

THÉMATIQUE « FLUENCE NEUTRONIQUE »

SYNTHÈSE DES QUESTIONS DE LA SOCIÉTÉ CIVILE

- Par Yves Lheureux (ANCCLI)

+

• **FLUENCE : IMPACT, ÉVALUATION ET INCERTITUDES**

○

- Est-il possible d'expliciter l'âge d'un réacteur en équivalence avec la fluence reçue par celui-ci ?
- Comment sont modifiés la manière dont les cuves sont irradiées lorsque certains réacteurs sont passés au combustible MOX et que d'autres font du suivi de charge ?
- Quelles sont les évaluations des fluences reçues par la cuve après 40 années de fonctionnement et comment seront t'elles mesurées sans la présence de dosimètres comme ceux contenus dans les capsules d'irradiation du PSI ?
- Quelles sont les incertitudes sur ces évaluations ?
- Est-il possible de disposer des calculs de la fluence à VD3 et VD4 pour tous les réacteurs de 900 MWe (à 40 ans pour les deux réacteurs de Fessenheim) et leurs résultats, avec les marges d'incertitude ?
- La fluence des cuves a-t-elle dépassé $6,5 \cdot 10^{19}$ neutrons/cm² ? Ou va-t-elle les dépasser avant 50 ans ?

PROBLÉMATIQUE ET TERMES UTILISÉS

- Par Cédric LAVILLE (IRSN)

Thématique « « Fluence neutronique » »

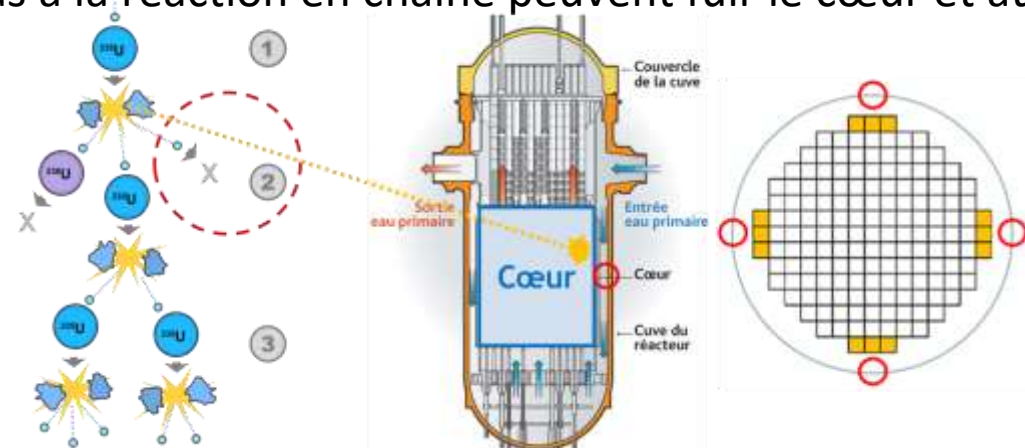
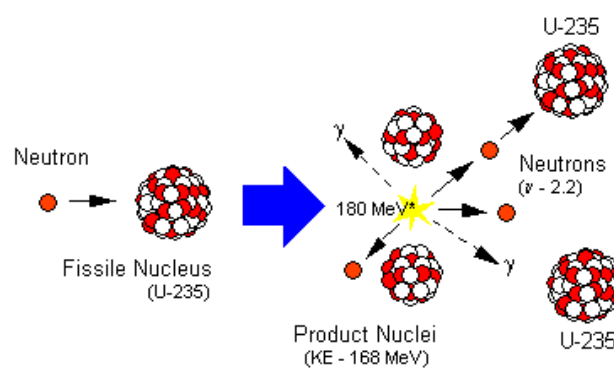
[PROBLÉMATIQUE ET TERMES UTILISÉS

La réaction nucléaire en chaîne :

- Repose sur la libération d'énergie lors de la fission de noyaux d'uranium ou de plutonium par un neutron
- Cette fission libère également d'autres neutrons qui initient à leur tour d'autres fissions (à des endroits différents dans le cœur)
- Ces neutrons « naviguent » dans le cœur du réacteur

Les fuites neutroniques :

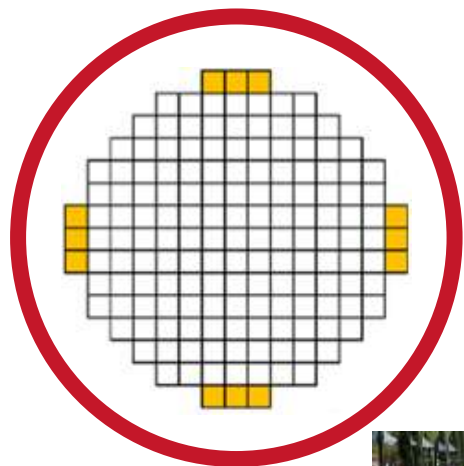
- Proviennent notamment des fissions se produisant en périphérie du cœur
- Les neutrons qui ne participent pas à la réaction en chaîne peuvent fuir le cœur et atteindre/irradier la cuve (voir partie effets d'irradiation)



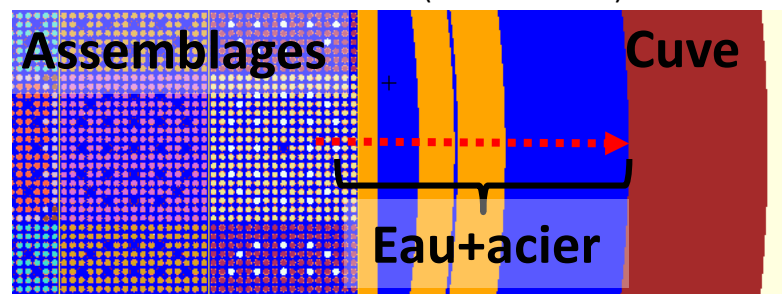
○ Points chauds de la cuve
■ Assemblages qui irradient le plus la cuve

Thématique « « Fluence neutronique » »

[PROBLÉMATIQUE ET TERMES UTILISÉS



Cœur du réacteur (vue du dessus)



**Neutrons
au départ**



**Neutrons
à l'arrivée**

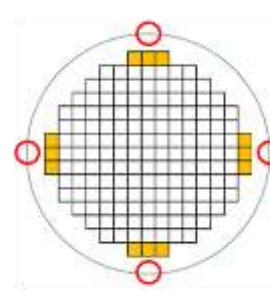
Les paramètres qui ont un impact sur l'irradiation de la cuve :

- Le temps de fonctionnement (exploitation réelle du réacteur)
- Le nombre de neutrons qui fuient le cœur
- La distance à parcourir entre le cœur et la cuve et les « obstacles » que les neutrons rencontrent sur leur parcours

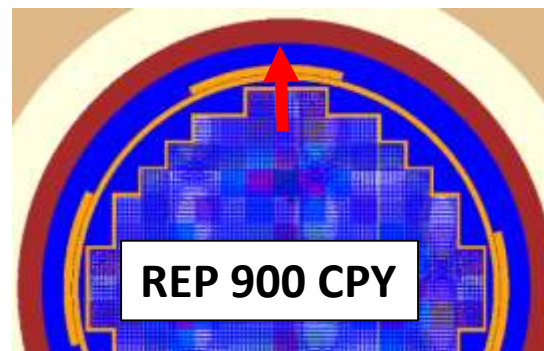
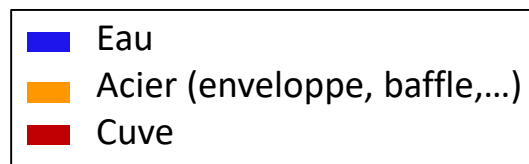
Thématique « « Fluence neutronique » »

[PROBLÉMATIQUE ET TERMES UTILISÉS

- Le nombre de neutrons (flux) qui fuient le cœur dépend directement de la « puissance » des assemblages en périphérie du cœur (nature du combustible : enrichissement et épauement)



- La distance et les obstacles dépendent de la forme du cœur (nombre d'assemblages) et de la structure à l'intérieur de la cuve



Thématique « « Fluence neutronique » »

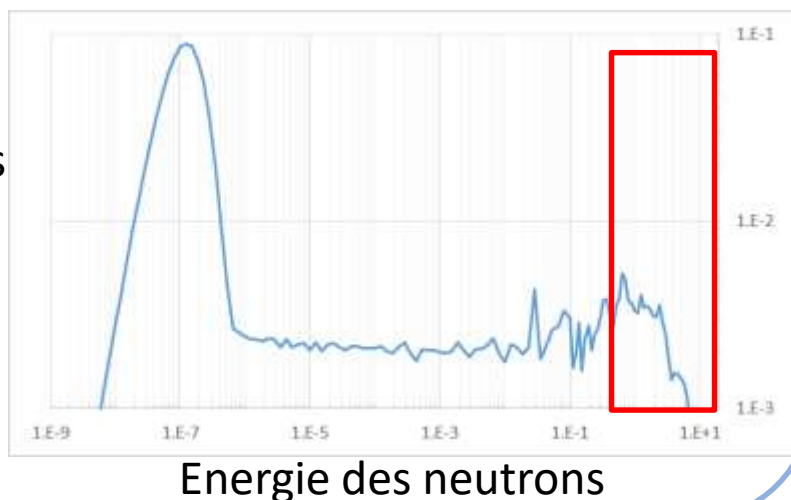
[PROBLÉMATIQUE ET TERMES UTILISÉS

■ Définition de la **fluence neutronique** :

- Correspond au nombre total de neutrons ayant percuté la cuve pendant toute la durée de fonctionnement du réacteur

Seuls les neutrons d'énergie supérieure à 1 MeV sont comptabilisés

Population des neutrons sur la cuve



$$Fluence = \int Flux\ de\ neutrons(t)\ dt$$

Fluence

Hypothèse de conception



Pente = Flux



40 ans

Temps de fonctionnement du réacteur

Les neutrons très énergétiques constituent un bon indicateur de l'endommagement de la cuve (pratique internationale) qui permet de bien prendre en compte les effets de spectre (travaux de vérification réalisés dans le passé)

Thématique « « Fluence neutronique » »

[PROBLÉMATIQUE ET TERMES UTILISÉS



En exploitation :

- La fluence est calculée après chaque arrêt pour chaque réacteur (fonction des plans de chargement et du fonctionnement réel) avec un outil de calcul d'EDF



Dans les rapports de sûreté (prolongation de la durée de vie) :

- La fluence est estimée/projetée dans le « futur » avec des hypothèses conservatives pour chaque réacteur (partant des résultats de l'outil de calcul d'EDF)

DOSSIER D'EDF

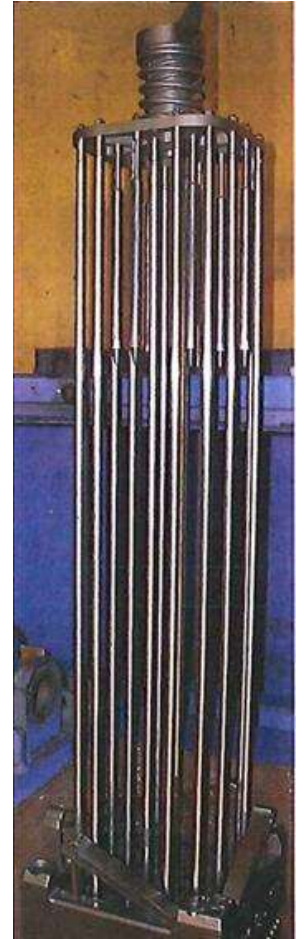
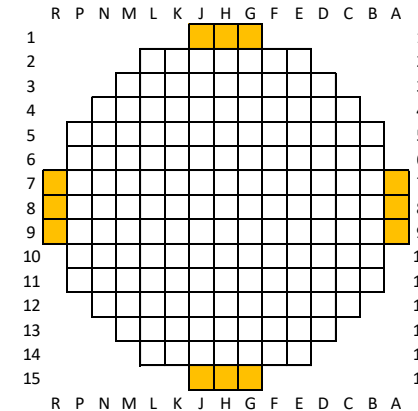
- Par Nicolas JARDIN (EDF)

FLUENCE NEUTRONIQUE – DOSSIER EDF (1/2)



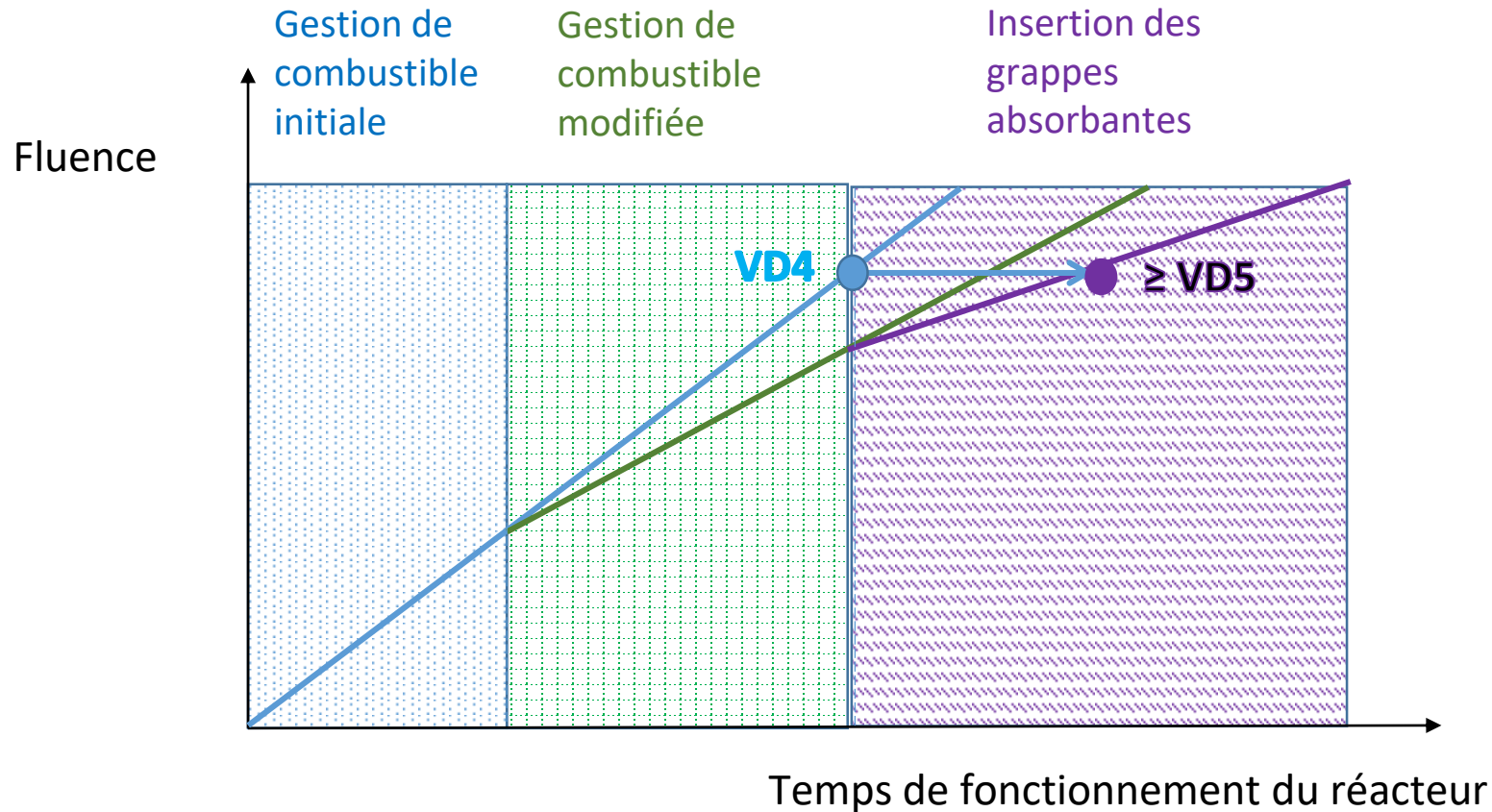
- La fluence est évaluée sur la base du REX d'exploitation et d'une estimation enveloppe pour la période à venir
- Depuis de nombreuses années, EDF adapte ses recharges de combustible pour limiter la fluence à la cuve
- A partir des VD4, EDF va insérer, dans ses cœurs 900 MWe, 12 grappes en hafnium, qui vont absorber les neutrons, afin de limiter plus fortement la fluence à la cuve (45% de réduction)
- Fluence max à VD4 : $5,7 \cdot 10^{19}$ n.cm⁻²
- Fluence max à VD4+10 ans : $6,4 \cdot 10^{19}$ n.cm⁻²

Nota : la fluence est une grandeur nécessaire pour déterminer les effets de l'irradiation sur la ténacité ; ce n'est pas une valeur limitative en elle-même



Cliquez dans Insertion/"En-tête-Pied" puis "Appliquer partout" pour indiquer le titre de votre présentation

FLUENCE NEUTRONIQUE – DOSSIER EDF (2/2)



Les efforts d'EDF pour limiter la fluence sur la cuve se traduisent par une augmentation de la durée d'exploitation



Cliquez dans Insertion/"En-tête-Pied" puis "Appliquer partout" pour indiquer le titre de votre présentation

PRINCIPAUX SUJETS AYANT FAIT L'OBJET D'UNE EXPERTISE TECHNIQUE ET CONCLUSIONS TIRÉES

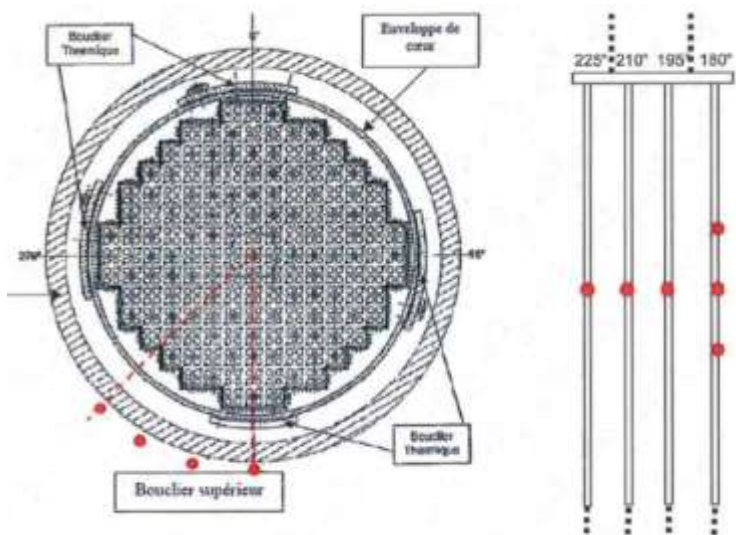
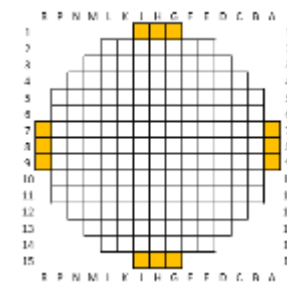
- Par Cédric LAVILLE (IRSN)

Thématique « « Fluence neutronique » »

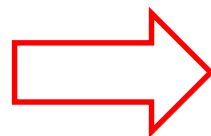
[GRAPPES HAFNIUM : DISPOSITION POUR LIMITER L'AUGMENTATION DE LA FLUENCE À PARTIR DE LA VD4

Au moment de l'expertise du dossier d'EDF :

- La diminution de 45 % du flux neutronique irradiant la cuve considérée par EDF provenait d'une estimation par calculs neutroniques → **L'IRSN a mené ses propres calculs neutroniques qui ont conforté cette valeur**
- L'expérimentation « *Précurseurs grappes hafnium 900 MWe* » avait débuté en 2017 sur le réacteur n°3 de Tricastin pour conforter cette valeur → **Action EDF : fournir fin 2020 les résultats dosimétriques de cette expérimentation**



Dosimètres



Les résultats obtenus fin 2020 confirment l'ordre de grandeur de la diminution du flux neutronique irradiant la cuve

Thématique « « Fluence neutronique » »

[PROJECTIONS DE FLUENCE POUR CHAQUE CUVE À VD4+10ANS

Les projections de fluence $\Phi(t_{VD4+10\text{ans}})$ reposent sur la formule suivante :

$$\Phi(t_{VD4+10\text{ans}}) = \underbrace{\Phi_{\text{REX}}(t_{\text{FDC}})}_{\text{REX}} + \underbrace{[K_p \times (t_{VD4+10\text{ans}} - t_{\text{FDC}}) \times \varphi_{\text{proj}}]}_{\text{Projection}}$$

- La fluence $\Phi_{\text{REX}}(t_{\text{FDC}})$ de chaque cuve à un temps « t_{FDC} » est calculée avec l'outil de calcul d'EDF qui est validé sur les résultats du PSI (voir partie PSI)
- EDF a justifié au cours de l'instruction le conservatisme des hypothèses de projection :

Coefficient de production $K_p=0,85$ -> REX sur 10 ans : min=0,67 / max=0,83

Flux neutronique de projection φ_{proj} (réduit de 45 %)

	Flux de projection sans grappe hafnium	Flux maximum du REX
CPO	4,60.10 ¹⁰ n/cm ² /s	4,48.10 ¹⁰ n/cm ² /s
CPY		4,14.10 ¹⁰ n/cm ² /s

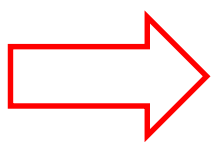
➔ Les hypothèses de projection (K_p , φ_{proj}) sont enveloppes du retour d'expérience d'exploitation des réacteurs d'EDF



Thématique « « Fluence neutronique » »

[CONCLUSIONS

- EDF réalise un suivi (communication à l'ASN tous les 3 ans) de la fluence des cuves des réacteurs 900 MWe
- Dans une démarche de protection des cuves (menée historiquement depuis les années 90), EDF a commencé à introduire des grappes hafnium en périphérie des cœurs à partir de la VD4
- Les grappes hafnium limiteront d'environ 45% (valeur issue de calculs neutroniques) le flux neutronique irradiant les cuves aux points chauds
- L'efficacité des grappes hafnium a été conforté par les résultats du suivi dosimétrique de l'expérimentation terminée sur Tricastin 3 (action EDF n°2)



Les projections de fluence prises en compte sont acceptables car les hypothèses retenues pour les réaliser sont enveloppes du retour d'expérience et que les grappes hafnium sont efficaces pour limiter le flux neutronique irradiant la cuve