

Groupe
de Recherche
sur l'aval
du Cycle
Electronucléaire

Bâtiment 24, 1er étage

Permanents :

Philippe Dessagne 6275

Maëlle Kerveno 6281

Gérard Rudolf 6290

Post doc :

Antoine Bacquias

Greg Henning

Doctorant :

Olivier Capdevielle (1ere année)

La physique nucléaire fondamentale
au service de la société...



Contexte énergétique mondial

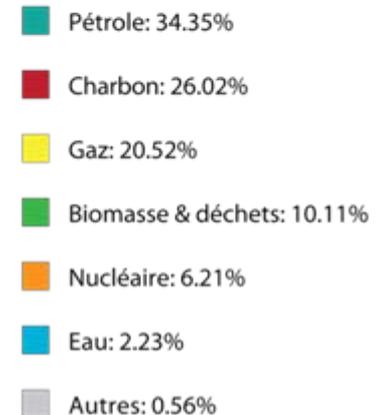
Croissance des besoins d'énergie :

- > Augmentation de la population mondiale (1% par an, 200 000 pers/jour)
- > Croissance de l'économie
- > 1,5 milliards de personnes n'ont pas accès à l'électricité aujourd'hui

Volonté de réduire l'émission de gaz à effet de serre

80% de l'énergie consommée à l'échelle mondiale provient de combustibles fossiles

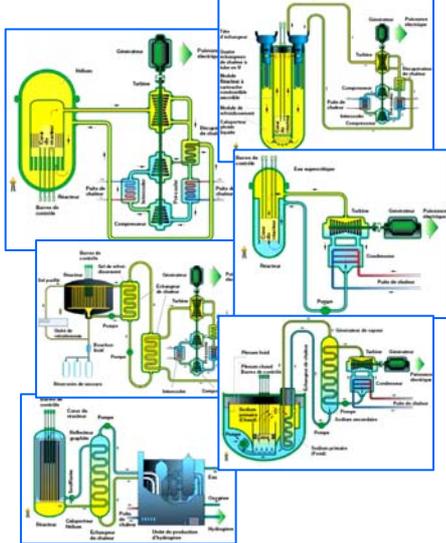
Solutions : optimisation de l'utilisation des sources d'énergie fossiles, augmentation de la part des énergies renouvelables et nucléaire (?)



Sources d'énergie dans la production primaire au niveau mondial

L'énergie nucléaire : présent & futur

Gen IV reactor systems

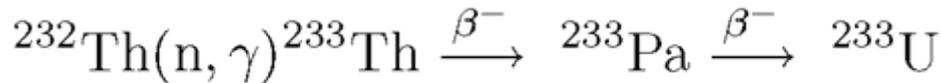
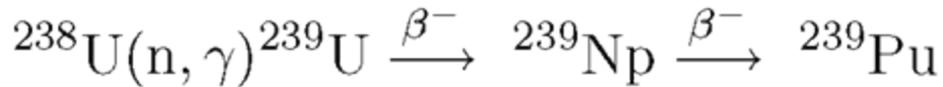


Nouveaux concepts de réacteurs
-> réacteurs rapides
-> réacteurs hybrides

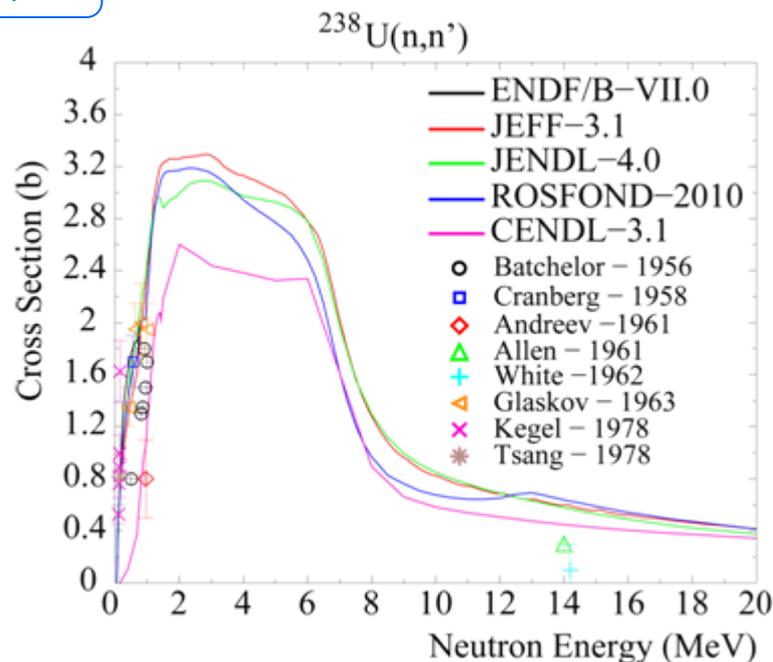
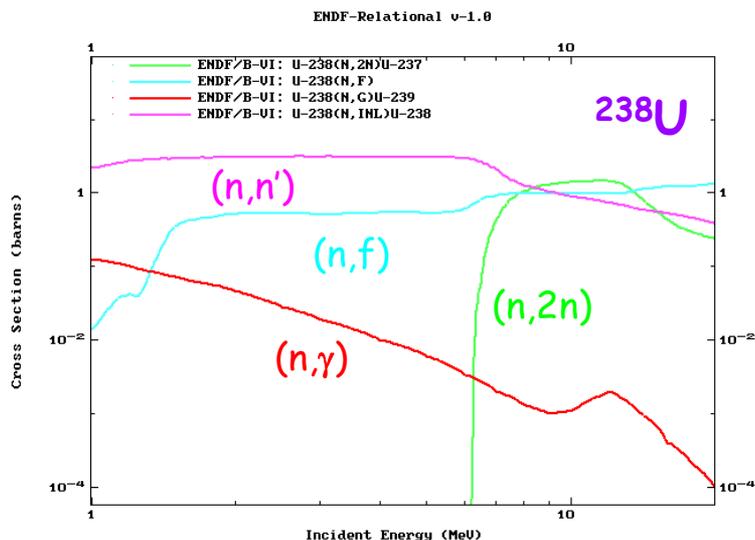
Nouveaux cycles de combustible
-> ^{238}U / ^{239}Pu
-> ^{232}Th / ^{233}U

Besoin important de **nouvelles données nucléaires** sur une large gamme de noyaux, d'énergie et de réactions.
Un des challenges est
la précision des mesures

NEA Nuclear Data
High Priority Request List



Sections efficaces de réaction $(n, xn \gamma)$



In reactor, **(n, xn) reactions** ($x \geq 1$) contribute to

- > Energy loss mechanism
- > Neutron multiplication
- > Production of radioactive isotopes

Bibliography in data bases shows that **improvement** of the **knowledge of (n, xn) process** is **necessary**.

How to study (n,xn) reactions?

- > Direct measurement of secondary neutrons
- > Activation technique
- > **prompt γ -ray spectroscopy**

Method: detection of the γ -rays stemming from the **decay of excited states** of nucleus created by the (n,xn) reaction.

(n,xn γ) cross section measurements -> **total (n,xn) cross section** :
Need of theoretical models...

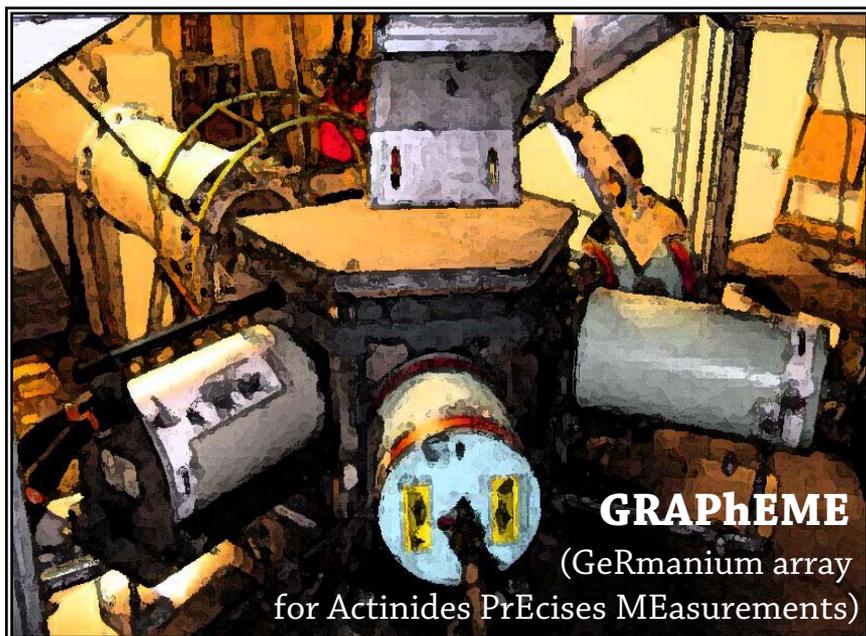
Nevertheless

(n,xn γ) cross sections :

- can be measured using **"white" neutron beam** with the TOF technique,
- provide **exclusive measurements very restrictive** for testing models.

$(n, xn \gamma)$ reaction cross sections measurements

IPHC (France) / IRMM (Belgium) / IFIN-HH (Romania) collaboration
=> development of an **experimental set-up GRAPhEME**
dedicated to the **precise measurement**
of the $(n, xn \gamma)$ **reaction cross sections** on actinides
@ **GELINA facility (IRMM-Belgium)**



2005 – 2010 :

^{235}U campaign

2009 – 2010 :

^{232}Th campaign

2009 – 2012 :

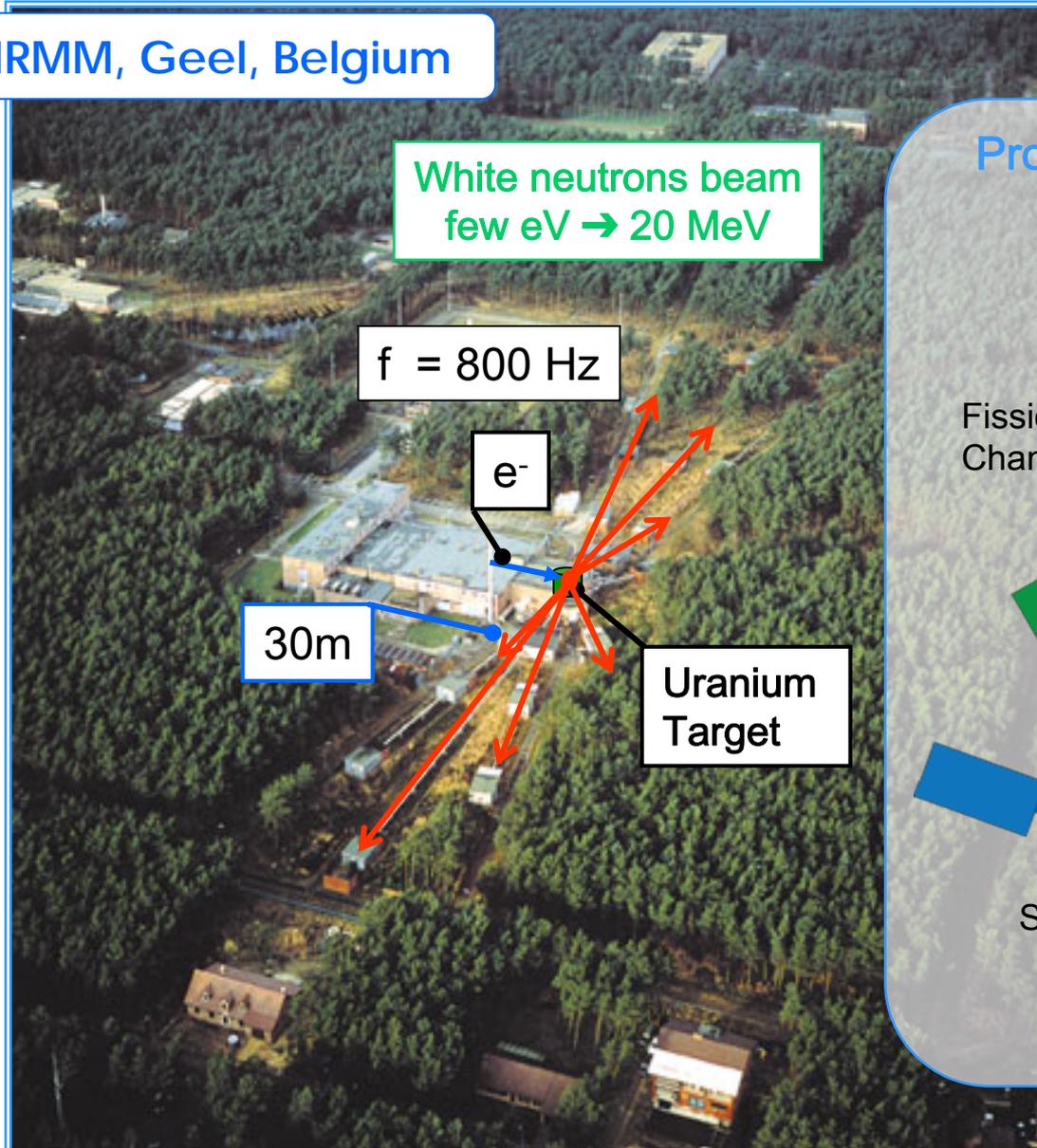
nat, ^{182}W , ^{183}W , ^{184}W , ^{186}W campaign

2011 – 2012 – 2013 :

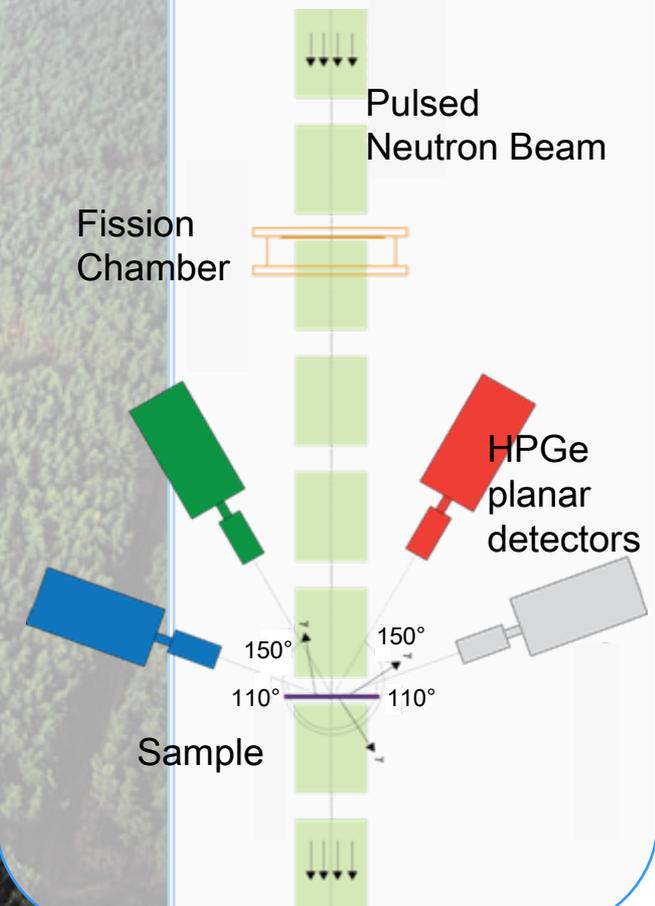
^{238}U campaign

➔ **Collaboration** with **theoreticians** and **evaluators** to **improve** the **quality**
and the **description** of our **measured cross sections**

GELINA, IRMM, Geel, Belgium

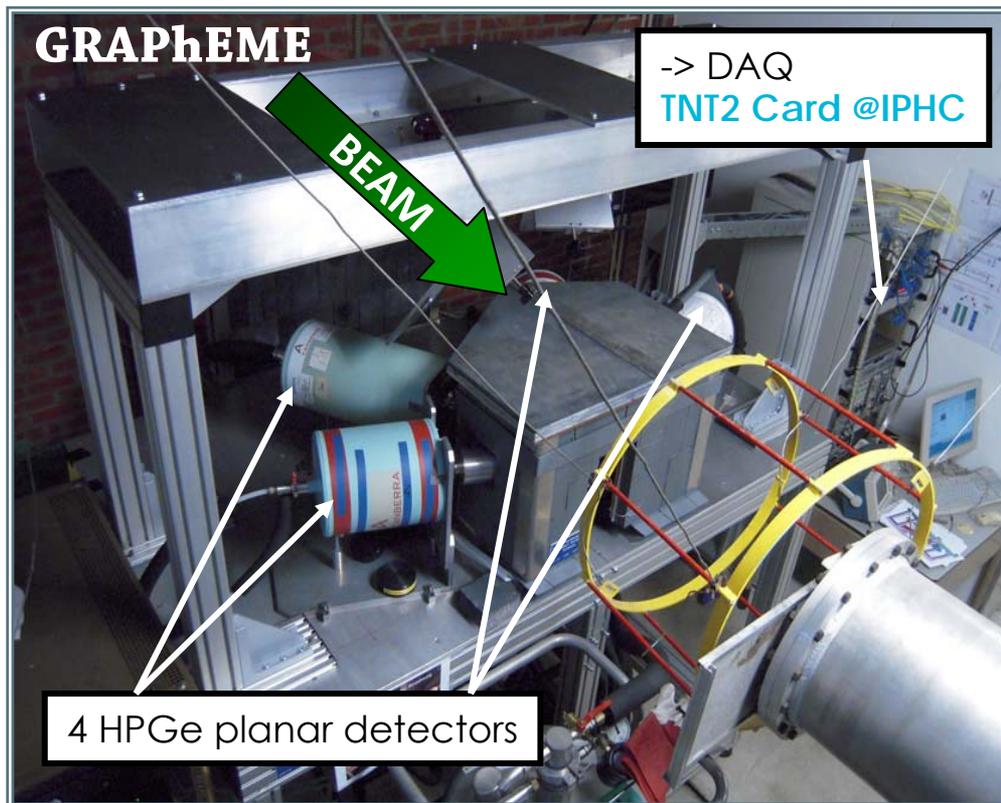


Prompt γ spectroscopy

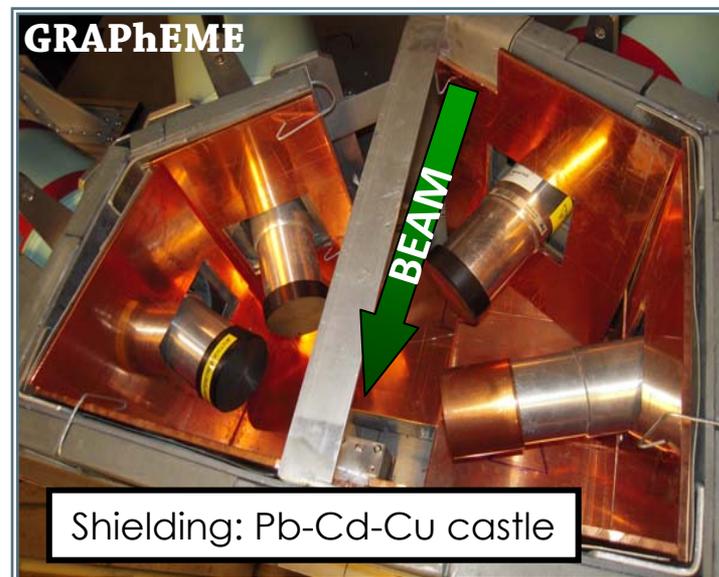
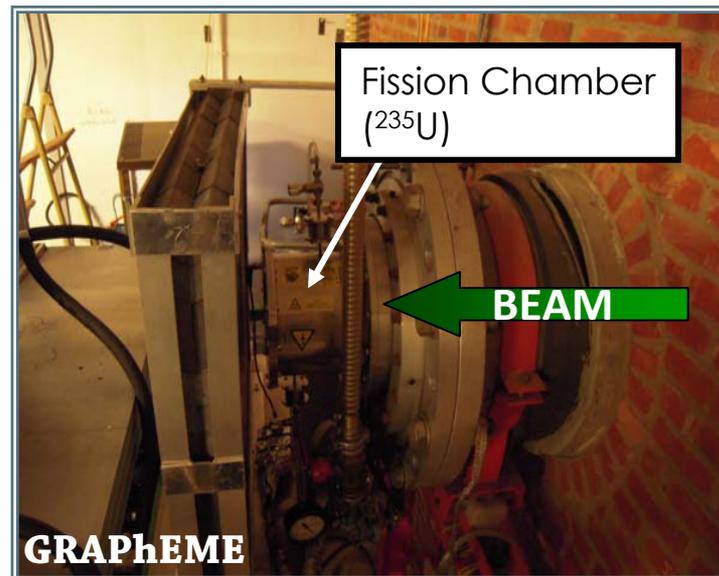


Dispositif expérimental

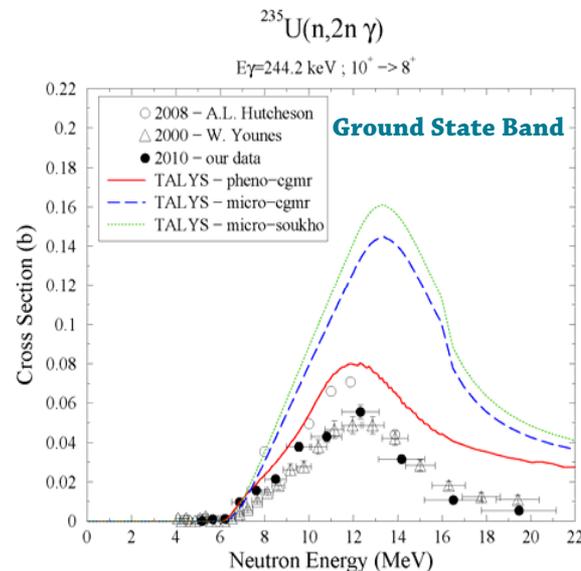
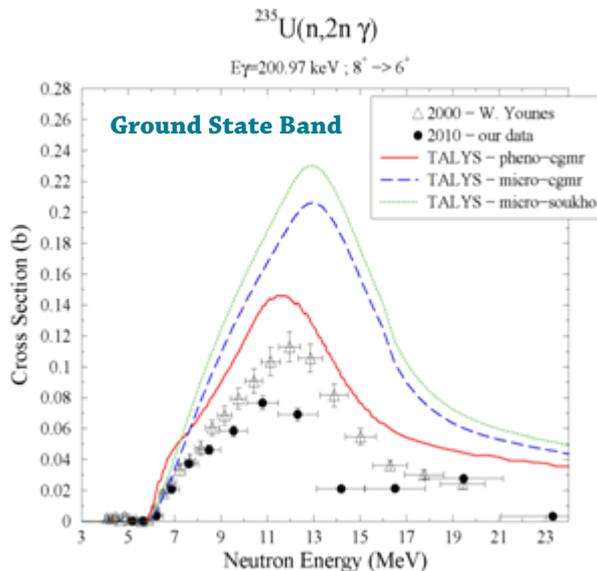
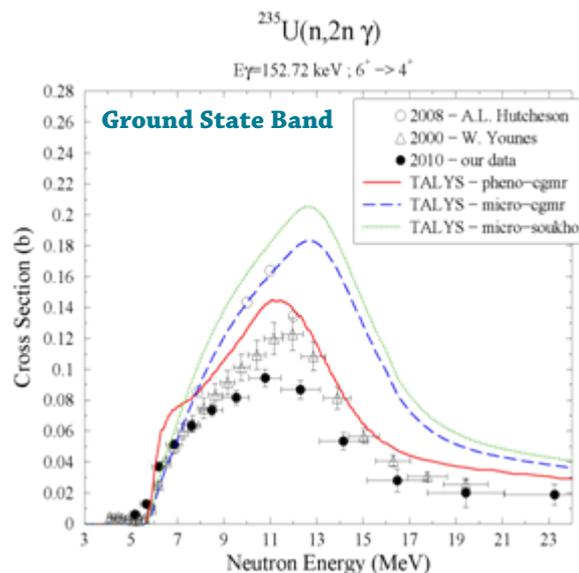
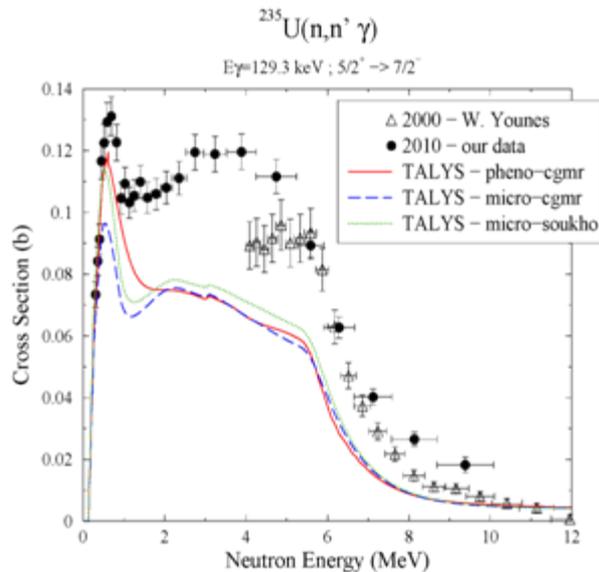
FP16 – 30 m



Noise insulation
(electromagnetic field
from the accelerator)
and
 γ background reduction



$^{235}\text{U}(n, xn \gamma)$



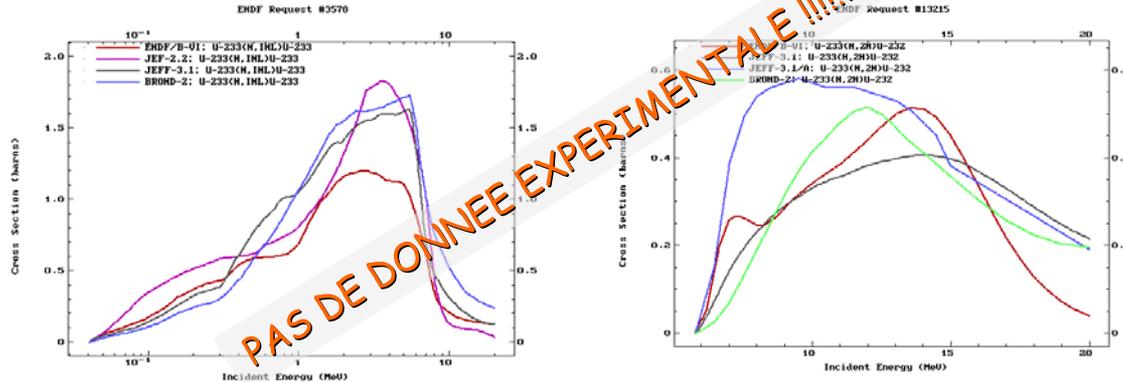
exp data % Our exp data

- * discrepancies with Hutcheson data.
- * agreement with Younes data for the 244 keV γ transition but discrepancies at high neutron energies for the 2 other $(n, 2n \gamma)$ transitions.

TALYS % Exp data

- * pheno-cgmr is the **best parameterization**.
- * $(n, n' \gamma)$: shape and amplitude are not well reproduced.
- * $(n, 2n \gamma)$: quite good agreement in the shape but factor 1.5 to 1.9 in amplitude.

mesure $^{233}\text{U}(n,2n\gamma)$; cycle du thorium



- Section efficace $(n,2n)$ non négligeable par rapport à la fission

- $^{233}\text{U}(n,2n)^{232}\text{U}$ qui décroît vers le ^{208}Pb avec émission d'un γ de 2.6 MeV

-> estimation des blindages pour le cycle du thorium?

-> sous estimation de la production de ^{232}U dans le cycle actuel

Difficultés:

° Obtention de l'échantillon ^{233}U : faible quantité de matière? composition? Forme? conditionnement?...

° Problème de la radioactivité de la cible -> activité importante vue par les détecteurs

Préparation de l'expérience « Lol_Day1_14 » auprès de la future installation NFS à SPIRAL2-GANIL: « Comparison between activation and prompt spectroscopy as means of (n,xn) cross section measurements »

Contact : **Maëlle KERVENO et Philippe DESSAGNE**

Téléphone : 03 88 10 62 81 et 03 88 10 62 75

Email : maelle.kerveno@iphc.cnrs.fr

Email : philippe.dessagne@iphc.cnrs.fr

Laboratoire d'accueil :

Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC) / DRS – UMR 7178

23 rue du Loess, BP 28 – 67037 STRASBOURG CEDEX 2

Directrice : Christelle Roy

Dans le cadre de la mise au point des réacteurs nucléaires de 4^{ème} génération dont certains pourront traiter les déchets à durée de vie longue, le Groupe de Recherches pour l'Aval du Cycle Electro-nucléaire (GRACE) se consacre à la mesure des sections efficaces de réactions (n,xn γ) sur des actinides.

Actuellement nous réalisons nos expériences auprès du faisceau de neutrons « blanc » de GELINA (JRC/IRMM Geel, Euratom) qui délivre des neutrons jusqu'à une énergie de 20 MeV. Compte tenu de la distribution en énergie de ces neutrons, cette installation est particulièrement bien adaptée à l'étude des réactions de diffusion inélastique (réaction (n,xn) avec x=1). L'équipe a donc développé un dispositif expérimental basé sur la spectroscopie γ prompt couplée à la mesure du temps de vol permettant l'étude de la diffusion inélastique des neutrons sur les actinides^[1].

La future installation NFS (Neutron For Science) de SPIRAL2 (Ganil, Caen) fournira des neutrons plus énergétiques (jusqu'à 40 MeV), ce qui devrait permettre d'étudier des réactions (n,xn) où plusieurs neutrons sont émis. Nous avons déposé, en collaboration avec nos collègues de l'IRMM (Geel) et de l'IFIN (Bucarest) une proposition d'expérience dont le but est de comparer les méthodes d'activation et de spectroscopie γ prompt pour la mesure des sections efficaces de réaction (n,xn) dans le cas de la réaction $^{90}\text{Zr}(n,3n)$. Cette proposition a été acceptée par le « Scientific Advisory Committee » de GANIL et a été classée en « day one experiment », ce qui signifie qu'elle pourra avoir lieu dès la mise en service de l'installation NFS^[2].

Le but du stage proposé est de participer activement à la préparation de cette expérience. Le travail présente plusieurs aspects. Dans un premier temps, l'étudiant devra se familiariser avec les deux méthodes expérimentales envisagées (activation et spectroscopie γ) afin de bien comprendre les enjeux de cette expérience. Puis, il travaillera sur la définition du protocole expérimental : estimation du temps faisceau, préparation des méthodes d'analyses...

En offrant la possibilité à un étudiant de s'immerger dans la phase préparatoire d'une expérience, ce stage lui permettra donc de découvrir un aspect fondamental du travail de physicien nucléaire.

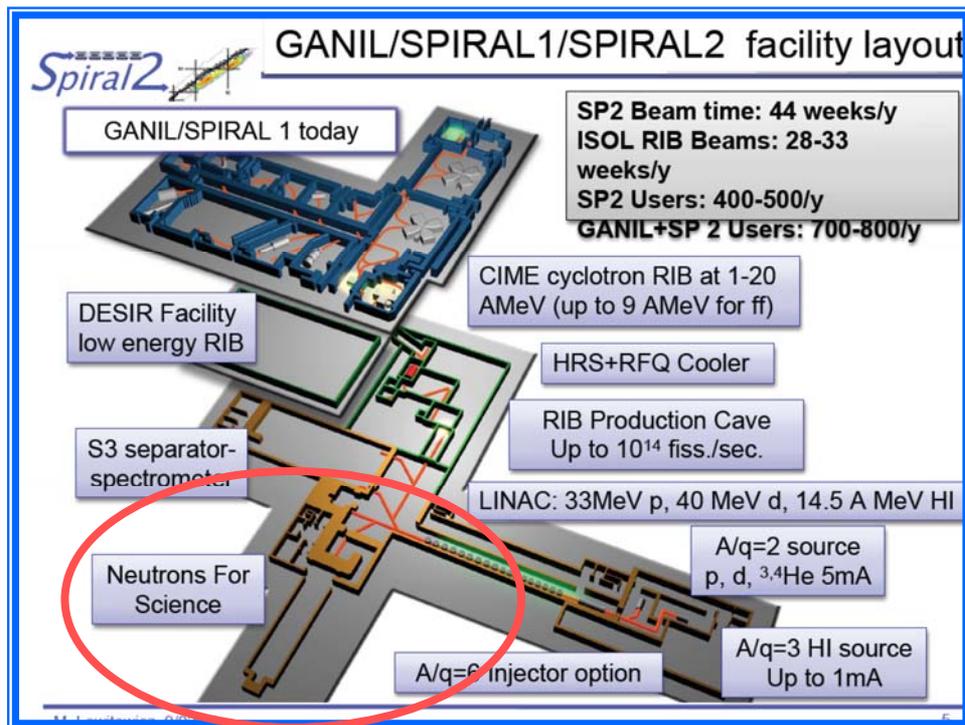
<http://www.iphc.cnrs.fr/-GRACE-.html>

<http://www.iphc.cnrs.fr/-Theses-stages-au-DRS-.html>

^[1] M.Kerveno *et al.* Phys. Rev C **87** 024609 (2013)

^[2] <http://pro.ganil-spiral2.eu/spiral2/instrumentation/nfs/lois/>

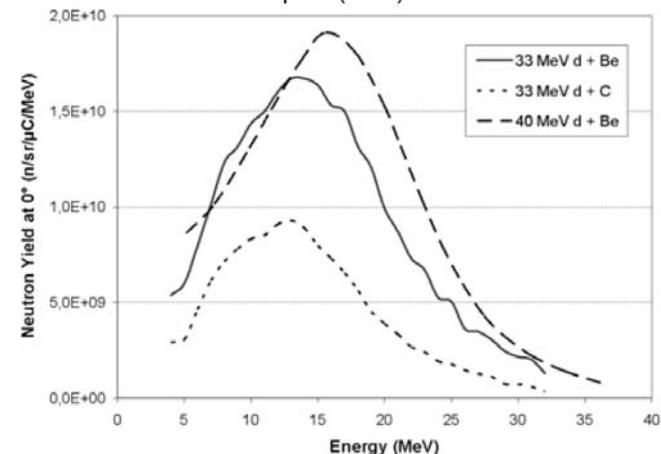
Expérience @Neutron For Science, SPIRAL2



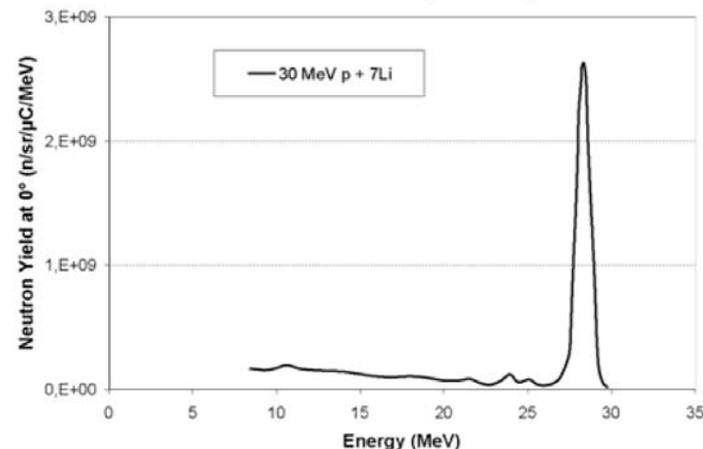
Faisceaux de neutrons

Spectre continu :

$E_{\text{max}} = 40 \text{ MeV}$, $\langle E \rangle = 14 \text{ MeV}$
 convertisseur épais (1cm)



Convertisseur mince (1-3 mm)

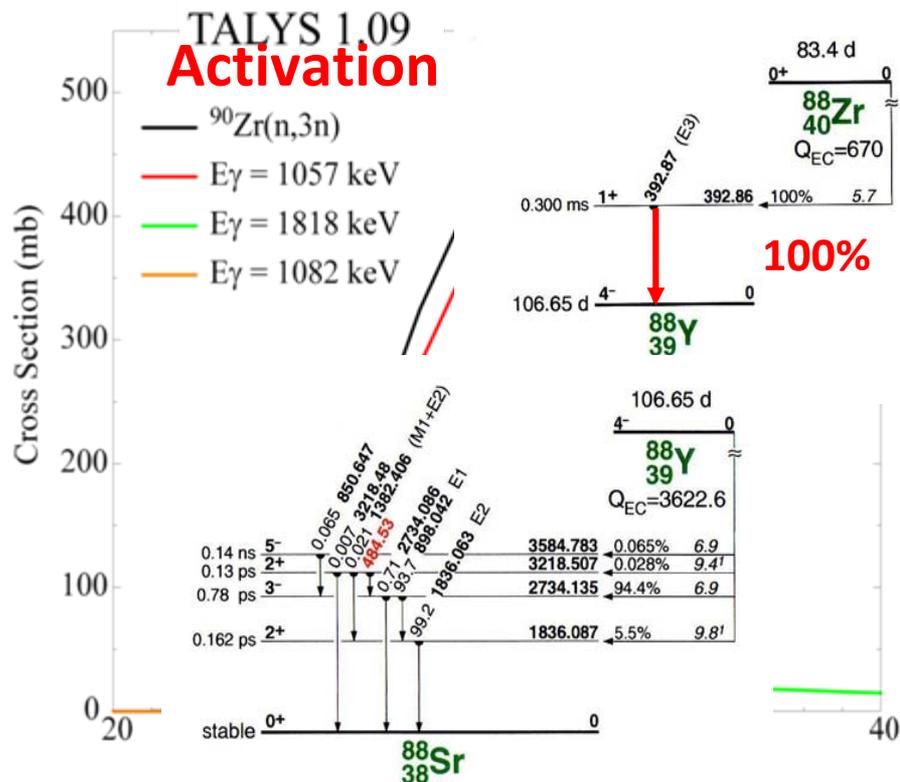
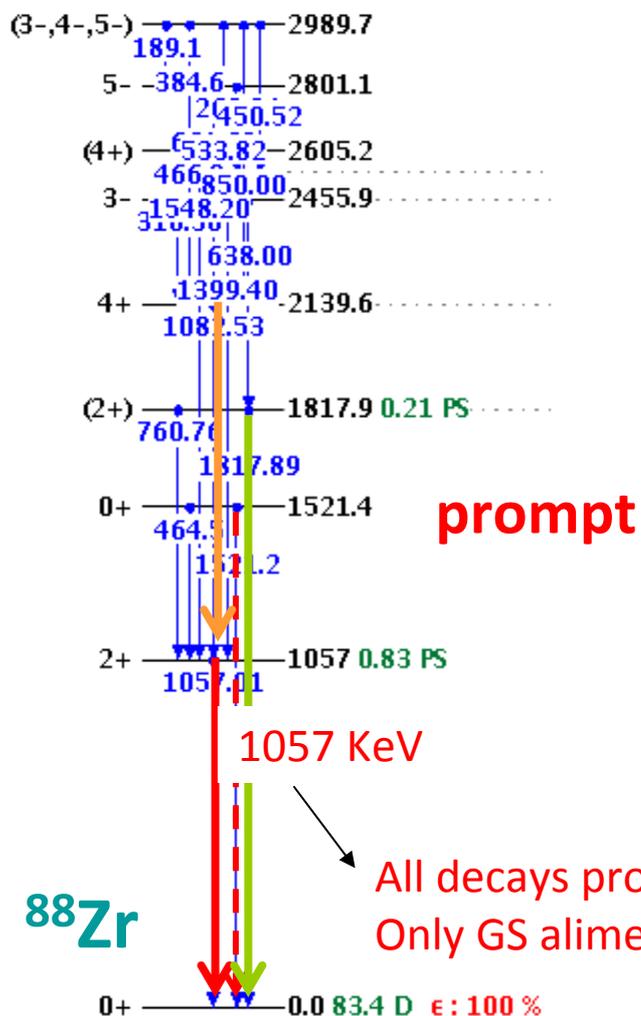


Physics Case

- Fission reactors of new generation
- Fusion technology
- Studies related to hybrid reactors (ADS)
- Validation of codes
- Nuclear medicine
- Development and characterization of new detectors
- Irradiation of chips and electronics structures

Proposed experiment : principle

SPIRAL 2 provides the opportunity to measure the $^{90}\text{Zr}(n,3n)^{88}\text{Zr}$ reaction cross section by activation and prompt gamma ray spectroscopy with the same experimental set-up



All decays proceed mainly via this transition
Only GS alimantation is missing

Proposed experiment : principle

taking into account the prompt decay of ^{88}Zr and the EC decay of ^{88}Zr

$$\frac{N_{393}(t)}{N_{1057}(t)} = \frac{1}{t_{on}} \cdot \frac{\varepsilon_{393}}{\varepsilon_{1057}} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda t_{on}}}{\lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda t_{off}}) \cdot e^{-\lambda t_d} \cdot \frac{\sigma_{(n,3n)}}{\sigma_{(n,3n\gamma)}}$$

With

t_{on} = in beam

t_d = delay

t_{off} = off beam

=>

Free from target and beam errors
Direct comparison with TALYS calculations

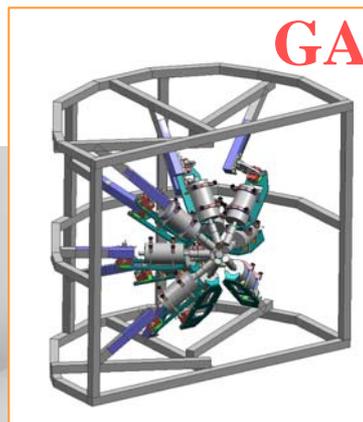


Experimental conditions:

- quasi mono energetic beam ($^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$)
- time of flight measurement is needed (*prompt measurement: to separate mono energy peak from the continuum contribution*)
- well determination of neutron energy distribution (*unfolding method for activation measurements*)
- new target for each energy

Experimental set up (already used at Geel)

GAINS¹ @ NFS :



GAINS + GRAPhEME

Gamma detection

Germanium detectors :
 12 $\varnothing = 8$ cm by 8 cm long,
 $\Delta t \sim 9.7$ ns + GRAPhEME

Neutron flux determination

Measurement normalized
 to $^{235}\text{U}(n,F)$ and $^{238}\text{U}(n,F)$

Compensation for angular
 distribution

by Gaussian quadrature
 using weighted sum of $d\sigma/d\Omega$
 at 110 and 150 degrees

¹ Germanium Array for Inélastique Neutron Scattering
 NIM A 624 (130-136) 2010 D. Deleanu et al.,

Beam time requested

Detectors

8 HPGe	-> ok
DAQ for HPGe TNT cards	-> ok
Autofill system	-> ok
1 Fission Chamber	-> in construction (U sample CACAO)
1 scintillator	-> in optimization
DAQ for scintillator	-> to be tested

Beam time

3 UT for each energy = 12 UT (stat. acc.)
 2 UT (beam adjustment)
 1 UT (optimization of the set-up)
TOTAL beam time = 15 UT = 5 days

Setting up, beam off calibration, dismantling
 = **9 days**

Beam specifications

Incident proton beam
 Converter : ${}^7\text{Li}$ (2 mm)
 Intensity : 1 μA (chopper 1/1000)
 Repetition rate : $\sim 10 \mu\text{s}$ (sufficient)
 Neutron collimator : $\varnothing = 5 \text{ cm}$
 Distance collimator – target : 2 m
 Distance converter – sample : 20 m
 4 neutron energies : 26, 28, 30, 32 MeV



- Beam stability
- Beam collimation

Préparation de l'expérience :

- comprendre :
 - les enjeux de l'expérience,
 - les méthodes instrumentales (couplage GAINS + GRAPhEME, spectroscopie γ prompt, activation)
- définition du protocole expérimental :
 - épaisseur de cible, cible naturelle/enrichie?,
 - temps faisceau,
 - mise au point des outils d'analyse...
- calculs théoriques (utilisation du code TALYS)



<http://www.iphc.cnrs.fr/-GRACE-.html>

N'hésitez pas à venir discuter avec nous



Collaboration



A. Bacquias, Ph. Dessagne, G. Henning, M. Kerveno, G. Rudolf



Strasbourg, France



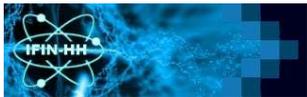
A. Plompen, J.C. Drohé, M. Nyman



Geel, Belgium



C. Borcea, A.L. Negret

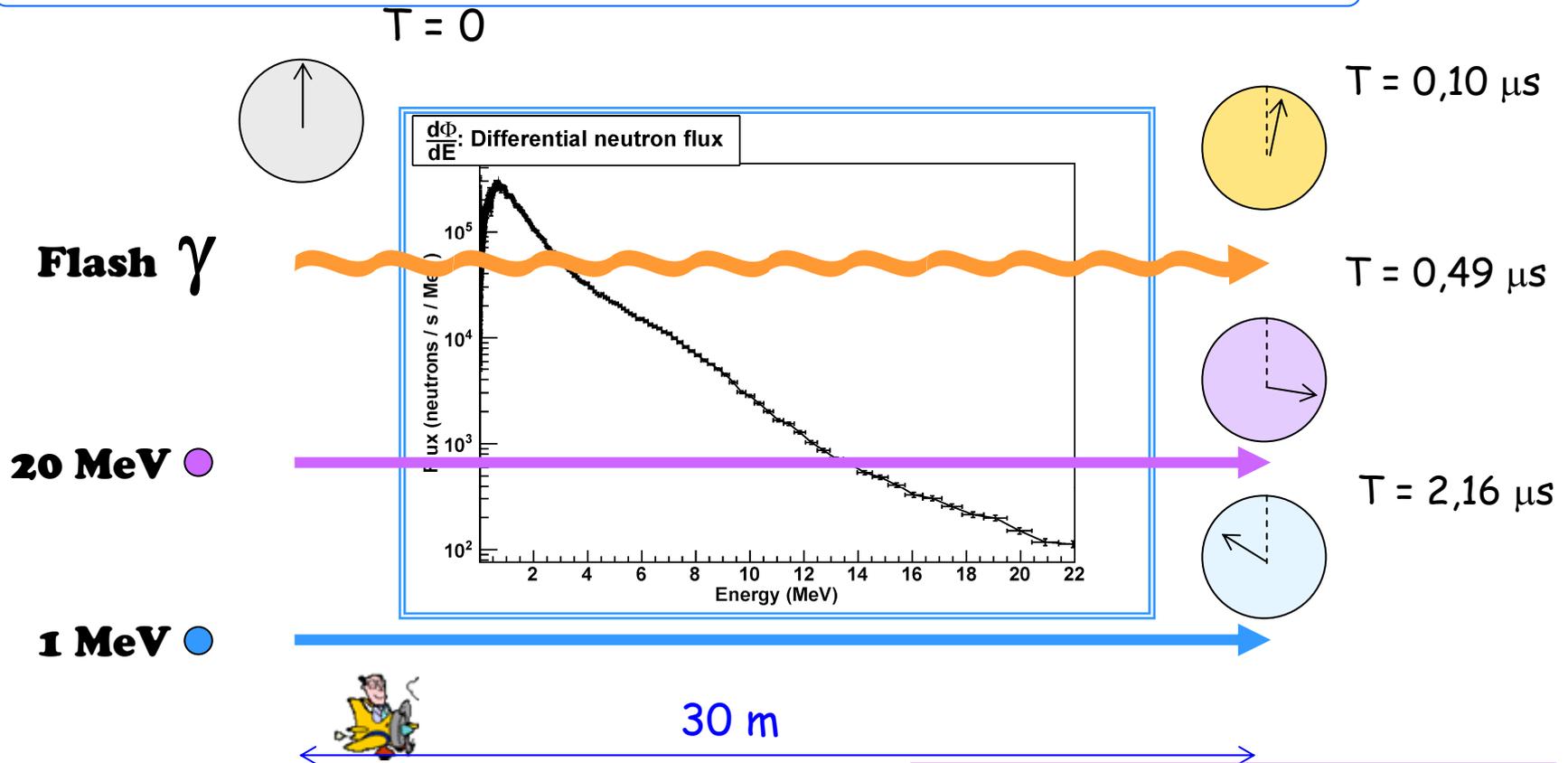


Bucharest, Romania



Théoriciens CEA/DAM; Evaluateurs CEA/Cadarache

GELINA, Spectre de neutrons blanc : méthode du Temps de vol

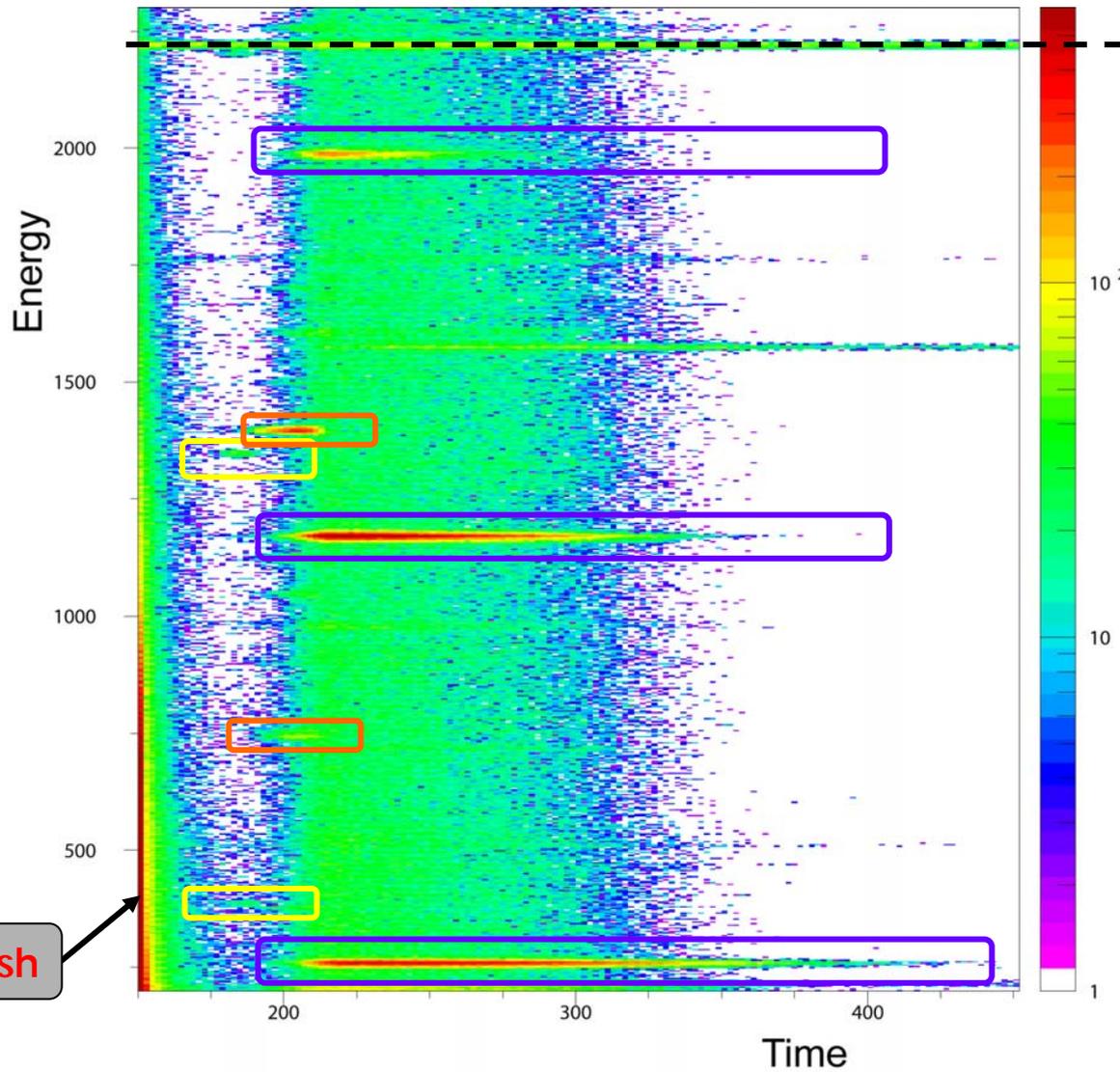


$$v = d/t, \quad \gamma = \sqrt{1/1 - v^2/c^2}$$

$$\Rightarrow E_n = (\gamma - 1)m_n c^2$$

TOF and γ spectra

Example of ^{232}Th



Radioactivity

$^{232}\text{Th}(n,n'\gamma)^{232}\text{Th}$

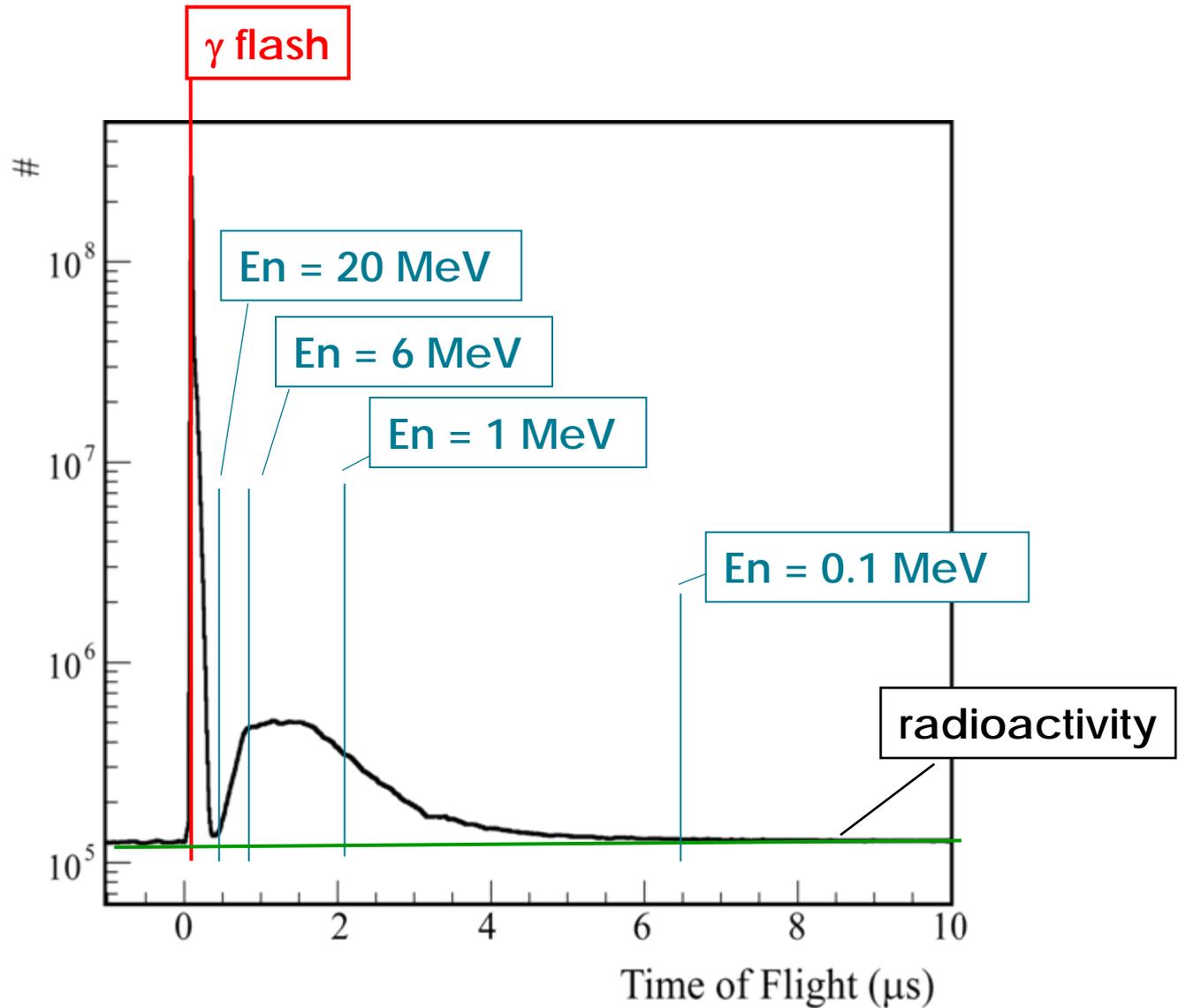
$^{232}\text{Th}(n,2n\gamma)^{231}\text{Th}$

$^{232}\text{Th}(n,3n\gamma)^{230}\text{Th}$

γ -flash

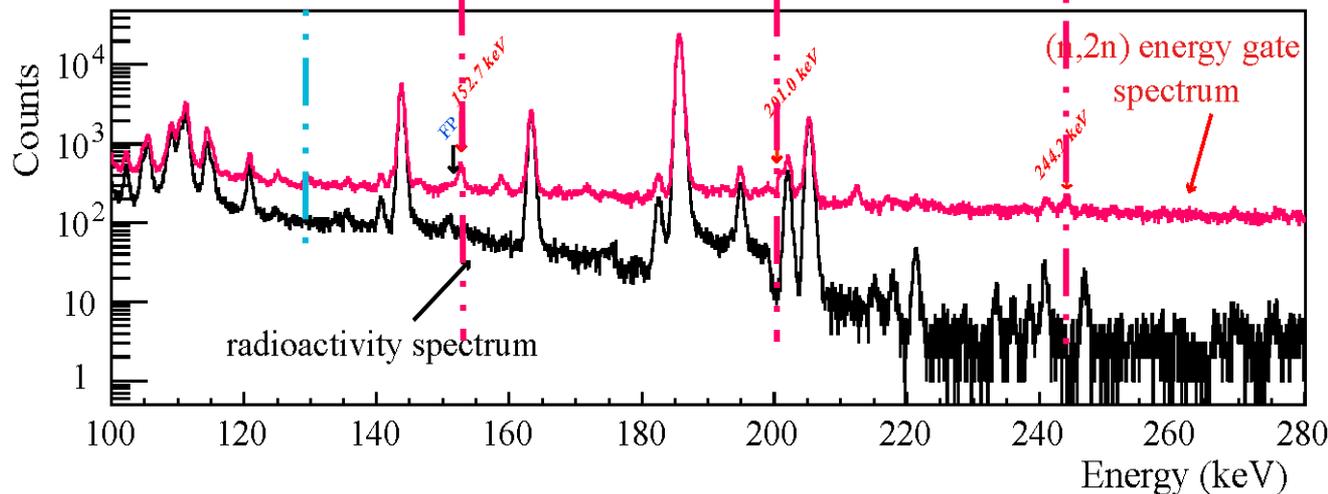
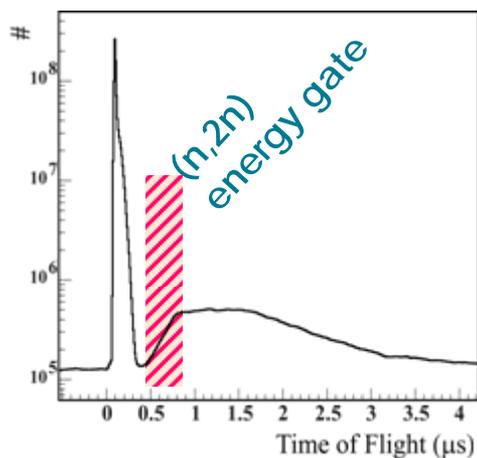
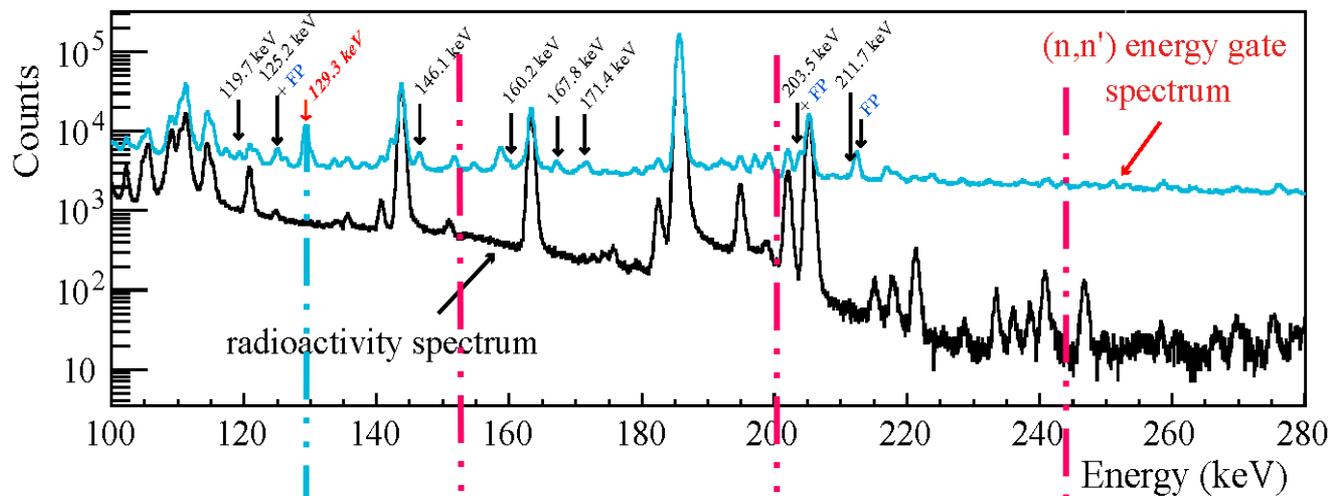
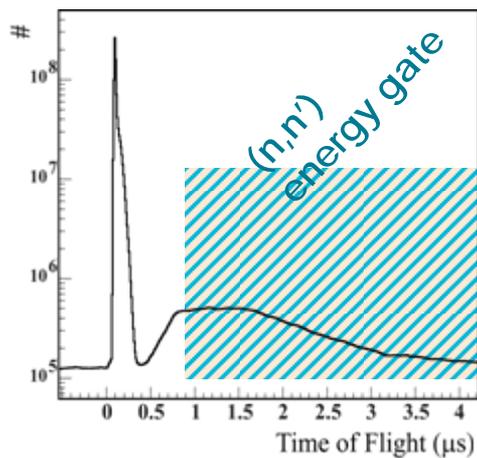
TOF spectrum

^{235}U case

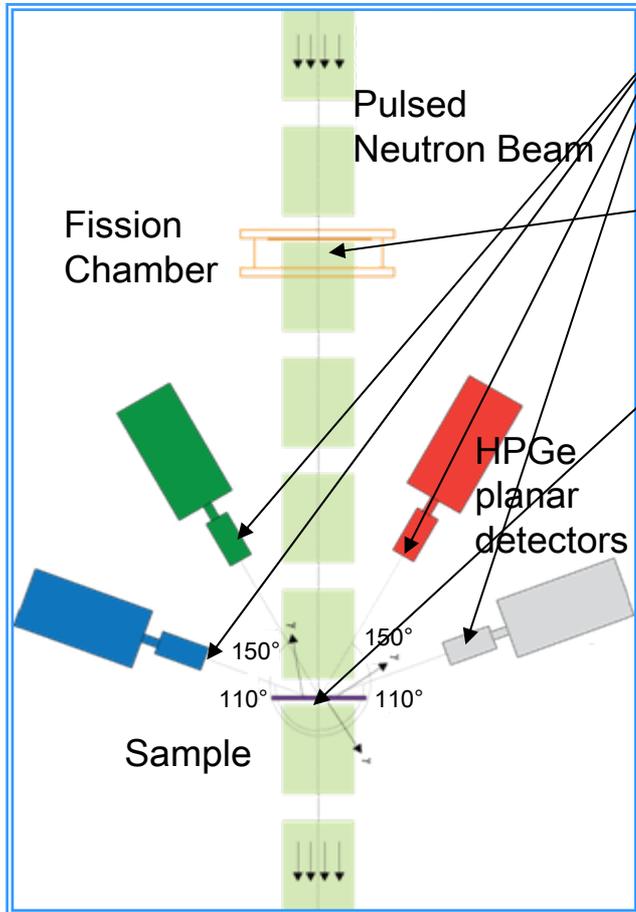


TOF and γ spectra

^{235}U case



Cross section calculation



$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \frac{n_{\text{det}}}{N_{\text{at}} \cdot \phi_n \cdot \varepsilon \cdot t}$$

n_{det} : number of detected γ

N_{at} : number of atoms in the sample

ϕ_n : neutron flux

ε : HPGe efficiency

t : measurement time

Differential cross section can be expressed by a finite **sum of Legendre polynomials** :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \frac{\sigma_{\text{tot}}}{4\pi} \sum_{i=0}^{\infty} a_i P_i(\cos \theta)$$

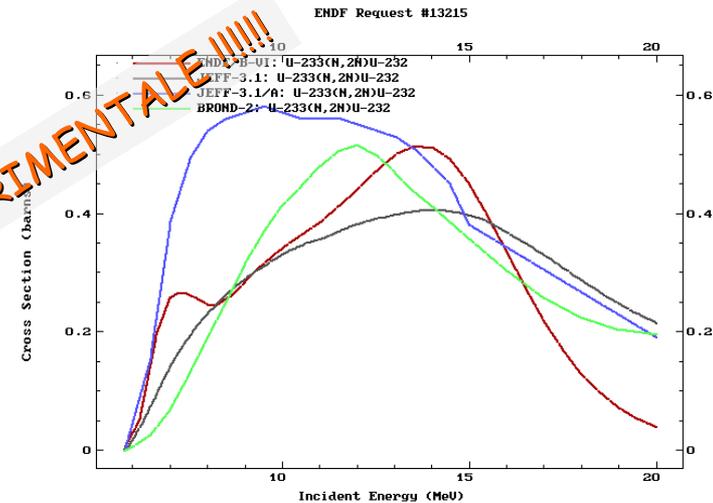
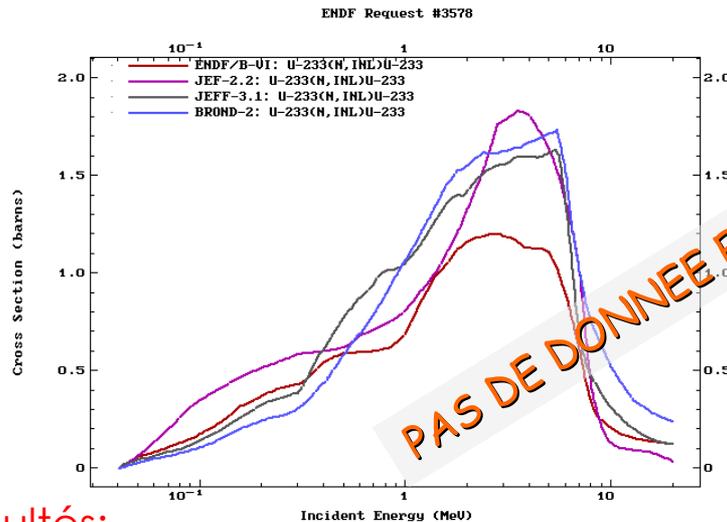
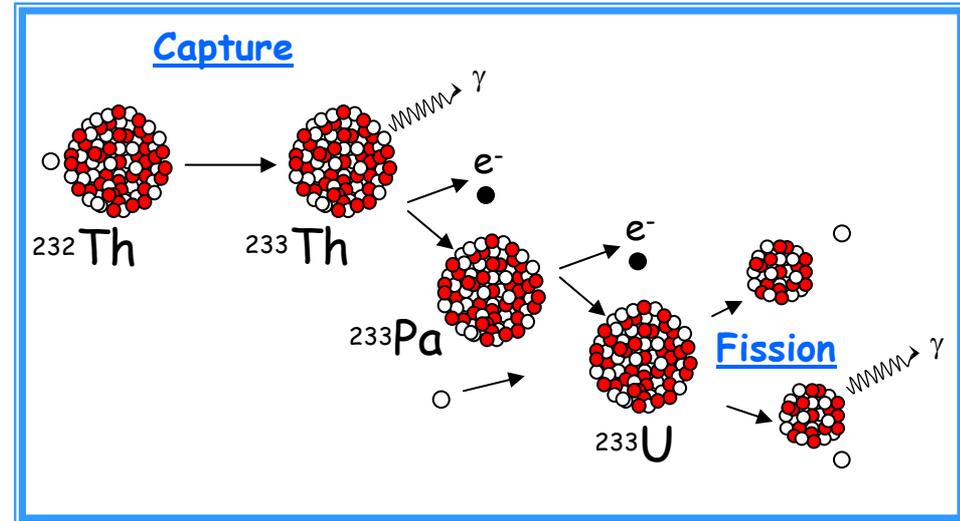
Measurement at the **polynomial nodes**
Gauss quadrature :

$$\sigma_{\text{tot}} = 4\pi \left[w_1^* \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta_1^*) + w_2^* \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta_2^*) \right]$$

$$w_1 = 0.3479 \text{ for } \theta_1 = 30.56^\circ \text{ or } 149.44^\circ \text{ and } w_2 = 0.6571 \text{ for } \theta_2 = 70.12^\circ \text{ or } 109.88^\circ$$

mesure $^{233}\text{U}(n,2n\gamma)$

- Section efficace (n,2n) non négligeable par rapport à la fission
- $^{233}\text{U}(n,2n)^{232}\text{U}$ qui décroît vers le ^{208}Pb avec émission d'un γ de 2.6 MeV
- > estimation des blindages pour le cycle du thorium?
- > sous estimation de la production de ^{232}U dans le cycle actuel



PAS DE DONNEE EXPERIMENTALE!!!!!!

Difficultés:

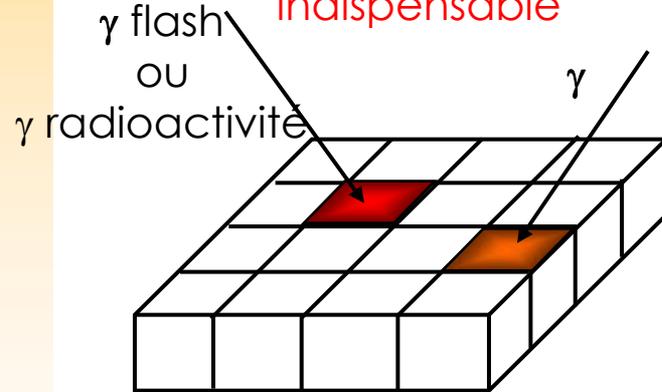
- ° Obtention de l'échantillon ^{233}U : faible quantité de matière? composition? Forme? conditionnement?...
- ° Problème de la radioactivité de la cible -> activité importante vue par les détecteurs

Compte tenu :

- ° du taux de **radioactivité** de la cible
- ° de la **faible quantité** de matière **à priori** disponible

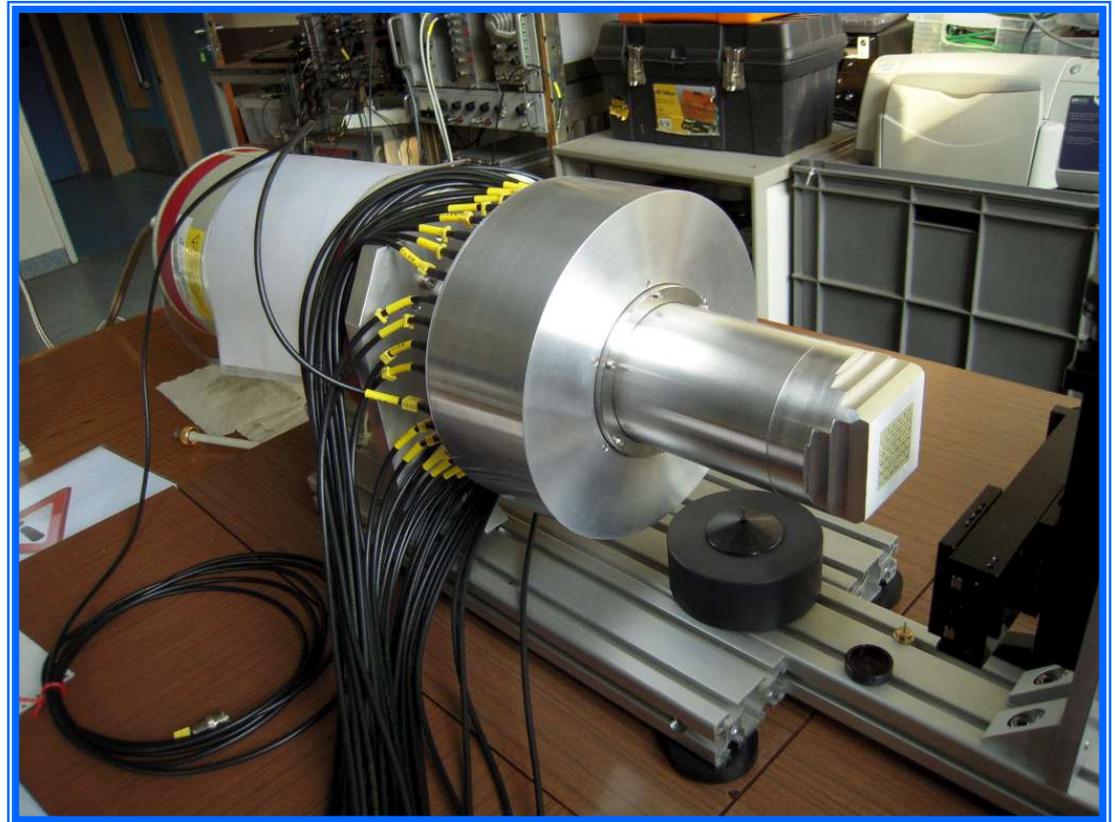


Pixellisation du
détecteur
indispensable



Détecteur HPGe segmenté

36 pixels



Caractérisation commencée à l'IPHC : GEANT 4, MCNPX