

# **Calculs de puissance résiduelle pour le concept MSFR & Données nucléaires de décroissance**

*Lydie.Giot@subatech.in2p3.fr*

*SUBATECH, CNRS-IN2P3, IMT Atlantique, Nantes*

*Stagiaires M1/M2: Hugo Pitois (Phelma Grenoble), Pyry Savaloinen (Univ. Lappeenrata)*



# *Plan*

- **I. Puissance résiduelle**
  - Motivations
  - Méthode de calcul
  - Codes d'évolution
  - Effet Pandémonium
- **II. Identification des principaux produits de fission contributeurs**
  - Objectifs et Méthode
  - Pulses de fission rapide
  - MSFR
- **III. To be or not to be Pandémonium ?**
  - Critères Pandémonium
  - Résultats
- **IV. Conclusions & Perspectives**

# I. Puissance Résiduelle / Motivations

- **Puissance résiduelle:**  $P_{TH}$  produite après arrêt réacteur.  
provenant principalement décroissances radioactives des FPs et actinides  
mais aussi sources additionnelles: fissions induites par neutrons retardés &  
réactions induites par fission spontanée, contribution matériaux activés

- Demande des autorités de sûreté d'avoir un calcul précis associé à un calcul d'incertitudes
- Intérêt de l'industrie de réduire les incertitudes pour des raisons économiques, tout en gardant le même niveau de sûreté

→ Identifier des biais dans les calculs/données d'entrée afin de les améliorer ....

## ■ Puissance résiduelle pour concept MSFR

≈ 5 % de la puissance nominale à arrêt

REX ??

≈ 1/3 chaleur produite ds unité retraitement des gaz

Mesures ??

≈ 2/3 chaleur produite ds combustible liquide

+ réservoir de vidange si accident

Pour sûreté fct: qq sec -> qq années => Contribution majeure des Produits de fission

# I. Puissance Résiduelle / Méthode de calcul

## ■ Formule de sommation

$$DH(t_c) = f(t_c) = \sum_i^N N_i(t_c) \lambda_i \bar{E}_i$$

$N_i$  : Nombre de noyaux i à l'instant  $t_{c=cooling}$

$\lambda_i$  : Constante de décroissance du noyau i

$\bar{E}_i$  : Energie totale de décroissance du noyau i

**Calcul d'évolution (modélisation réacteur + code )**

## ■ $\bar{E}_i$ généralement divisée ds librairies évaluées (ENDF, JEFF,...) en 3 parties :

$$\bar{E}_{LP} = \bar{E}_{\beta^-} + \bar{E}_{\beta^+} + \bar{E}_{e^-} + \dots \quad \text{Light particles component}$$

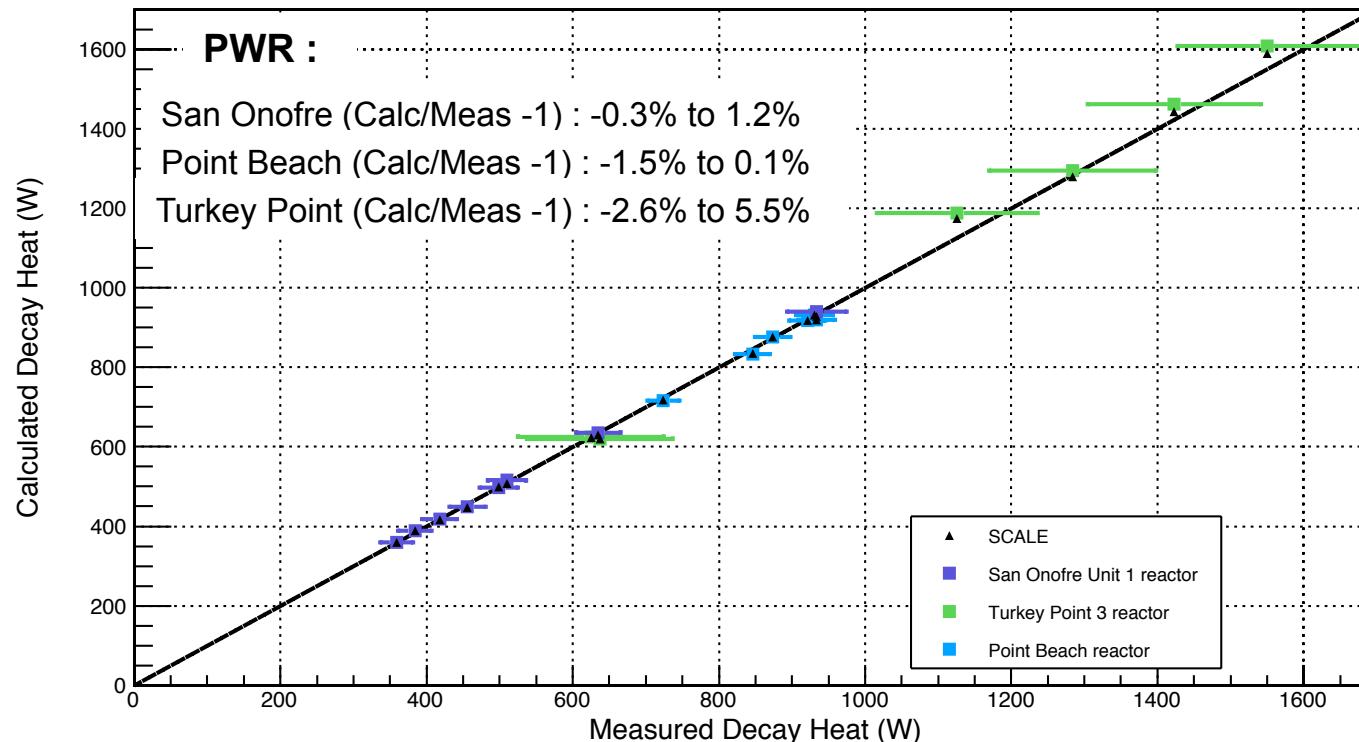
$$\bar{E}_{EM} = \bar{E}_{\gamma} + \bar{E}_{x-ray} + \bar{E}_{ anni.rad. } + \dots \quad \text{Electromagnetic component}$$

$$\bar{E}_{HP} = \bar{E}_{\alpha} + \bar{E}_{SF} + \bar{E}_p + \bar{E}_n + \dots \quad \text{Heavy particles component}$$

- Résultat => Qualité du code utilisé mais aussi des données nucléaires d'entrée ...
- ~ 40 000 données nucléaires:  $\sigma$ ,  $\bar{E}$ , Branching Ratio,  $\lambda$ , Fission Yields,  $\bar{\nu}$

# I. Puissance Résiduelle / Codes d'évolution

- SERPENT (VTT): déjà largement utilisé pour études MSFR  
+ Benchmarks puissance résiduelle pour PWR(18 assbl.)/BWR (61 assbl.) @SUBATECH



- 3 operation cycles
- Final cooling period:  
San Onofre1 1000-3000 days  
Turkey Point 800-1700 days  
Point Beach2 1600 days

## - 2018-2020: Swedish Central Interim Storage Facility for spent fuel (CLAB)

- 39 assemblages BWR : Barsebäck 1-2, Forsmark 1-3, Oskarshamm 2-3, Ringhals 1
- 34 assemblages PWRs : Ringhals 2-3

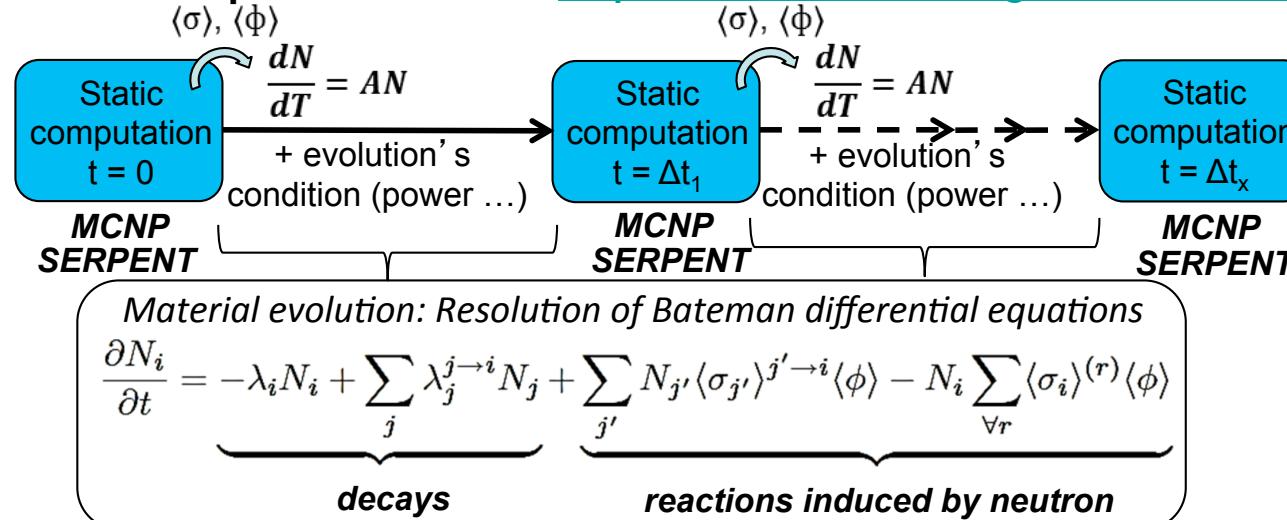
## - 2018: International Decay Heat blind test, 5 assemblages CLAB

organisé par SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management) ≈ 60 participants

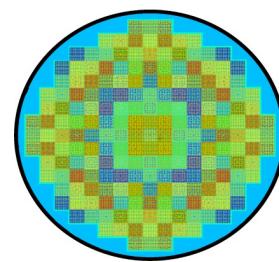
# I. Puissance Résiduelle / Codes d'évolution

## MURE: MCNP Utility for Reactor Evolution (CNRS-IN2P3)

- ✓ Interface C++ couplé au code Monte Carlo MCNP et maintenant SERPENT
- ✓ Code open source disponible @ NEA: <http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/nea-1845>



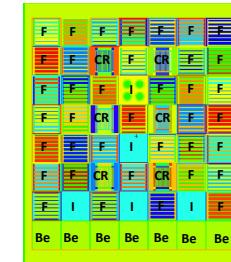
- ✓ Adapté à SUBATECH pour les expériences d'antineutrinos des réacteurs et maintenant puissance résiduelle ==> tous les émetteurs  $\beta^-$  et  $\gamma$  suivis à chaque pas en temps d'évolution  
==> Premiers travaux sur les erreurs systématiques



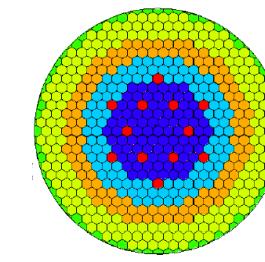
N4 Chooz,  
EDF PWR



BR2, SCK CEN



OSIRIS, CEA-Saclay



Na Fast-breeder

# I. Energie totale de décroissance et effet Pandemonium

## ■ Formule de sommation

$$DH(t_c) = f(t_c) = \sum_i^N N_i(t_c) \lambda_i \bar{E}_i$$

$N_i$  : Nombre de noyaux i à l'instant  $t_{c=cooling}$

$\lambda_i$  : Constante de décroissance du noyau i

$\bar{E}_i$  : Energie totale de décroissance du noyau i

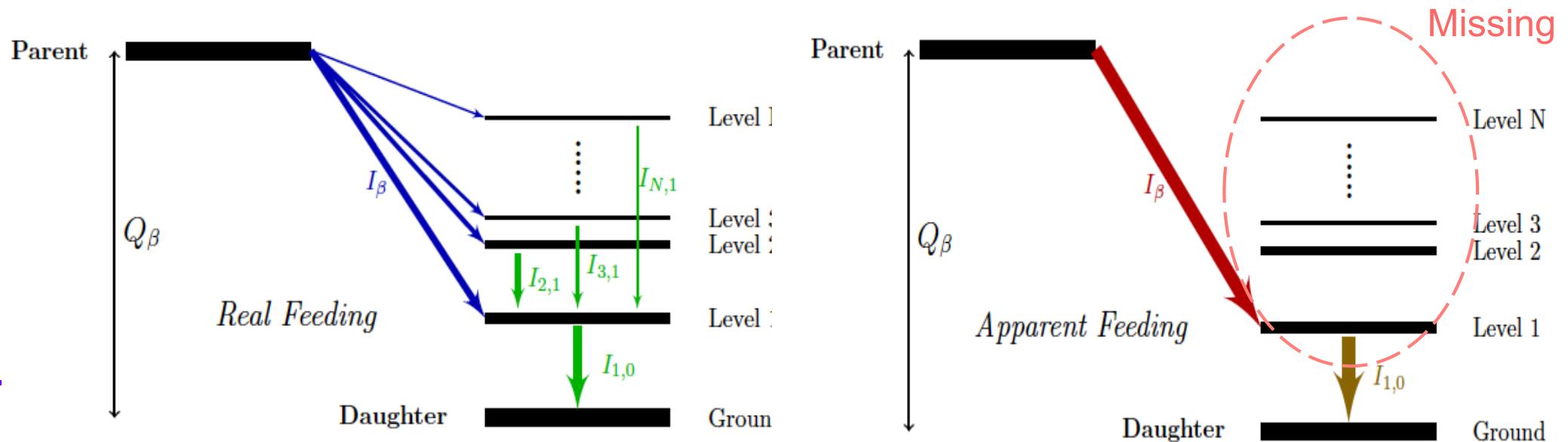
Calcul d'évolution (modélisation réacteur + code )

# I. Energie totale de décroissance et effet Pandemonium

## - Mesures de l'énergie totale de décroissance $E_i$

- Avant années 90s, technique de détection conventionnelle: high resolution  $\gamma$ -ray spectroscopy (Ge)
- Excellente résolution en énergie mais efficacité décroît fortement quand énergie augmente
- Risque d'occulter l'alimentation  $\beta^-$  vers niveaux haute énergie du noyau fils (surtout pour schémas de décroissance avec large Q values ex >3-4 MeV)

Schémas de décroissance incomplets: sur-estime  $E_{\text{beta}}$ , sous-estime  $E_{\text{gamma}}$



⇒ Biais des bases données nucléaires pour certains noyaux clés & leurs applications (safeguards,  $P_{\text{res}}$ )

=> Connue sous le nom « d'effet Pandemonium »

# *I. Energie totale de décroissance et effet Pandemonium*

## Pandemonium (The Capital of Hell)

introduced by John Milton (XVII) in his epic poem Paradise Lost



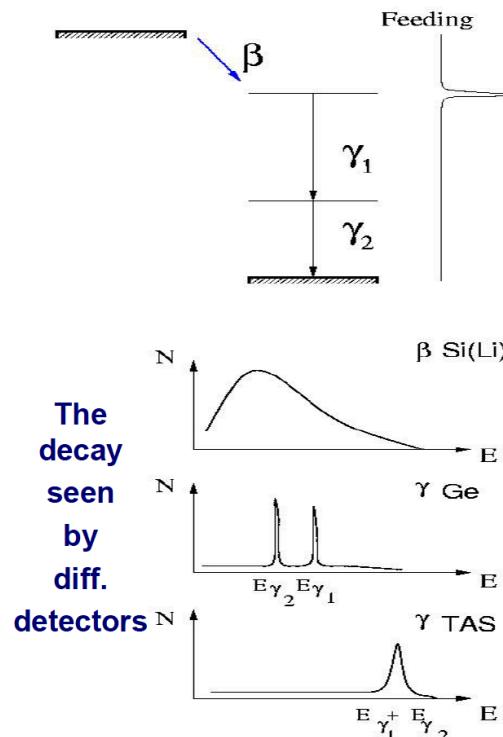
John Martin (~ 1825)

Hardy et al., Phys. Lett. 71B (1977) 307

From A. Algora

# I. Energie totale de décroissance et effet Pandemonium

- Technique la plus adaptée pour re-mesurer des noyaux clés : Total Absorption Spectroscopy  
Collaboration TAGS IFIC Valencia/Subatech/Surrey  
Experiences @ Jyväskylä, Finlande avec des pièges de penning



Since the gamma detection is the only reasonable way to solve the problem, we need a highly efficient device:

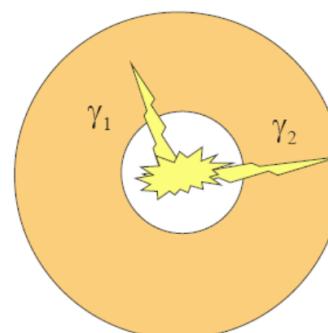
## A TOTAL ABSORPTION SPECTROMETER

But we need a change in philosophy. Instead of detecting the individual gamma rays we sum the energy deposited by the gamma cascades in the detector.

A TAS is like a calorimeter!

Big crystal,  $4\pi$

$$d = R(B) \cdot f$$

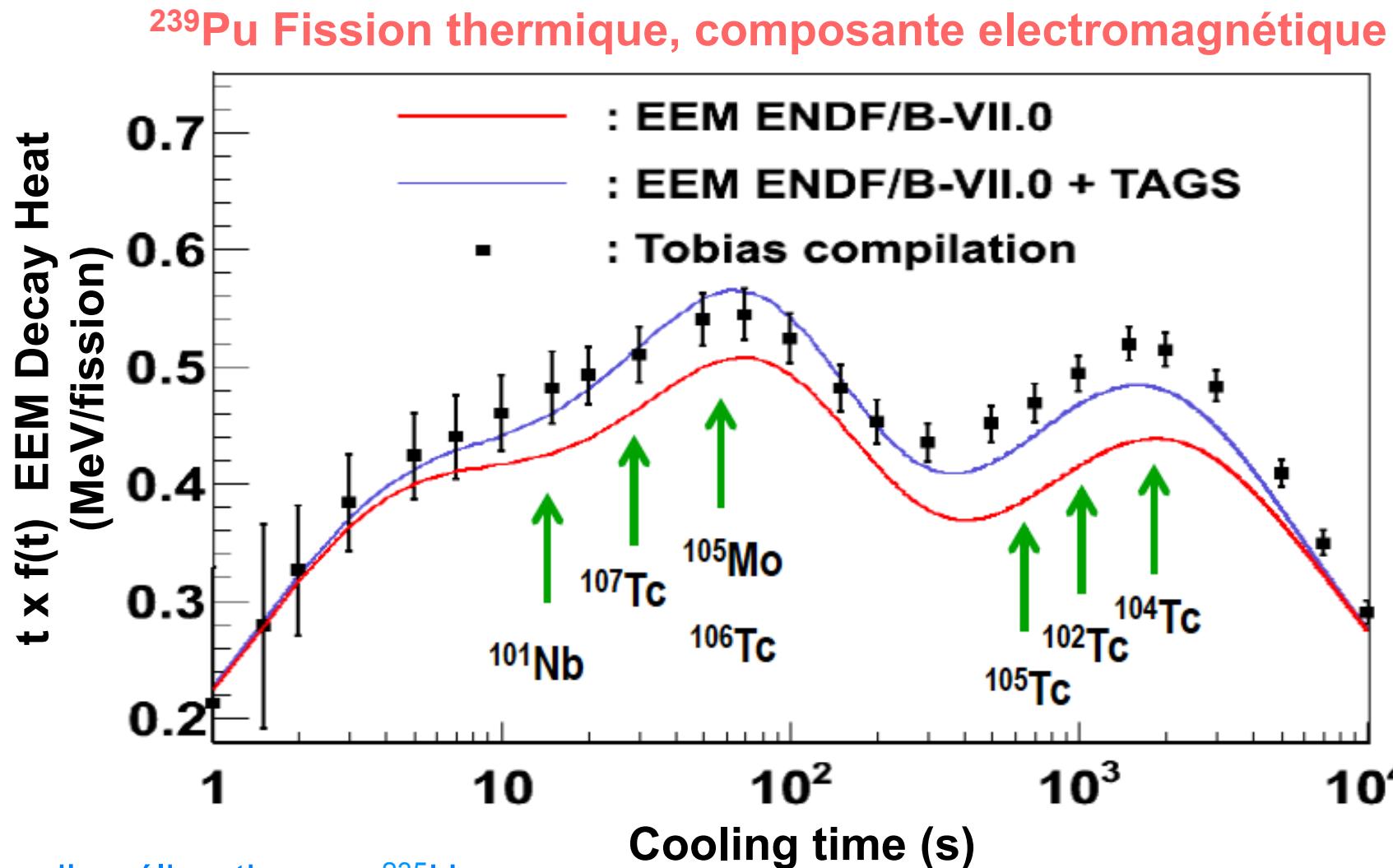


TAGS Arrays, Valencia

From TAS collaboration: contacts A. Algora & J. L. Tain @Valencia, W. Gellatly@Surrey, M. Fallot@Subatech

# I. Impact des noyaux “Pandémonium” re-mesurés

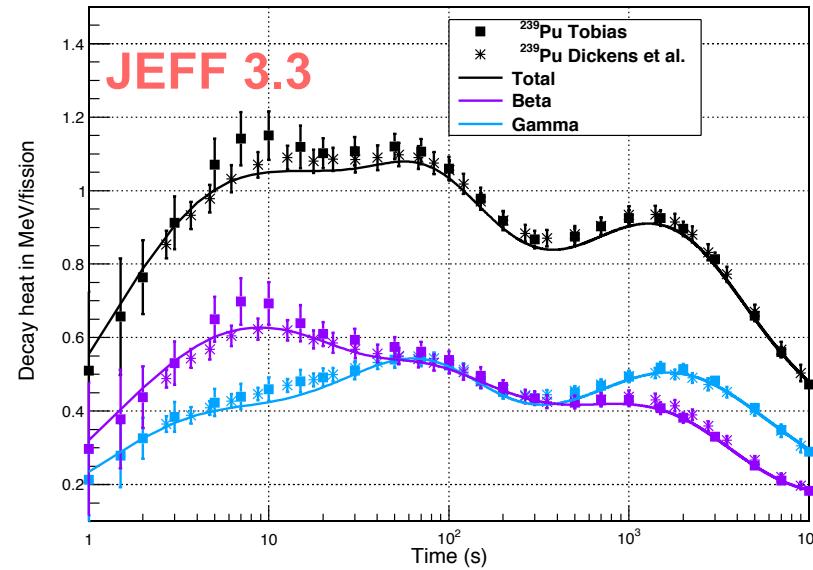
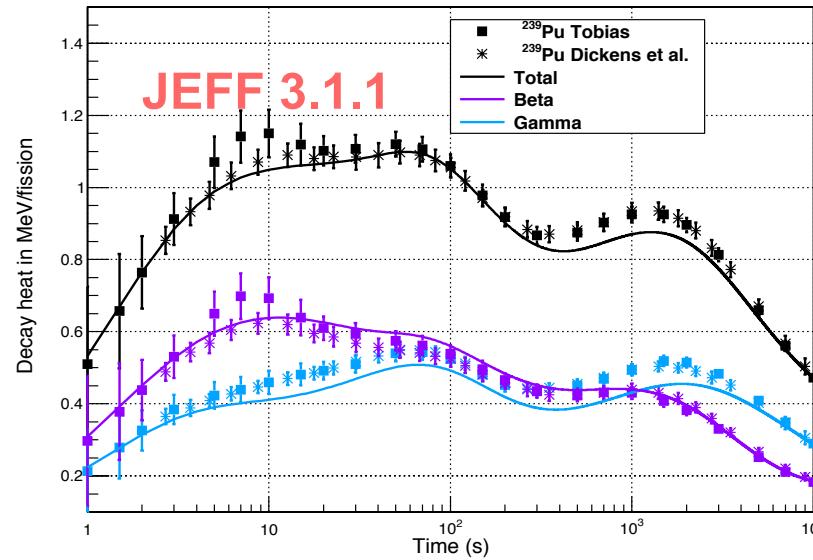
- Important improvement with 7 nuclei known from suffering from Pandemonium effect (WPEC-25, IAEA) and re-measured by TAS technique



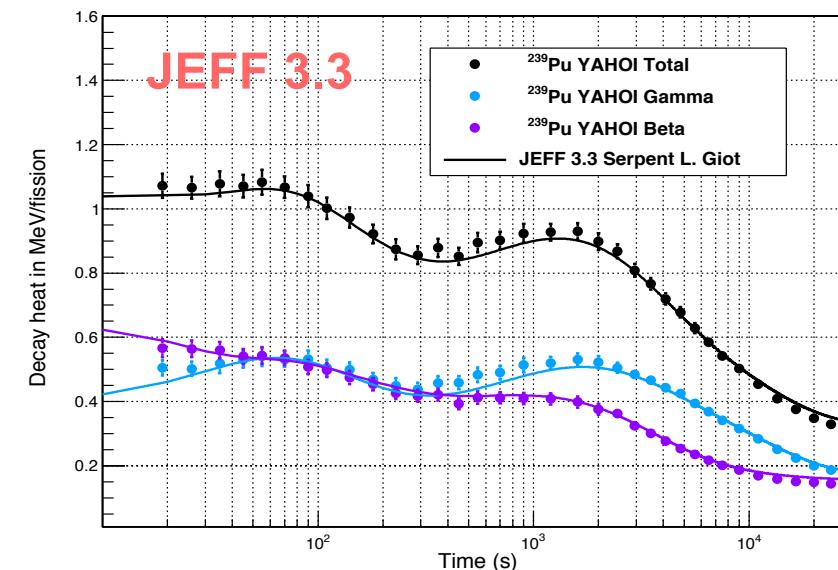
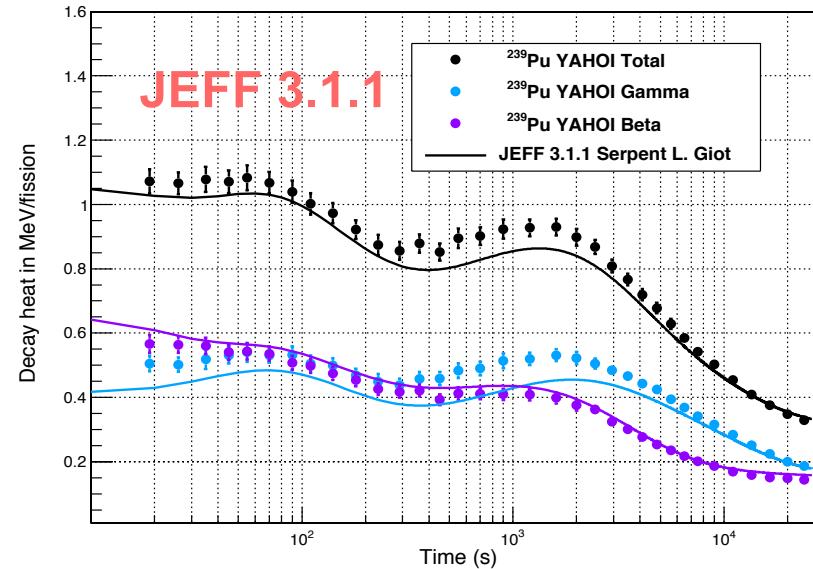
- Pas d'amélioration sur  $^{235}\text{U}$

# I. Impact des noyaux “Pandémonium” re-mesurés

## $^{239}\text{Pu}$ , Fission thermique



## $^{239}\text{Pu}$ , Fission Rapide



## *II. Identification des principaux PF contributeurs*

**Objectif: Données de décroissance des Principaux PF contributeurs souffrent ou non de l'effet Pandémonium pour le MSFR ?**

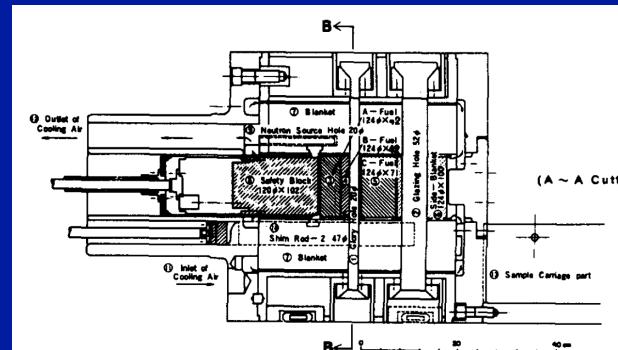
## Etape 1: Identification des principaux PFs

## Pulses de fission rapide

## $^{233}\text{U}$ , $^{239}\text{Pu}$ , $^{238}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$

# Calculs SERPENT2 vs Mesures

# Fast neutron source Reactor YAYOI



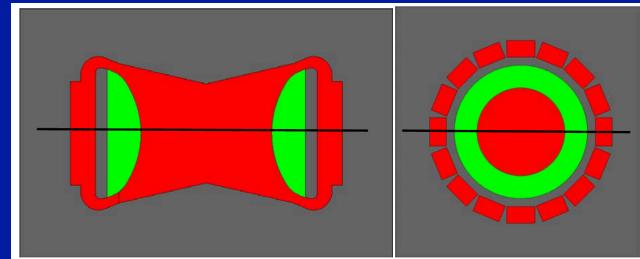
- Identification des principaux PF pour différents pas en temps de refroidissement: 1s, ..., 20000s  
Analyse contributions ELP & EEM séparées

## Puissance résiduelle MSFR

3GWth, 40.4W/g,

Sel combustible: démarrage à l' $^{233}\text{U}$   
Cas: 3, 10 et 40 ans de fct

SERPENT2, JEFF3.1.1



*from A. Laureau*

- #### - Mêmes études croisées

## Liste commune de PFs => Noyaux Pandémonium ou pas ???

## *II. Pulses de fission rapide*

Exemple:  $^{233}\text{U}$ , Fission rapide, Contribution gamma, Temps de refroidissement 5 s

JEFF 3.1.1

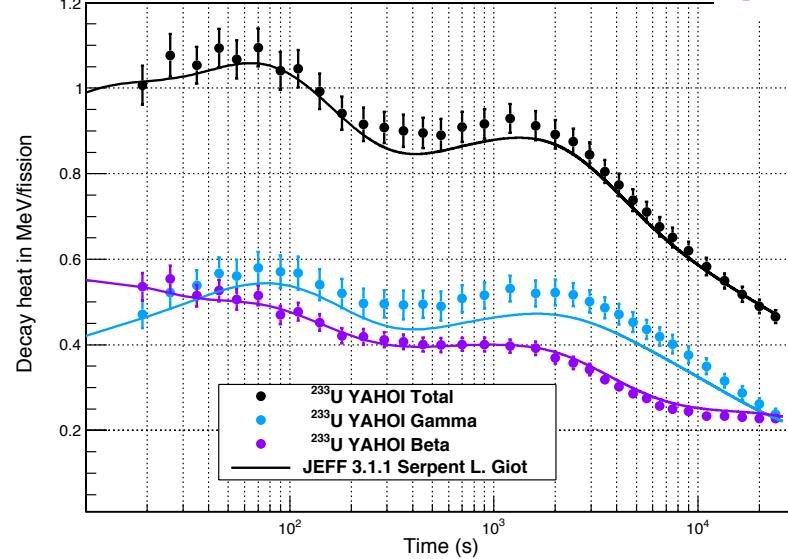
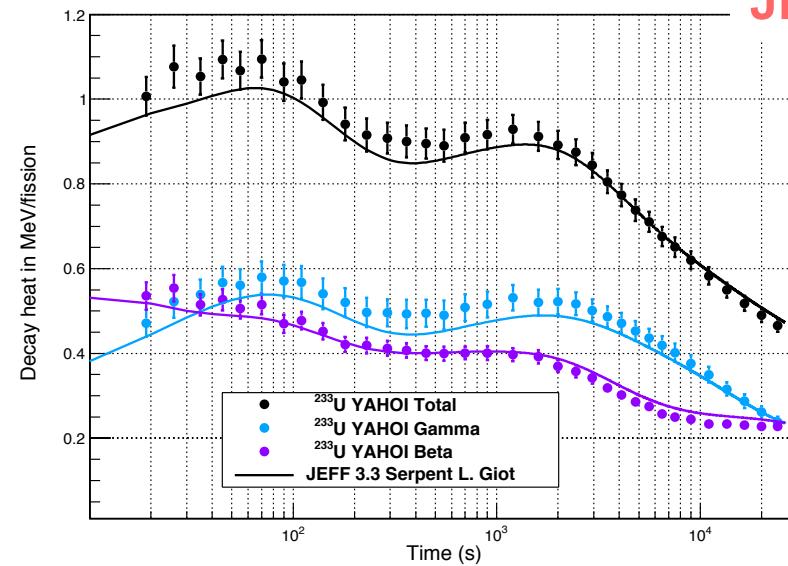


Figure hors version web

JEFF



## II. Simulation MSFR

- Temps de fonctionnement: 3, 10, 40 ans
  - Fuel: démarrage à l' $^{233}\text{U}$
  - Analyse des principaux PFs contributeurs pour différents pas de temps refroidissement  $\rightarrow 20\ 000\ \text{s}$
- Analyse croisée avec pulses de fission  
Première liste 24 noyaux
- En cours:
    - Analyse temps refroidissement  $> 10^4\ \text{s}$
    - Autre sels combustibles (ex: REBUS)

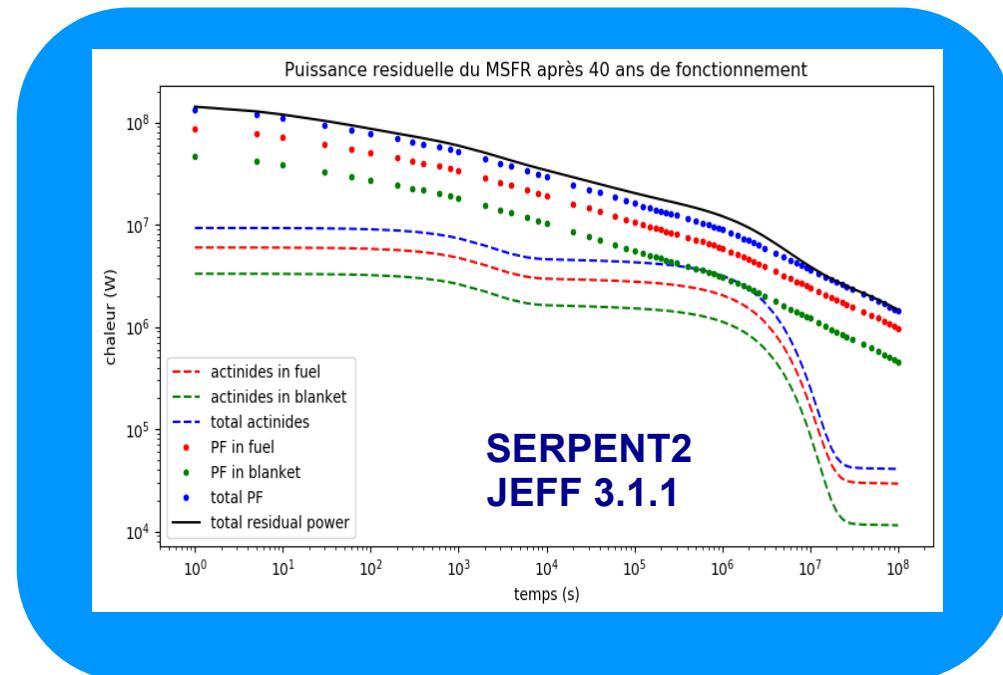


Figure hors version web

## *II. Identification des principaux PF contributeurs*

**Objectif:** Données de décroissance des Principaux PF contributeurs souffrent ou non de l'effet Pandémonium pour le MSFR ?

**Etape 1: Identification des principaux PFs**



**Etape 2: « Critères Pandémonium » à la première liste de PFs**



**Noyaux « candidats » pour mesures TAS**



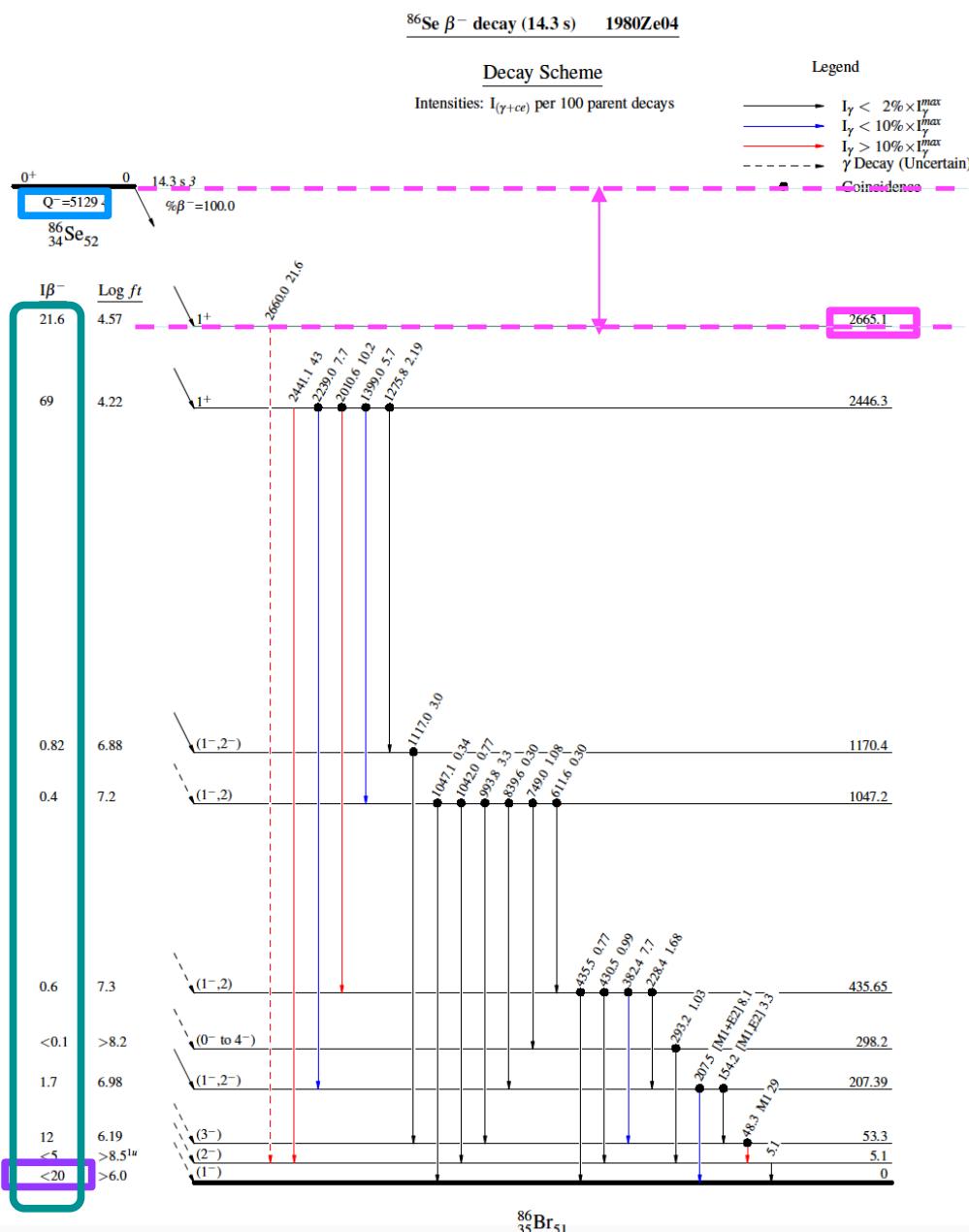
*FrenchTeamMSFR*



**Faisabilité/ Détails de la proposition d'expérience**

**Autres motivations que decay heat pour la proposition d'expérience ?**

### III. Critères possibles pour “noyaux Pandémonium”



=> Outils PYTHON: extraction automatique ds ENSDF & JEFF/ENDF

1. Valeur importante du  $Q_{\beta^-}$
2. Différence entre la valeur du  $Q_{\beta^-}$  et la valeur en énergie du plus haut niveau du noyau fils
3. Alimentation de l'état fondamental  
Ground state feeding
4. Somme des intensités  $\beta^-$   
Répartition des intensités  $\beta^-$
5. Seuil neutron du noyau fils >  
dernier niveau mesuré
6. Informations sur le type de transition

### *III. Résultats*

Figure hors version web

# *Conclusions & Perspectives*

## Bilan

- Effet Pandémonium => impact  $E_{moyenne}$   $\beta^-$  et  $\gamma$  => Estimation puissance Résiduelle
- Simulations puissance résiduelle pulse & MSFR: complémentaires du travail déjà réalisé => Liste de 9 PFs candidats pour expérience TAS
- Outils mis en place pourraient aussi être appliqués d'autres concepts Gen IV

## Perspectives

- Proposition d'expérience TAS à faire en détail
- Etudes autres combustibles
- M1 ou M2 Needs 2019 : reprise decay heat et études transport  $\gamma$  ds réservoir de vidange
- Etude de la propagation des erreurs pour puissance résiduelle  
Approche Total Monte-Carlo vs méthode des perturbations
- Thèse ?, Financement ?

.....