



**HAL**  
open science

## Validation de la fluence reçue par la cuve

N. Thiollay

► **To cite this version:**

N. Thiollay. Validation de la fluence reçue par la cuve. Journée Technique SFEN "Poursuivre le fonctionnement des réacteurs nucléaires après 40 ans", Nov 2019, Paris, France. cea-02614139

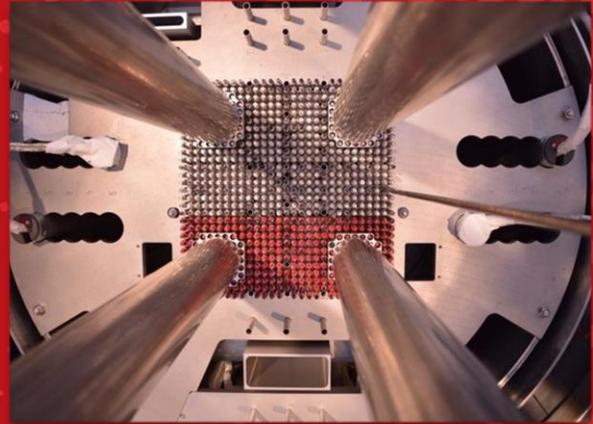
**HAL Id: cea-02614139**

**<https://cea.hal.science/cea-02614139v1>**

Submitted on 20 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

The logo for CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) is displayed in white lowercase letters on a red square background. A thin green horizontal line is positioned below the letters.

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

# Validation de la fluence reçue par la cuve

*Poursuivre le fonctionnement des réacteurs nucléaires après 40 ans*

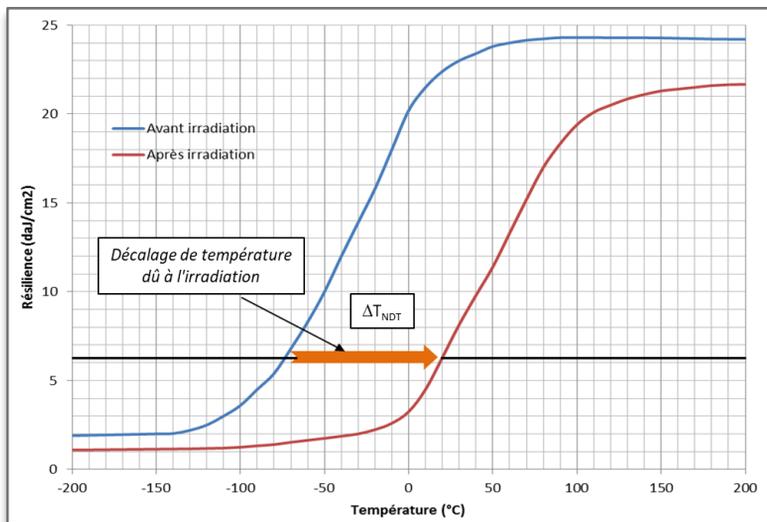
Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives - [www.cea.fr](http://www.cea.fr)

DEN/CAD/DER/SPESI - Nicolas THIOLLAY – Journée Technique SFEN du 27 novembre 2017

## PLAN DE LA PRÉSENTATION

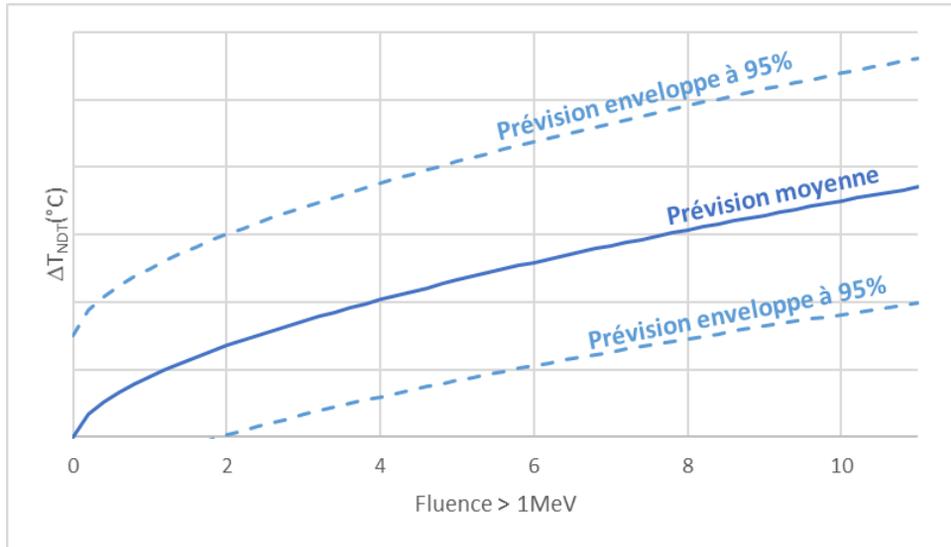
- Vieillessement des aciers de cuve
- Programme de Surveillance des effets de l'Irradiation
  - Capsules de surveillance
  - Dosimétrie / Ajustement de spectre
  - Simulation
  - Hypothèses / Limitations
- Eléments de validation
  - Benchmarks (SAINT LAURENT B1 et NOGENT 2)
  - FLUOLE (1300 MWe) et FLUOLE-2 (900 & 1450 MWe)

## Evolution des propriétés de la cuve sous irradiation



- Confinement
- Non remplaçable
- $\theta$  et P
- Propriétés mécaniques (thermique, neutronique)
- Ténacité des matériaux
- ↗ de la température de transition ductile/fragile
- **Risque de rupture fragile brutale**

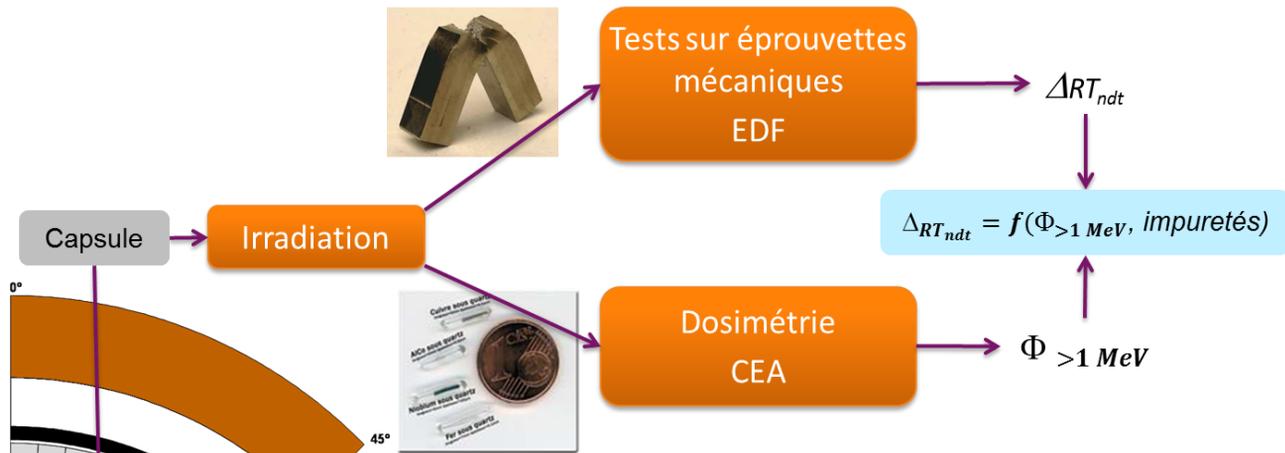
## Formule empirique de prédiction de la fragilisation basée sur des mesures



362 données sur des matériaux de référence  
65 expériences en réacteurs de recherche

$$\Delta RT_{ndt} = f(\Phi_{>1MeV}, \text{impuretés})$$

Point chaud de la cuve

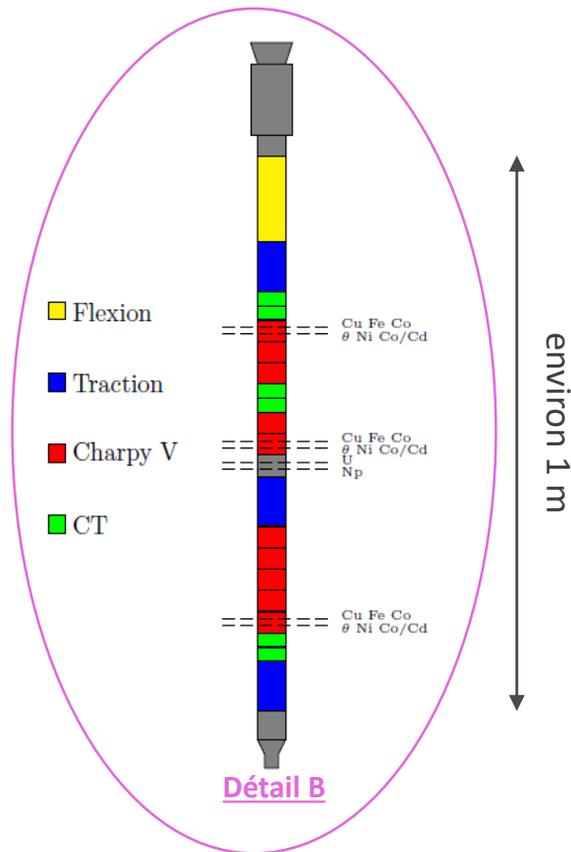
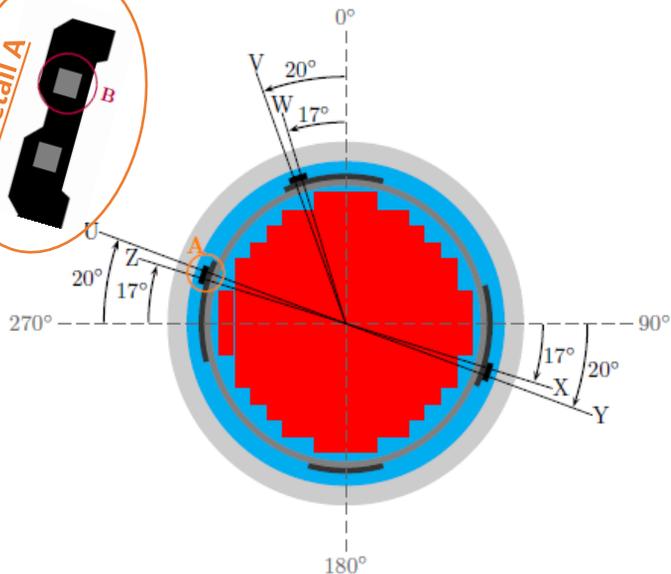
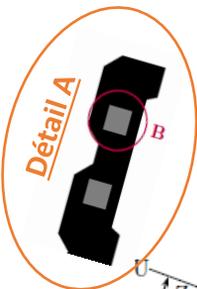


### Objectifs du PSI :

**Vérifier le caractère conservatif des formules**  
(périodiquement pour chaque cuve du parc)

**Anticiper la fragilisation de la cuve**  
(facteur d'anticipation = Fluence capsule / Fluence cuve)

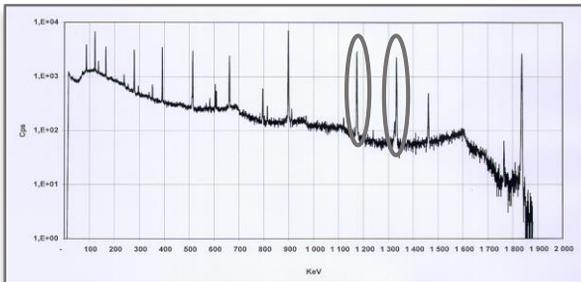
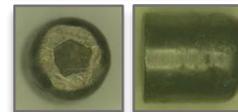
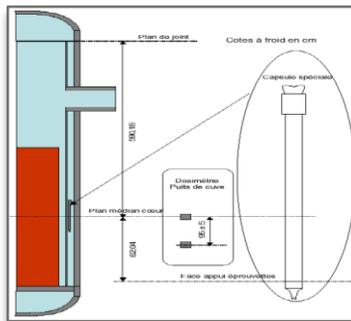
## Capsules de surveillance



## Dosimètres et leurs gammes d'énergie

Dosimètre	Père	Réaction	Fils	Seuil	T½
Cobalt	<sup>59</sup> Co	(n,γ)	<sup>60</sup> Co	thermique	5,27 a
Cobalt/Cd	<sup>59</sup> Co	(n,γ)	<sup>60</sup> Co	> 0,74 eV	5,27 a
Neptunium	<sup>237</sup> Np	(n,f)	<sup>137</sup> Cs	575 keV	30 a
Niobium	<sup>93</sup> Nb	(n,n')	<sup>93m</sup> Nb	1,2 MeV	16,1 a
Uranium	<sup>238</sup> U	(n,f)	<sup>137</sup> Cs	1,4 MeV	30 a
Fer	<sup>54</sup> Fe	(n,p)	<sup>54</sup> Mn	2,7 MeV	312 j
Nickel	<sup>58</sup> Ni	(n,p)	<sup>58</sup> Co	2,8 MeV	71 j
Cuivre	<sup>63</sup> Cu	(n,α)	<sup>60</sup> Co	6,1 MeV	5,27 a

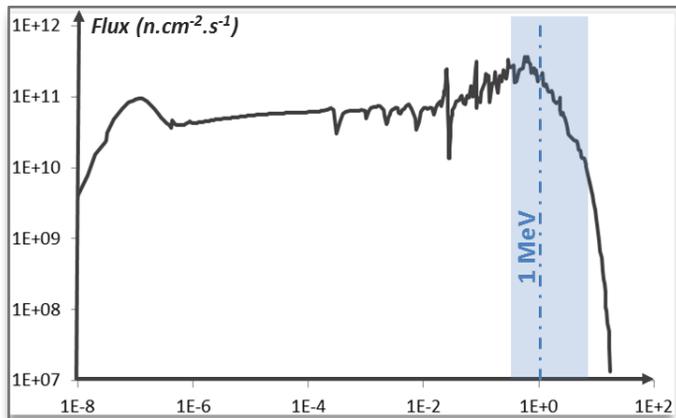
Les dosimètres par activation sont pesés très précisément (incertitude ~ 0%)  
 U et Np ~ 20 mg - AlCo 25 mg - Ni 130 mg - Fe 70mg - Cu 60 mg - **Nb 0.5 mg**

La plate-forme MADERE (spectrométrie  $\gamma$  et X)

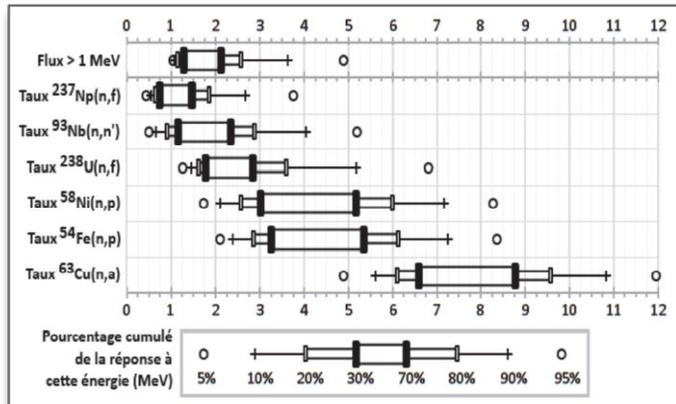
**Activité  
massique**

## Couverture spectrale

Spectre neutronique type  
à la capsule d'un REP 900



Champ d'action des dosimètres  
(effet de recouvrement/tuilage)



## Simulation des irradiations de capsules

- Un calcul de référence Monte Carlo par palier
  - Sources d'un chargement de référence
  - Données technologiques
  - Données nucléaires
- Un calcul de suivi de l'irradiation par tranche et par carte de puissance
  - Sources réelles
- Un calcul de la fluence par capsule
  - Activités des dosimètres
  - Historique de puissance

## Fondements de la simulation

- Trois hypothèses essentielles
  - La forme du spectre neutronique à la capsule varie peu
  - Le spectre à la cuve diffère peu de celui à la capsule
  - La simulation à la cuve est aussi précise et convergée qu'à la capsule
  
- Sources d'incertitudes à la cuve
  - Evolution des sources du cœur
  - Données technologiques

**Nécessité de disposer d'éléments de validation**

## Evolution des sources neutroniques

- Benchmarks sur deux géométries de REP
  - ST LAURENT B1 (900 MWe)
  - NOGENT 2 (1300 MWe)
- Une unique campagne d'irradiation (env. 15 mois)
- Instrumentation dosimétrique
  - Capsule interne
  - Capsule externe
- Simulation de référence Monte Carlo avec sources réelles

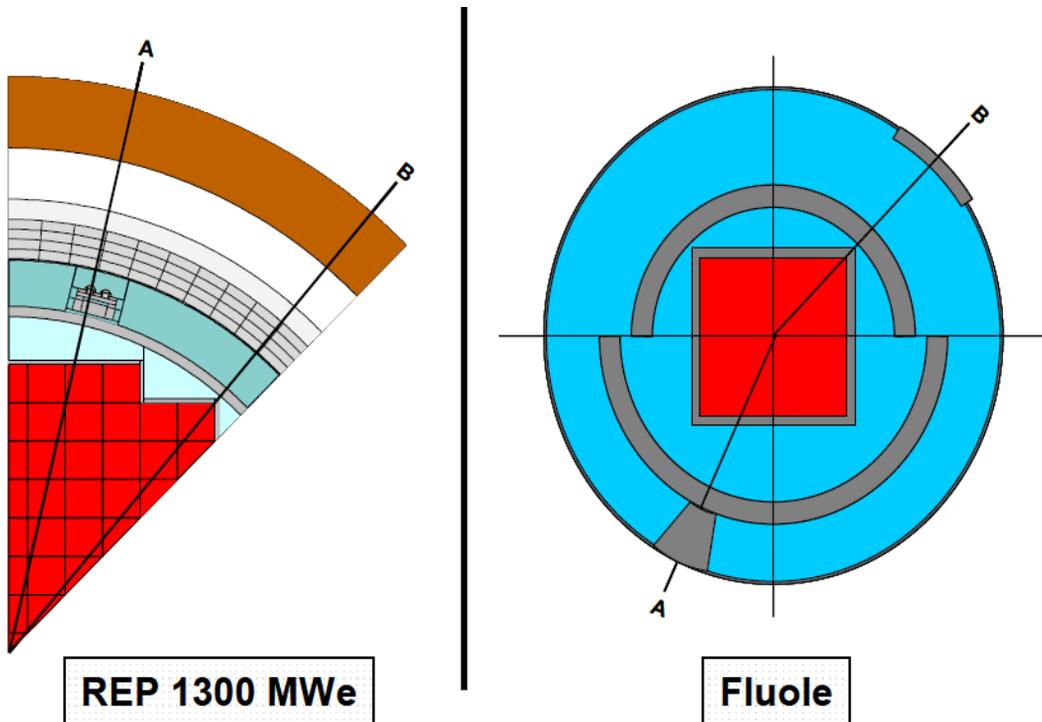
**Objectif : valider le recalage  
de la source de référence aux sources réelles**

## Données technologiques

- Expériences sur la maquette EOLE
  - FLUOLE (1300 MWe) en 2006-2007
  - FLUOLE-2 (900 et 1450 MWe) en 2014-2015
- Incertitude minimale sur les données technologiques
  - Température contrôlée
  - Compositions isotopiques maîtrisées
  - Métrologie fine
- Instrumentation dosimétrique étoffée
  - Capsules de surveillance
  - Cuve du réacteur

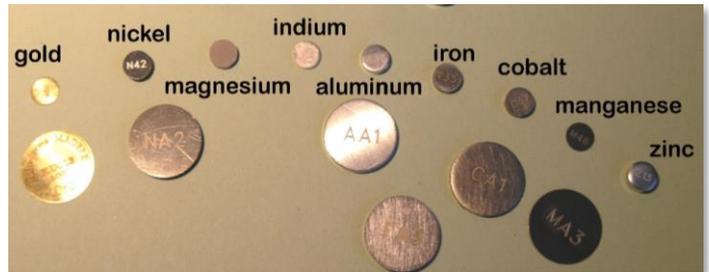
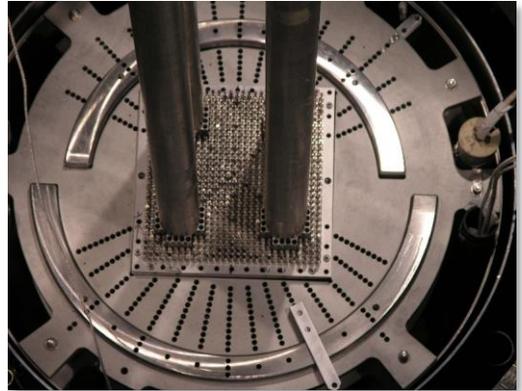
**Objectif : valider le transport neutronique Monte Carlo**

## Expérience FLUOLE : conception

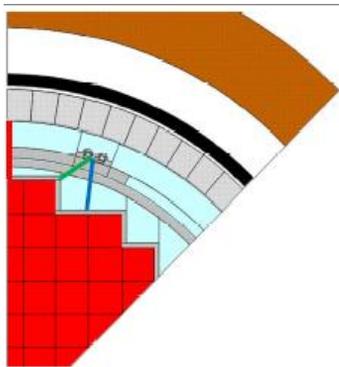


## Expérience FLUOLE : synthèse des mesures

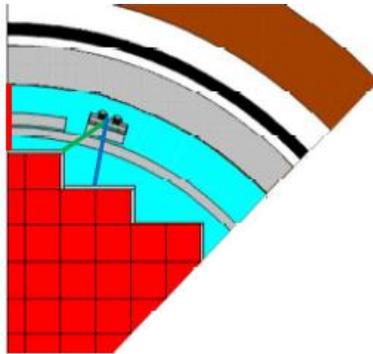
- Instrumentation
  - CF (puissance du cœur)
  - Dosimètres à activation
- Emplacements
  - Capsules de surveillance
  - Entrée de cuve
- Source neutronique
  - $UO_2$



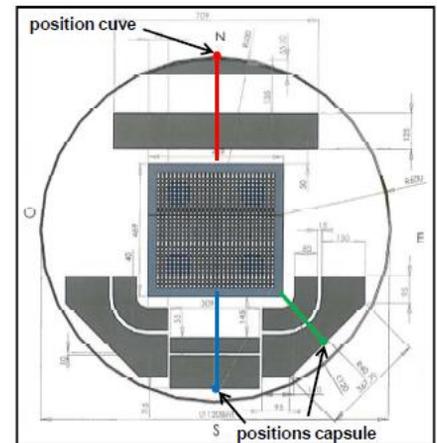
## Expérience FLUOLE-2 : conception



900 MWe

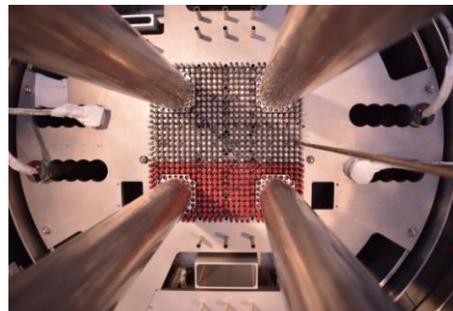
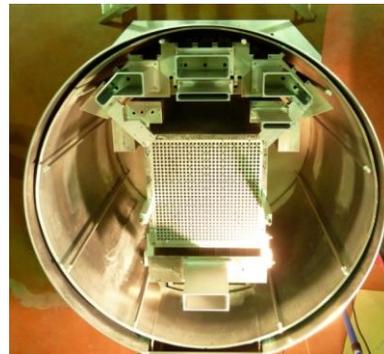
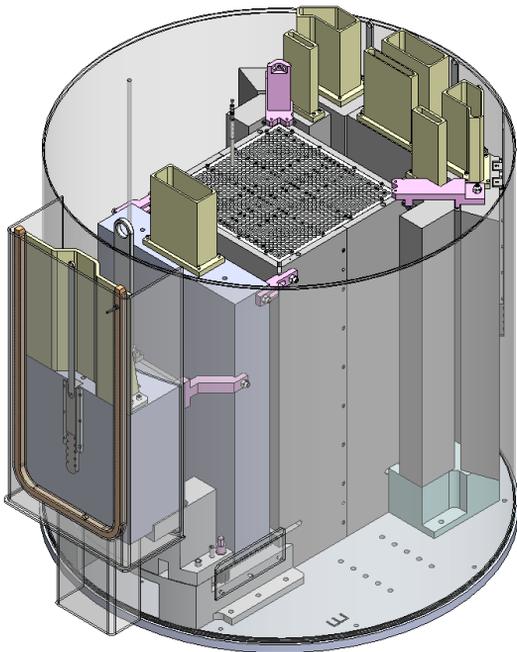


1450 MWe

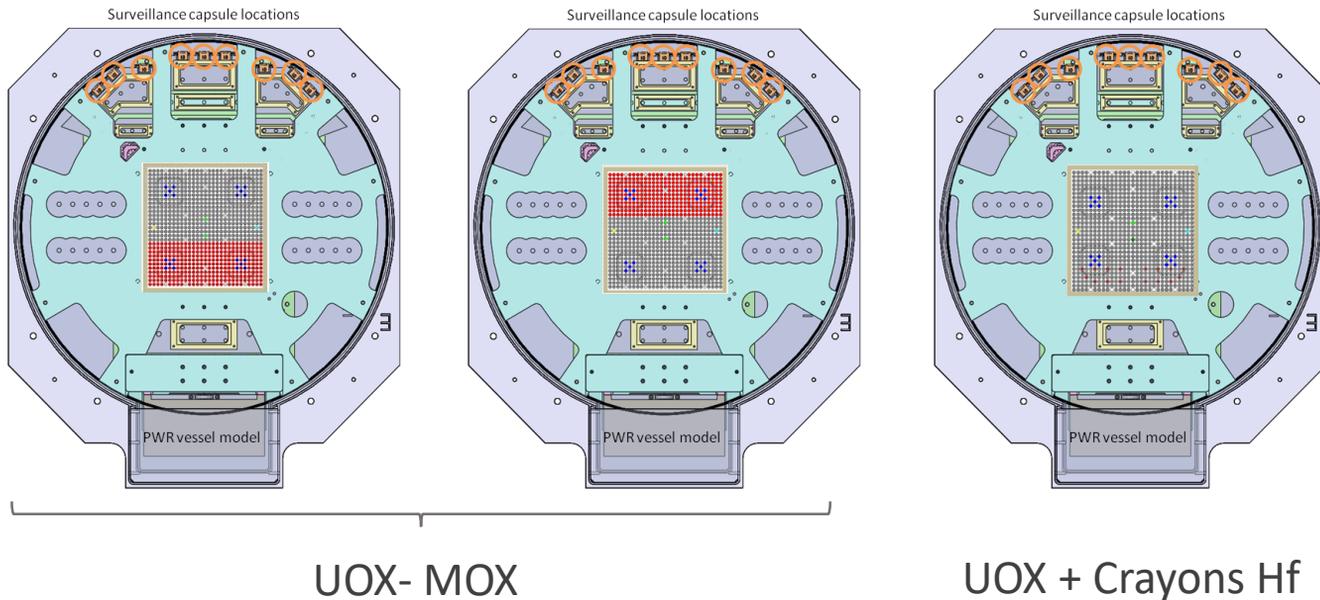


- Instrumentation : CF (puis. du cœur ) + dosimétrie
- Emplacements : Capsule + Entrée cuve + Sortie cuve
- Source neutronique : UOX + MOX

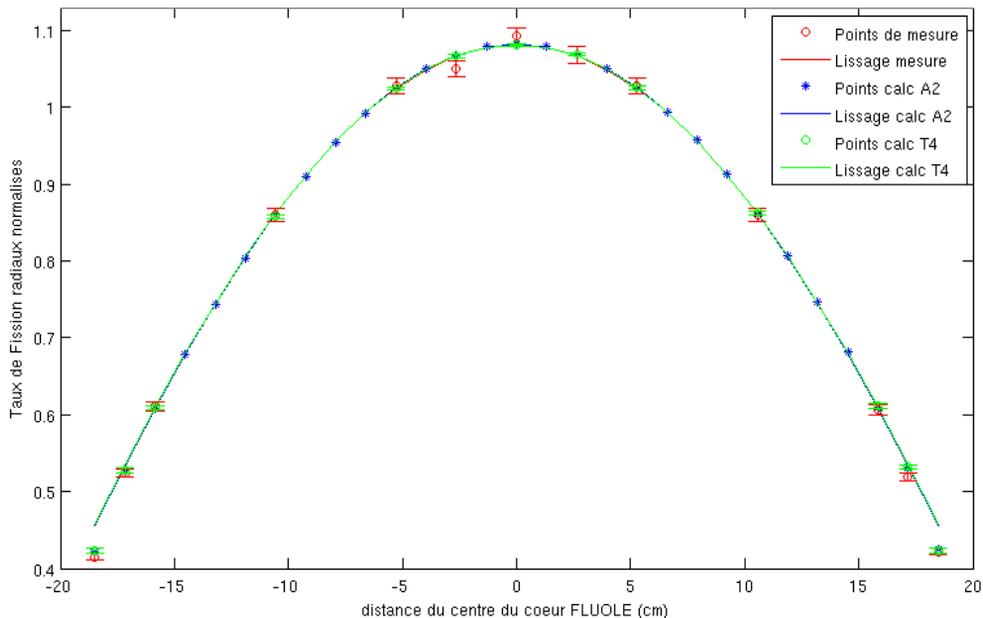
## Expérience FLUOLE-2 : maquette sur mesure



## Expérience FLUOLE-2 : configurations étudiées



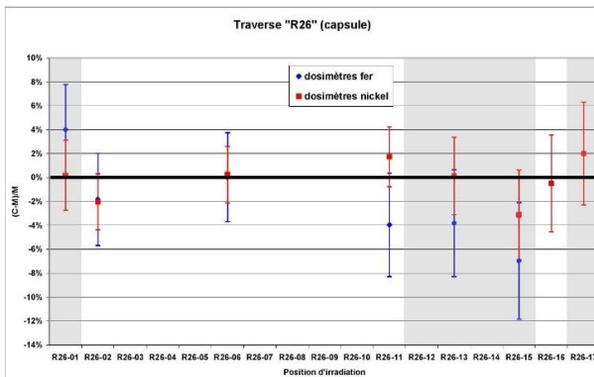
## Distribution des sources neutroniques (TRIPOLI-4<sup>®</sup> vs spectrométrie gamma)



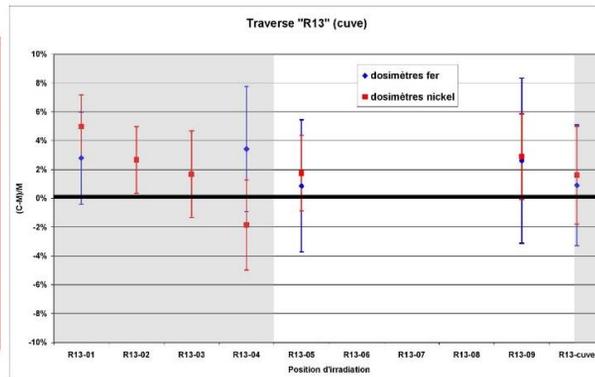
*Validation du calcul des sources neutroniques dans le coeur*

## Propagation des sources neutroniques (TRIPOLI-4<sup>®</sup> + DARWIN vs mesures d'activité MADERE)

Traverse « capsule »

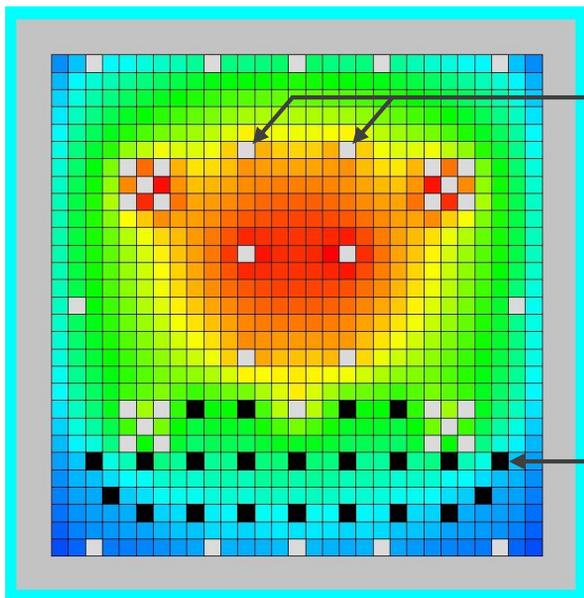


Traverse « cuve »



*Validation de la propagation des sources vers la capsule et la cuve*

*Ajustement du spectre neutronique calculé à partir des mesures d'activité : réduction de l'incertitude sur le spectre rapide*

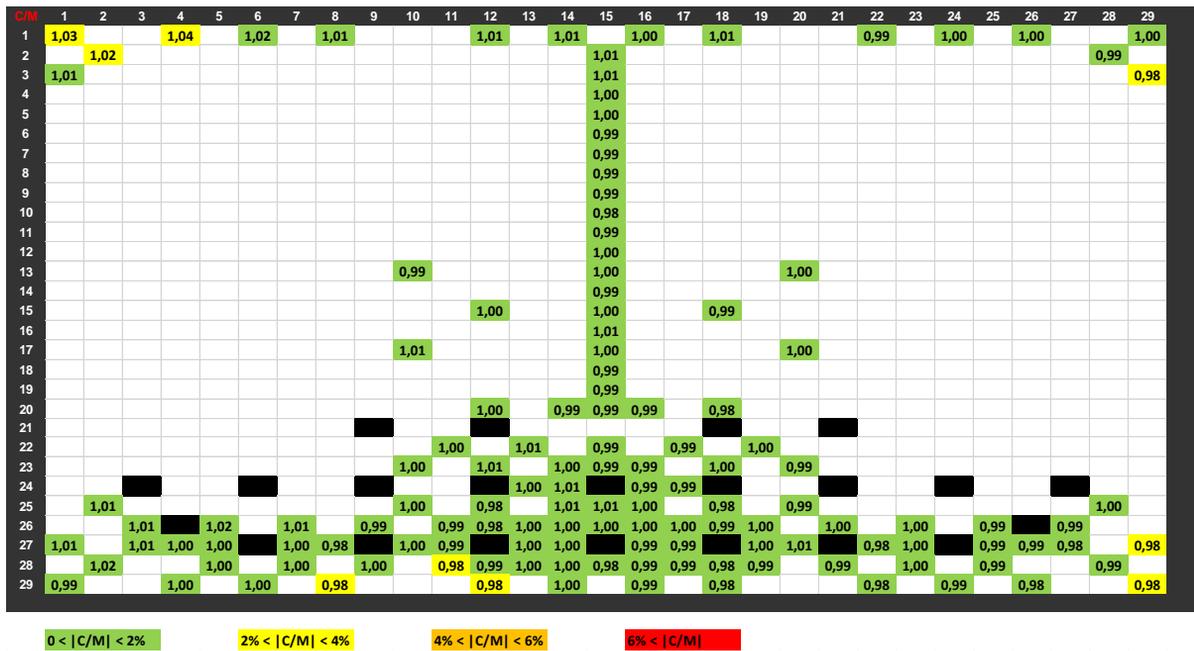
Distribution des sources neutroniques par TRIPOLI-4<sup>®</sup>

*2 chambres à fission  
(recalage à la puissance  
du réacteur)*

*22 crayons hafnium  
(protéger le point  
chaud de la cuve)*

*Analysis of hafnium configuration of FLUOLE-2 program, S. Bourganel, CEA/DANS/DM2S, RPSD 2018*

## Distribution des sources neutroniques (TRIPOLI-4® vs spectrométrie gamma)

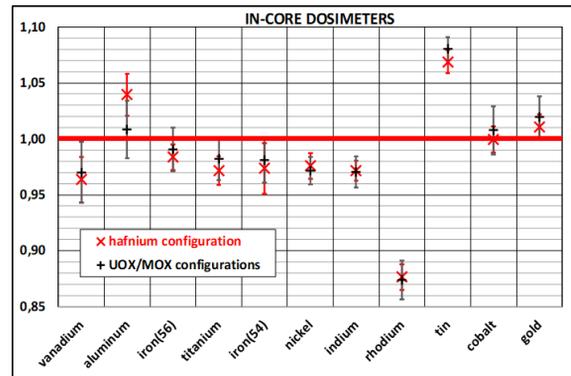
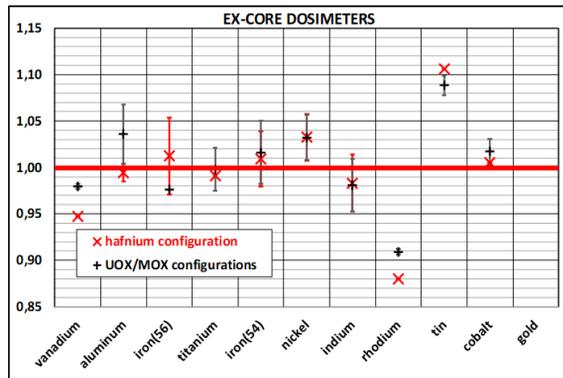


Analysis of hafnium configuration of FLUOLE-2 program, S. Bourganel, CEA/DANS/DM2S, RPSD 2018

## Propagation des sources neutroniques (TRIPOLI-4® + DARWIN vs mesures d'activité MADERE)

Bon accord pour les dosimètres du PSI  
(Ni, Fe, Co)

Bon accord pour la dosimétrie classique  
(Au, Ti, In)



Bon accord pour Al et Va, témoins des neutrons de haute énergie

Écarts pour deux dosimètres prospectifs  
Sn (section efficace  $\Rightarrow$  calcul)  
Rh (données nucléaires  $\Rightarrow$  mesure)

Analysis of hafnium configuration of FLUOLE-2 program, S. Bourganel, CEA/DANS/DM2S, RPSD 2018

## 1300 MWe

Validation de la distribution en cœur des sources U

Validation du transport de la source vers la capsule et la cuve

## 900 MWe et 1450 MWe

Validation de la distribution en cœur des sources U et Pu

Validation du transport de la source vers la capsule et la cuve  
(entrée et sortie)

Validation de la réduction de flux rapide grâce aux crayons  
hafnium en périphérie du cœur



**MERCI DE VOTRE ATTENTION**