



Fontenay-aux-Roses, le 19 avril 2024

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2024-00059

**Objet :** Réacteurs électronucléaires du palier CPY en gestion de combustible PARITE MOX – EDF – Anomalies MOX – Levée des mesures compensatoires et de la mesure palliative.

**Réf. :** [1] Avis IRSN – 2020-00050 du 30 mars 2020.  
[2] Avis IRSN – 2023-00119 du 25 juillet 2023.  
[3] Courrier ASN – CODEP-DCN-2023-044777 du 27 septembre 2023.  
[4] Saisine ASN – CODEP-DCN-2024-012519 du 2 avril 2024.  
[5] Avis IRSN – 2020-00081 du 27 mai 2020.

### 1. CONTEXTE

EDF a déclaré plusieurs anomalies concernant les crayons de combustible MOX<sup>1</sup> chargés dans les réacteurs du palier 900 MWe exploités en gestion de combustible « PARITÉ MOX » qui concernent :

- la fabrication des pastilles de combustible de par, notamment, la présence d'îlots plutonifères (PRI<sup>2</sup>) de grande taille (depuis 2013) ;
- l'absence de prise en compte du phénomène de remontée de flux neutronique lors du fonctionnement normal du réacteur, aux extrémités basse et haute des crayons de combustible (anomalie d'étude déclarée en 2017).

Le cumul de ces anomalies peut mettre en cause la démonstration de l'intégrité de la première barrière de confinement pour certains transitoires de catégorie 2<sup>3</sup>. Or dans ces situations, il convient de garantir l'absence de fusion du combustible. Ce cumul d'anomalies a donc fait l'objet d'un événement significatif pour la sûreté de niveau 1.

Afin de résorber l'anomalie relative à la présence de PRI, des évolutions du procédé de fabrication des pastilles ont été engagées en 2022. La poudre d'oxyde d'uranium (UO<sub>2</sub>), utilisée pour la fabrication du combustible MOX, est de nouveau élaborée par le procédé « voie humide » en lieu et place du procédé « voie sèche », identifié comme responsable de ces PRI.

<sup>1</sup> Oxyde mixte de plutonium et d'uranium.

<sup>2</sup> Plutonium rich island.

<sup>3</sup> Incident de fréquence modérée, dont la fréquence d'apparition annuelle est supérieure à 10<sup>-2</sup>.

Pour résorber l'anomalie de remontée de flux neutronique aux extrémités des crayons de combustible MOX, une nouvelle conception d'assemblage de combustible est déployée à partir de 2024. Cette nouvelle conception, dite optimisée, comprend notamment un insert en hafnium (absorbant neutronique) en partie haute et une cale en acier avec un opercule en hafnium en partie basse des crayons de combustible MOX.

Dans l'attente de la mise en œuvre de cette nouvelle conception d'assemblage, des dispositions transitoires ont été mises en œuvre pour limiter les remontées de flux neutronique, à savoir :

- une première mesure compensatoire : la modification de la position haute des grappes d'arrêt et de compensation de puissance afin de restaurer des marges en partie haute de la colonne fissile vis-à-vis du risque de fusion du combustible ;
- une seconde mesure compensatoire : la modification de la chaîne de protection contre les surpuissances pour anticiper la survenue de l'arrêt automatique lors de certains transitoires incidentels et ainsi bénéficier d'un gain de marges sur la puissance en bas de la colonne fissile pour des transitoires pénalisants ;
- une mesure palliative : une réduction du domaine de fonctionnement normal des réacteurs. Cette mesure, valorisée dans le cadre du quatrième réexamen périodique des réacteurs de 900 MWe pour restaurer des marges vis-à-vis du phénomène de ballonnement-éclatement de la gaine lors d'accidents par perte de réfrigérant primaire de taille intermédiaire (APRP-BI) [1], reste applicable jusqu'au déploiement des assemblages de combustible MOX à pression abaissée<sup>4</sup> ;
- une mesure transitoire de conception : le remplacement intermédiaire de la cale en Zircaloy-4 (Zy-4) des crayons de combustible MOX par une cale en acier, et ce, dans l'attente de la mise en place d'une cale avec un opercule en hafnium (produit final visé). L'acier étant un matériau plus neutrophage que le Zy-4, sa présence a en effet tendance à réduire la remontée de flux neutronique en bas de la colonne fissile.

Par ailleurs, la démonstration de la sûreté des recharges d'assemblages apportée dans les dossiers spécifiques de sûreté (DSS), pour chaque cycle irradiant des crayons de combustible MOX, a été complétée par une analyse de bilan de marges (aux extrémités et en partie courante de la colonne fissile) au regard du risque de fusion du combustible en transitoire de catégorie 2 en considérant le cumul des anomalies. Les puissances linéiques atteintes sont évaluées à l'aide de l'outil de calcul scientifique (OCS) de neutronique utilisé pour la démonstration de sûreté des recharges. Les puissances linéiques à fusion<sup>5</sup> des pastilles de combustible MOX en présence de PRI sont quant à elles déterminées à l'aide d'un OCS de thermique développé spécifiquement. La qualification de l'OCS de thermique et les caractéristiques enveloppes du PRI ont fait l'objet d'une expertise de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) [2] à la suite de laquelle l'ASN a jugé acceptables les éléments transmis par EDF [3].

En mars 2023, EDF a transmis le dossier relatif à la nouvelle conception d'assemblage de combustible MOX, dite optimisée, visant à résorber l'anomalie de flux neutronique aux extrémités de la colonne fissile. Les crayons de combustible de cet assemblage présentent également une pression interne de remplissage abaissée.

Enfin, en novembre 2023, pour les réacteurs dont les cœurs ne comportent que des assemblages de conception optimisée, EDF a demandé la levée des mesures compensatoires et de la mesure palliative, ainsi que la limitation du bilan de marges intégré dans les DSS à la zone en partie courante de la colonne fissile. Ce bilan de marges en partie courante de la colonne fissile est maintenu dans les DSS tant que l'évolution du procédé de fabrication des

---

<sup>4</sup> Un assemblage de combustible MOX avec une pression de remplissage abaissée présente un meilleur comportement vis-à-vis du phénomène de ballonnement-éclatement de la gaine lors d'un APRP-BI.

<sup>5</sup> Puissance linéique (W/cm) à partir de laquelle la fusion du combustible peut intervenir.

pastilles MOX n'a pas pleinement fait ses preuves<sup>6</sup>. Le premier cycle concerné est le cycle 40 du réacteur n° 4 du centre nucléaire de production d'électricité du Tricastin, dont le démarrage est prévu en juillet 2024. Cette demande de levée des mesures compensatoires ainsi que de limitation du bilan de marges intégré dans les DSS à la zone en partie courante de la colonne fissile a également été formulée pour les réacteurs du palier de 900 MWe chargés d'assemblages de combustible MOX de conception non optimisée<sup>7</sup> et effectuant leur quatrième cycle d'irradiation, la mesure palliative leur restant applicable<sup>8</sup>.

Par la saisine en référence [4], l'ASN souhaite recueillir l'avis de l'IRSN sur « *l'acceptabilité sur le plan de la sûreté des projets de levée des dispositions provisoires souhaités par EDF* ».

Afin de répondre à la demande de l'ASN, l'expertise de l'IRSN a porté sur :

- l'acceptabilité de la levée des mesures compensatoires et de la mesure palliative pour les réacteurs ne comportant que des assemblages de combustible MOX de conception optimisée ;
- l'acceptabilité de la levée des mesures compensatoires pour les réacteurs comportant des assemblages de combustible MOX de conception non optimisée effectuant leur quatrième cycle d'irradiation.

Les conclusions de cette expertise sont présentées respectivement dans les paragraphes 2 et 3.

## 2. CAS DES REACTEURS NE COMPORTANT QUE DES ASSEMBLAGES DE COMBUSTIBLE MOX DE CONCEPTION OPTIMISEE

Afin de soutenir sa demande de levée des mesures compensatoires et de la mesure palliative pour les réacteurs ne comportant que des assemblages de combustible MOX de conception optimisée, EDF a réévalué les remontées de flux neutronique à chaque extrémité de la colonne fissile, ainsi que les puissances linéiques à fusion des pastilles de combustible MOX pour chaque extrémité et en partie courante de la colonne fissile, et ce en tenant compte des évolutions de conception de l'assemblage de combustible MOX.

### Évaluation des remontées de flux aux extrémités de la colonne fissile

L'objectif des études, réalisées sans prise en compte de PRI, est de démontrer que les évolutions de conception de l'assemblage de combustible MOX dit optimisé permettent de situer la puissance maximale en partie courante de la colonne fissile (au point chaud) et non à ses extrémités lors des transitoires. Le risque de fusion des pastilles de combustible MOX serait ainsi porté par la partie courante de la colonne fissile, comme dans la démonstration de sûreté générique.

Ces études sont réalisées pour les transitoires de catégorie 2 et pour les accidents limitatifs du point de vue de la remontée de flux pour lesquels la puissance est piquée en haut ou en bas du cœur. Les calculs de puissance linéique considèrent notamment une pénalité de désalignement des colonnes fissiles entre elles, phénomène conduisant à une augmentation du flux neutronique pour la colonne désalignée [5]. Les résultats présentés par EDF montrent l'absence de pic de puissance aux extrémités de la colonne fissile et donc l'absence de fusion des pastilles de combustible MOX. **L'IRSN estime acceptables les éléments apportés par EDF.**

<sup>6</sup> La fabrication de combustible MOX à partir de poudre UO<sub>2</sub> produite par voie humide est de nouveau réalisée depuis 2022, ce qui conduit, à date, aux résultats escomptés. EDF attend toutefois de disposer d'un REX suffisant (plusieurs années de production) pour pouvoir afficher la résorption de la problématique liée aux PRI.

<sup>7</sup> Dans le cadre du présent avis, on appelle conception « non optimisée » une conception avec une cale en acier antérieure à la conception dite « optimisée ».

<sup>8</sup> Les crayons de combustible de ces assemblages ne présentant pas systématiquement une pression interne de remplissage abaissée.

Ainsi, pour l'assemblage de combustible MOX de conception optimisée, les valeurs de puissance linéique maximales sont portées par la partie courante de la colonne fissile comme c'est le cas dans la démonstration de sûreté générique du rapport de sûreté (RDS) de la gestion de combustible PARITÉ MOX dans les référentiels VD3 et VD4<sup>9</sup>.

### **Évaluation de la puissance linéique à fusion**

Le risque de fusion des pastilles de combustible MOX est accru par la présence de PRI, ce qui se traduit par une diminution de la puissance linéique à fusion à considérer dans la démonstration de sûreté apportée par EDF (comme explicité dans l'avis en référence [5]). Par ailleurs, la présence d'éléments en hafnium dans la nouvelle conception d'assemblage de combustible MOX a des effets favorables tant sur la neutronique (caractère neutrophage du hafnium) que sur l'évacuation de la chaleur aux extrémités de la colonne fissile. Ces éléments ont donc un effet favorable sur la puissance linéique à fusion des pastilles de combustible MOX aux extrémités de la colonne fissile.

Les puissances linéiques à fusion ont donc été réévaluées par EDF, en considérant un PRI enveloppe [2], aux extrémités et au milieu de la colonne fissile, et ce pour la conception d'assemblage optimisée, conformément à la démarche de calcul acceptée par l'ASN [3]. Les résultats montrent que les puissances linéiques à fusion réévaluées aux extrémités de la colonne fissile sont supérieures à celles calculées en milieu de colonne fissile. **L'IRSN estime acceptables les éléments apportés par EDF.**

**Ainsi, pour l'assemblage de combustible MOX de conception optimisée, les valeurs de puissance linéique à fusion des pastilles de combustible sont minimales en partie courante de la colonne fissile comme c'est le cas dans la démonstration de sûreté générique du RDS de la gestion de combustible PARITÉ MOX dans les référentiels VD3 et VD4.**

Par ailleurs, au cours de l'expertise, l'IRSN a constaté que, pour les DSS transmis jusqu'à présent pour le référentiel VD4, les marges à la fusion des pastilles de combustible MOX affichées en milieu de la colonne fissile considéraient des puissances linéiques à fusion établies dans le référentiel VD3, moins pénalisantes que celles évaluées pour le référentiel VD4. En conséquence, EDF s'est engagé à prendre en compte les nouvelles puissances linéiques à fusion des pastilles de combustible MOX pour les futures vérifications de la sûreté des recharges dans le référentiel VD4. Dans l'attente de l'évolution de la vérification en recharge, EDF continuera de s'assurer que les marges à fusion des pastilles de combustible MOX au milieu de la colonne fissile sont supérieures à l'écart entre les puissances linéiques à fusion calculées selon les deux référentiels. **L'IRSN estime l'engagement d'EDF acceptable.**

En conclusion, l'IRSN estime acceptable la demande de levée des mesures compensatoires et de la mesure palliative pour les réacteurs de 900 MWe exploités en gestion PARITÉ MOX irradiant des assemblages de combustible MOX de conception optimisée.

## **3. CAS DES REACTEURS COMPORTANT DES ASSEMBLAGES DE COMBUSTIBLE MOX DE CONCEPTION NON OPTIMISEE EFFECTUANT LEUR QUATRIEME CYCLE D'IRRADIATION**

Pour les cas où les réacteurs exploités en gestion PARITÉ MOX présentent des assemblages de combustible MOX de conception non optimisée effectuant leur quatrième cycle d'irradiation, EDF demande la levée des mesures compensatoires ainsi que la limitation du bilan de marges intégré dans les DSS à la zone en partie courante de la

---

<sup>9</sup> Réacteurs à l'état de la troisième ou quatrième visite décennale.

colonne fissile. La mesure palliative est quant à elle maintenue tant que les assemblages de combustible MOX concernés ne présentent pas une pression interne de remplissage abaissée.

EDF a recalculé, pour 35 plans de rechargement d'assemblages de combustible sur la période entre 2020 et 2023, les bilans de marges relatifs à la fusion des pastilles de combustible MOX. EDF montre que, pour toute conception d'assemblage de combustible MOX non optimisée, le risque de fusion des pastilles de combustible MOX des assemblages effectuant leur quatrième cycle d'irradiation peut être écarté en l'absence de mesures compensatoires. **L'IRSN estime acceptables les éléments transmis par EDF.**

**L'IRSN estime donc acceptable la demande de levée des mesures compensatoires pour les réacteurs de 900 MWe exploités en gestion PARITÉ MOX irradiant des assemblages de combustible MOX de conception non optimisée effectuant leur quatrième cycle d'irradiation.**

## 4. CONCLUSION

En conclusion de son évaluation, l'IRSN estime acceptables sur le plan de la sûreté :

- pour les réacteurs de 900 MWe exploités en gestion PARITÉ MOX ne comportant que des assemblages de combustible MOX de conception optimisée, la demande de levée des mesures compensatoires, de la mesure palliative, ainsi que la suppression dans les DSS du bilan de marges vis-à-vis du risque de fusion du combustible MOX aux extrémités de la colonne fissile ;
- pour les réacteurs de 900 MWe exploités en gestion PARITÉ MOX comportant des assemblages de combustible MOX de conception non optimisée et effectuant leur quatrième cycle d'irradiation, la demande de levée des mesures compensatoires ainsi que la suppression dans les DSS du bilan de marges vis-à-vis du risque de fusion du combustible MOX aux extrémités de la colonne fissile.

**IRSN**

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté