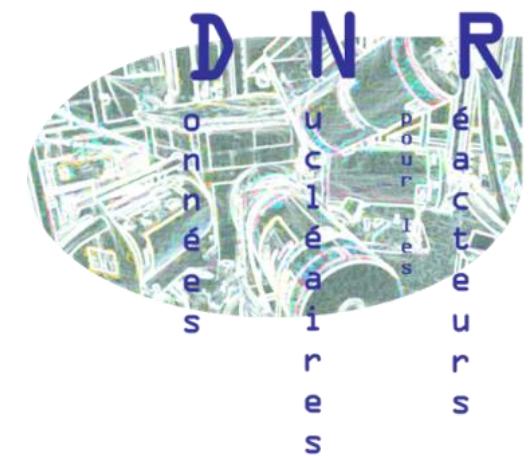


Groupe

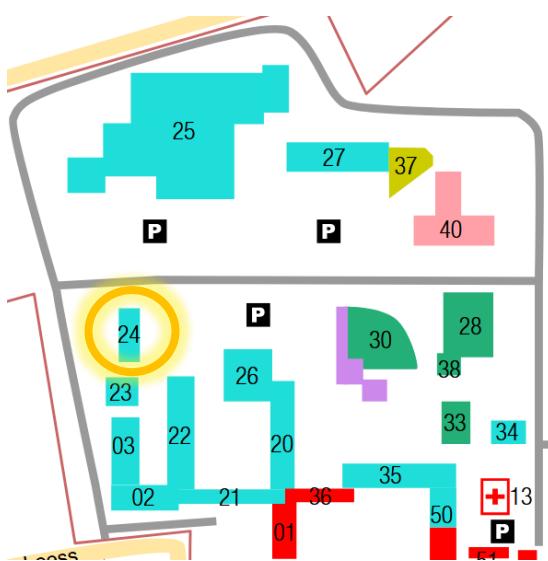
Données Nucléaires pour les Réacteurs



...

Le groupe

- Maëlle Kerveno (DR),
- Greg Henning (CR),
- Philippe Dessagne (DR émérite)
- + CPJ (2026)



photographies non contractuelles

1er étage, bâtiment 24.

... Contexte Général: Les défis de la production électrique nucléaire

Economiques:

- Une centrale coûte plusieurs millions d' €
- Le prix de traitement du combustible usagé représente 2 à 6% du prix du kWh.



Image: EDF

Sécurité:

- Prolifération
- Prévention des accidents
- Manipulation des déchets radioactifs



Image: AP

Durabilité :

- Centrales vieillissantes
- Ressources limitées en ^{nat}U
- Stockage des déchets radioactifs.



Image: Andra

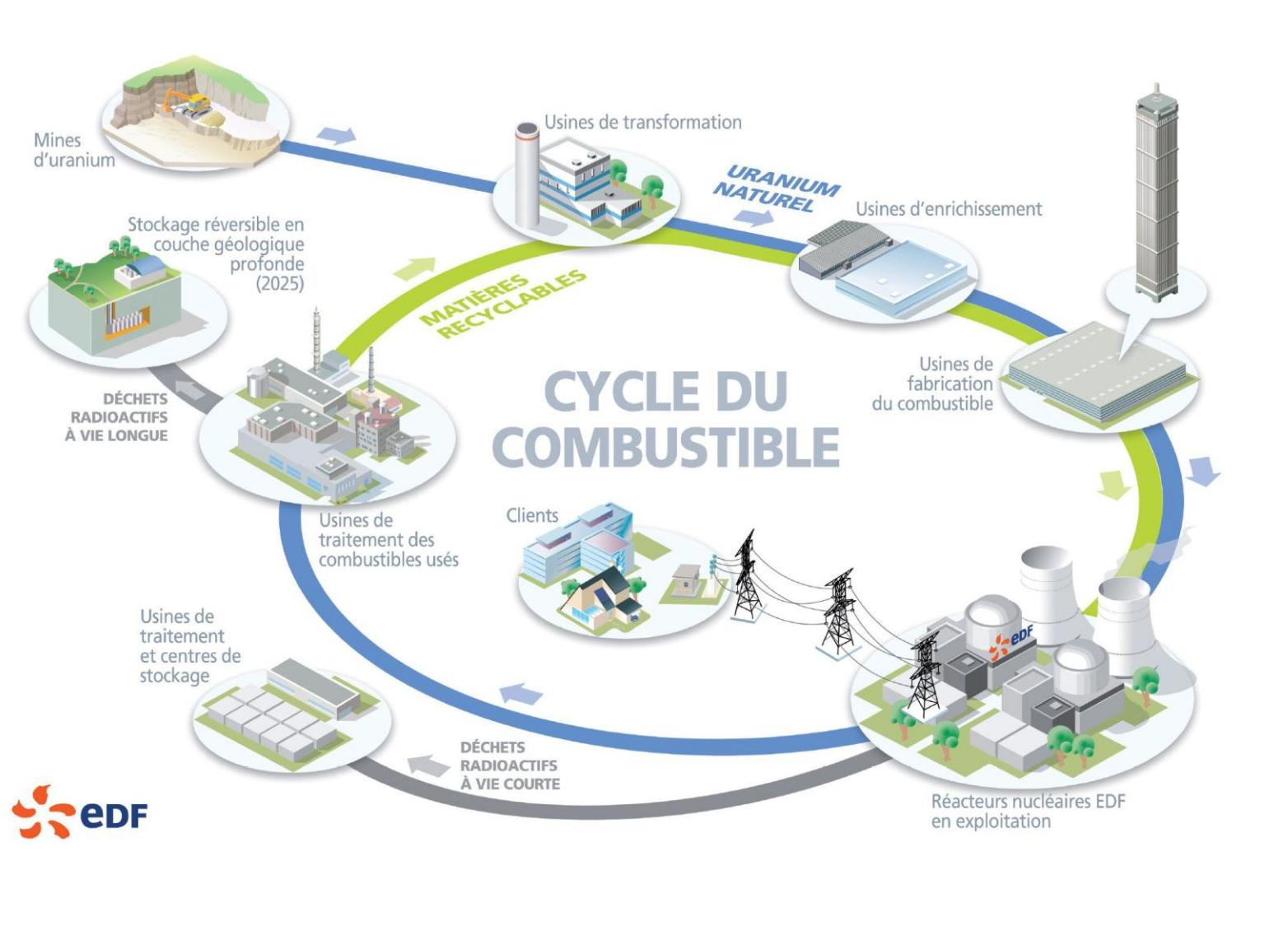
... Un cycle complexe

Aujourd’hui, la production électrique nucléaire repose sur la fission de l’Uranium 235, un isotope rare dans la nature (0.3%).

Le combustible, sous forme d’oxyde d’Uranium, doit être enrichi (3-5%) avant utilisation.

Après exploitation, le combustible usagé peut être en partie recyclé. Il contient par ailleurs des isotopes radioactifs qu’il faut séparer et stocker.

Les différentes étapes du cycle du combustible sont interdépendantes.



... Répondre aux défis : les futurs designs de réacteurs nucléaires

Nouveaux designs

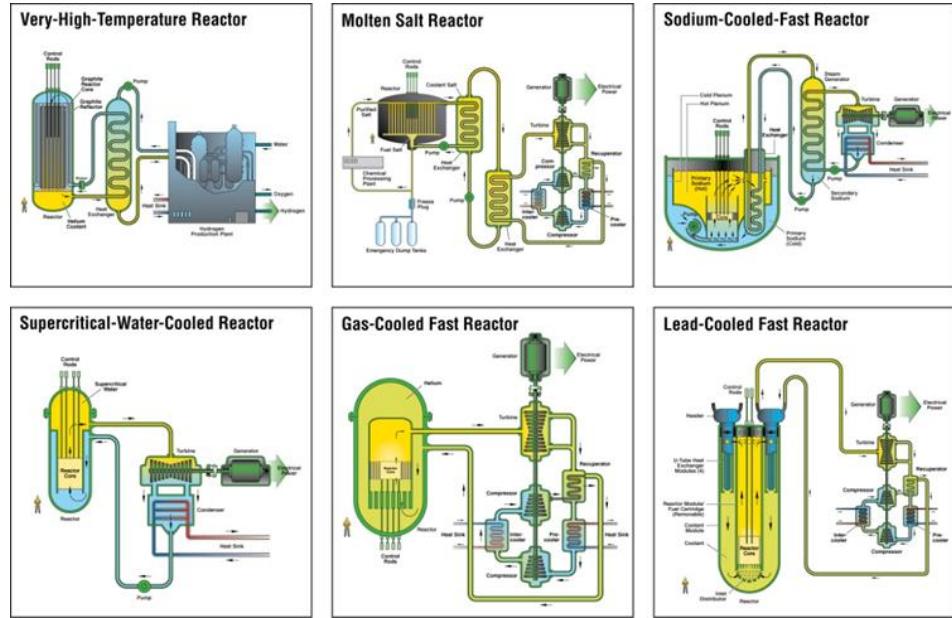


Image: Forum Gen IV

Nouveaux combustibles

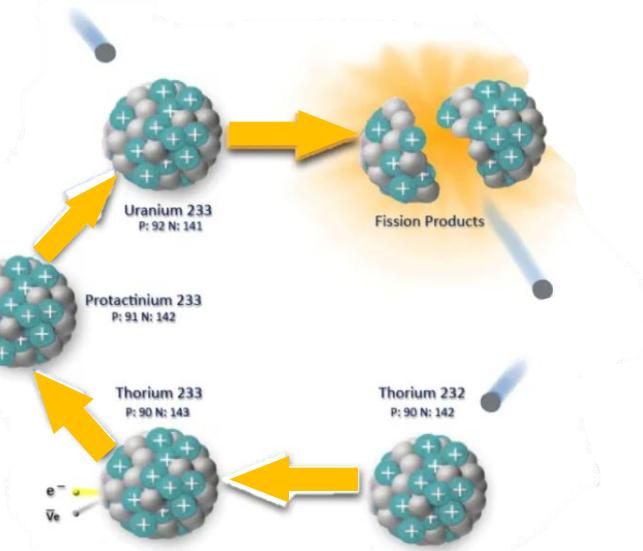


Image: UC Davis

Les cycles régénérateurs utilisant les isotopes ^{232}Th , ^{238}U permettent de maximiser l'utilisation de minerais

Des solutions existent pour répondre aux défis mentionnés plus tôt :

Réduction des déchets: Neutrons rapides → Transmutation des déchets

Nouveau combustible (^{232}Th) → Réduction de la production des actinides radioactifs

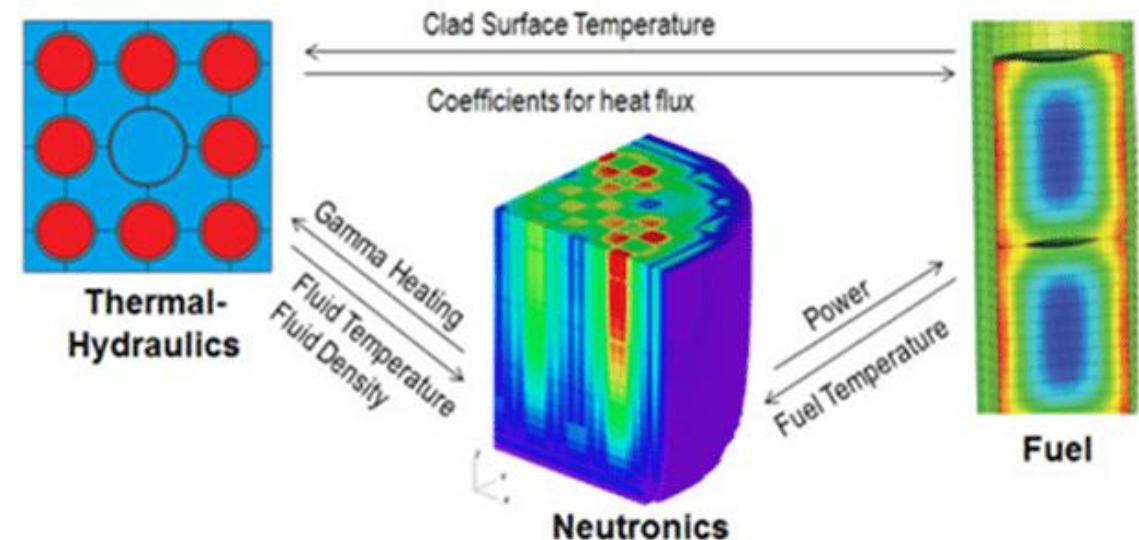
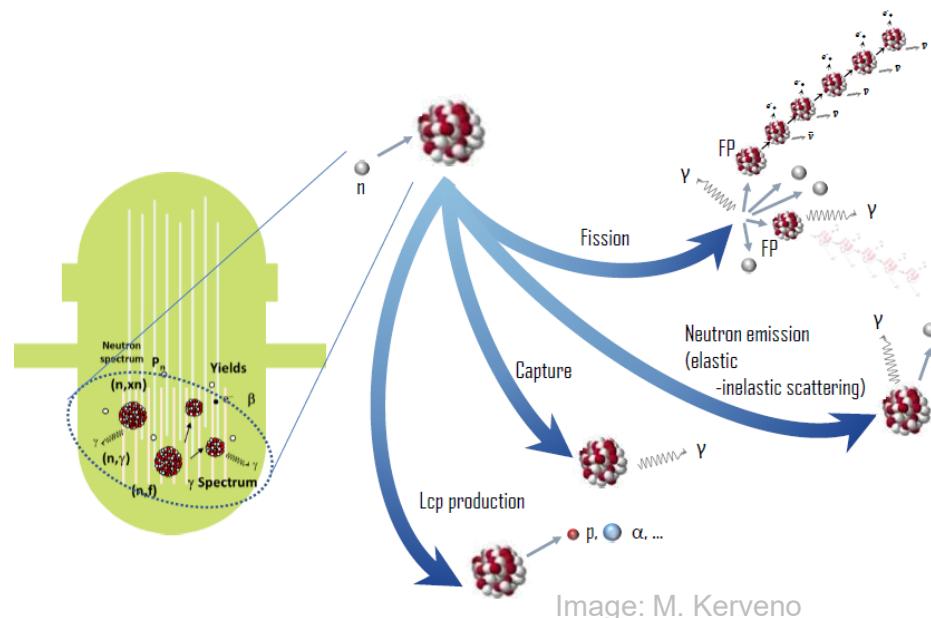
Sécurité → Réacteurs sous-critiques

Disponibilité du minéral → Cycles régénérateurs ($^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$, $^{238}\text{U}/^{239}\text{Pu}$)

Le développement et les analyses de risques sont faits par simulation numérique.

... Des simulations multi physiques et multi-échelles

- Physique nucléaire,
- Transport et échanges de chaleur,
- Dynamique des fluides,
- Résistance des matériaux,
- Chimie,
- ...

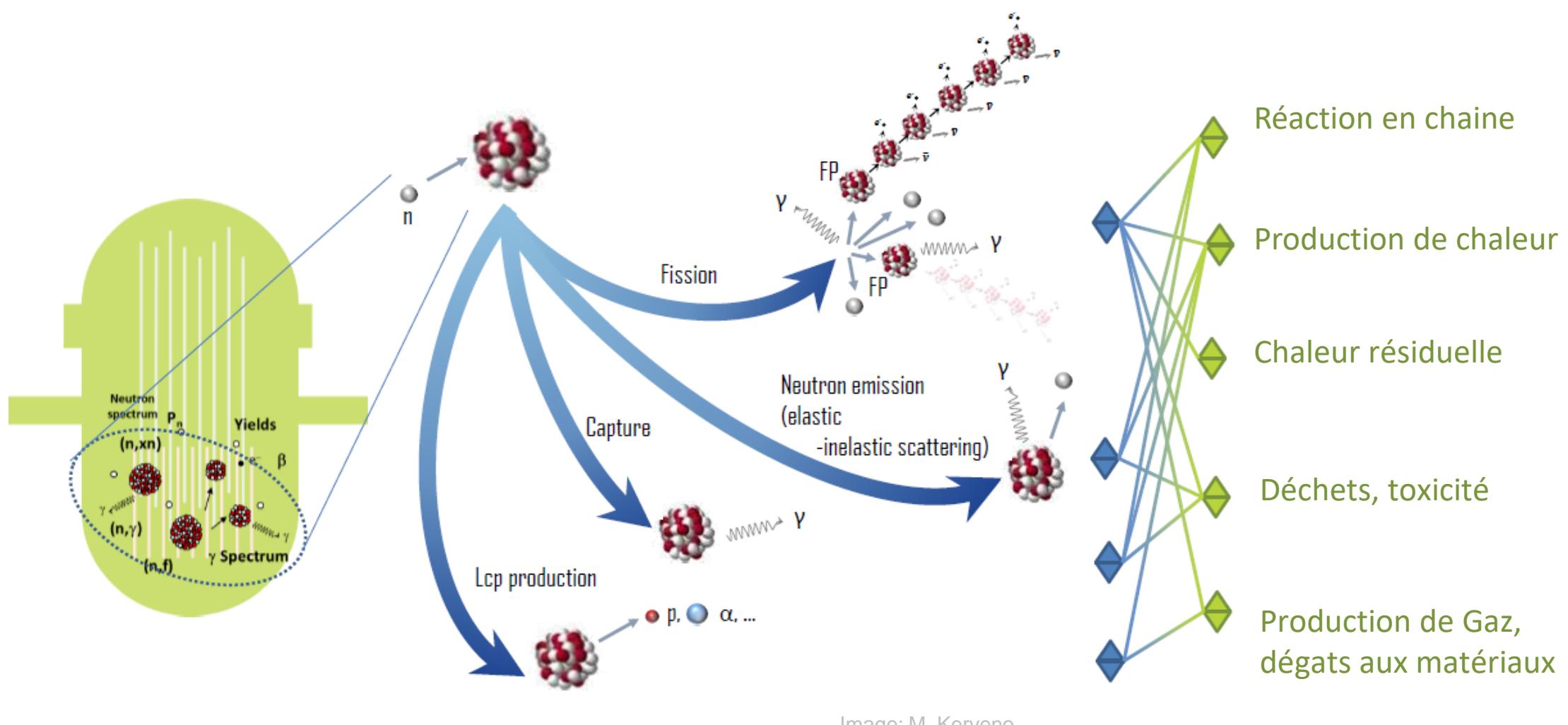


*Pour la seule Physique nucléaire, de nombreux processus sont impliqués, sur de nombreux matériaux **dans le cœur du réacteur** :*

- Réactions induites par neutrons,
- Décroissances radioactives,
- Interactions particules/matière,
- concerne le combustible, les matériaux de structure, le caloporteur (eau), ...

...

Dans les simulations, les processus microscopiques influent sur les paramètres macroscopiques du réacteur



... Données d'entrées pour les simulations : les bases de données évaluées

Les données de physique nucléaire nécessaires aux calculs sont **évaluées** et rassemblées dans des bases de données.

L'évaluation permet de combiner les connaissances expérimentales et les modèles théoriques pour calculer la meilleure valeur possible des quantités d'intérêt.

Il existe plusieurs bases de données évaluées :

JENDL-5

ENDF/B
VIII.1

JEFF-4

JANIS Web Browse Search Books TRANS Checker

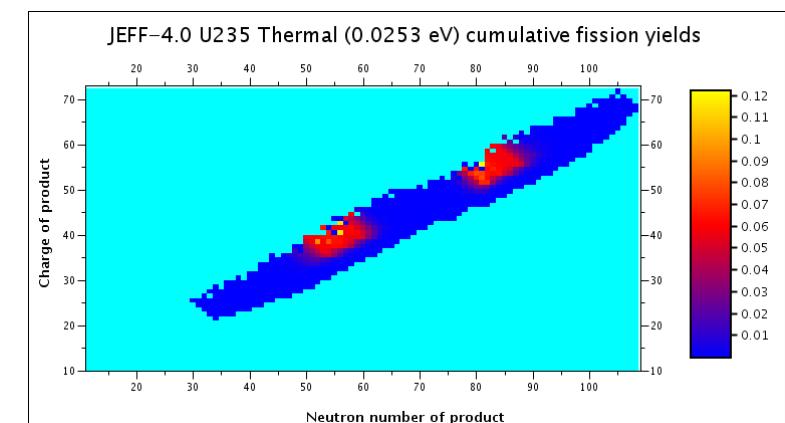
Browse database

Base / Radioactive data / ENDF/B-VIII.0 / Radioactive decay data / U / U235

Open General information

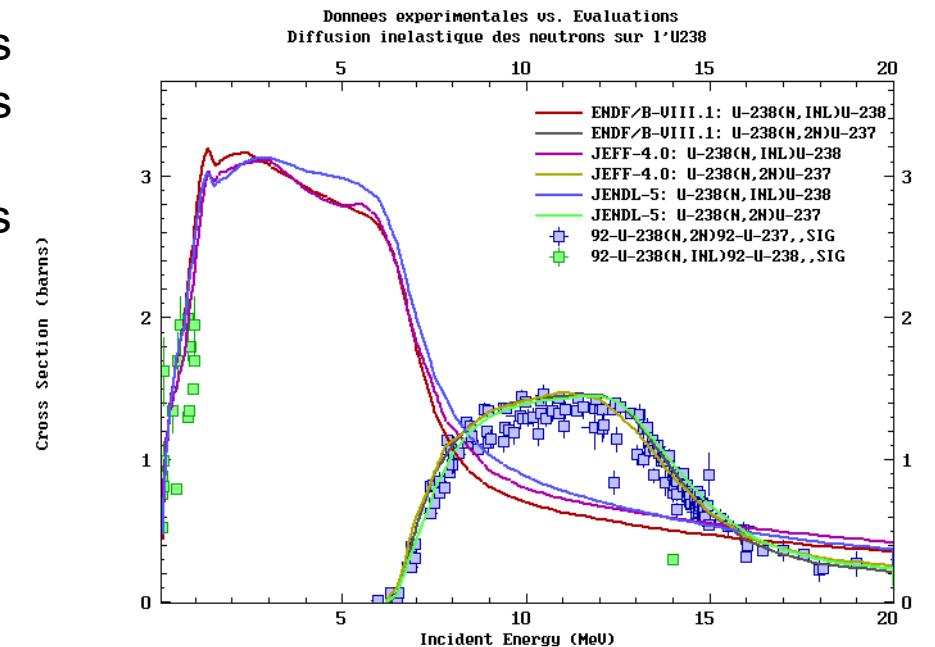
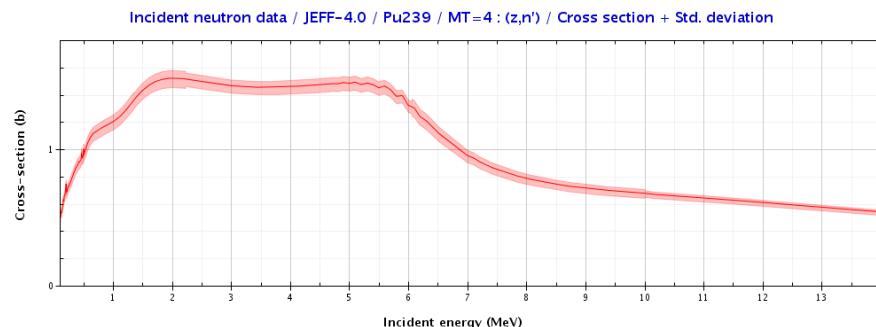
Open Decay data

```
92-U -235 BNL          EVAL-NOV05 Conversion from ENSDF
/ENSDF/                  DIST-FEB18          20111222
----ENDF/B-VIII.0        Material 3515
----RADIOACTIVE DECAY DATA
----ENDF-6 FORMAT
***** Begin Description *****
** ENDF/B-VII.1 RADIOACTIVE DECAY DATA FILE **
** Produced at the NNDCC from the ENSDF database
** Translated into ENDF format by:
**   T.D. Johnson, E.A. McCutchan and A.A. Sonzogni, 2011
*****
ENSDF evaluation authors: E. BROWNE
Parent Excitation Energy: 0
Parent Spin & Parity: 7/2-
Parent half-life: 703.8E+06 Y 5
Decay Mode: A
***** Energy Balance *****
Mean Gamma Energy: 1.486E0 +- 1.440E0 keV
Mean X-Ray+S11 Energy: 1.553E1 +- 7.609E-1 keV
Mean CE+Auger Energy: 4.170E1 +- 1.313E0 keV
Mean B- Energy: 0.000E0 +- 0.000E0 keV
Mean B+ Energy: 0.000E0 +- 0.000E0 keV
Mean Neutrino Energy: 0.000E0 +- 0.000E0 keV
Mean Neutron Energy: 0.000E0 +- 0.000E0 keV
Mean Proton Energy: 0.000E0 +- 0.000E0 keV
Mean Alpha Energy: 4.339E3 +- 1.648E2 keV
Mean Recoil Energy: 7.386E1 +- 2.806E0 keV
Sum Mean Energies: 4.619E3 +- 1.649E2 keV
Q effective: 4.679E-1 keV
Missing Energy: 5.951E1 keV
Deviation: 1.272E0 %
K X-ray energies are from the NIST database. The remaining
X-ray and Auger data obtained using EADL.
***** End Description *****
```

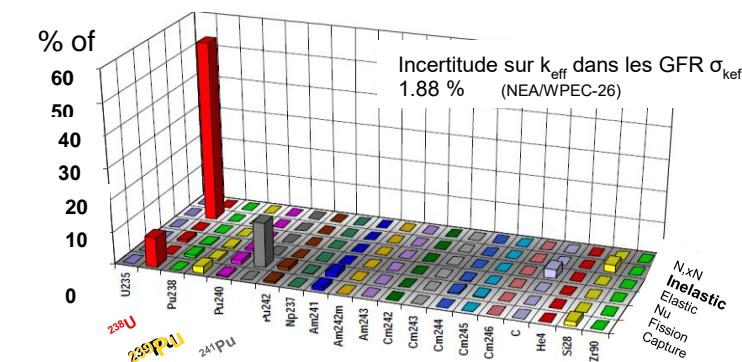


... Les évaluations comportent des incertitudes

- A cause de données expérimentales parfois trop partielles, les évaluations présentent des désaccords et des incertitudes élevées.
- En particulier, pour les isotopes et les réactions d'intérêt dans les réacteurs de prochaine génération (^{238}U , ^{233}U , ^{239}Pu , ...)

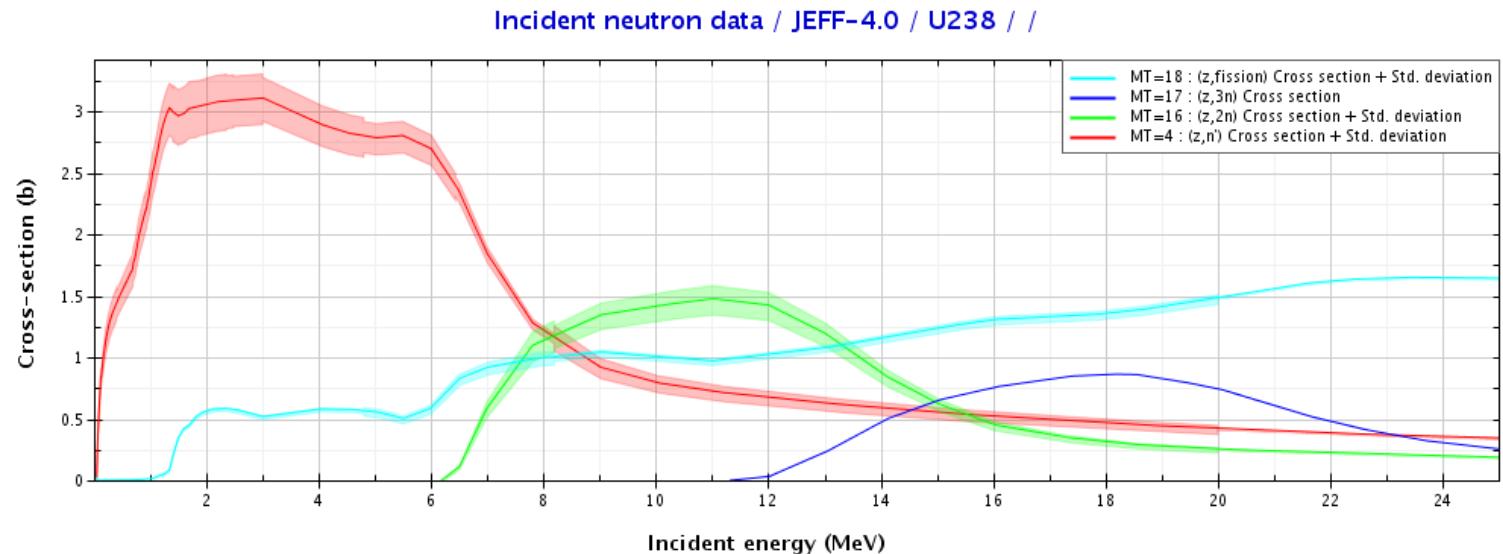
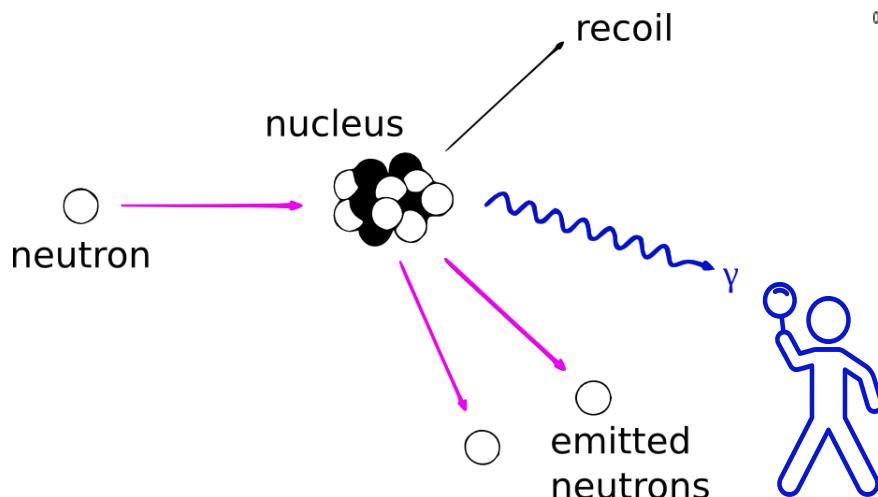


- Les incertitudes actuelles sur certaines réactions d'intérêts dans les réacteurs limitent la précision des calculs de fonctionnement (puissance, criticité, ...).



... Contexte : Données Nucléaires pour les Réacteurs

- Notre focus: les réactions de diffusion inélastique de neutron, en compétition avec les réactions de fissions.



- Notre approche:
 - Mesures par spectroscopie γ (très sélective)
 - Confrontation avec les prédictions théoriques pour améliorer les modèles et évaluations.

... Dispositif Expérimental : Grapheme

- Installé auprès du faisceau de neutrons Gelina, au JRC-Geel (Belgique).
- Neutrons produits par réactions d'électrons accélérés sur une cible d'Uranium.
- Énergies des neutrons de ~eV à ~20 MeV.
- GRAPhEME à ~30 m de la source de production des neutrons.



- Dispositif créé par notre équipe et en upgrade continu depuis 2005.
- Adapté aux études de noyaux fortement radioactifs.
- 1 chambre à fission et 6 HPGe planaires.
- Enregistrements pendant 100 – 1000 heures, étendus sur quelques semaines à plusieurs années.

... Les résultats expérimentaux avec Grapheme (morceaux choisis)

- Mesures de section efficace $^{238}\text{U}(n,n'\gamma)$: La description microscopique des réactions aux énergies intermédiaires permet une meilleure reproduction de la distribution des spins. [M. Kerveno, et al. Phys. Rev. C 104].

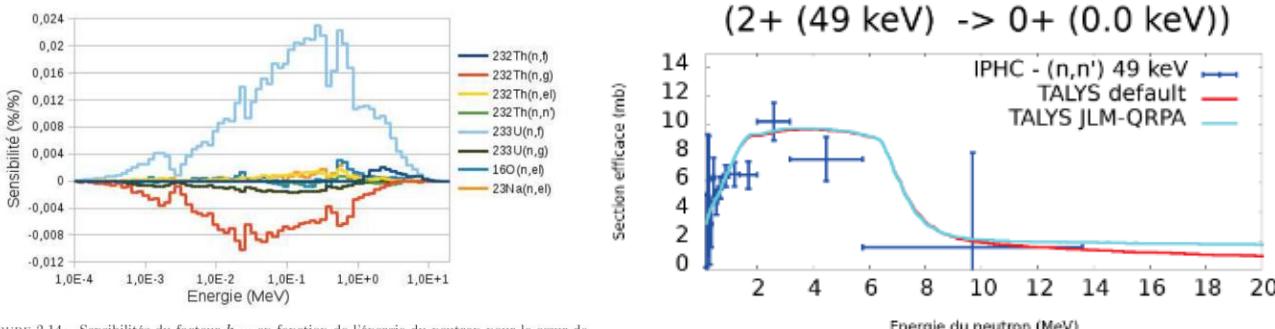
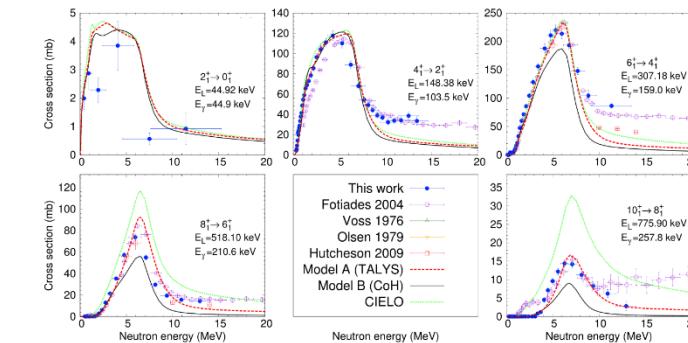


FIGURE 2.14 – Sensibilités du facteur k_{eff} en fonction de l'énergie du neutron pour le cœur de type ASTRID.

- Dans les isotopes 182,184 , et ^{186}W , les sections efficaces expérimentales permettent un ajustement *global* des paramètres de modèle.



- « Etude des réactions (n, xn) pour les noyaux fertiles / fissiles du cycle du combustible innovant au $^{232}\text{Thorium}$ » [Thèse E. Party, Univ. Strasbourg, 2019].

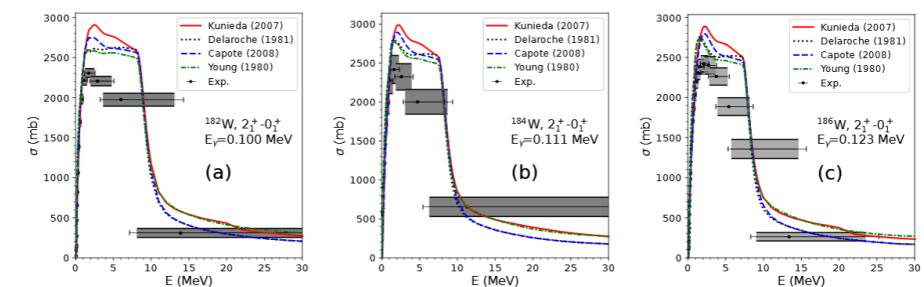
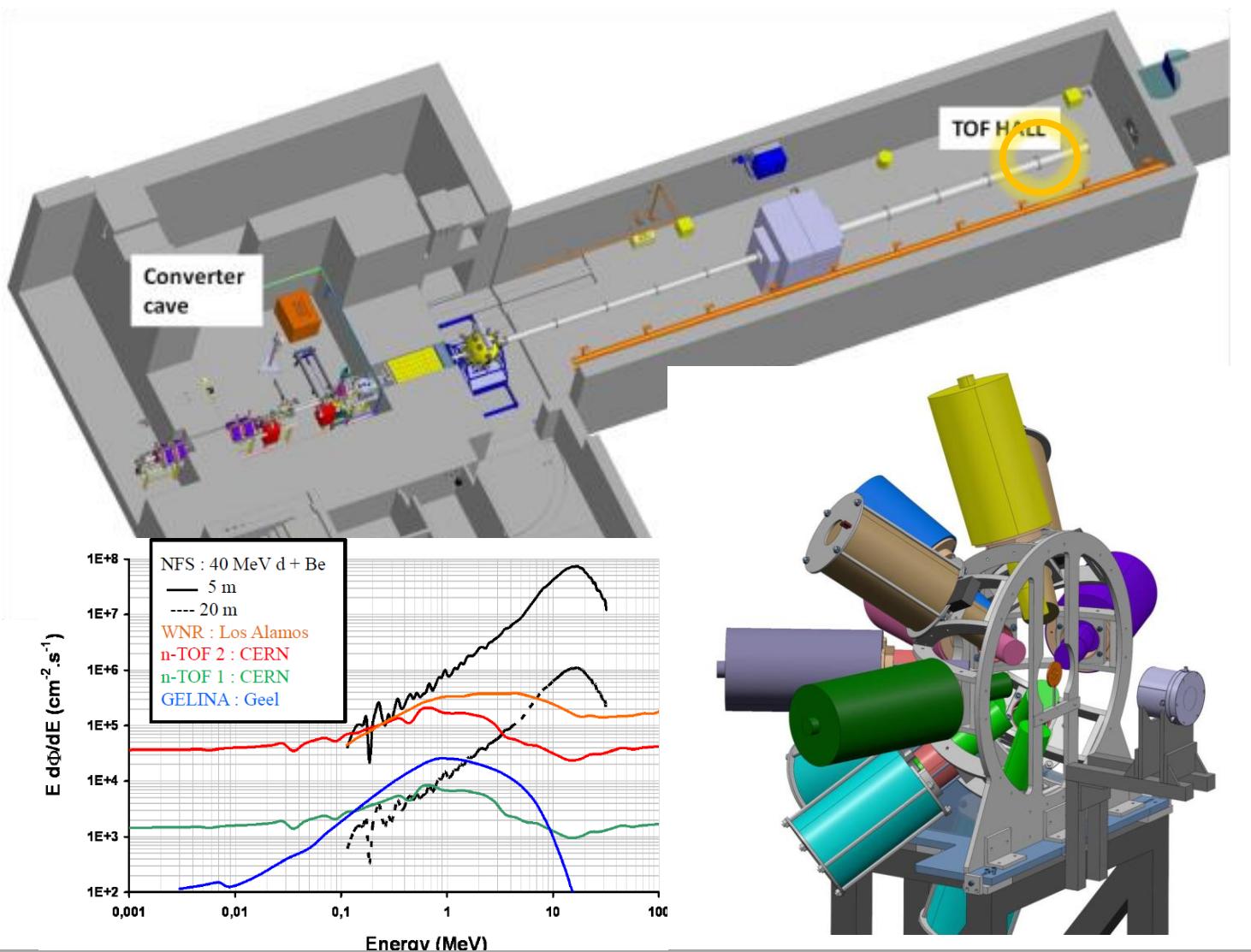


FIG. 18. Total cross sections for the $2_1^+ \rightarrow 0_1^+$ transition in (a) ^{182}W , (b) ^{184}W and (c) ^{186}W . Calculations using four different OMPs are compared to the current measurements (symbols).

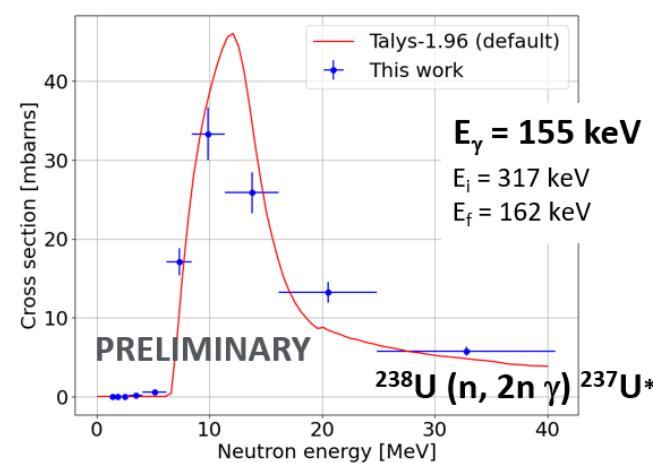
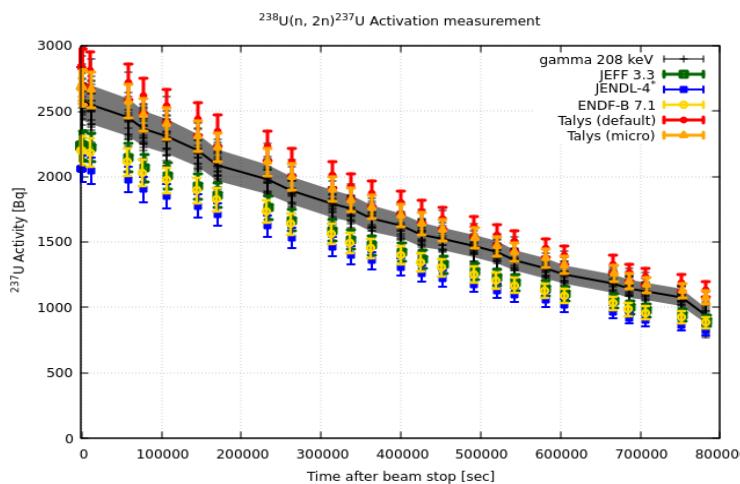
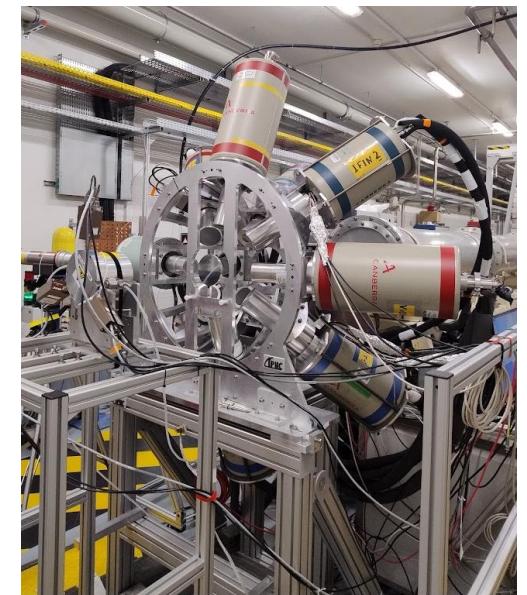
... Autre centre experimental : NFS @ Ganil

- Production de neutrons par réaction des ions légers accélérés par le Linac de Spiral2.
- Énergies des neutrons plus élevée qu'à Gelina et mieux adaptées à l'étude des réactions (n, 2n) et (n, 3n).
- Utilisation de la longue base de vol (~30 mètres).
- Conception et construction de la ligne neutron et du second collimateur à l'IPHC.
- En Octobre/Novembre 2024 : Mesure de sections efficaces de diffusion inélastique des neutrons sur le ^{238}U , avec un dispositif conçu à l'IPHC, rassemblant des détecteurs de Grapheme, du JRC-Geel et de l'IFIN-HH (Bucarest)



... Etude des réactions ($n, 2-3n \gamma$) à NFS

- 2024 : Sections efficaces de réaction $^{238}\text{U}(n, 2n\gamma)$ et $(n, 3n\gamma)$
- Mesure γ *prompt* et activation
(radioactivité ^{237}U ,
cibles fournies par le JRC-Geel)
- 2 semaines de faisceau, et 16 de décroissance.



- Les résultats très préliminaires obtenus pendant des stages (été 2025) sont encourageants.
- S
- Sujet de thèse proposé en 2026.

... Récapitulons : Résultats et Perspectives Scientifiques

- Les données nucléaires précises sont indispensables pour la conception et l'opération des réacteurs nucléaires, en particulier dans le contexte des nouveaux concepts (réacteurs rapides, cycle au thorium...).
- Nos programmes expérimentaux avec GRAPhEME et à NFS fournissent des mesures de haute qualité, essentielles pour contraindre les modèles de réaction, et ont déjà un impact.
- Nos collaborations, avec des expérimentateurs ([JRC-Geel](#), [IFIN-HH](#) ([Bucarest](#)), [Univ. Groningen](#), ...) et des théoriciens et évaluateurs ([CEA](#)) nous permettent d'avoir une vision globale regroupant travaux expérimentaux, interprétation et applications.
- Travaux dans le cadre de projets à l'échelle nationale et européenne.



APED



APRENDE

... Récapitulons : Résultats et Perspectives Scientifiques

- Nos projets, avec notamment la spectroscopie d'électrons de conversion, qui permettra de dépasser les limites de la spectroscopie γ , offriront de nouvelles mesures pour renforcer nos résultats et affiner les modèles.
- Les données enregistrées pour les noyaux ^{238}U , ^{239}Pu , Zr , ... feront l'objet de travaux de thèse / postdoc dans les années à venir.
- **Ces travaux s'inscrivent dans un effort de long terme : fournir, par des mesures de physique nucléaire fondamentale, des données nucléaires robustes et bien contrôlées, au service des applications et de la société.**

