



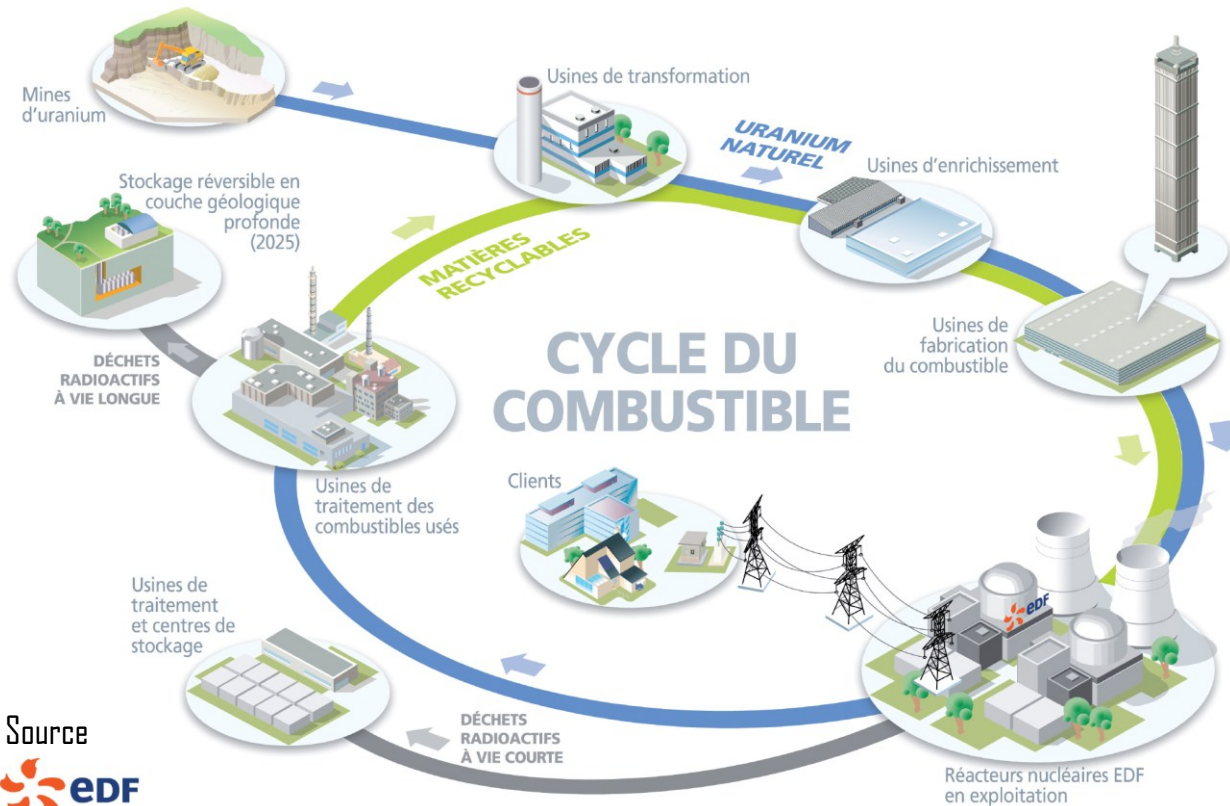
PEPR Science Amont Nucléaire de Fission (SCIAM)

Projet 1 : données nucléaires pour le cycle et les réacteurs

Maëlle Kerveno (CNRS), Fadhel Malouch (CEA)

Les données nucléaires

De quoi parle t'on?



Les **données nucléaires** interviennent à chaque étape du cycle du combustible pour estimer les **flux de neutrons**, les **quantités de matières** en jeu & les paramètres du cœur du réacteur.

$$\left[\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} + \hat{\Omega} \cdot \vec{\nabla} + \Sigma \right] \psi(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) = \int dE' \int d\hat{\Omega}' \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) \psi(\vec{r}, E', \hat{\Omega}', t) + \sum_x \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty dE' \chi_s(\vec{r}, E' \rightarrow E) \mathbf{v}_x(E', E) \Sigma_{f,x}(E', \vec{r}) \phi(\vec{r}, E') + S_{ext}(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t)$$
$$\& \quad \frac{d\mathbf{c}}{dt} = ([\sigma]\psi + [\lambda])\mathbf{c}(t); \quad \mathbf{c}(t_0) = \mathbf{c}_0$$

Les **données nucléaires** sont des nombres* quantifiant les observables de physique nucléaire utilisées pour résoudre les équations qui régissent l'évolution de la **population de neutrons** et des **isotopes**.

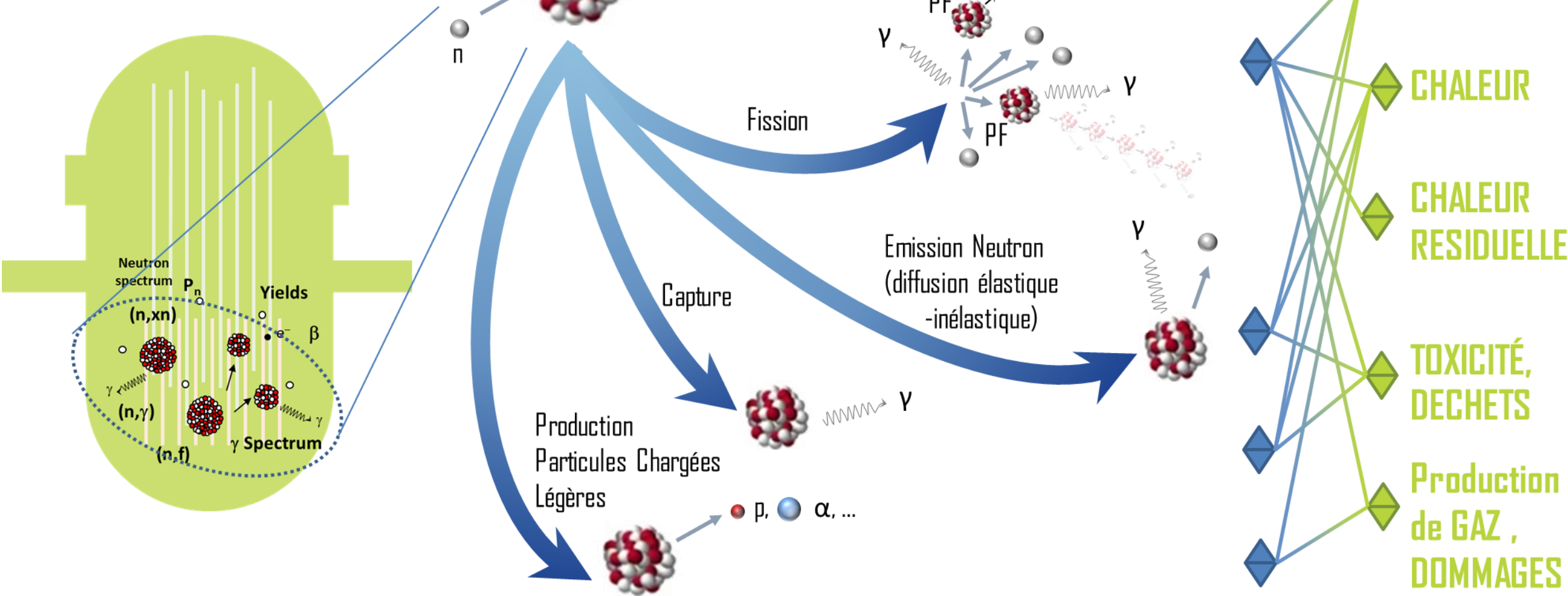
*section efficace, rendement de fission, multiplicité et spectre neutron et γ , données de décroissance, constante de décroissance radioactive



Les données nucléaires

De quoi parle t'on?

Réactions d'intérêt



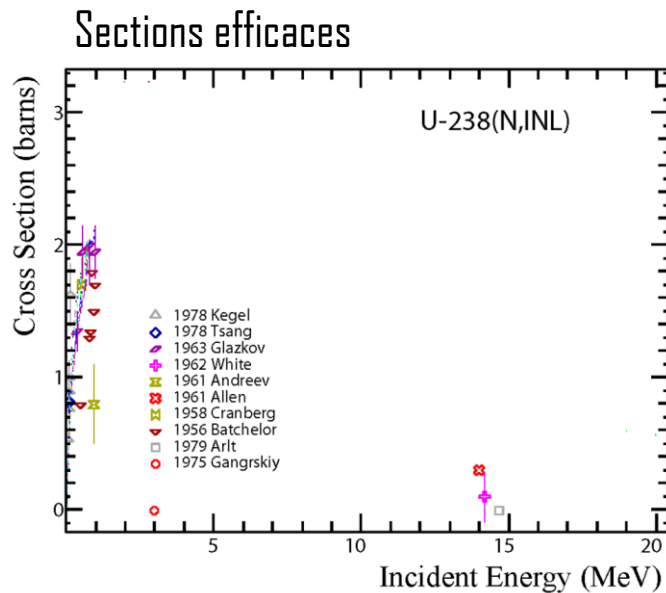


Les données nucléaires

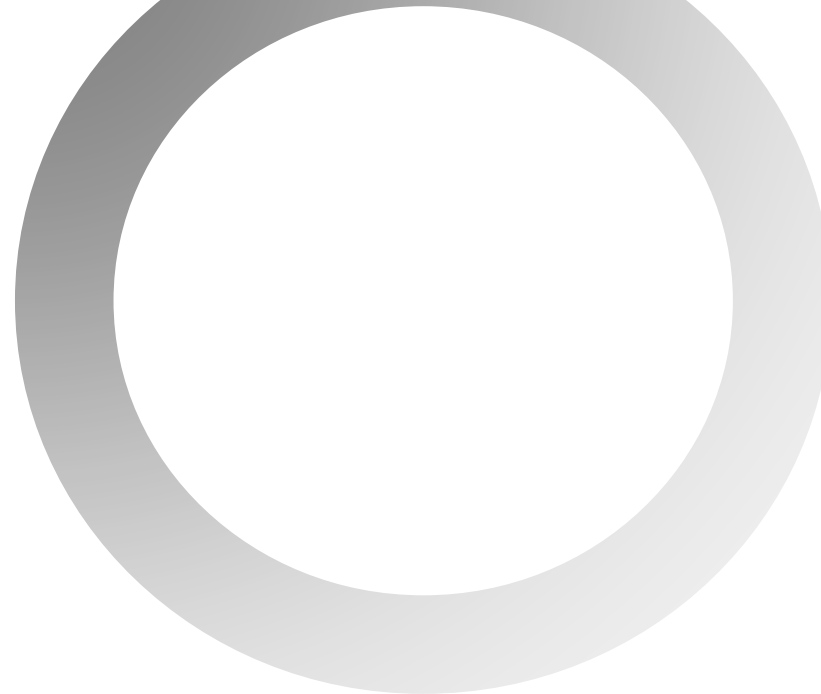
De quoi parle t'on?



Données nucléaires évaluées
("nombres")

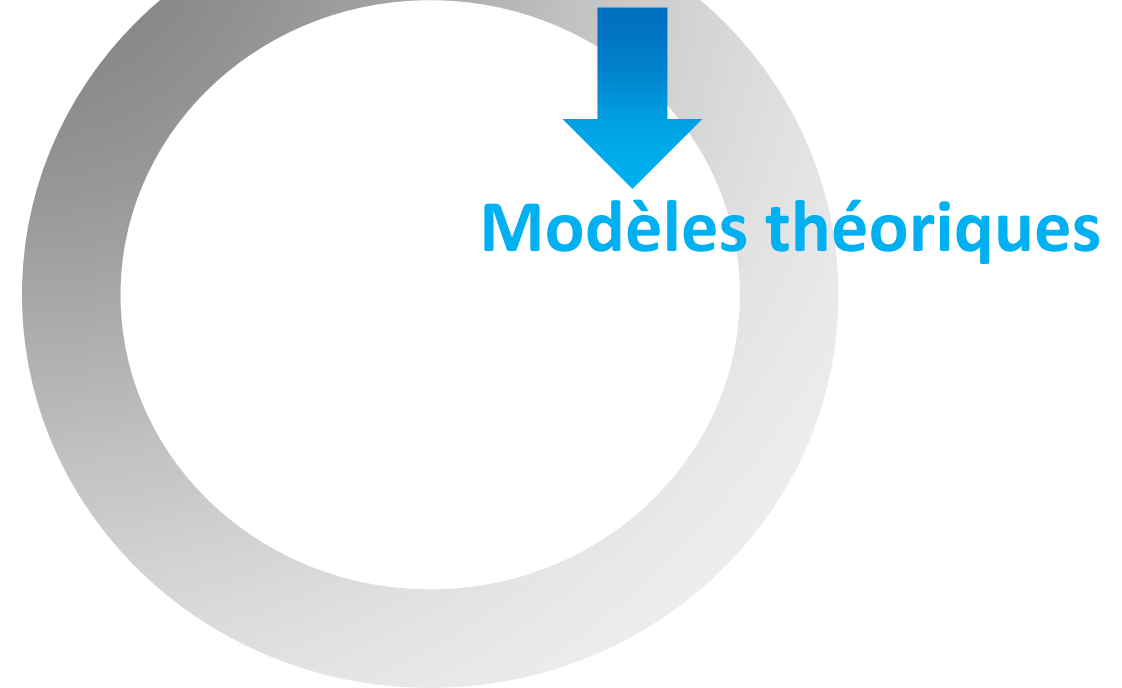


Données expérimentales
différentielles





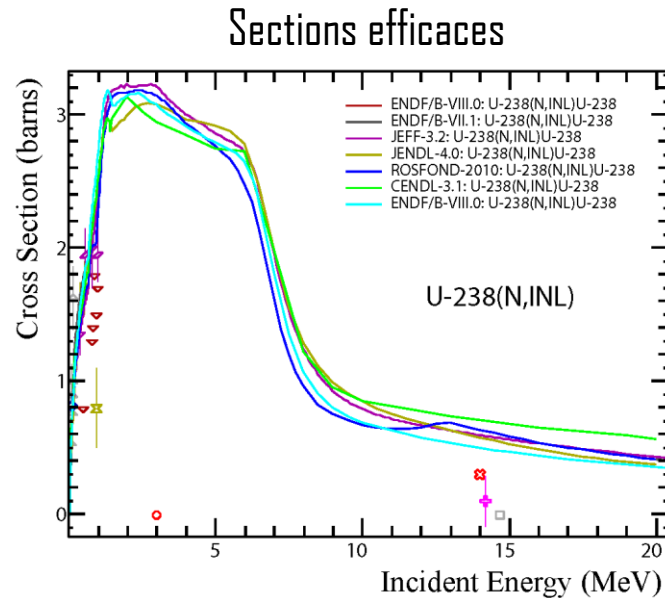
Données expérimentales différentielles



Les données nucléaires

De quoi parle t'on?

Données nucléaires évaluées
("nombres")



Les données évaluées doivent être :

Robustes – définies avec des incertitudes bien caractérisées,
répétables et traçables

Données expérimentales
différentielles

Modèles théoriques

Données évaluées

```
5.21000+1 1.49034+2 0 0 0 06210 3 16 350
-5.59644+6 -5.59644+6 0 0 0 1 1336210 3 16 351
133 2 6210 3 16 352
5.633849+6 0.000000+0 5.700000+6 1.580180-3 5.800000+6 6.073681-36210 3 16 353
5.900000+6 1.347960-2 6.000000+6 2.690410-2 6.100000+6 4.687551-26210 3 16 354
6.200000+6 7.598900-2 6.300000+6 1.119810-1 6.400000+6 1.518520-16210 3 16 355
6.500000+6 2.016680-1 6.600000+6 2.528690-1 6.700000+6 3.144490-16210 3 16 356
6.800000+6 3.780410-1 6.900000+6 4.433380-1 7.000000+6 5.136740-16210 3 16 357
7.100000+6 5.833550-1 7.200000+6 6.576591-1 7.300000+6 7.306390-16210 3 16 358
7.400000+6 8.033710-1 7.500000+6 8.746620-1 7.600000+6 9.434911-16210 3 16 359
7.700000+6 1.010320+0 7.800000+6 1.078950+0 7.900000+6 1.140340+06210 3 16 360
8.000000+6 1.202710+0 8.100000+6 1.257750+0 8.200000+6 1.313280+06210 3 16 361
8.300000+6 1.367080+0 8.400000+6 1.416210+0 8.500000+6 1.463580+06210 3 16 362
8.600000+6 1.506400+0 8.700000+6 1.546900+0 8.800000+6 1.586770+06210 3 16 363
8.900000+6 1.623670+0 9.000000+6 1.656720+0 9.100000+6 1.687930+06210 3 16 364
9.200000+6 1.717430+0 9.300000+6 1.745200+0 9.400000+6 1.771480+06210 3 16 365
9.500000+6 1.796050+0 9.600000+6 1.817200+0 9.700000+6 1.837390+06210 3 16 366
9.800000+6 1.858090+0 9.900000+6 1.876590+0 1.000000+7 1.893530+06210 3 16 367
```

Les données nucléaires

De quoi parle t'on?

Données nucléaires évaluées
("nombres")



BENCHMARKING



Données expérimentales

Différentielles – semi/intégrales

Modèles théoriques

Données évaluées



JEFF

Applications

Les données évaluées doivent être :

Robustes – définies avec des incertitudes bien caractérisées,
répétables et traçables

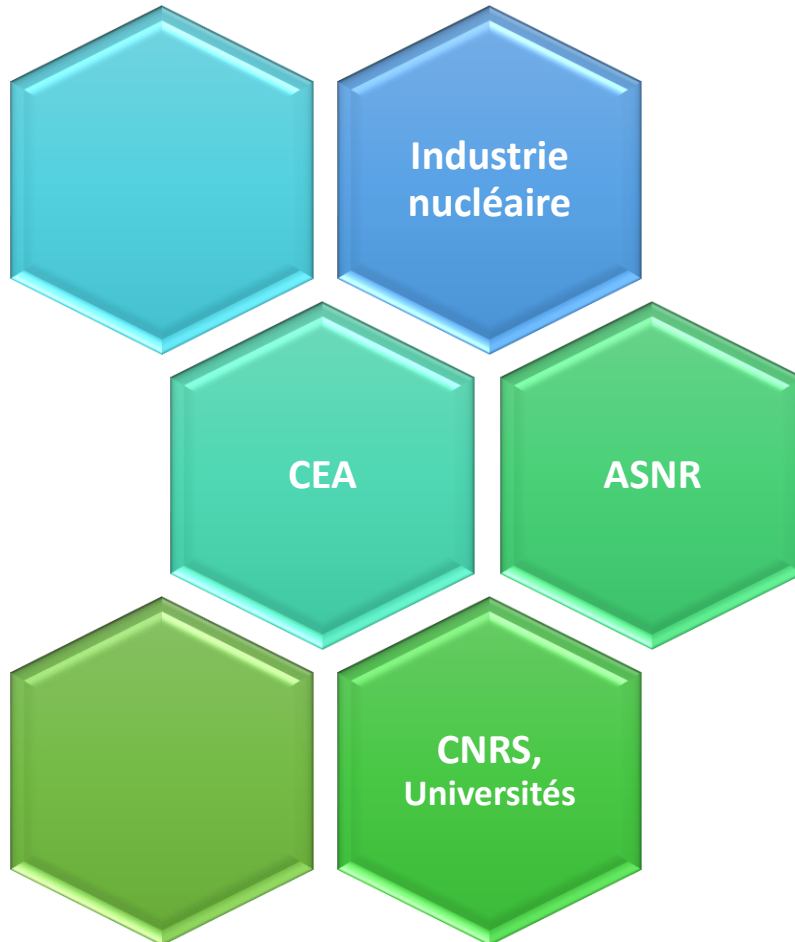
Validées – expérimentalement, utilisables par les applications



Les données nucléaires

Pourquoi doit-on toujours progresser?

Applications



Expriment les besoins pour :

Réacteurs (REL, RNR, IVème génération, SMR, AMR), Cycle du Combustible

- ❖ Écart sur des paramètres de cœur
- ❖ Écart sur composition combustible irradié
- ❖ Écart sur observables entre exp. Micro. et intégrale
- ❖ Etude de sensibilité
- ❖ Etude de la transmutation
- ❖ Nouveau cycle de combustible

...



HPRL



CRP's



Identification des pistes de progrès

- ➔ Analyse de la chaîne d'évaluation complète
- ➔ Impact sur les 3 piliers de l'évaluation



Les données nucléaires

Enjeux de recherches



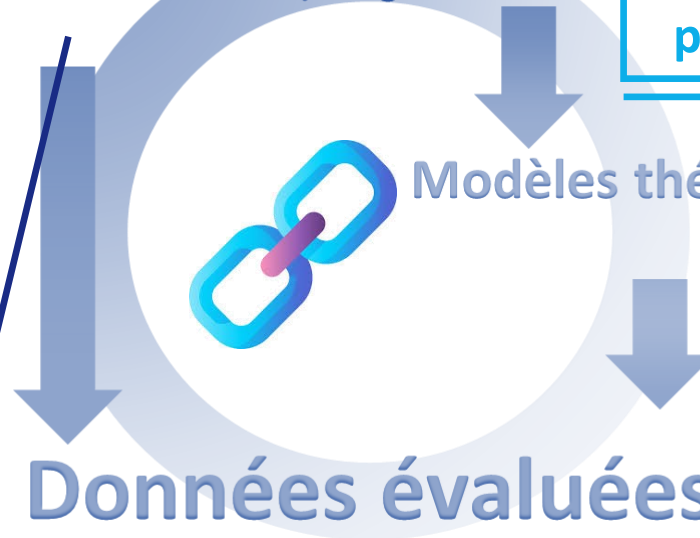
**Des objectifs ambitieux
dans un contexte contraint**

⌘ Expériences différentielles

- Nouvelles mesures indépendantes et discriminantes: développer des méthodes innovantes (domaine en énergie orphelin, isotopes déjà étudiés ou pas, large domaine en énergie, ...)
- Réduire les incertitudes systématiques, matrices de covariance
- Expériences multi-observables et mesures d'observables fondamentales (microscopiques)

Données expérimentales

Différentielles – semi/intégrales



- Vers des modèles ab initio et des approches multi-échelles
- Moins de paramètres libres, plus de modèles microscopiques

Modèles théoriques

Données évaluées

- Vers le multi-modèles (0-200 MeV), couplage des outils d'éval.
- Intégrer les matrices de covariances
- Développer les méthodes Monte-Carlo / de Bayes
- Faire des choix, porter des jugements, expertise de l'évaluateur

SCIAM projet 1

Un levier pour relever les défis



**Adaptation et Développement
de dispositifs expérimentaux innovants**



**Formation de jeunes chercheurs
(doctorants et post doctorants)**



**Mobilisation de la communauté française
(dans la continuité du projet NEEDS/NACRE)**

SCIAM projet 1

Un levier pour relever les défis



Complémentarité des compétences
des différents partenaires

Experimental Data

semi/integral & Differential



Theoretical Models

Evaluated Data
Applications

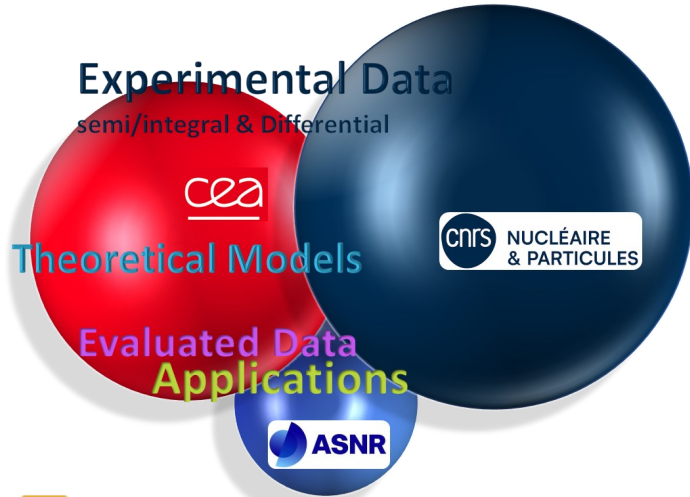


- IPHC Strasbourg (CNRS & Université de Strasbourg)
- SUBATECH Nantes (CNRS & Nantes Université, IMT Atlantique)
- LPSC Grenoble (CNRS & Université Grenoble Alpes & Grenoble INP)
- LP2i Bordeaux (CNRS & Université de Bordeaux)
- IJCLab Orsay (CNRS & Université Paris Saclay & Université Paris-Cité)
- GANIL (CNRS & CEA)
- CEA/DES/IRESNE
- CEA/DAM/SPhN
- CEA/DRF/IRFU

ASNR • ASNR

SCIAM projet 1

Un levier pour relever les défis



Budget ambitieux



4 406 k€



Instruments 36%



Ressources Humaines 37%



Mobilisation RH



Personnel permanent 491 p.mois



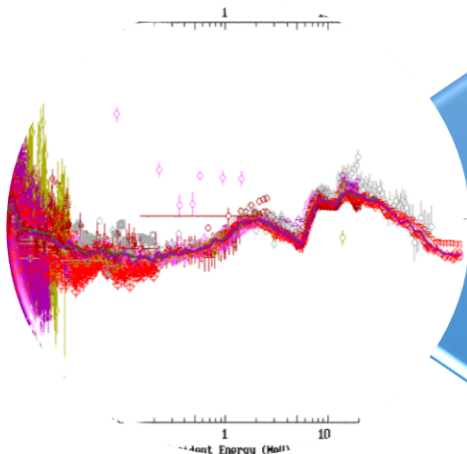
2 ½ thèses (financées PEPR)



15 ans de post-doc (financés PEPR)

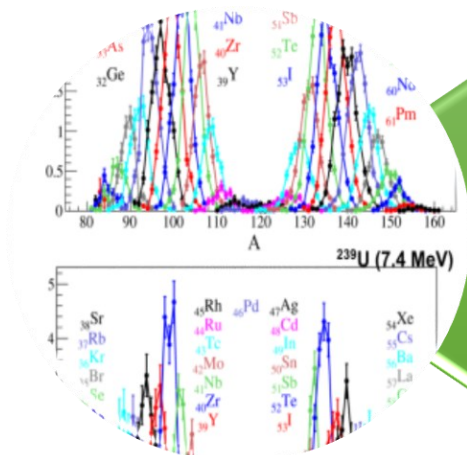
SCIAM projet 1

Un levier pour relever les défis



WP1 : Mesures des sections efficaces de réaction

- Diffusion inélastique, élastique du neutron et réaction (n, xn) sur les actinides et Cu, Ni, Cr
- Fission des isotopes du Pu (239, 240 et 241) et capture du Pu241
- Réinterprétation d'expériences intégrales passées pour la diffusion thermique des neutrons



WP2 : Mesures et évaluation des propriétés des produits de fission

- Mesure et évaluation des rendements de fission thermique et rapide
- Mesure des rendements de neutrons retardés et spectres des neutrons prompts
- Mesure de la désintégration β , γ des produits de fission



SCIAM projet 1: programme scientifique

WP1 Mesures de sections efficaces

✓ $^{239}\text{Pu}(n, f)$, $^{240}\text{Pu}(n, f)$, $^{241}\text{Pu}(n, f) \& (n, \gamma)$



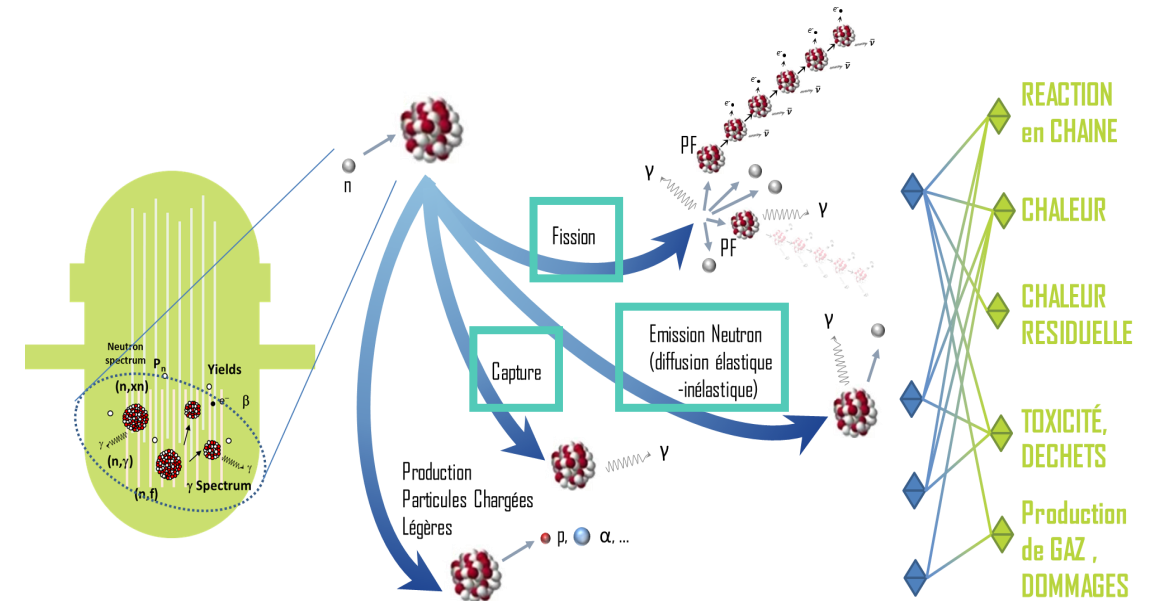
- ⌘ Réactivité / sûreté
 - ⌘ Combustible utilisé
 - ⌘ Multirecyclage Pu - combustibles MOX
- => Des évaluations et des mesures en désaccord ou très peu de mesures contraignantes



✓ $^{238}\text{U}(n, n'e^-)$, $^{238}\text{U}(n, 2-3n\gamma)$, $^{239}\text{Pu}(n, n'\gamma)$, $^{65,63}\text{Cu}(n, n \& n')$



- ⌘ Criticité
 - ⌘ Nappe de puissance
 - ⌘ Radioprotection
 - ⌘ Combustible utilisé
- => réactions mal connues expérimentalement, modélisation théorique peu contrainte



✓ **Loi de diffusion thermique des neutrons**



- ⌘ Thermalisation des neutrons
 - ⌘ Criticité
- => Propagation des incertitudes à implémenter

SCIAM projet 1: prog. scientifique

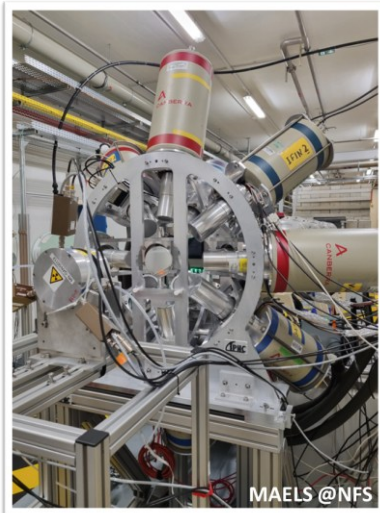
WP1 Mesures de sections efficaces



$\text{Nat}, ^{65}\text{Cu}(n, n); (n, n')$  iresne



$^{239}\text{Pu}(n, n'\gamma)$ 



$^{238}\text{U}(n, 2-3n\gamma)$



$^{238}\text{U}(n, n\gamma)$ 



Diffusion élastique
& inélastique du neutron



iresne



SCIAM projet 1: prog. scientifique

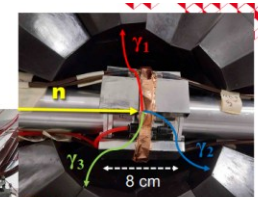
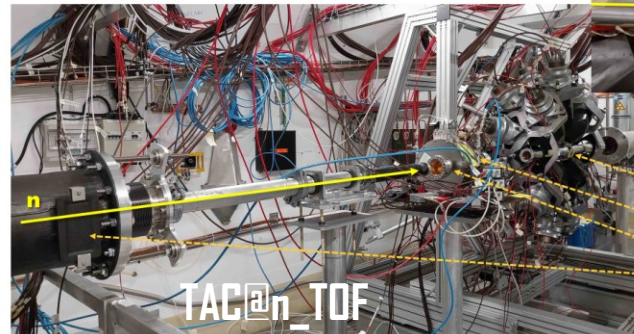
WP1 Mesures de sections efficaces



$^{241}\text{Pu}(n, f) \text{ \& } (n, \gamma)$ 

Rapport α jusqu'à 100-200 eV
XS (n, f) du thermique à ~ 1 MeV

**n_TOF EAR1 measurement
with the Total Absorption Calorimeter (TAC)**
Data taking: 7 weeks in July-August 2025

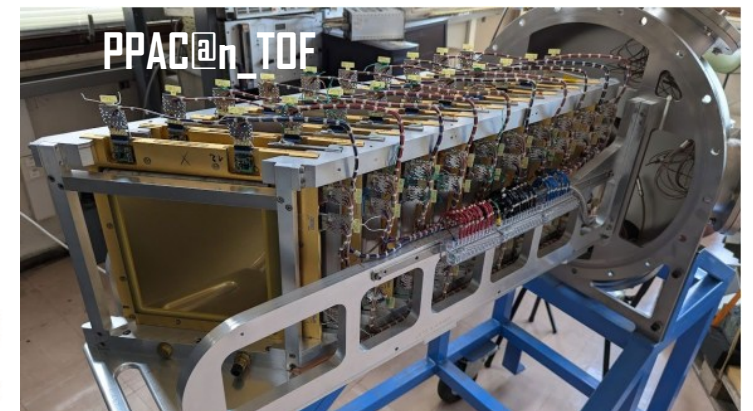


Zoom on FICH-Pu241
inside the TAC (open)

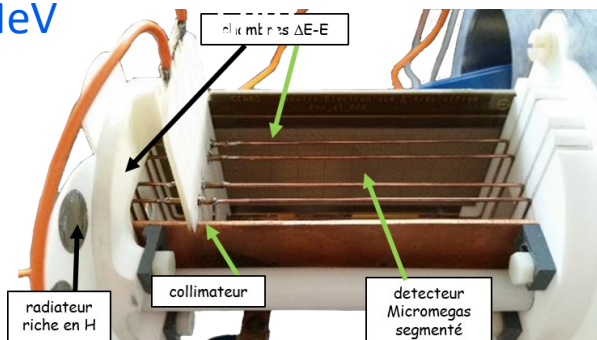
FICH-Pu241
FICH-U235 (reference)
 ^{235}U PTB LMFC (ref.)
SiMon (reference)

$^{239}\text{Pu}(n, f)$ 

XS (n, f) du thermique à ~ 1 GeV



$^{240}\text{Pu}(n, f)$ $E_n < 1$ MeV



radiateur
riche en H

collimateur

détecteur
Micromegas
segmenté

Fission & capture





SCIAM projet 1: prog. scientifique

WP1 Mesures de sections efficaces

Utilisation de données d'expérience à l'ILL (France) et au SNS (USA)

Quantifier et propager les incertitudes TSL.

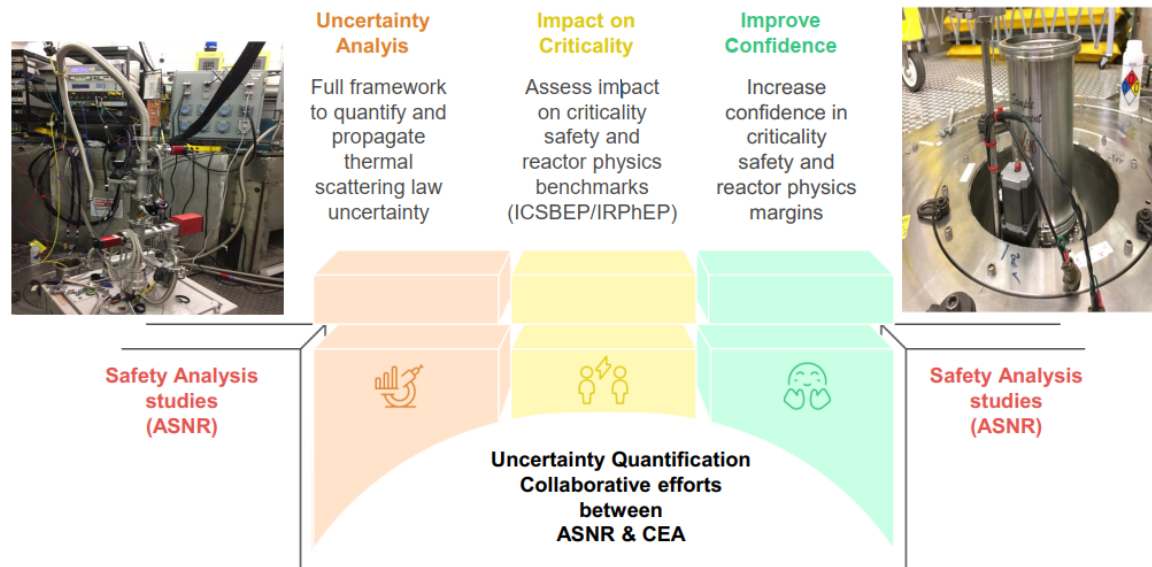
Evaluer l'impact sur la criticité, la sûreté et les benchmarks de réacteurs (ICSBEP/IRPhEP)

Améliorer la confiance dans les calculs de criticité et les marges



THIS PROJECT

OBJECTIVES & COLLABORATION



½ SCIAM, ½ ASNR



VAIBHAV JAISWAL, PEPR SCIAM, JOINT ASNR/CEA PHD PROPOSAL

JUNE 2026

7



SCIAM projet 1: programme scientifique

WP2 Mesure et évaluation des propriétés des produits de fission

✓ Rendements de fission thermique et rapide

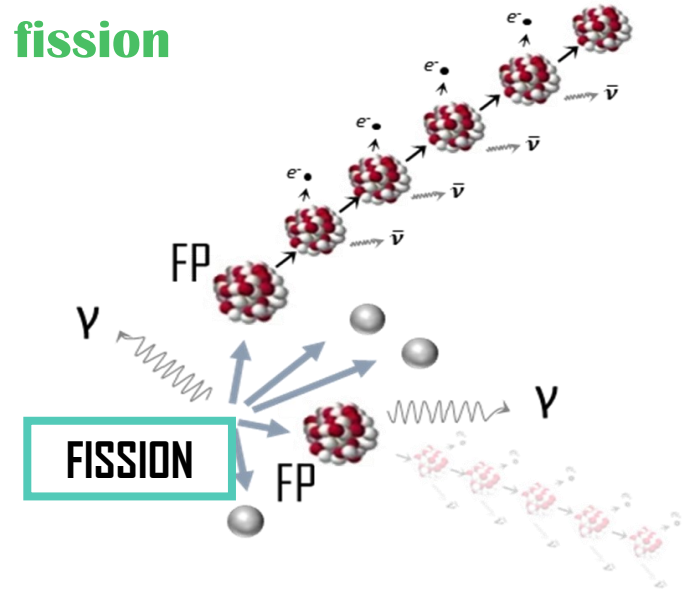


- ✕ Chaleur résiduelle
 - ✕ Combustibles usés
 - ✕ Criticité, sûreté, radioprotection
- => modèle théorique de la fission à améliorer, besoin de données expérimentales plus complètes dans le domaine thermique et de nouvelles données dans le domaine rapide

✓ Emission des neutrons prompts et retardés



- ✕ Réactivité
 - ✕ Contrôle de la réaction en chaîne
 - ✕ Endommagement de la cuve du réacteur
- => de grandes dispersions dans les mesures à basse et haute énergie, manque des données expérimentales, des grandeurs difficiles à modéliser



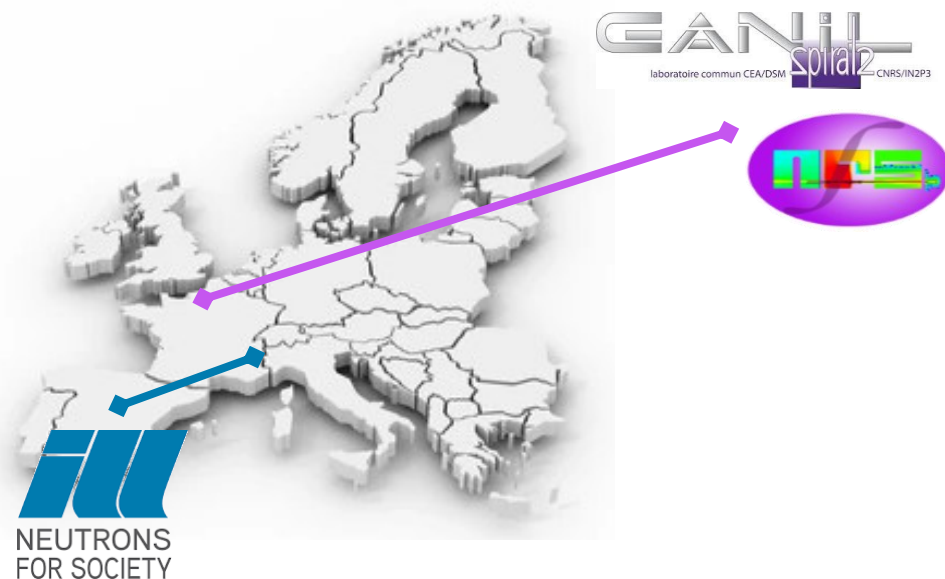
✓ Désintégration β , γ des produits de fission



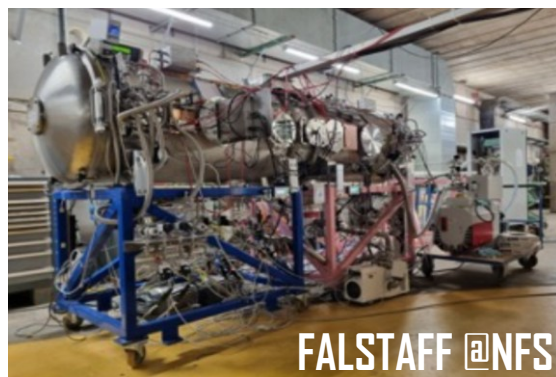
- ✕ Chaleur résiduelle
 - ✕ Sûreté
 - ✕ Outils de non-prolifération
- => Données expérimentales parcellaires et entachées de biais expérimentaux, incertitude modélisation à améliorer

SCIAM projet 1: prog. scientifique

WP2 Mesure et évaluation des propriétés des produits de fission



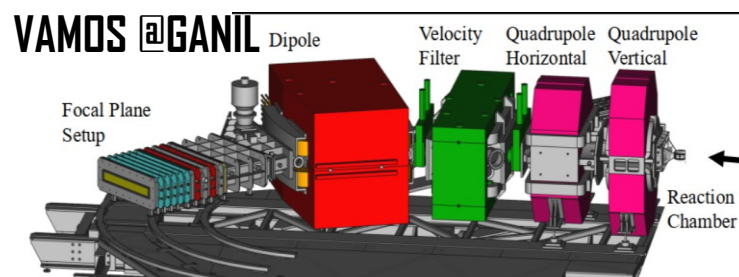
Rendement en masse (& en charge)
avant /après evaporation $^{235}\text{U}(n_{\text{fast}}, f)$



cea irfu GANIL



Rendement en masse & en charge
 ^{238}U , ^{236}U via la méthode de la
cinématique inverse

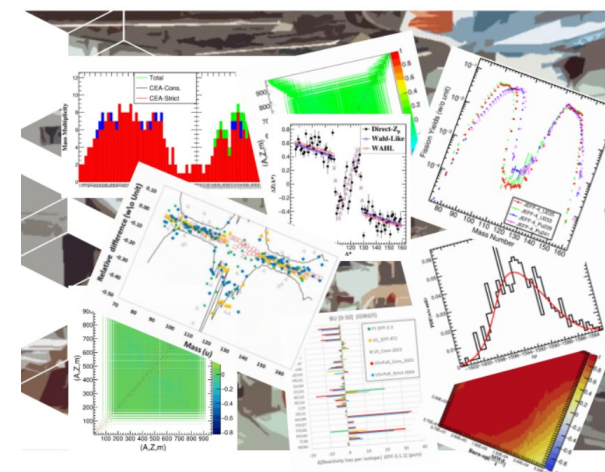


GANIL



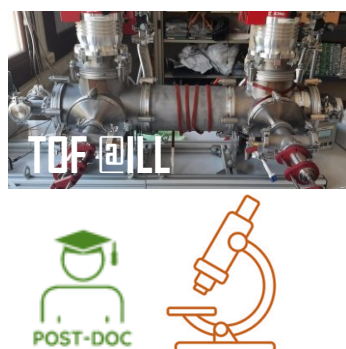
Evaluation des rendements
de fission du thermique
au rapide

cea iresne



Rendement indépendants & cumulés
& en masse : $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$ & $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$

LPSC
GRENoble | MODANE
cea iresne

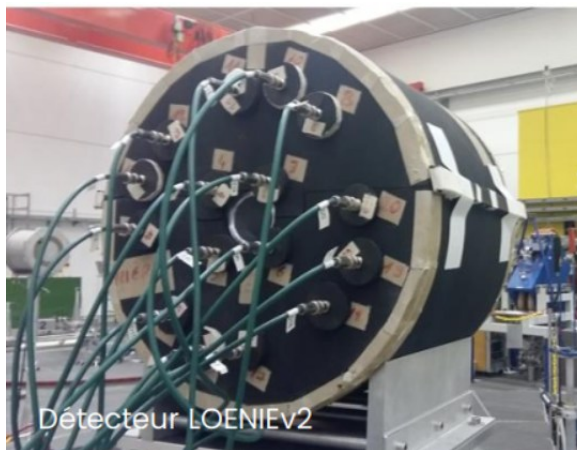


SCIAM projet 1: prog. scientifique

WP2 Mesure et évaluation des propriétés des produits de fission



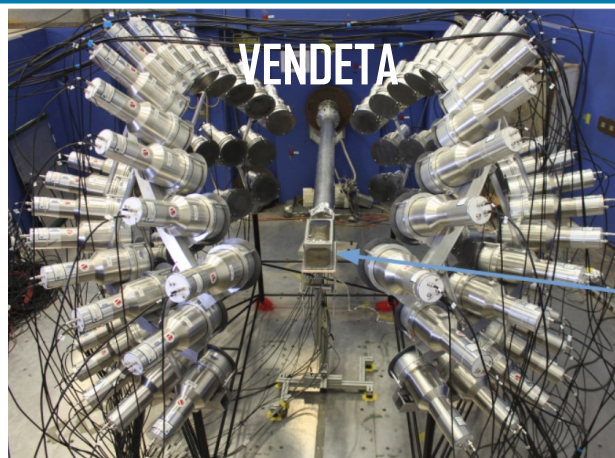
Rendements de neutrons retardés de fission ^{239}Pu & ^{235}U (1 - 20 MeV)



Détecteur LOENIEV2



Mesure des spectres des neutrons prompts et de la multiplicité moyenne des neutrons $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$ & $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$



Emission
neutrons prompts
& retardés



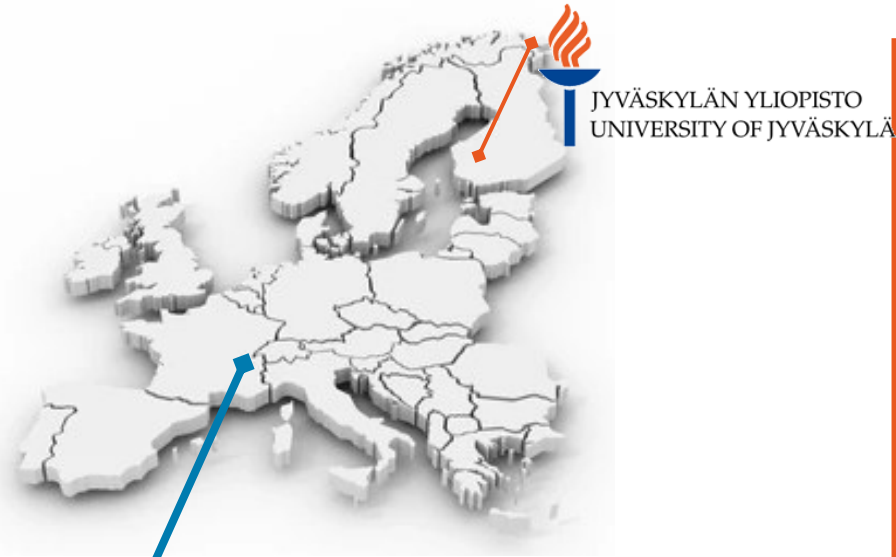
iresne





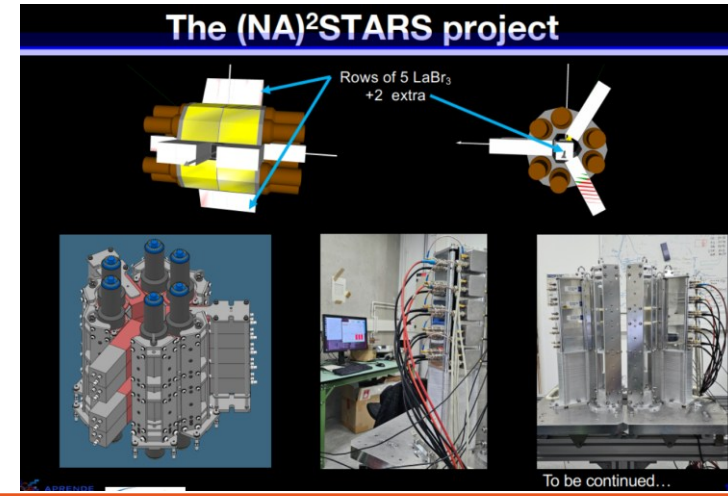
SCIAM projet 1: prog. scientifique

WP2 Mesure et évaluation des propriétés des produits de fission



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ

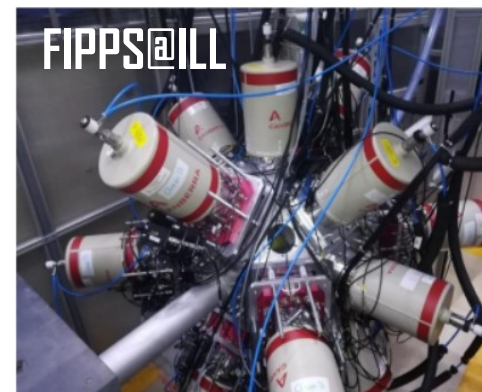
Développement d'un nouveau spectromètre TAS pour la mesure de données de décroissance exempte de l'effet Pandemonium



Données de décroissance



Mesure des γ de décroissance $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$
& mesure intégrales des spectres d'électrons
 $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$ & $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$



Take away message

Effort expérimental important : instruments de pointe provenant de l'innovation en recherche fondamentale en physique nucléaire

Production de :

données expérimentales aux incertitudes maîtrisées et réduites

(HPRL, casse-tête de l'évaluation, ...)

données expérimentales inédites

(HPRL, systèmes nucléaire du futur, ...)

données systématiques pour calibrer les modèles

Des données de qualité pour le projet JEFF exp & eval

Levier pour fédérer la communauté française (CNRS, CEA, ASNR) autour d'objectifs communs

Favoriser les échanges entre les physiciens expérimentateurs et évaluateurs français

Une force pour exister dans le paysage européen

Booster la formation

des doctorants et post doctorants

Amorce de la construction d'un vivier de jeunes chercheurs

Préparer les programmes de recherche futurs

Merci