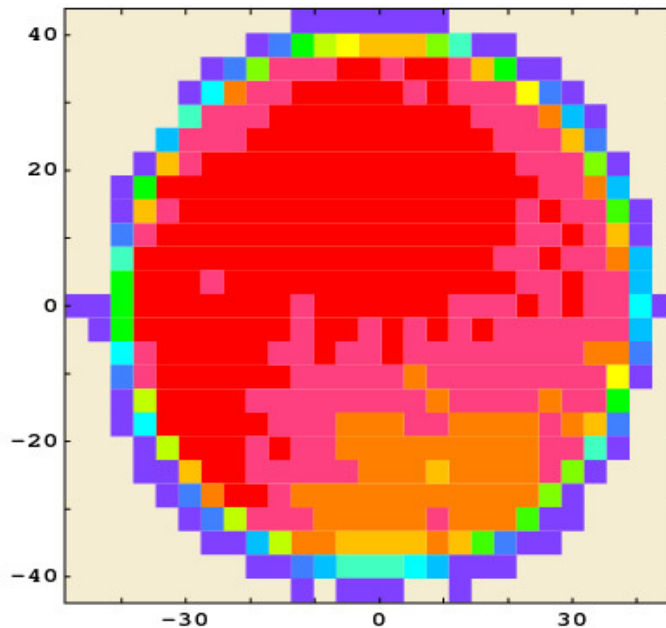
La détection

- Made in IPN
- Détection PPAC (Parallel Plate Avalanche Chambers)
 - électrodes minces : fragments de fission en coincidence
- Localisation : cathodes à bandes + ligne à retard
 - distribution surfacique du flux et du dépôt de cible
- Digitalisation complète des signaux à 500 MHz sur 8 bits signal

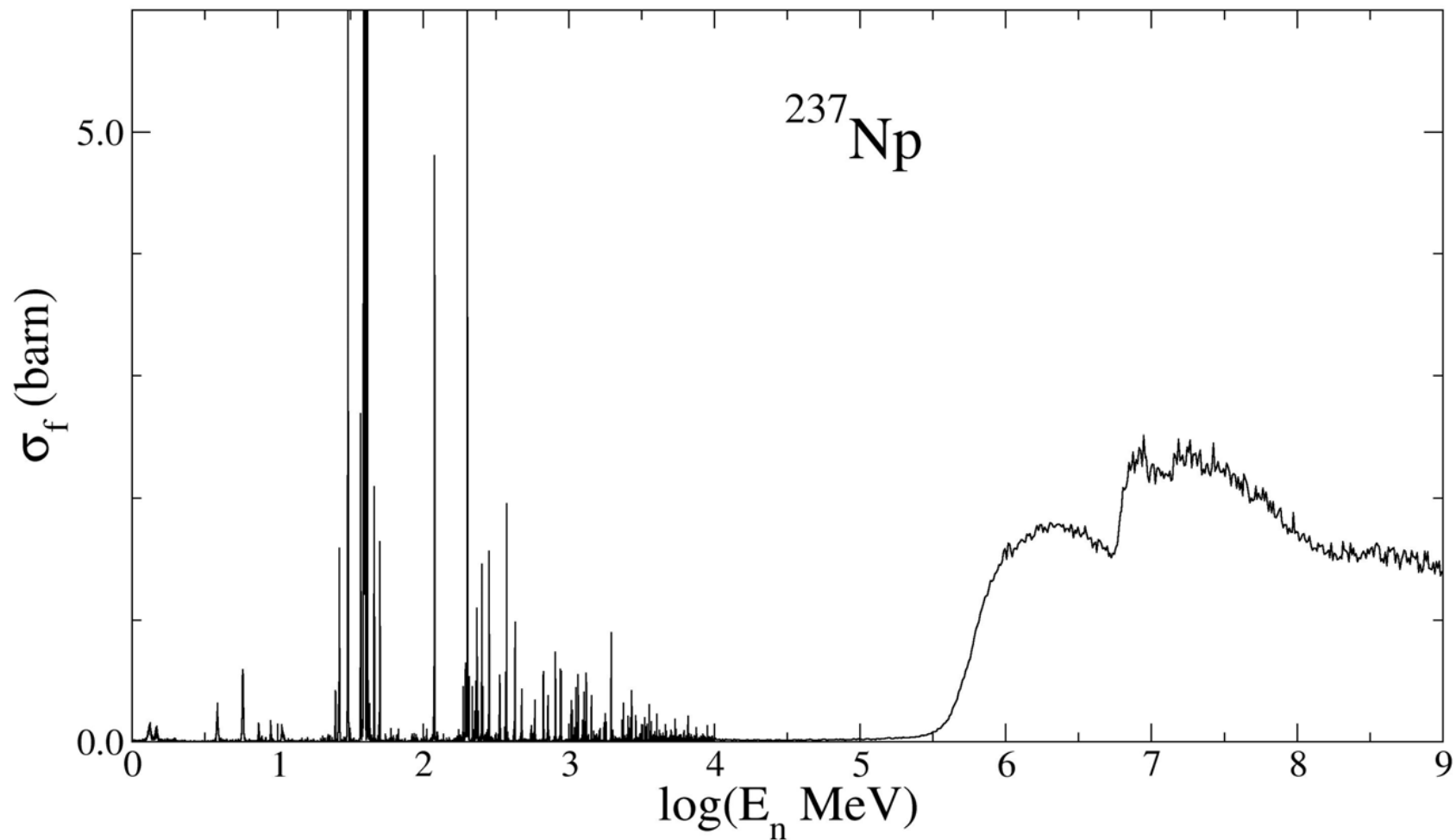


Les cibles

- Fabriquées à l'IPN (radiochimie : C. Le Naour et D. Trubert)
- Electrodeposition d'une fine couche ($0,3 \text{ mg/cm}^2$) sur feuille d'aluminium de $2 \text{ }\mu\text{m}$ (^{232}Th , ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np)
- 8 cm diameter targets
- Characterisation :
 - α activity
 - RBS



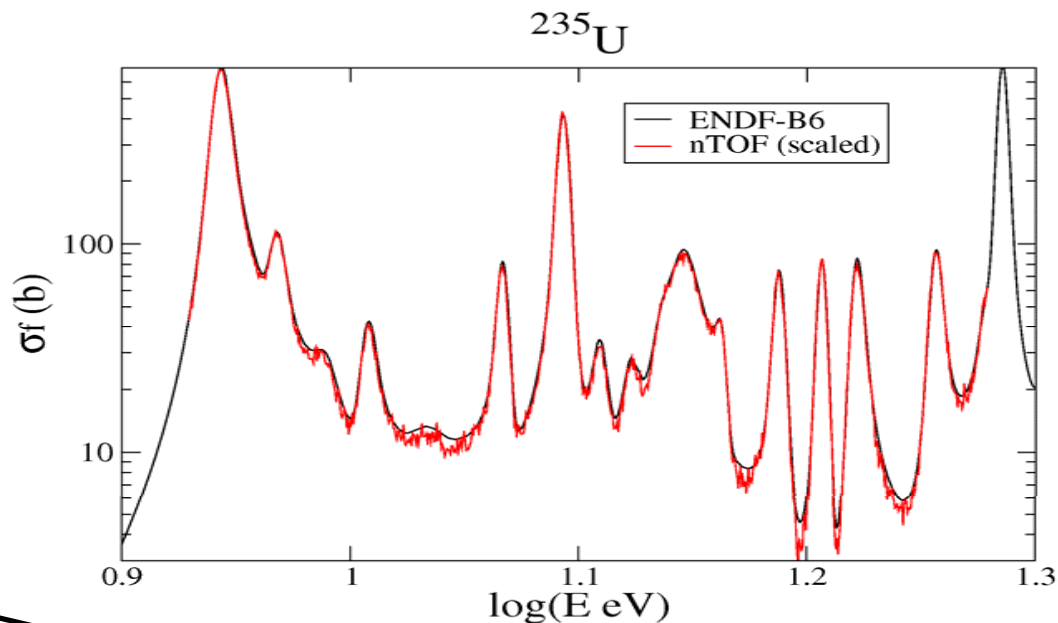
Des résonances à la spallation



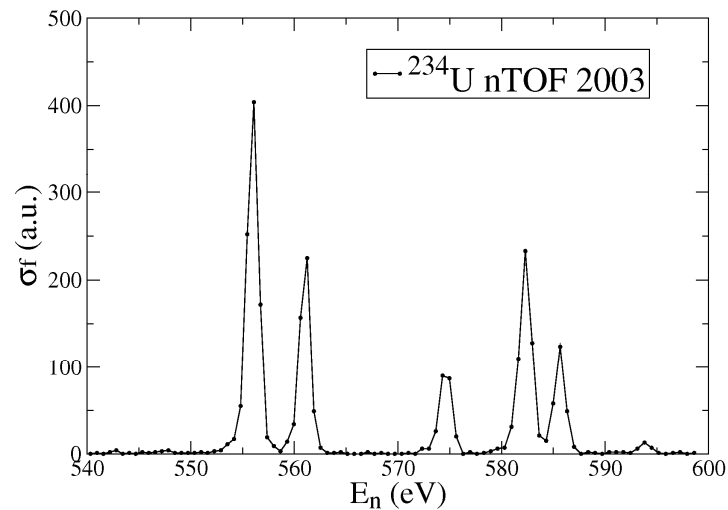
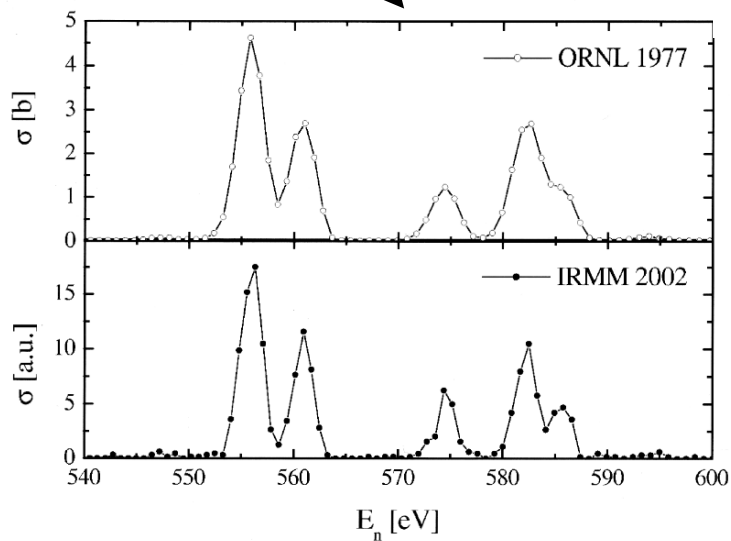
Données nucléaires :

Résolution en énergie et bruit de fond

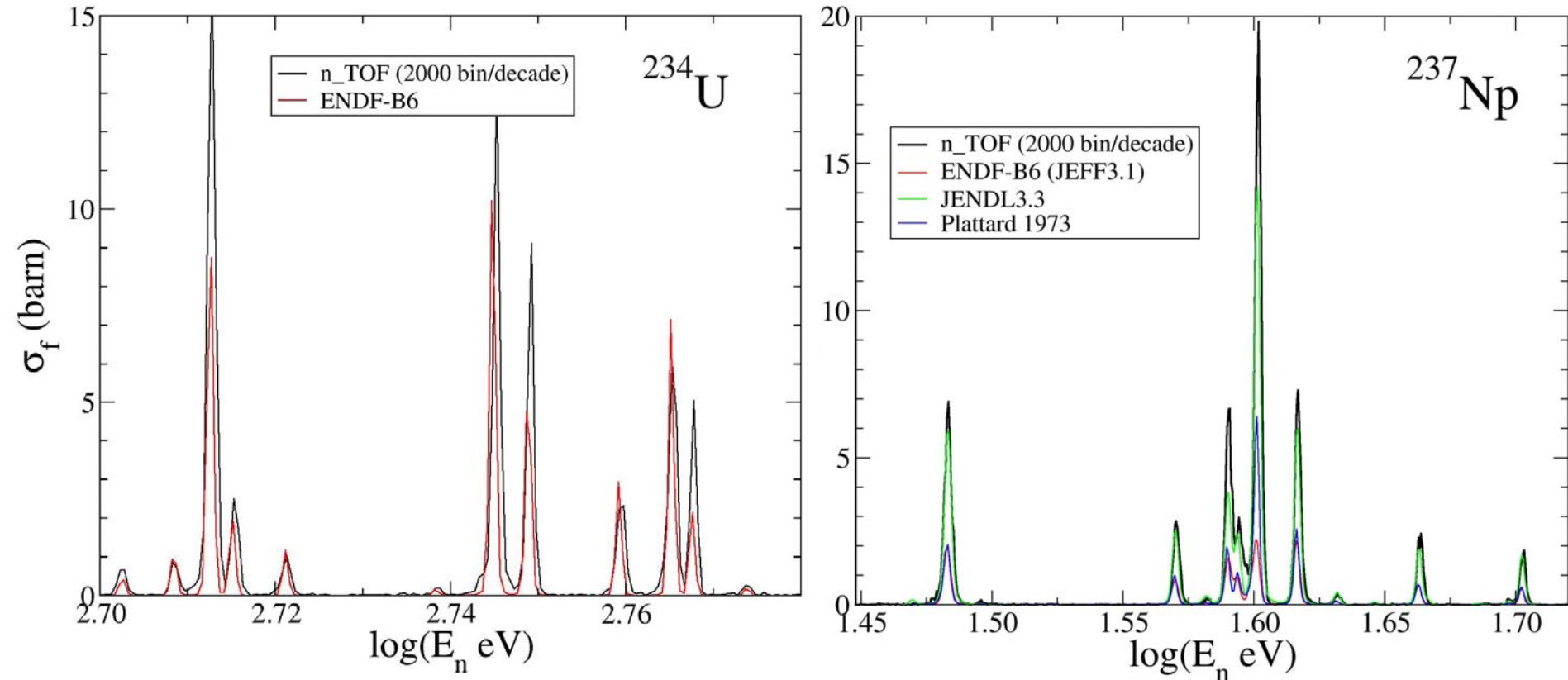
^{235}U around 10eV
(scaled and compared to ENDF)



^{234}U around 570eV



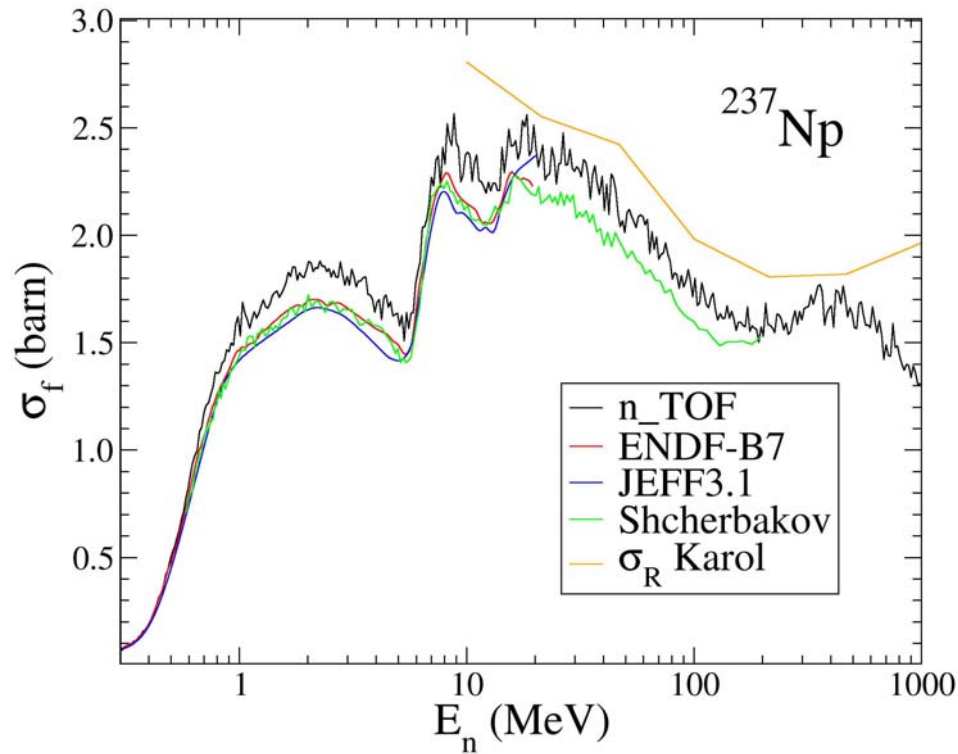
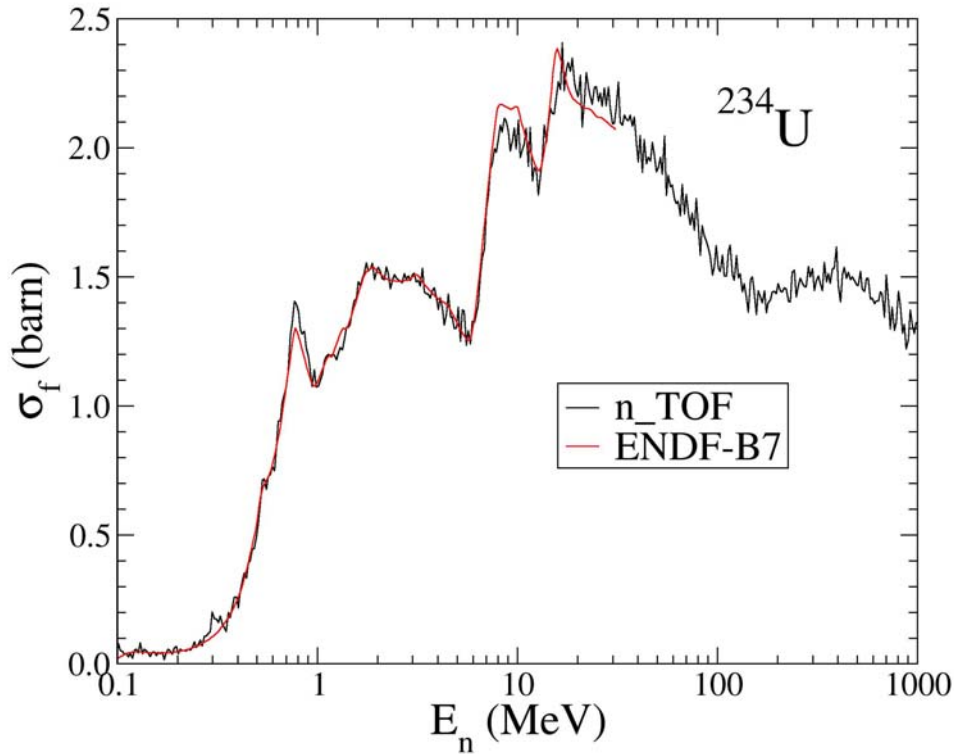
Zone des résonances....



Mise en évidence de la défaillance de certaines évaluations (ENDF-B6) et anciennes mesures pour ^{237}Np

Données nucléaires : NTOF

... au-dessus du seuil de fission



Un projet de laboratoire de fabrication et de caractérisation de couches mines radioactives

C.O. Bacri

Communautés intéressées:

- Physique de l'aval du cycle
- Astrophysique
- synthèse/étude des superlourds
- structure nucléaire

Nécessité d'un laboratoire de couches minces radioactives

- Grande difficulté à se fournir en cibles radioactives
- Perte du savoir faire en France ... et dans le monde

Contours du laboratoire:

- Fourniture des isotopes (aide)
- Fabrication des cibles
- Séparation isotopique
- Caractérisation des cibles

Pourquoi à l'IPNO:

- Service de cibles stables
- Groupe de radiochimie
- Expertise en sûreté et radioprotection
- Complément à Alto

PACS : sociologie, enseignement

Collaboration CNRS IN2P3 / SHS : le thème de la temporalité

- Les délais qui apparaissent dans le nucléaire rendent délicates, en tous cas spécifiques, la plupart des décisions
- Durée de vie des centrales : > 60 ans
- Stockage des déchets HAVL : décision 2015, début enfouissement 2070, notion de réversibilité
- Période radioactive des déchets 30 ans à $15 \cdot 10^6$ années
- Transmutation : intérêt si le nucléaire dure 150 ans au moins
 - Intérêt des sociologues, couplage IN2P3/SHS très intéressant

Enseignement : Effort national de relance de la formation en ingénierie nucléaire

→ Forte implication des enseignants-chercheurs et chercheurs de PACS

- Master «international « Nuclear Engineering » Paris 11 / INSTN
- Option Energie L1→L3 MPI, IFIPS, PC
- Cours déchets nucléaires, M2 Physique & Environnement
- Licence professionnelle « Techniques Physiques des Energies » P7/P11

Cadre des recherches

PACEN / GEDEPEON : équipe MURE (IPNO/LPSC) seul intervenant dans les actions 8 et 9 de GEDEPEON sur les systèmes innovants et scénarios

Loi 1991 et 2006, Commission Nationale d'Evaluation : études de scénarios CEA CNRS EDF R&D,

Acssone (IN2P3 / SHS) : animation d'un séminaire sur la temporalité de la décision

Programme Energie 2 du CNRS : responsabilité du groupe « nucléaire du futur »

COSSYN : Comité de Suivi sur les Systèmes Nucléaires (DGEC, DGRI, CEA, EDF, Areva, CNRS, IRSN, ASN)

Commission Nationale de Débat Public : scénarios de transmutation (2005-2007) : 2 auditions depuis 2004

EFNUDAT : European Facilities for Nuclear Data (I3, 6^{ème} PCRD): réseau sources neutrons pour données

PACS : perspectives

MURE

Développement module « sûreté » : finaliser le couplage neutro/thermo, benchmarks sur démarrage, accidents types (vidange, éjection de barre, injection d'eau claire, ...)

Etudes de systèmes

Configurations innovantes des RNR

- RNR-Na U/Pu + couv. U+AM, Th/U
- RNR refroidis au Pb, aux sels fondus

Configurations innovantes de réacteurs à eau : ABWR U/Pu, Th/Pu, Th/U

Etudes de scénarios

Utilisation du code COSI (CEA) : formation 1 semaine en Avril 2008

Calculs COSI sur cycle 3 strates, RNR Th/U
Rapprochements avec CNRS/SHS économistes

Données nucléaires

Mesure de sections efficaces de fission

Mesure des distributions angulaires des produits de fission à nToF (2009)

Problèmes importants de radioprotection
→ impossibilités de mesure sur cibles radioactives

Alternatives à nToF

Gelina (Geel) (court terme)
NFS (Ganil) (plus long terme)

A plus long terme > 2012

Grand intérêt pour FELISE@FAIR
Identification complète des produits de fission en fonction de l'énergie d'excitation
Développement de détecteurs de position des FF

Soutien demandé

Activités expérimentales (2,5 permanents)
Renforcement à court terme sous peine d'extinction lente programmée

Simulation (2 permanents + 1 détachement jusqu'à fin 2009):
un poste MdC demandé pour 2009 (pas encore confirmé)
renforcement à maintenir dans le futur