

Fontenay-aux-Roses, le 27 avril 2018

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

Avis IRSN/2018-00120

Objet : Réacteurs électronucléaires - Palier CPY - EDF
Anomalies de fabrication du combustible MOX et phénomène de remontée de flux neutronique en bas de colonne fissile

Réf. Lettre ASN CODEP-DCN-2018-006883 du 2 février 2018.

Conformément à la demande de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en référence, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a examiné l'acceptabilité, au plan de la sûreté, de la démonstration apportée par EDF relative à la prise en compte de plusieurs anomalies affectant potentiellement les crayons de combustible MOX¹ de conception FRAMATOME et fabriqués par l'usine MELOX d'ORANO. Des crayons de ce type sont présents dans les réacteurs de 900 MWe du palier CPY exploités par EDF en gestion de combustible PARITE MOX.

En effet, EDF a informé l'ASN de plusieurs anomalies relatives à :

- la non-conformité de fabrication de pastilles de combustible MOX avec une dérive de la teneur moyenne en plutonium observée entre les crayons issus d'un même lot de pastilles. L'exigence d'uniformité au sein d'un même lot mentionnée dans les RCC-C², et traduite dans les spécifications techniques de fabrication, n'a pas été respectée pour l'ensemble des lots de crayons produits entre début 2014 et 2016 ;
- la non-conformité de fabrication de pastilles de combustible MOX avec la présence potentielle d'îlots plutonifères (PRI³) de « grande taille », pouvant atteindre un diamètre effectif maximal dépassant le critère des spécifications techniques de fabrication. Cette anomalie concerne un nombre limité de pastilles de combustible MOX produites entre début 2013 et mi-2015 ;
- l'absence de prise en compte du phénomène de remontée de flux neutronique se produisant pendant le fonctionnement du réacteur, en bas du cœur. Cette remontée, générant un surcroît de puissance sur les premiers millimètres de la première pastille de

Adresse Courrier
BP 17
92262 Fontenay-aux-Roses
Cedex France

Siège social
31, av. de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses

Standard +33 (0)1 58 35 88 88

RCS Nanterre 8 440 546 018

¹ Mélange d'oxydes constitué de dioxyde de plutonium (PuO₂) et de dioxyde d'uranium appauvri (UO₂).

² Règles de conception et de construction applicables aux assemblages de combustible des centrales nucléaires REP (réacteurs à eau pressurisée).

³ *Pu rich island* (îlot riche en plutonium).

combustible MOX, est due à la présence en bas du cœur d'une zone neutroniquement réfléchissante et faiblement absorbante, liée notamment à la présence d'une cale en Zircaloy-4⁴ dans le crayon en dessous de la première pastille. Cette anomalie concerne l'ensemble des crayons de combustible MOX irradiés sur les 22 réacteurs de 900 MWe du palier CPY exploités en gestion de combustible PARITE MOX.

EDF a déclaré en mars 2017 un événement significatif pour la sûreté relatif au cumul du phénomène de remontée de flux neutronique en bas de colonne fissile et de la présence d'îlots plutonifères de « grande taille » pour les réacteurs n° 1 et n° 4 de Chinon, n° 6 de Gravelines, n° 1 de Saint-Laurent et n° 3 du Tricastin.

À l'issue de son analyse d'impact sur la sûreté des anomalies de fabrication et de remontée de flux ainsi que de leur cumul, EDF conclut à l'absence d'enjeu de sûreté.

L'ASN souhaite recueillir l'avis de l'IRSN concernant :

- la justification de sûreté apportée par l'exploitant pour les anomalies de fabrication de crayons de combustible MOX mentionnées ci-dessus ;
- la démonstration de sûreté apportée par EDF pour tenir compte du phénomène de remontée de flux neutronique en bas de colonne fissile, et la complétude de la caractérisation de ce phénomène ;
- la démonstration de sûreté apportée par EDF pour tenir compte du cumul du phénomène de remontée de flux et de la présence de PRI.

Anomalies de fabrication des pastilles de combustible MOX

L'analyse d'EDF concernant les anomalies de fabrication relatives à la dérive de la teneur en plutonium, à la présence potentielle d'îlots plutonifères et au cumul de ces deux anomalies conclut au respect des critères de la démonstration de sûreté, notamment à l'absence de risque de fusion de combustible en cas de transitoire incidentel (condition de fonctionnement de dimensionnement de deuxième catégorie). Cette conclusion s'appuie sur des études réalisées avec des modélisations neutronique et thermique du crayon de combustible MOX considérant des hypothèses conservatives, notamment en ce qui concerne les caractéristiques de l'îlot plutonifère retenu (taille, teneur en plutonium...). L'IRSN estime que l'analyse relative à la dérive de la teneur en plutonium est satisfaisante. Par ailleurs, l'anomalie relative à la présence d'îlots plutonifères concerne un faible nombre de crayons de combustible MOX. De plus, EDF a analysé le risque de fusion associé en transitoire incidentel en supposant des caractéristiques enveloppes pour les îlots, dont la probabilité d'occurrence est faible. L'IRSN estime ainsi que le risque de fusion du combustible MOX en cas de transitoires incidentels peut effectivement être considéré comme résiduel, y compris en considérant le cumul des deux anomalies. À cet égard, les assemblages de combustible MOX susceptibles d'être concernés par les deux anomalies de fabrication en cours d'irradiation dans plusieurs réacteurs de 900 MWe du palier CPY exploités en gestion PARITE MOX seront déchargés d'ici deux à trois ans.

EDF a indiqué que ces anomalies sont désormais résorbées par la mise en œuvre d'actions correctives et préventives dans le procédé de fabrication de l'usine MELOX d'ORANO visant à garantir le respect des spécifications techniques de fabrication. L'IRSN a analysé les données transmises, issues notamment des contrôles réalisés par échantillonnage, et n'a pas relevé d'élément mettant en doute le respect des spécifications techniques de fabrication pour les dernières campagnes de fabrication des pastilles de combustible MOX.

⁴ Zircaloy-4 (Zy-4) : matériau « historique » utilisé pour le gainage et la cale des crayons de combustible REP, qui possède la propriété d'être transparent aux neutrons.

Remontée de flux neutronique en bas de colonne fissile des crayons de combustible MOX

EDF a mis en évidence que, dans certaines conditions où la distribution de puissance présente un pic en bas du cœur, le point chaud du cœur⁵ pouvait être porté par le premier centimètre en bas de la colonne fissile des crayons de combustible MOX, notamment du fait de la présence d'une cale en Zy-4.

Pour évaluer les conséquences de ce phénomène, EDF a développé une démarche d'analyse élaborée comprenant la mise en œuvre de modélisations avancées de neutronique et de thermique du crayon de combustible MOX.

En transitoires incidentels, l'intégrité des crayons de combustible doit être assurée, ce qui passe par une démonstration de l'absence de fusion du combustible au sein des pastilles. Pour démontrer que la température de fusion n'est pas atteinte au point chaud du cœur, situé normalement en partie courante d'un crayon c'est-à-dire dans une zone où il y a très peu d'effet d'évacuation d'une partie de la puissance par conduction thermique axiale, EDF s'assure que la puissance linéique à fusion n'est pas atteinte. Par contre, pour démontrer l'absence de fusion en partie basse de la première pastille en transitoires incidentels, EDF a dû définir un critère relaxé en puissance linéique, valorisant les effets de conduction axiale entre la première pastille et la cale. L'étude d'EDF conclut au respect de ce critère. Cependant, l'IRSN estime que la modélisation neutronique n'est pas satisfaisante dans la mesure où l'analyse d'EDF ne tient pas compte des effets neutroniques du désalignement potentiel des colonnes fissiles des crayons entre elles dans un réacteur. Comme illustré par la figure en annexe 3, si le bas d'une colonne fissile d'un crayon se trouve en-dessous du bas de la colonne de crayons voisins, même de seulement quelques millimètres, le flux neutronique dans les premiers millimètres de la première pastille de ce crayon sera significativement accru. Un tel désalignement peut avoir différentes causes, par exemple une différence de positionnement des crayons dans l'assemblage au moment de la fabrication ou un grandissement différentiel pendant l'irradiation de crayons voisins dont la teneur en plutonium ou le taux de combustion peuvent être différents. De plus, l'analyse d'EDF s'appuie sur une évolution non justifiée de la méthode de prise en compte du cumul des incertitudes et pénalités. Enfin, la validité de la modélisation thermique retenue par EDF, essentielle à sa démonstration, n'est pas acquise en raison des méconnaissances relatives notamment à l'état de la première pastille de combustible MOX en bas de colonne fissile et de l'absence de prise en compte, dans les calculs thermiques d'EDF, des effets des déformations de la cale en transitoire. **EDF s'est engagé à compléter sa démonstration d'absence de risque de fusion du combustible en bas de colonne fissile, comme indiqué dans l'observation 1 en annexe 2. L'IRSN estime acceptable cet engagement, mais souligne qu'EDF ne s'engage pas à revoir la méthode de cumul des incertitudes et pénalités dans la modélisation neutronique, alors qu'il n'a pas justifié la nouvelle méthode mise en œuvre.**

De plus, dans son dossier, EDF n'apporte pas la démonstration de la tenue mécanique (maintien de la géométrie et du positionnement) de la cale supportant la colonne fissile, alors que, sans cette tenue, l'intégrité des crayons ne peut être garantie en transitoire incidentel et que la refroidissabilité du cœur pourrait être mise en cause en transitoire accidentel. En effet, en cas de transitoire incidentel ou accidentel, la colonne fissile exercerait des chargements thermiques et mécaniques significatifs sur cette cale. À cet égard :

- L'IRSN a la raisonnable assurance que le risque de fusion de la cale peut être écarté compte tenu des marges indiquées par EDF lors des échanges techniques. **Cependant, les hypothèses retenues dans les calculs d'EDF nécessitent d'être ajustées, ce qui fait l'objet d'un engagement d'EDF cité dans l'observation 2 en annexe 2 ;**

⁵ Endroit du cœur où la puissance linéique produite est maximale.

- en l'absence de démonstration apportée par EDF, l'IRSN n'a pas été en mesure de statuer sur le risque d'endommagement de la cale en transitoires incidentels et accidentels. **EDF s'est engagé à compléter sa démonstration de tenue mécanique de la cale comme indiqué dans l'observation 3 en annexe 2.**

En ce qui concerne le phénomène de remontée de flux neutronique en bas de colonne fissile, EDF envisage une modification de la conception de la cale supportant la colonne fissile afin de limiter ce phénomène. L'introduction, en 2018, dans un réacteur, de quatre assemblages précurseurs permettra d'acquérir du retour d'expérience visant à évaluer l'efficacité de la modification de conception envisagée. Cependant, la généralisation de cette modification n'est à ce jour pas décidée par EDF et nécessite une adaptation du processus de fabrication à l'échelle industrielle et une qualification associée. En tout état de cause, il faudra attendre plusieurs années avant de voir disparaître, sur l'ensemble des réacteurs du palier CPY exploités en gestion PARITE MOX, les crayons de combustible MOX de conception actuelle avec une cale en Zircaloy-4.

Remontée de flux neutronique en haut de colonne fissile des crayons de combustible MOX

Par ailleurs, un phénomène de remontée de flux neutronique est également observé en haut de colonne fissile des crayons de combustible MOX, mais avec une amplitude inférieure à celle observée en bas de colonne fissile. En partie basse des crayons de combustible MOX, le rôle « radiateur » de la cale permet d'évacuer une partie importante de l'énergie déposée dans le combustible. Par contre, en partie haute, seul le ressort, en contact avec la dernière pastille de la colonne fissile, joue *a priori* ce rôle mais avec une efficacité moindre. Ces effets antagonistes n'ont à ce jour pas été analysés par EDF qui s'est engagé à transmettre des éléments de justification, comme indiqué dans l'observation 4 en annexe 2.

Mesures compensatoires

En l'attente de l'accomplissement des engagements rappelés dans les observations 1 à 4, l'IRSN considère qu'EDF n'a pas apporté une démonstration complète et probante du respect des critères de sûreté en transitoires incidentels et accidentels. Les risques de fusion du combustible en parties haute et basse de la colonne fissile des crayons de combustible MOX et d'endommagement de la cale en cas de transitoires incidentels et accidentels sont plus importants lorsque l'opérateur pilote le réacteur avec une distribution de puissance qui présente un pic dans le bas ou le haut du cœur. Dès lors, l'IRSN estime nécessaire qu'EDF mette en œuvre au plus tôt des mesures compensatoires visant à contraindre le domaine de fonctionnement du réacteur⁶ pour réduire ces risques. EDF a indiqué qu'il prévoit effectivement de mettre œuvre des mesures compensatoires, mais uniquement si des désalignements de colonnes fissiles des crayons de combustible MOX sont observés en réacteur. EDF s'est sur ce point engagé à réaliser une campagne de mesures comme indiqué dans l'observation 5 en annexe 2.

L'IRSN estime que l'engagement d'EDF de réaliser des mesures sur site est pertinent, mais pas suffisant. En effet, même si aucun désalignement n'est observé à l'issue des mesures et même si cette conclusion, obtenue sur la base d'une campagne de mesures, pouvait être généralisée à l'ensemble des assemblages MOX chargés en réacteur, ce résultat ne suffirait pas à lever l'ensemble des réserves de l'IRSN (justification relative à la modélisation thermique et à l'effet des déformations de la cale, justification de la tenue mécanique de la cale, justification pour la partie haute des colonnes fissiles, cumul des incertitudes et pénalités...) ayant notamment conduit EDF à prendre les différents engagements rappelés dans les observations 1 à 4 en annexe 2. En

⁶ Le domaine de fonctionnement autorisé du réacteur limite notamment, en fonction du niveau de puissance, l'ampleur du pic de puissance dans la partie basse ou la partie haute du cœur du réacteur.

conséquence, dans l'attente d'une démonstration complète et probante du respect des critères de sûreté ou de la mise en œuvre d'une modification de la conception des crayons, l'IRSN estime qu'EDF doit mettre en place au plus tôt des mesures compensatoires⁷. L'IRSN formule donc la recommandation en annexe 1.

Remontée de flux neutronique en bas de colonne fissile des crayons de combustible MOX en présence d'îlots plutonifères

Dans le cadre de la déclaration de l'événement significatif pour la sûreté mentionné plus haut, EDF a analysé l'impact sur la démonstration de sûreté du cumul du phénomène de remontée de flux neutronique en bas de colonne fissile des crayons de combustible MOX avec l'anomalie de fabrication concernant la présence d'îlots plutonifères pour les réacteurs susceptibles d'en contenir. Les réserves précédemment évoquées concernant l'analyse du phénomène de remontée de flux neutronique sont transposables à l'analyse de son cumul avec la présence d'îlots plutonifères qui aura tendance à amplifier l'impact de ce phénomène en haut et en bas de colonne fissile des crayons de combustible MOX. **Cependant, compte tenu du fait qu'EDF a analysé ce risque en supposant la présence d'un îlot plutonifère de caractéristiques enveloppes (taille, teneur en plutonium...), dont la probabilité d'occurrence est faible, et compte tenu également du faible nombre de crayons de combustible MOX concernés, l'IRSN estime qu'il n'est pas nécessaire, pour les réacteurs concernés, de renforcer les mesures compensatoires faisant l'objet de la recommandation en annexe 1.**

Conclusion

Concernant les anomalies de fabrication des pastilles de combustible MOX liées à une dérive de la teneur en plutonium et à la présence potentielle d'îlots plutonifères, l'IRSN estime que le risque de fusion du combustible associé en cas de transitoires incidentels peut être considéré comme résiduel. Par ailleurs, l'IRSN n'a pas relevé, parmi les éléments transmis par EDF, d'élément mettant en doute le respect des spécifications techniques de fabrication pour les dernières campagnes de fabrication des pastilles de combustible MOX.

Concernant le phénomène de remontée de flux neutronique en partie basse du cœur et ses conséquences, l'IRSN souligne d'une part que la démonstration d'EDF ne traite que d'une partie des conséquences sur les études du rapport de sûreté et, d'autre part, que cette démonstration élaborée nécessite des compléments et des justifications supplémentaires. EDF s'est engagé à compléter sa démonstration pour prendre en compte l'ensemble des phénomènes de remontée de flux neutronique aux extrémités de la colonne fissile des crayons de combustible MOX et leurs conséquences.

Nonobstant l'engagement d'EDF de vérifier par des mesures le caractère enveloppe de la pénalité de désalignement des colonnes fissiles retenue en cours d'instruction et dans l'attente d'une démonstration complète et probante du respect des critères de sûreté ou de la mise en œuvre d'une modification de conception des crayons, **l'IRSN estime nécessaire qu'EDF mette en place au plus tôt des mesures compensatoires visant à réduire le risque de fusion du combustible en parties haute et basse de la colonne fissile des crayons de combustible MOX et le risque d'endommagement de la cale en cas de transitoires incidentels et accidentels. Ceci fait l'objet d'une recommandation présentée en annexe 1.**

⁷ Comme par exemple la réduction du domaine de fonctionnement qui limiterait les pics de puissance en haut ou en bas du cœur lorsque le réacteur est à puissance élevée ou bien l'abaissement des seuils de protection du cœur qui limitent le niveau de puissance linéique maximal susceptible d'être atteint en cas de transitoire incidentel.

Par ailleurs, l'IRSN note qu'EDF envisage une modification de la conception de la cale supportant la colonne fissile en vue de limiter le phénomène de remontée de flux neutronique en bas de colonne fissile des crayons de combustible MOX. Quatre assemblages expérimentaux seront introduits en 2018 dans un réacteur du palier 900 MWe exploité en gestion PARITE MOX. **L'IRSN considère qu'EDF doit poursuivre sa démarche, avec le concepteur FRAMATOME et le fournisseur ORANO, afin d'aboutir au chargement, dans tous les réacteurs utilisant du MOX, de crayons à conception modifiée permettant de limiter les remontées de flux neutronique aux extrémités haute et basse des colonnes fissiles. Comme toute évolution de conception du combustible, cette démarche doit être menée de manière prudente mais, compte tenu de l'enjeu de sûreté, sans perte de temps.**

Pour le Directeur général et par délégation,

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

Annexe 1 à l'Avis IRSN/2018-00120 du 27 avril 2018

Recommandation

L'IRSN recommande que, pour les réacteurs exploités en gestion PARITE MOX, EDF mette en place au plus tôt des mesures compensatoires visant à réduire les risques de fusion à cœur du combustible MOX en haut et bas de la colonne fissile et d'endommagement de la cale située en bas des crayons en cas de transitoires incidentels et accidentels.

Observations

Observation n° 1 :

EDF a pris l'engagement suivant : « *EDF complétera [pour fin juillet 2018] sa démonstration d'absence de risque de fusion du combustible en bas de colonne fissile et fournira des compléments sur les calculs ayant permis de dimensionner la pénalité de désalignement pour une cale en Zy4, ainsi que sur l'absence d'impact de la microstructure de la première pastille et de la déformation de la cale sur la thermique* ».

Observation n° 2 :

EDF s'est engagé à fournir pour fin juillet 2018 les résultats d'un calcul Thermic2D pénalisé pour la température de la cale en considérant une valeur de puissance linéique du premier centimètre égale au critère de découplage.

Observation n° 3 :

EDF a pris l'engagement suivant : « *EDF complétera [pour fin juillet 2018] sa démonstration de la tenue mécanique de la cale en transitoires incidentels et accidentels et apportera des éléments de validation des modélisations retenues* ».

Observation n° 4 :

EDF a pris l'engagement suivant : « *EDF [justifiera d'ici fin 2018] l'absence d'impact sur la démonstration de sûreté du phénomène de remontée de flux neutronique en partie haute de colonne fissile des crayons de combustible MOX* ».

Observation n° 5 :

EDF a pris l'engagement suivant : « *pour conforter l'hypothèse de désalignement prise en compte dans le dossier de justification de sûreté de l'anomalie, actuellement basée sur du REX des paliers 1300 et N4, EDF s'engage à réaliser à partir de juin 2018 des mesures sur des assemblages MOX 1^{er} cycle* ».

Annexe 3 à l'Avis IRSN/2018-00120 du 27 avril 2018

Illustration de l'effet du désalignement des colonnes fissiles sur la distribution axiale de puissance à l'extrémité basse des crayons de combustible

