

Atelier Accélérateurs, Recherche et Société

25-27/03/2026, Grenoble

Données nucléaires pour les applications à l'énergie nucléaire

Maëlle Kerveno, IPHC – CNRS/Université de Strasbourg



Données nucléaires pour les applications à l'énergie nucléaire

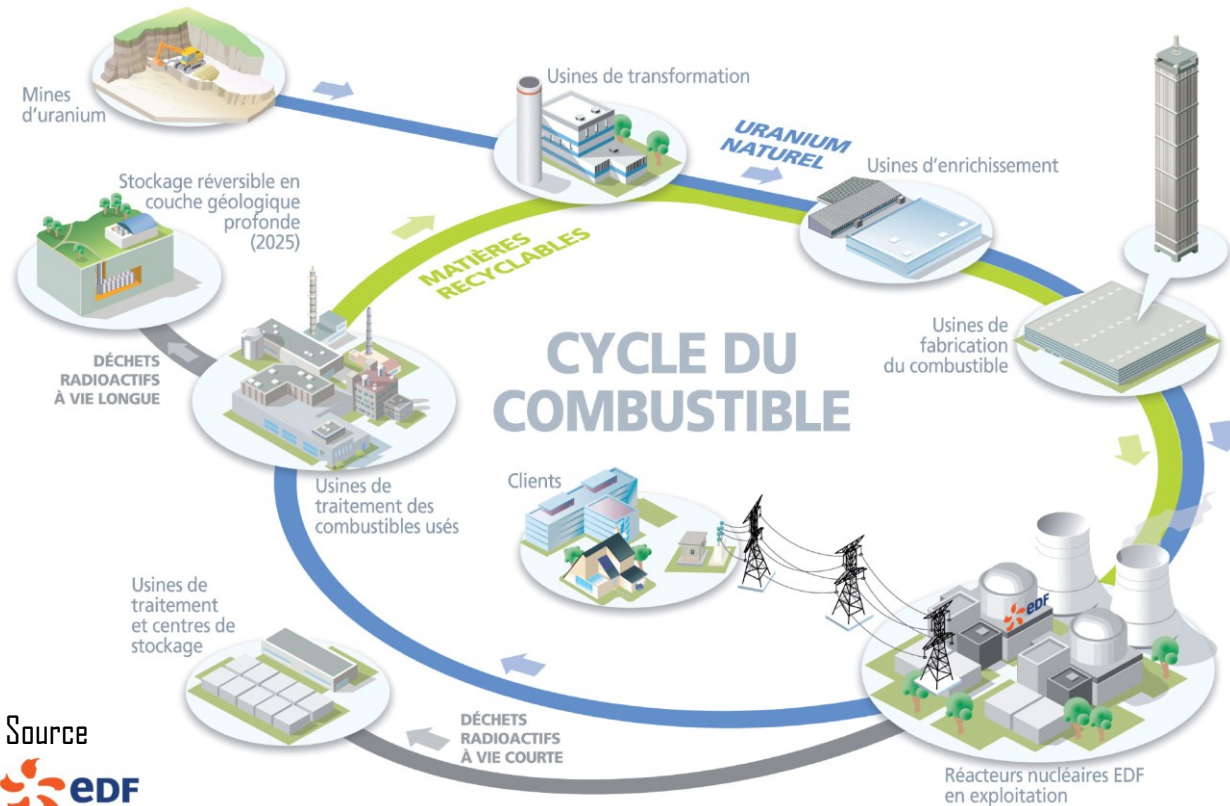
Données nucléaires évaluées : Contexte, besoins & enjeux de recherches

Données nucléaires : Quelles observables de physique nucléaire mesure-t 'on?

Les installations

Conclusions et perspectives

Contexte



Source
EDF

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.

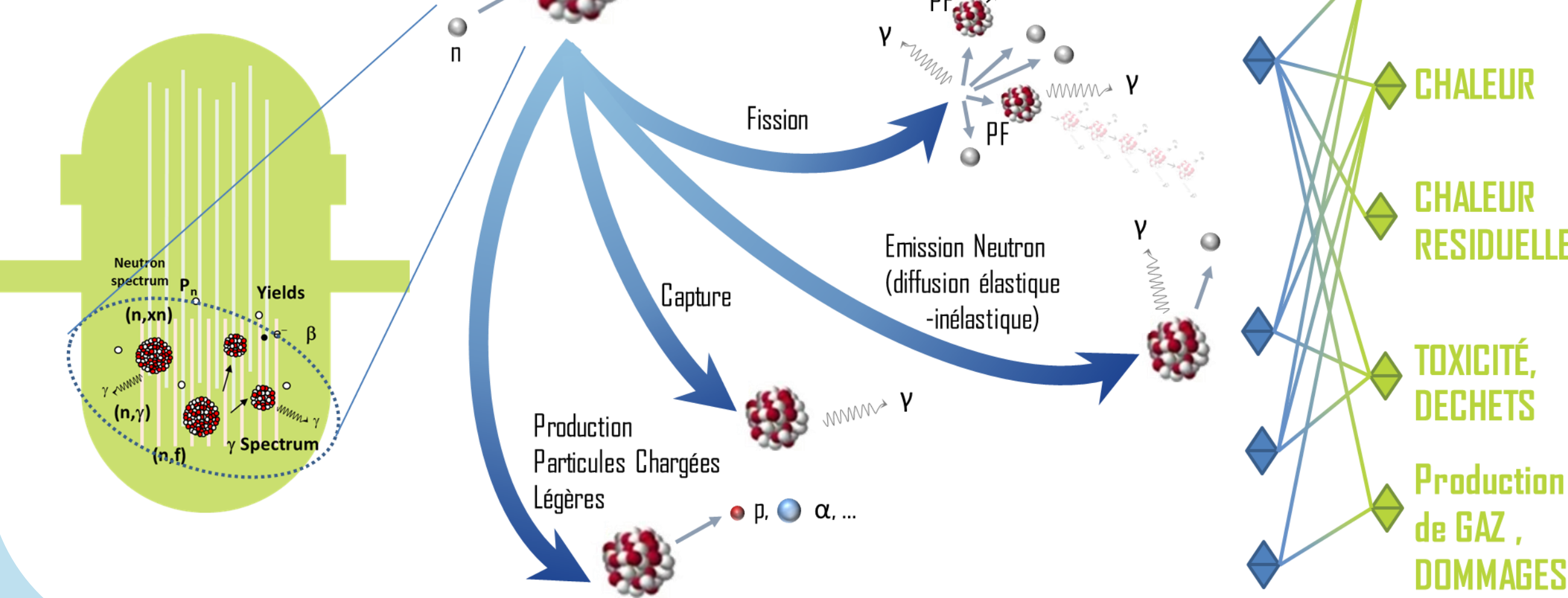
$$\left[\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} + \hat{\Omega} \cdot \vec{\nabla} + \Sigma \right] \psi(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) = \int dE' \int d\hat{\Omega}' \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) \psi(\vec{r}, E', \hat{\Omega}', t) + \sum_x \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty dE' \chi_x(\vec{r}, E' \rightarrow E) \nu_x(E', E) \Sigma_{f,x}(E', \vec{r}) \phi(\vec{r}, E') + S_{ext}(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) \quad \& \quad \frac{dc}{dt} = ([\sigma]\psi + [\lambda])c(t); \quad c(t_0) = c_0$$

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



Réactions d'intérêt



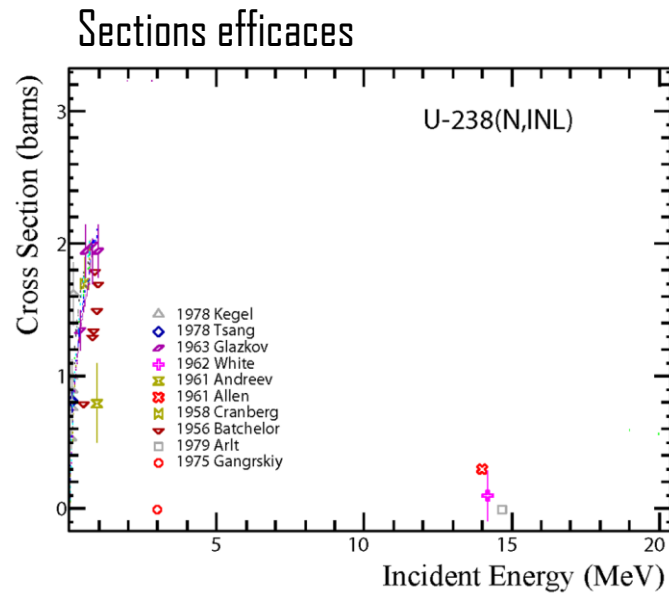


Données nucléaires évaluées ("nombres")

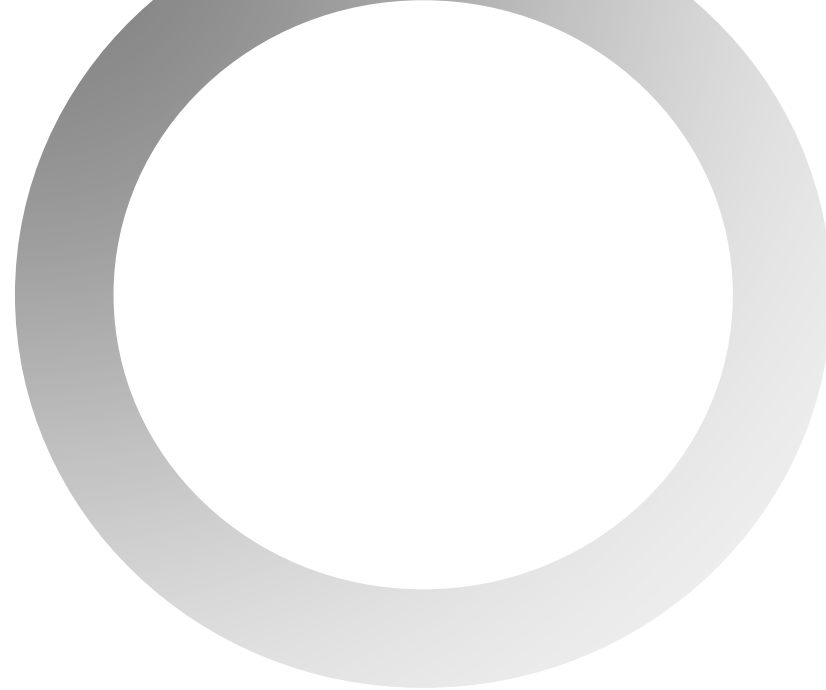
$$\begin{aligned} & \left[\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} + \hat{\Omega} \cdot \vec{\nabla} + \Sigma \right] \psi(\vec{r}, E, \hat{\Omega}, t) \\ &= \int dE' \int d\hat{\Omega}' \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \hat{\Omega}' \rightarrow \hat{\Omega}) \psi(\vec{r}, E', \hat{\Omega}', t) \\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

$$\& \quad \frac{d\mathbf{c}}{dt} = ([\sigma] \psi + [\lambda]) \mathbf{c}(t);$$
$$\mathbf{c}(t_0) = \mathbf{c}_0$$

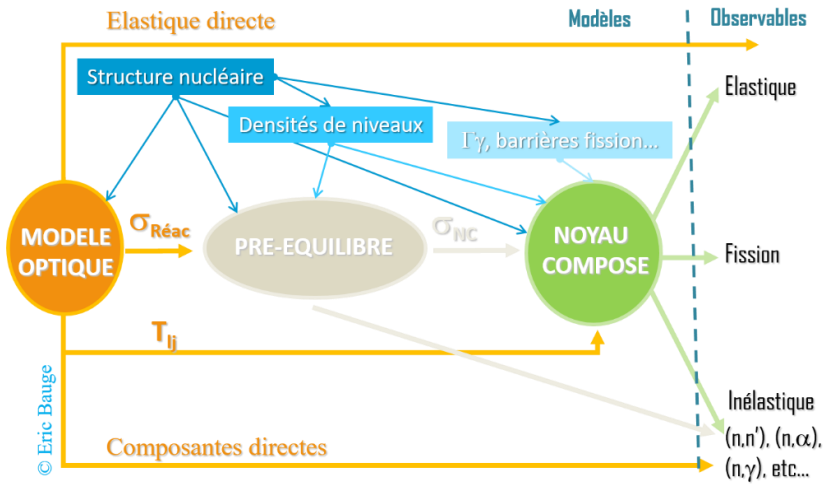
Données nucléaires évaluées ("nombres")



Données expérimentales différentielles



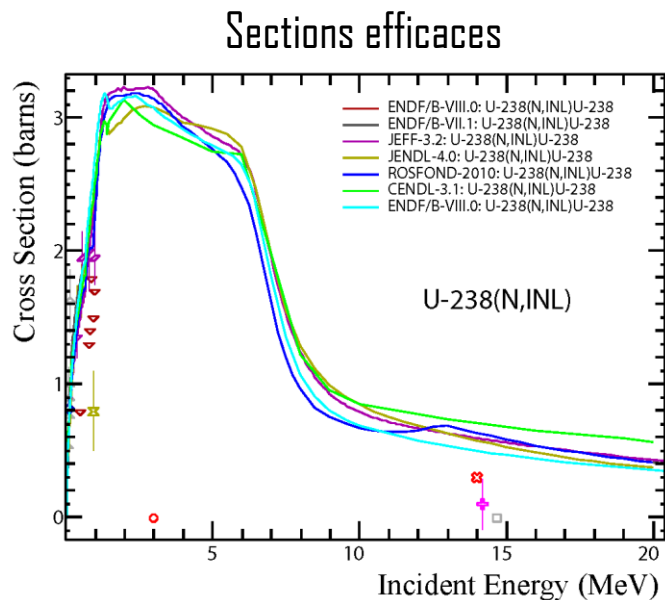
Données nucléaires évaluées ("nombres")



Données expérimentales différentielles

Modèles théoriques

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 4.9334+2 0 0 0 06210 3 16 350
-5.59644+6 -5.95644+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
    
```

Données nucléaires évaluées
("nombres")



BENCHMARKING



Données expérimentales
Différentielles – semi/intégrales

Modèles théoriques

Données évaluées



Applications

Les données évaluées doivent être :

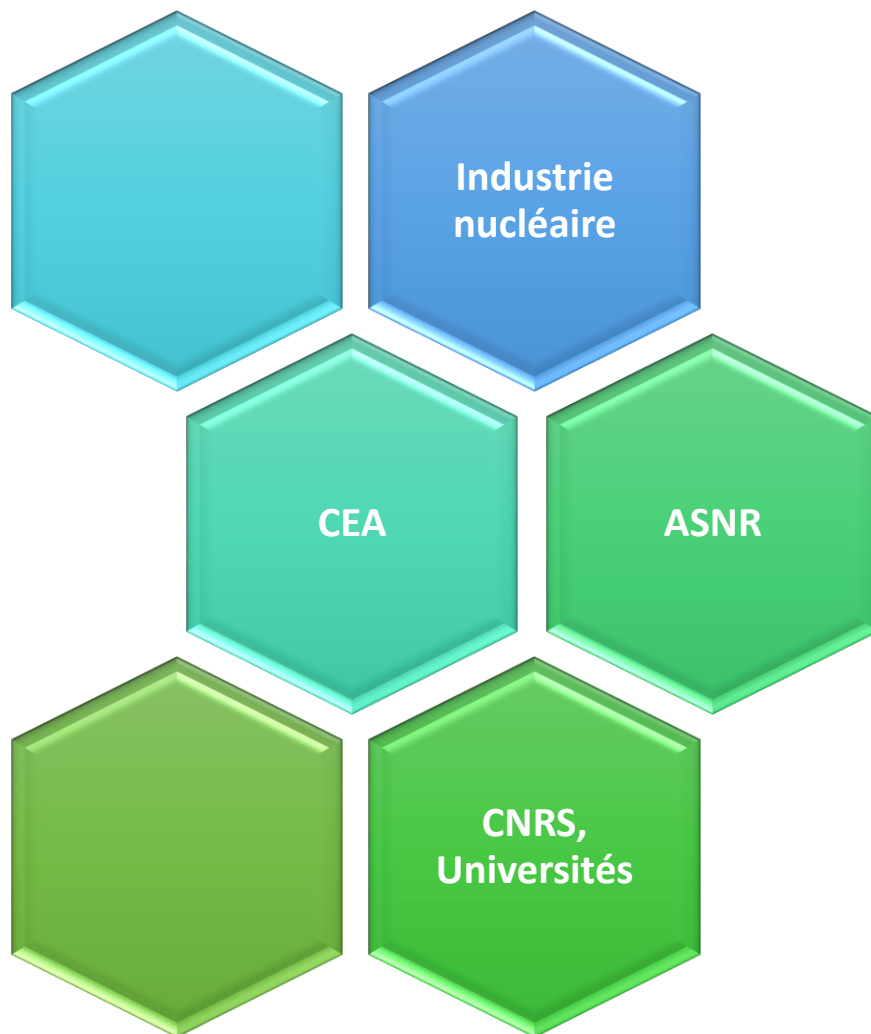
Robustes – définies avec des incertitudes bien caractérisées, répétables et traçables

Validées – expérimentalement, utilisables par les applications



Besoin d'amélioration

Applications

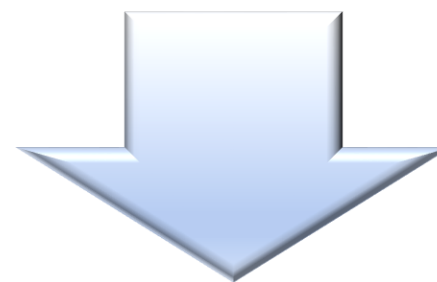


Expriment les besoins pour :

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

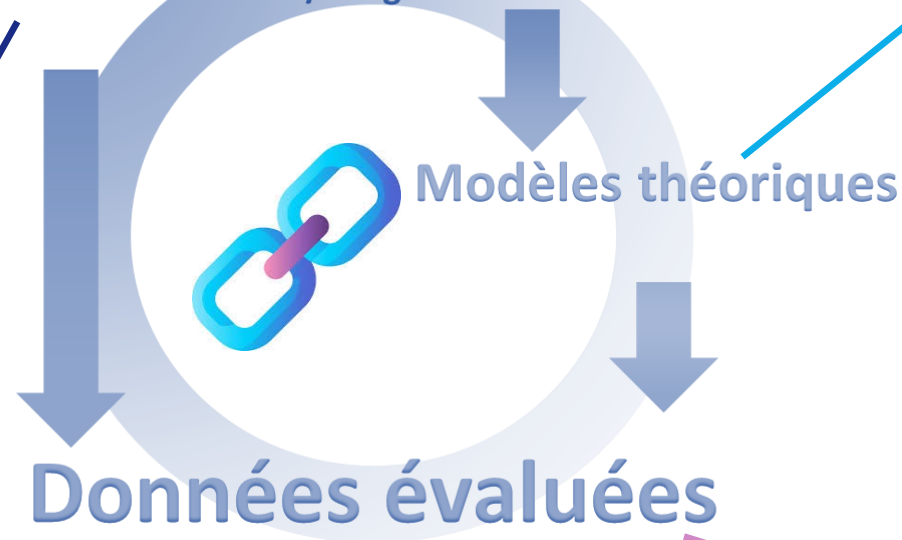
- ➔ Analyse de la chaîne d'évaluation complète
- ➔ Impact sur les 3 piliers de l'évaluation

⌘ 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



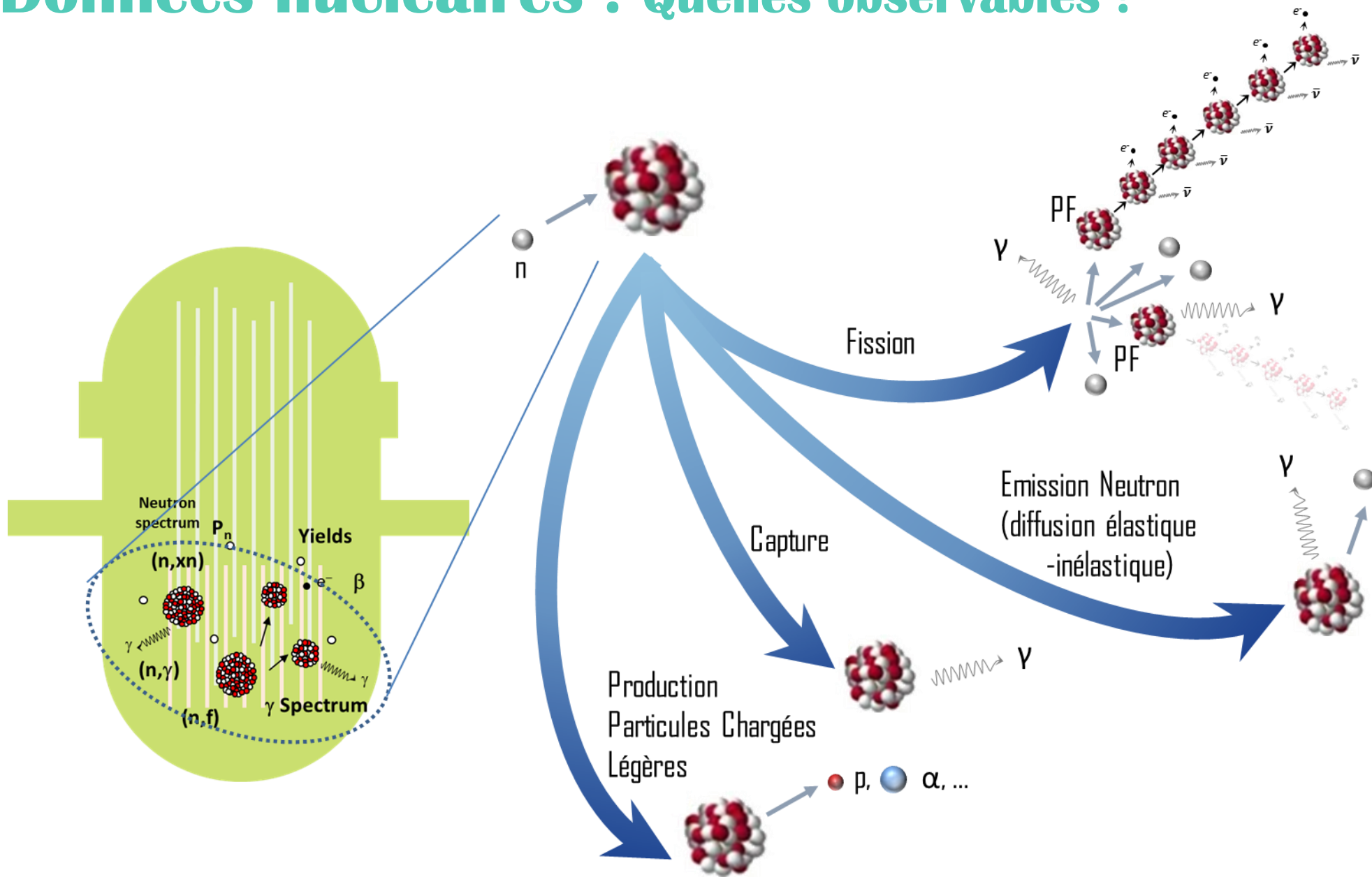
- Vers des modèles ab initio et des approches multi-échelles
- Moins de paramètres libres, plus de modèles microscopiques

- 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

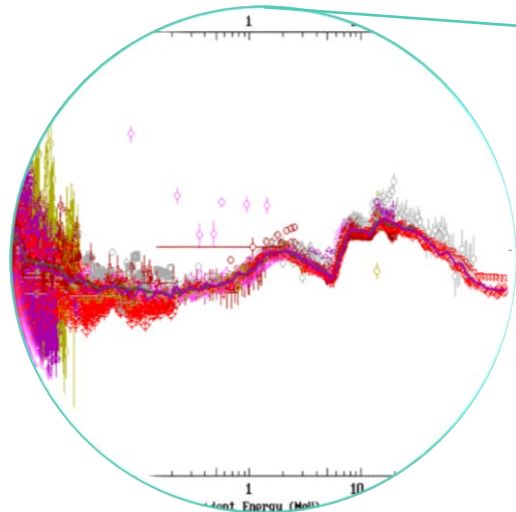


Besoin d'accélérateurs pour relever ces défis

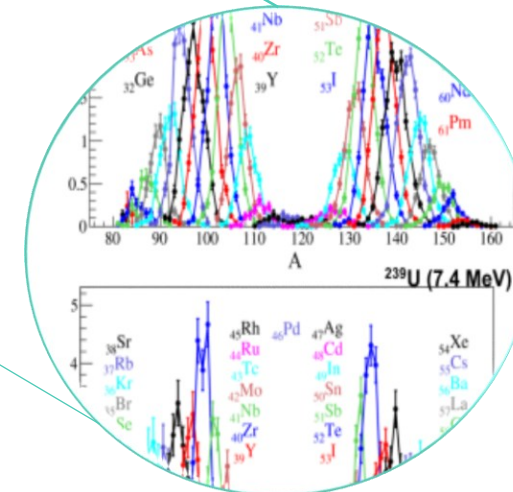
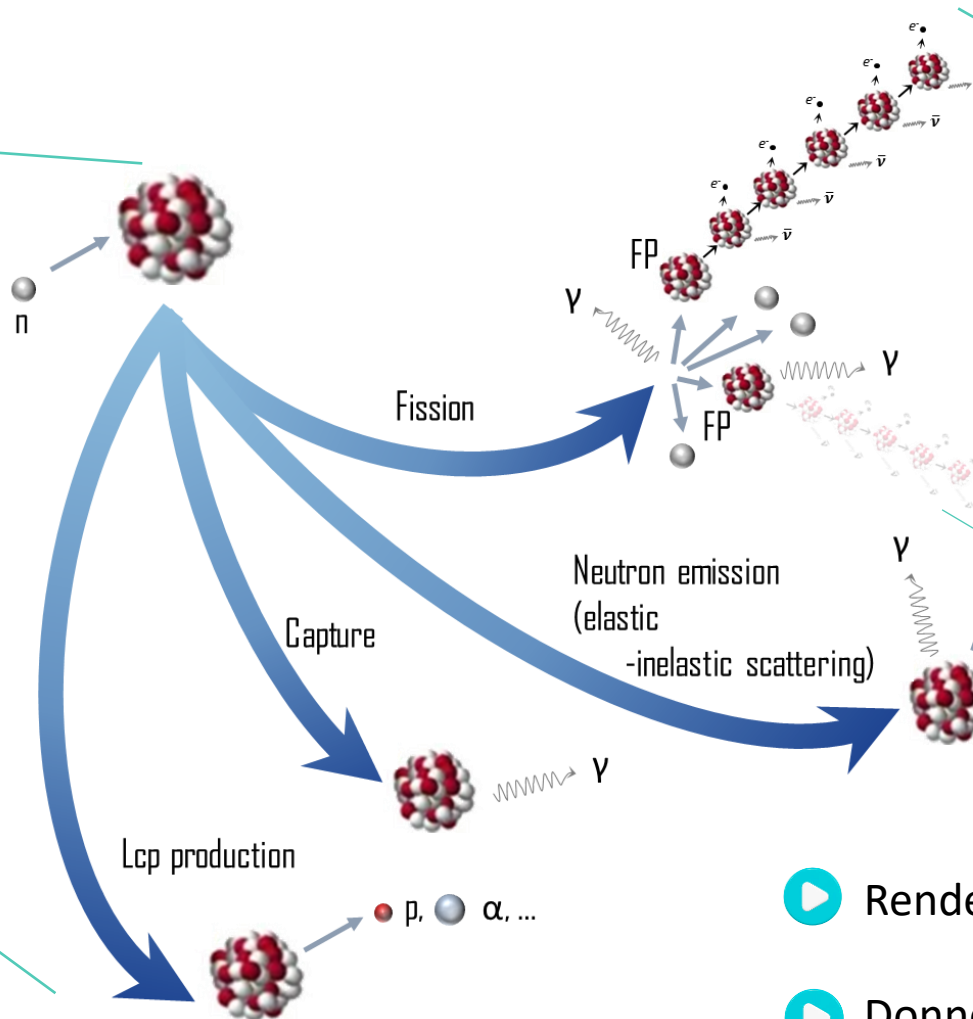
Données nucléaires : Quelles observables ?



Données nucléaires : Quelles observables ?

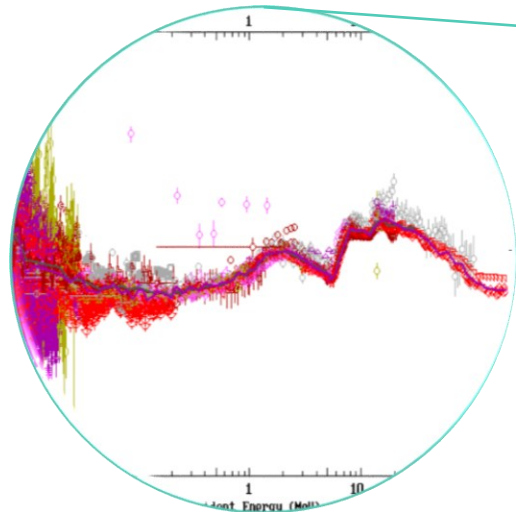


- ▶ Sections efficaces de réaction
- ▶ Distributions angulaires/énergie des particules émises

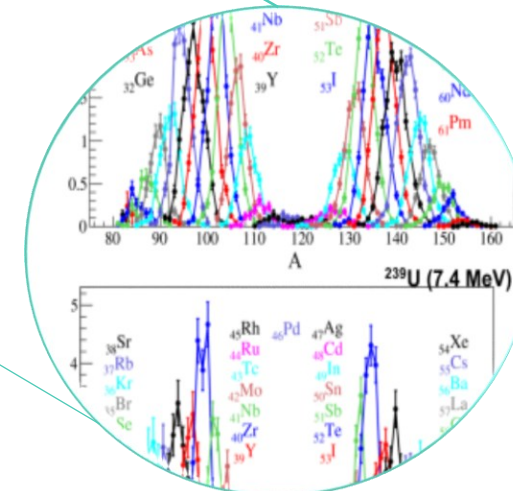
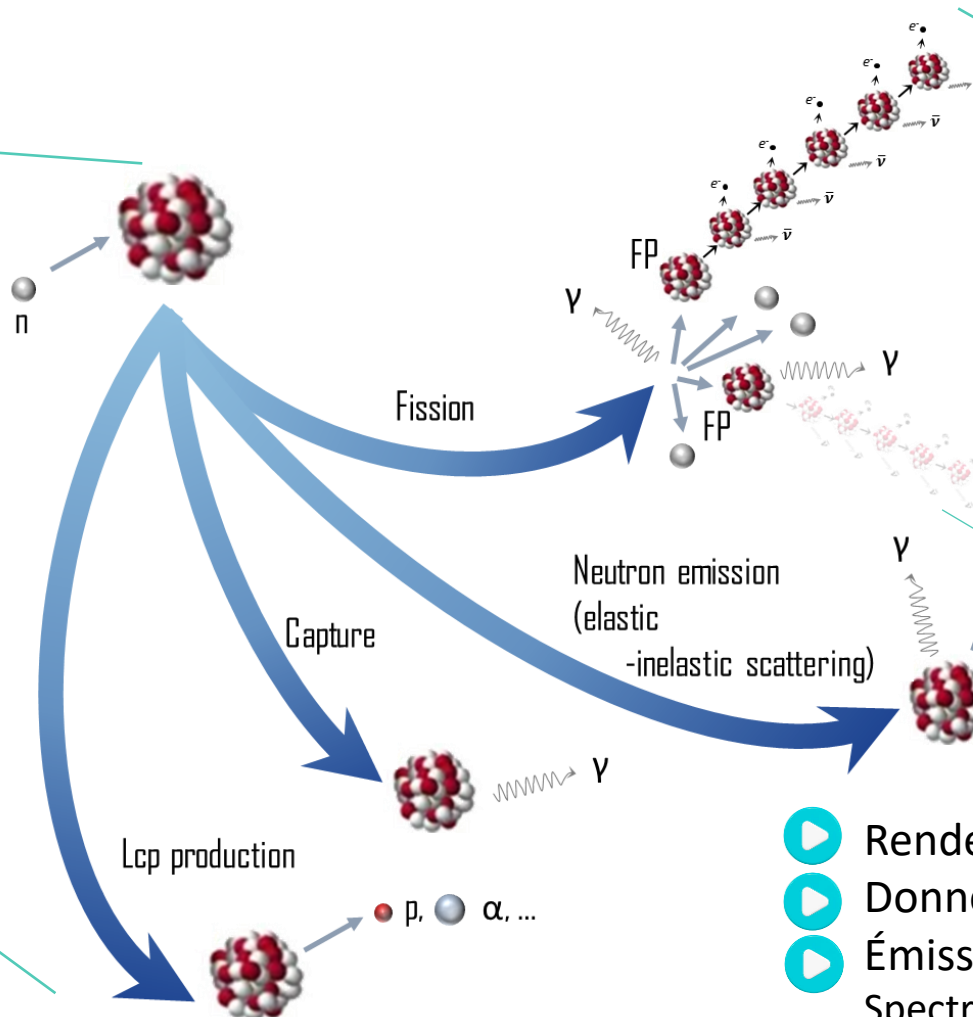


- ▶ Rendement de fission
- ▶ Données de décroissance
- ▶ Émission des particules promptes (n & γ)
Spectres et multiplicités

Données nucléaires : Quelles observables ?



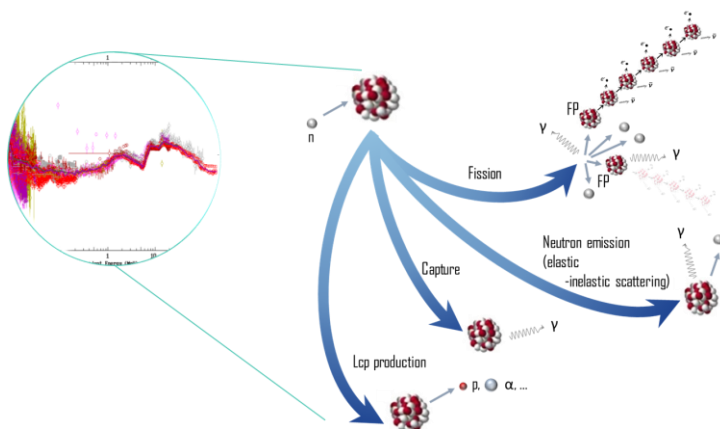
- ▶ Sections efficaces de réaction
- ▶ Distributions angulaires/énergie des particules émises



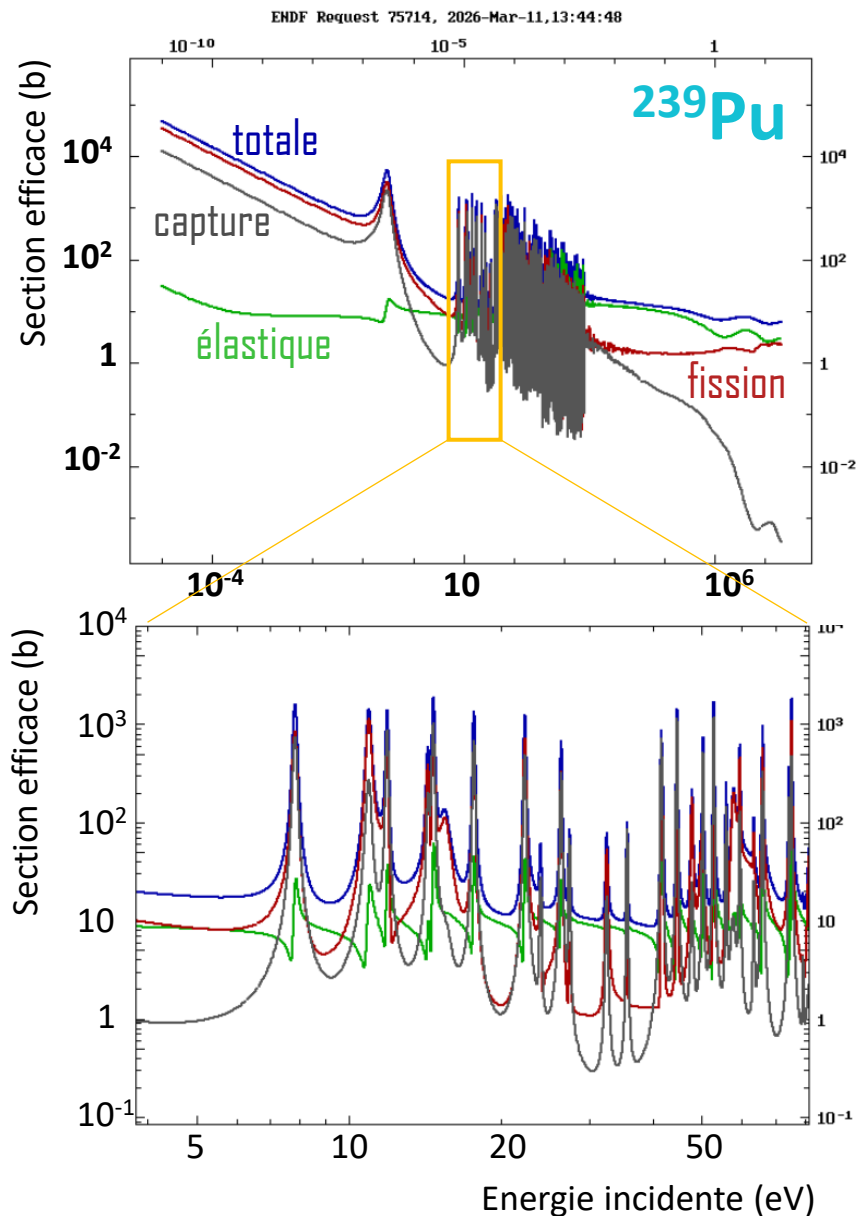
- ▶ Rendement de fission
- ▶ Données de décroissance
- ▶ Émission des particules promptes (n & γ)
- ▶ Spectres et multiplicités

Quelles installations?

Faisceaux de neutrons



- ▶ Sections efficaces de réaction
- ▶ Distributions angulaires des particules émises



Grande plage en énergie
Sur des décades

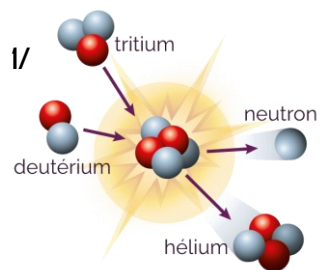


Grande plage en sections efficaces
Sur des décades



Résolution en énergie < eV

Faisceaux de neutrons « mono-énergétiques »



Réaction (p,x) ou (d,x) sur Li, d, t ...

- E_n quelques keV à 20 MeV, avec sélection de l'énergie possible grâce aux dist. angulaires
- $\sim 10^5$ - 10^7 n/cm²/s à qqs cm de la cible de production

Faisceaux de neutrons « blancs »

Réaction de spallation p ~ 1 GeV + cible de métal lourd (Hg, W, Pb)

- E_n spectre énergétique continue et une $E_{\max}$ proche de l'énergie du faisceau primaire
- $\sim 10^{15}$ n/s dans tout l'espace au niveau de la source

Réaction (γ ,n) ; (γ ,f)

- E_n spectre énergétique continue jusqu'à ~ 20 MeV
- $\sim 10^{13}$ n/s dans tout l'espace au niveau de la source

Réaction de break up d+C ou Be

- E_n spectre énergétique continue jusqu'à qqs dizaines de MeV
- $\sim 10^{11}$ n/cm²/s peut être atteint à 5 cm du convertisseur

Faisceaux de neutrons « de fission »

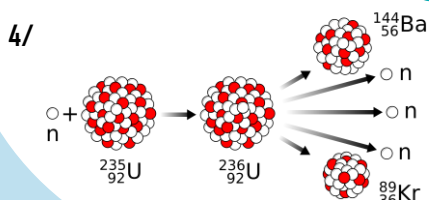
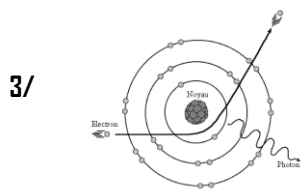
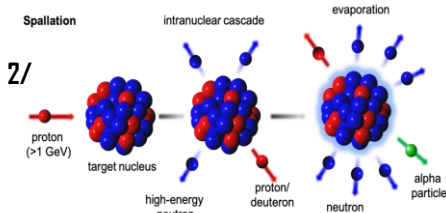
Réaction (n, f) en réacteur

- E_n spectre de fission plus ou moins modéré
- $\sim 10^{13}$ n/cm²/s dans un réacteur de type REP
- $\sim 10^{15}$ n/cm²/s @ILL

Méthode du temps de vol



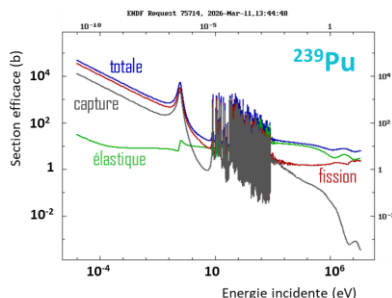
Longue base de vol
Fréquence faisceau raisonnable



1/ © <https://www.maxicours.com/se/cours/les-reactions-nucleaires/>
2/ © <https://elena-neutron.iff.kfa-juelich.de/neutron-facilities/>
3/ © <https://www.ca-se-passe-la-haut.fr/2013/09/des-orages-nucleaires.html>
4/ © https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9couverture_de_la_fission_nucl%C3%A9aire

Quelles installations?

Faisceaux de neutrons



En fonction de ses besoins et de ses contraintes, le physicien des données nucléaires choisira l'installation la mieux adaptée.

▶ Faisceaux de neutrons « mono-énergétiques »

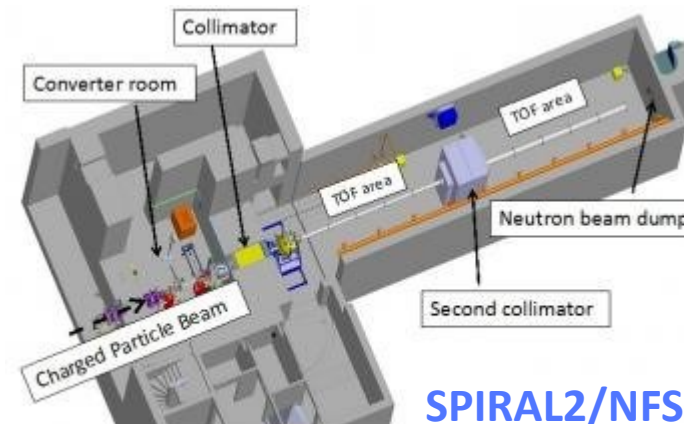
ALTO/LICORNE (Fr)
SPIRAL2/NFS (Fr)
JRC-Geel/MONNET (Be)
PTB (All.)
CNA/HISPANOS (Es)
NPL (GB)

▶ Faisceaux de neutrons « blancs »

JRC-Geel/GELINA (Be)
CERN/n_TOF (S, Fr)
SPIRAL2/NFS (Fr)

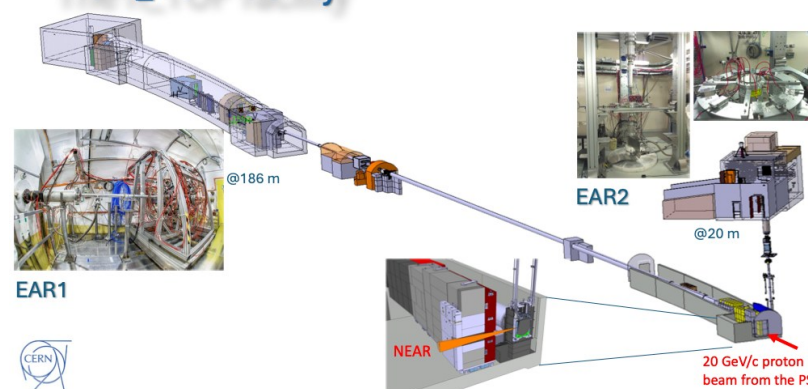
▶ Faisceaux de neutrons « de fission »

ILL (Fr)



SPIRAL2/NFS

The n_TOF facility



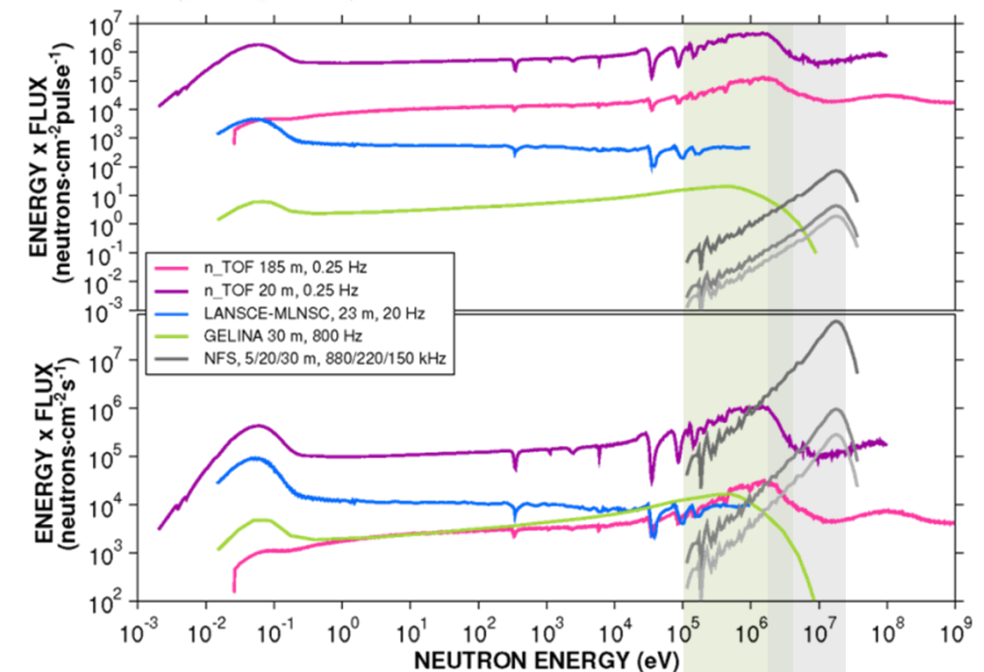
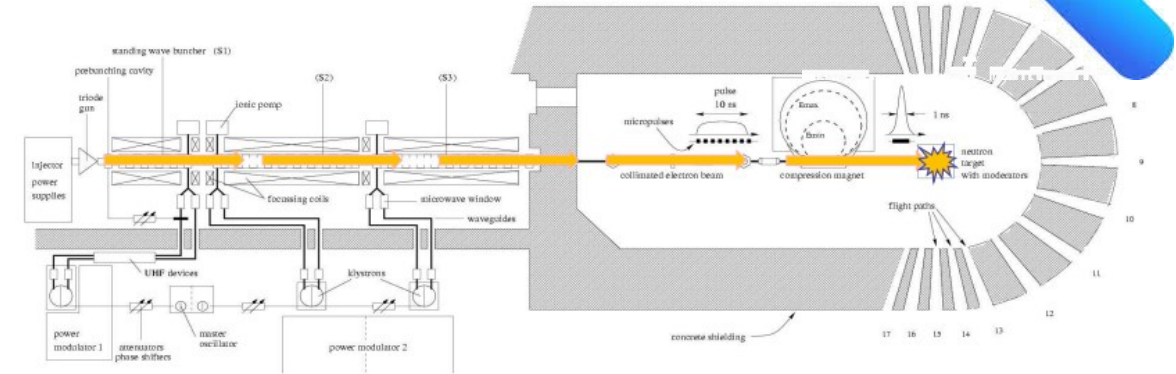
Quelles installations?



“The **GELINA neutron source** is based on a **linear electron accelerator** producing electron beams. A typical beam operation mode uses **100 MeV average energy, 10 ns pulse length, 800 Hz repetition rate, 12 A peak and 100 μ A average current**. With a post-acceleration pulse compression system, the **electron pulse width** can be reduced to approximately **1 ns (FWHM)** while preserving the current, resulting in a peak current of 120 A. The accelerated electrons produce **Bremsstrahlung in a uranium target** which in turn, by photonuclear reactions, produces neutrons. Within a 1 ns pulse a peak neutron production of 4.3×10^{10} neutrons is achieved (average production rate of 3.4×10^{13} neutrons/s). The up to 400 m long flight paths, symmetrically arranged around the uranium target, lead to experimental locations at distances of 10, 30, 50, 60, 100, 200, 300 and 400 m.”

https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-z/jrc-neutron-time-flight-facility_en

Faisceaux de neutrons JRC-Geel GELINA



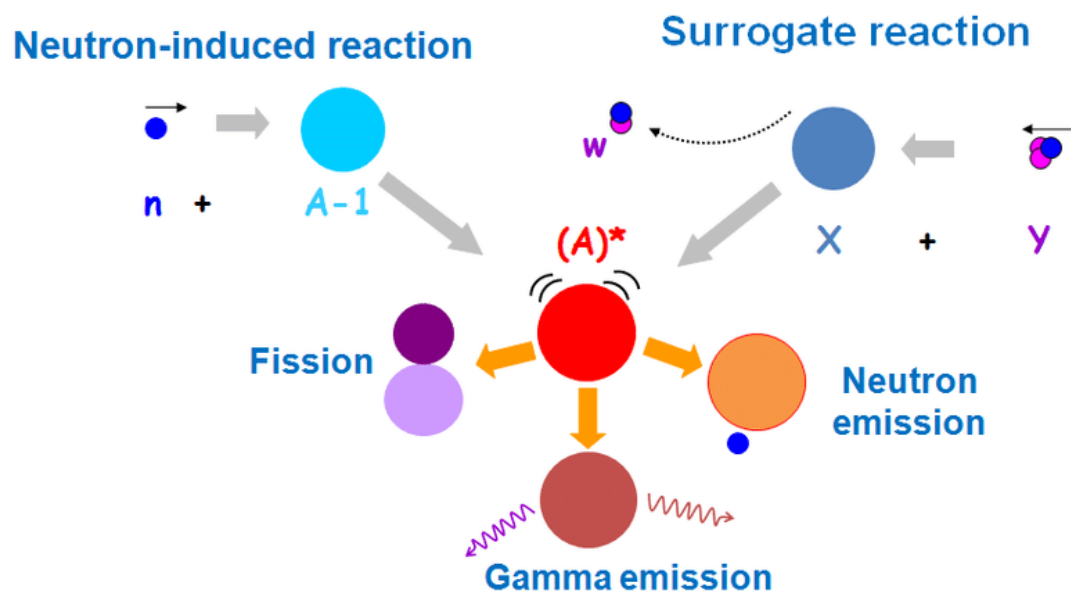
Quelles installations?

Faisceaux de particules chargées



Pour contourner la difficulté des mesures avec des neutrons incidents et la production de cibles très radioactives, des méthodes indirectes qui peuvent renseigner sur les processus neutroniques, sont également utilisées.

▶ Méthodes « surrogate » Accélérateur de particules chargées

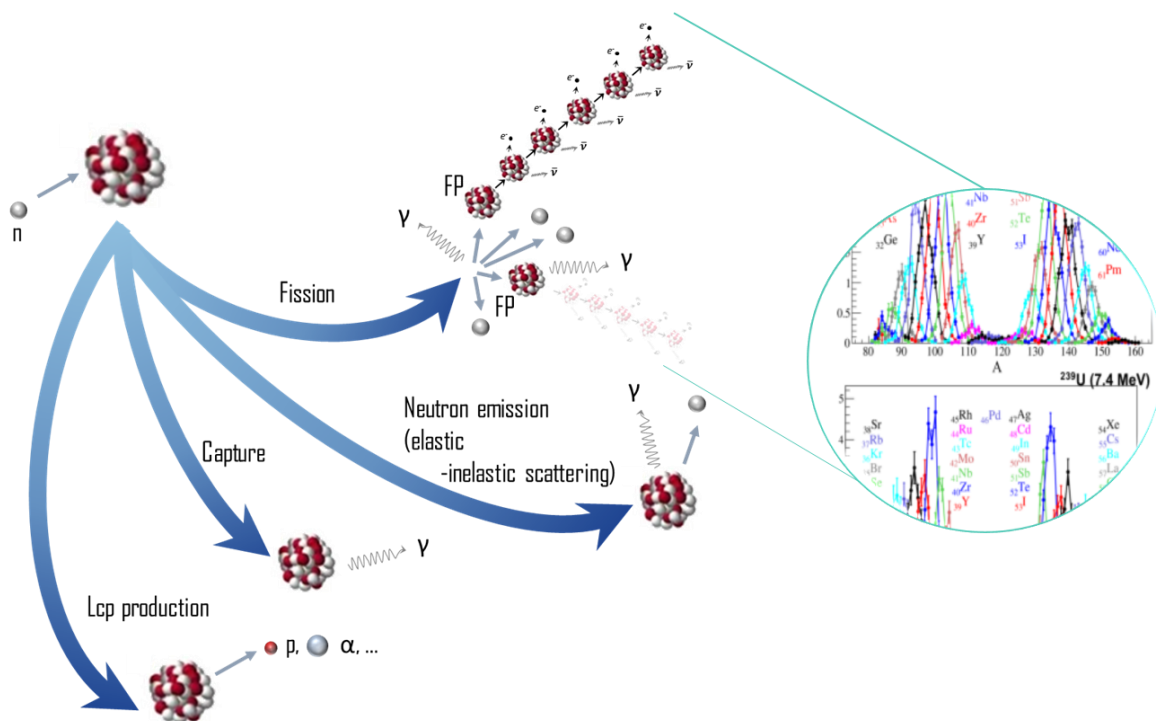


Exemple :

L'étude des probabilités de fission neutronique de ^{241}Am ($t_{1/2}=16.02$ h), ^{243}Cm ($t_{1/2}=29.1$ y) et ^{244}Cm ($t_{1/2}=18.1$ y) peut être réalisée via les réactions de substitution $^{243}\text{Am}(^3\text{He}, ^4\text{He})$, $^{243}\text{Am}(^3\text{He}, t)$ et $^{243}\text{Am}(^3\text{He}, d)$ (^{243}Am $t_{1/2}=7364$ y) qui forment les mêmes noyaux composés.

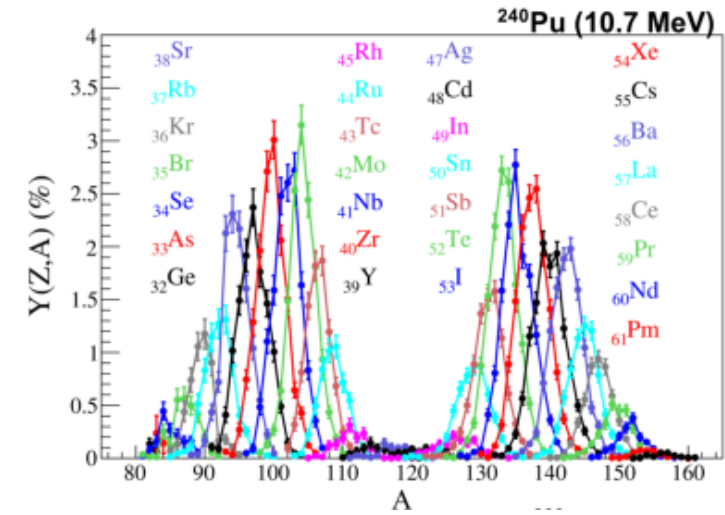
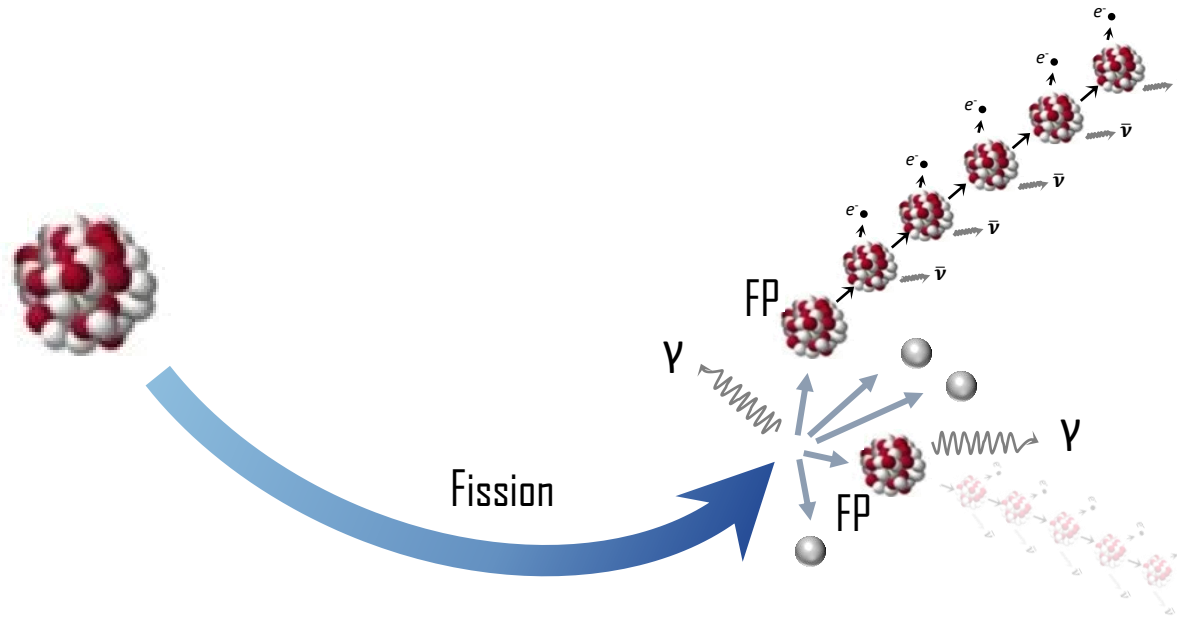
Quelles installations?

Production des produits de fission



Quelles installations?

Production des produits de fission



► Générer une fission

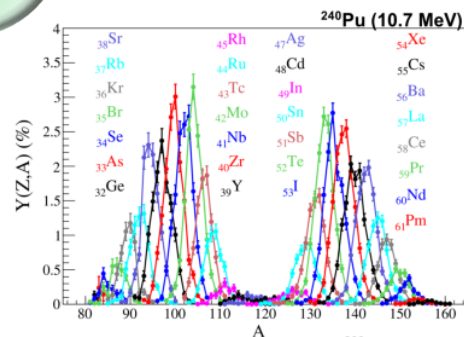
Induite par neutrons (accélérateur ou réacteur) ou protons/deutons
Induites par réactions de transfert (gros noyau + noyau léger)
Induites par interaction électromagnétique

► Sélectionner et transporter les ions

Méthode ISOL, IGISOL
Séparateur/Spectromètre
Dériveur de bande rapide ou implantation directe

Quelles installations?

Production des produits de fission



En fonction de ses besoins et de ses contraintes, le physicien des données nucléaires choisira l'installation la mieux adaptée.



Faisceaux de neutrons

Cf. slide 16



Production de Produits de fission

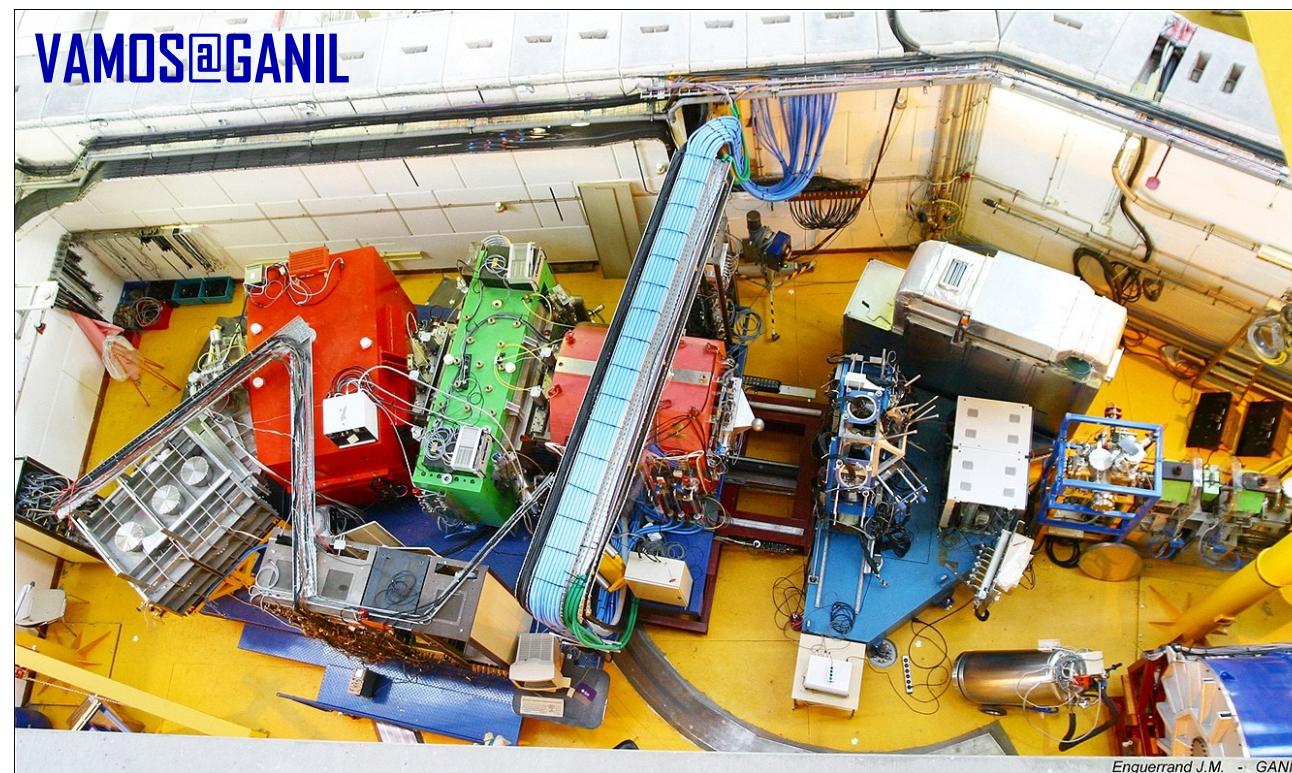
GANIL (Fr)

GSI (All.)

CERN/ISOLDE(S, Fr)

Jyväskylä (Fin.)

ILL (Fr)



Enguerrand J.M. - GANIL

Quelles installations?

Usage et accès



Accès aux grandes installations

(mêmes règles que pour toute expérience de physique nucléaire)

- ✘ Soumission de proposition d'expérience au PAC des installations
(1/an GANIL, 3/an CERN/n_TOF, ...)
- ✘ Accord de collaboration avec certaines installations (instruments à demeure)
(JRC/Geel GELINA)
- ✘ Expérience qui peuvent courir sur plusieurs semaines

Soutien des projets européens

De nombreux programmes transnationaux se sont succédés EFNUDAT-2006, ERINDA-2010, CHANDA-2014, ARIEL-2019 (2 M€), APRENDE-2024

- Temps faisceau « pré-attribué » négocié avec les installations au montage du projet (remboursement 💰 aux installations)
- PAC interne au projet, focalisé sur des mesures de données nucléaires
- Soutien financier pour les missions des expérimentateurs & des visites scientifiques

Soutien des TGR



Quelles installations?

Usage et accès

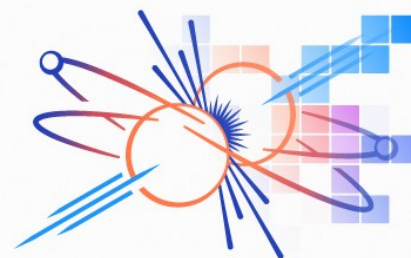


Objectives

- Run calls for proposals for training activities of early-stage researchers and scientific visitors to develop multidisciplinary nuclear competences.
- Exploit synergies between APRENDE and OFFERR, ENEN2Plus, and other projects supporting access to experimental facilities.
- Organize **three calls for proposals** of experiments and training activities with a peer-review by a Project Advisory Committee. Terms of reference for the PAC guarantee good scientific output, a transparent, impartial, and effective selection process and efficient use of resources.
- Provide **750 additional beam time hours** for external users at the participating consortium facilities
In **15 experiments with a typical support of 50 beam time hours**. Two users will receive mobility support for the length of the stay, typically 5 days.
- Organize **10 education and training visits** of early-stage researchers or senior nuclear data experts for scientific stays of up to 8 weeks at the consortium facilities.

2

Date Title of presentation



APRENDE



TAA : 317 400 € / 4 ans

1.1 Transnational access facilities

The APRENDE WP6 support transnational access to the following facilities, see Figure 1



Figure 1 Logos of the APRENDE beneficiaries participating in the Transnational Access of WP6

Take away message



La communauté des données nucléaires pour les applications « énergie nucléaires »

- utilise les mêmes installations que les physiciens nucléaires et est soumis aux mêmes règles quant aux accès,
- est confrontée au vieillissement des machines (ex. JRC-Geel/GELINA) / difficulté d'assurer la maintenance (ex. HZDR/n-ELBE),
- expérimente parfois la concurrence avec les expériences de physique nucléaire (ex NFS) (besoin de pédagogie, soutien extérieur),
- a besoin de cibles d'actinides (raréfaction des labos de production de cibles)

Merci