

Fontenay-aux-Roses, le 27 mai 2020

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

Avis IRSN n° 2020-00081

Objet...	Réacteurs électronucléaires (Palier CPY en Parité MOX) - EDF - Anomalies MOX (îlots plutonifères, phénomène de remontée de flux neutronique en haut et bas de colonne fissile des assemblages, logiciel ORPHEE).
Réf(s) ..	[1] Saisine ASN - CODEP-DCN-2020-024348 du 09 avril 2020. [2] Avis IRSN/2018-00120 du 27 avril 2018. [3] Lettre ASN - CODEP-DCN-2018-025483 du 12 juillet 2018. [4] Avis IRSN/2020-00050 du 30 mars 2020. [5] Avis IRSN/2020-00009 du 20 janvier 2020. [6] Lettre ASN - CODEP-DCN-2020-005699 du 23 janvier 2020. [7] Lettre ASN - CODEP-DCN-2019-043896 du 25 octobre 2019. [8] Avis IRSN/2019-00255 du 19 novembre 2019.
Nbre de page(s) ...	9

Conformément à la demande formulée par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en référence [1], l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a examiné l'acceptabilité, au plan de la sûreté, des éléments apportés par Électricité de France (EDF) relatifs à la prise en compte du cumul du phénomène de remontée de flux neutronique aux extrémités basse et haute de colonne fissile et de la présence d'îlots de plutonium (PRI) dans les pastilles de combustible MOX¹.

1 CONTEXTE

Ces dernières années, EDF a déclaré plusieurs anomalies concernant le combustible MOX utilisé dans les réacteurs CPY de 900 MWe exploités en gestion de combustible « PARITÉ MOX ». Ces anomalies concernent :

- la non-conformité de fabrication de pastilles de combustible MOX en lien avec une dérive de la teneur moyenne en plutonium observée entre les crayons issus d'un même lot de pastilles ;
- la non-conformité de fabrication de pastilles de combustible MOX en lien avec la présence de PRI de « grande taille », pouvant atteindre un diamètre effectif maximal dépassant le critère des spécifications techniques de fabrication ;
- l'absence de prise en compte du phénomène de remontée de flux neutronique se produisant pendant le fonctionnement normal du réacteur, en bas du cœur. Cette remontée de flux, générant un surcroît de puissance sur les premiers millimètres de la première pastille, 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-4 (Zy-4) dans le crayon, en dessous de la première pastille.

¹ Oxyde mixte de plutonium et d'uranium.

Le cumul de ces anomalies pourrait mettre en cause la démonstration de l'intégrité du combustible pour certains transitoires de deuxième catégorie (transitoires incidentels). Dans ces situations, la vérification de l'intégrité du combustible repose notamment sur l'absence d'atteinte de la puissance linéique à partir de laquelle la fusion de la pastille peut intervenir.

EDF a donc déclaré en mars 2017 un évènement 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 non-conformes pour les réacteurs CPY de 900 MWe exploités en gestion de combustible PARITÉ MOX.

Dans son avis en référence [2], l'IRSN s'est prononcé sur la démonstration de sûreté apportée par EDF prenant en compte ces anomalies de fabrication à date et considérant le phénomène de remontée de flux neutronique en partie basse des crayons MOX. L'IRSN a souligné d'une part que la démonstration d'EDF nécessitait des compléments et des justifications supplémentaires et, d'autre part, que cette démonstration ne traitait que d'une partie des conséquences sur les études du rapport de sûreté. En effet, la présence d'un ressort au-dessus de la colonne fissile des crayons MOX conduit également à un phénomène de remontée de flux neutronique en partie haute de la colonne fissile, phénomène non étudié par EDF. EDF s'est engagé à compléter sa démonstration pour prendre en compte le phénomène de remontée de flux neutronique aux deux extrémités de la colonne fissile des crayons de combustible MOX et ses conséquences.

Cette expertise réalisée par l'IRSN a conduit l'ASN, par la lettre en référence [3], à demander la mise en œuvre au plus tôt de mesures compensatoires en exploitation visant à réduire les risques de fusion à cœur du combustible MOX en haut et bas de colonne fissile en cas de transitoires incidentels pour tous les réacteurs exploités en gestion de combustible PARITÉ MOX.

En conséquence, EDF a mis en œuvre, en octobre 2018, une mesure palliative consistant à modifier des alarmes de pré-sortie du domaine de conduite² afin de restreindre le domaine de fonctionnement normal des réacteurs, dans l'attente de la mise en œuvre des mesures compensatoires envisagées. Vis-à-vis de la remontée de flux en partie basse, EDF a mis en œuvre à partir d'avril 2019 une modification de la chaîne de protection contre les surpuissances sur tous les réacteurs concernés, dans l'attente d'une évolution de conception des crayons. En décembre 2019, EDF a informé l'ASN qu'il envisage de supprimer la mesure palliative de modification des alarmes RPN 414 AA et RPN 900 AA sur les réacteurs à l'état visite décennale 2 ou 3 (VD2-VD3) compte tenu des contraintes d'exploitation qu'elle engendre. Toutefois, la modification de la pré-alarme RPN 900 AA sera conservée, en référentiel VD4, car elle est valorisée pour restaurer des marges dans les études de perte de réfrigérant primaire de taille intermédiaire (APRP-BI) [4].

Pour pallier le phénomène de remontée de flux en partie haute des crayons de combustible MOX, et dans l'attente également d'une modification de conception des crayons, EDF a déposé fin décembre 2019 une demande d'autorisation auprès de l'ASN portant sur la mise en œuvre d'une mesure compensatoire consistant en une sur-insertion des grappes d'arrêt et des groupes de compensation de puissance³ à 222 pas en fonctionnement normal.

² La mesure palliative consiste en une réduction de l'occupation du domaine de fonctionnement normal par le passage de jaune à rouge des alarmes RPN 414AA et RPN 900AA et visant à durcir la conduite à tenir.

³ Les grappes de commande constituées de crayons d'absorbants neutroniques s'insèrent dans certains assemblages de combustible constituant le cœur du réacteur. Elles sont réparties en grappes de régulation et en grappes d'arrêt, pour former le « schéma de grappes » du réacteur. Les grappes de régulation (groupes de compensation de puissance et groupe de régulation de la température) permettent de compenser les variations rapides de réactivité liées au pilotage du réacteur lorsqu'il est en puissance et de contrôler la répartition de la puissance dans le cœur. Les grappes d'arrêt contribuent à la maîtrise de la réactivité dans les états d'arrêt et sont en position haute lorsque le réacteur est en production, pour constituer une réserve d'anti-réactivité. En cas de besoin,

L'IRSN a considéré acceptable cette mesure compensatoire dans son avis en référence [5], ce qui a conduit à la décision de l'ASN en référence [6].

Par ailleurs, en mai 2019, EDF a déclaré un nouvel évènement anormal affectant la fabrication du combustible MOX, en lien avec la présence de PRI non-conformes, malgré les actions correctives précédemment mises en place à l'usine de fabrication MELOX d'ORANO. À la demande de l'ASN [7], EDF a transmis les éléments justifiant le respect des critères de sûreté en considérant les caractéristiques de ces PRI pour l'ensemble des réacteurs du palier CPY en gestion PARITE MOX à l'état correspondant à leur troisième visite décennale (VD3) et également pour le réacteur n°1 du CNPE du Tricastin dans le référentiel VD4 900⁴. Dans son avis en référence [8], l'IRSN n'a pas émis de réserve sur la démonstration de sûreté apportée par EDF en vue du redémarrage du réacteur n°1 du CNPE du Tricastin pour son cycle 37, consécutif à sa quatrième visite décennale. Toutefois, en décembre 2019, un nouvel évènement anormal de fabrication du combustible MOX a été déclaré par EDF, toujours en lien avec la présence de PRI non-conformes mais de taille supérieure à celle évaluée en mai 2019. En conséquence, EDF a transmis une révision de l'évènement significatif pour la sûreté concernant le cumul du phénomène de remontée de flux aux extrémités de colonne fissile et les anomalies de fabrication du combustible MOX en retenant des caractéristiques de PRI enveloppes définies sur la base du retour d'expérience de l'usine de MELOX.

Ainsi, par lettre citée en référence [1], l'ASN souhaite recueillir l'avis de l'IRSN concernant l'acceptabilité, au plan de la sûreté :

- des réponses apportées par EDF en ce qui concerne :
 - la valeur de désalignement des crayons en bas d'assemblages de combustible MOX,
 - la tenue mécanique des cales des crayons MOX dans les situations incidentelles considérées dans le rapport de sûreté,
 - la modélisation thermique de la première pastille de combustible en bas de colonne fissile,
 - les justifications concernant le phénomène de remontée de flux neutronique en haut de colonne fissile ;
- des caractéristiques enveloppes des PRI retenues par EDF dans ses études de sûreté compte tenu des dispositions mises en œuvre aux différentes étapes de la ligne de fabrication des assemblages de combustible MOX et des mesures de surveillance mises en œuvre à l'usine MELOX ;
- des justifications permettant de lever la mesure palliative consistant en une réduction du domaine de fonctionnement ;
- de la démonstration du respect des critères de sûreté dans les différentes situations du domaine de dimensionnement en considérant la présence de PRI dans les pastilles de combustible MOX et la mise en œuvre des mesures compensatoires, à savoir :

l'activation de l'arrêt automatique du réacteur (AAR) provoque rapidement la chute de toutes les grappes par gravité pour arrêter les réactions nucléaires en chaîne et réduire ainsi rapidement la puissance produite dans le cœur du réacteur.

⁴ Dans le cadre du réexamen périodique de sûreté associé aux quatrièmes visites décennales (VD4) des réacteurs de 900 MWe du palier CPY exploités en gestion de combustible PARITÉ MOX (dont le réacteur n°1 du Tricastin est le réacteur tête-de-série), EDF a notamment réexaminé l'ensemble des études d'accidents. À cette occasion, et conformément aux demandes de l'ASN effectuées dans le cadre des orientations associées aux VD4 900 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, EDF a pris en compte des phénomènes physiques avérés mais non considérés jusqu'alors dans les études, et qui sont susceptibles de réduire les marges de sûreté. C'est notamment le cas de la déformation latérale des assemblages de combustible attendue en fonctionnement normal qui conduit à plusieurs effets, notamment à une augmentation de la puissance neutronique des crayons en périphérie de certains assemblages de combustible.

- la modification de la position haute des grappes de commande et de compensation de puissance proposée par EDF pour restaurer des marges de sûreté en partie haute de la colonne fissile ;
- la modification de la chaîne contre les surpuissances pour restaurer des marges de sûreté en partie haute et basse de la colonne fissile.

L'ASN souhaite également que l'IRSN tienne compte dans son analyse des réserves qui demeurent sur l'utilisation par EDF de la nouvelle version d'un logiciel de thermomécanique du combustible.

2 ANALYSE DES ELEMENTS APPORTES PAR EDF SUITE A L'AVIS IRSN [2]

Le désalignement des colonnes combustible en partie basse des assemblages est susceptible d'aggraver les effets du phénomène de remontée de flux neutronique. À cet égard, EDF a établi une loi de désalignement en fonction du taux de combustion en s'appuyant sur des mesures sur assemblage combustible en piscine de désactivation. Ces mesures ont mis en évidence un risque de « glissement précoce » des crayons de deuxième cycle, qui a été pris en compte par EDF dans ses analyses. De plus, EDF a réalisé des calculs des effets neutroniques du désalignement de colonne fissile. À l'issue de son analyse, l'IRSN estime satisfaisantes les hypothèses retenues par EDF pour prendre en compte le phénomène de désalignement des colonnes fissiles dans l'évaluation du risque de fusion du combustible en transitoires incidentels.

Concernant la démonstration de la tenue mécanique de la cale Zy-4, EDF a mis en œuvre une démarche basée sur des calculs thermomécaniques et sur la comparaison des déformations obtenues à un critère de déformation à rupture. L'analyse des éléments apportés par EDF soulève des réserves :

- EDF retient une modélisation axisymétrique pour l'opercule et le tube de cale. Or, cette modélisation n'est pas adaptée dans la mesure où l'opercule et le tube de cale sont soudés en trois points ;
- EDF considère des propriétés matériaux de la gaine à l'état vierge. Or, le durcissement sous irradiation de la gaine pourrait conduire à une répartition différente des déformations entre la gaine et la cale, ce qui augmenterait la déformation de la cale ;
- EDF utilise un critère de déformation à rupture issu d'essais de traction pour vérifier la tenue de la cale. Or, ce critère de déformation à rupture n'est pas adapté à la sollicitation subie par la cale.

Toutefois, compte tenu du rôle favorable que jouerait la gaine en limitant toute déformation supplémentaire, l'IRSN a la raisonnable assurance que les exigences de maintien de la géométrie de la partie basse du crayon et du maintien de la colonne fissile sont respectées. Néanmoins, l'IRSN estime qu'EDF devrait compléter sa démonstration de la tenue mécanique de la cale en Zy-4, ce qui fait l'objet de l'observation n°1 en annexe 2.

Pour ce qui concerne la cale en acier, qui remplace la cale en Zy-4 dans l'attente de la solution définitive, EDF a mis en œuvre une démarche de justification, différente de celle retenue pour la cale en Zy-4, basée sur l'évaluation d'un critère de rupture fonction de la contrainte locale et de la restauration des défauts d'irradiation. Cependant, le type de modélisation axisymétrique et les propriétés matériaux retenus font l'objet des mêmes réserves que pour la cale en Zy-4. Par ailleurs, l'IRSN note qu'EDF ne mentionne pas l'applicabilité de cette nouvelle démarche au domaine de température concerné et ne justifie pas le critère de déformation retenu. Toutefois, l'introduction de la cale acier atténuera les niveaux de déformation de la cale et les puissances atteintes en transitoires, effets qui contribuent à garantir le respect des exigences liées à la cale. Comme pour la cale en Zy-4, l'IRSN a donc la raisonnable assurance du respect de ces exigences. Néanmoins, l'IRSN estime que la démonstration de la tenue mécanique de la cale en acier doit faire l'objet de compléments. Ceci fait l'objet de l'observation n°2 en annexe 2.

Concernant la microstructure des pastilles soumises à la remontée de flux neutronique en extrémité de colonne fissile, EDF a réalisé des analyses céramographiques⁵. Ces analyses montrent que la première pastille en bas de colonne fissile ne présente pas de fissuration particulière par rapport aux autres pastilles en partie courante. Toutefois, l'IRSN souligne le faible nombre de céramographies (en coupes transverses) présentées par EDF. Ainsi, l'IRSN estime qu'EDF devrait effectuer des céramographies supplémentaires sur une « première pastille » de crayon MOX afin de confirmer les observations précédentes et de les compléter par des coupes longitudinales permettant de mettre en évidence l'état de fissuration axiale, non visible sur les coupes transverses. De plus, l'IRSN note qu'EDF n'a fourni aucun élément concernant l'état microstructural de la pastille soumise au phénomène de remontée de flux en partie haute de la colonne fissile. Ceci fait l'objet de l'observation n° 3 en annexe 2.

Enfin, concernant la caractérisation du phénomène de remontée de flux neutronique en partie haute, EDF a réalisé une analyse complète du phénomène, similaire à celle fournie pour la partie basse. De manière générale, l'IRSN estime satisfaisants les éléments apportés relatifs à la modélisation neutronique et au désalignement des colonnes fissiles. Les conclusions de l'expertise de la caractérisation de cette remontée de flux neutronique en partie haute sont présentées au paragraphe 5 ci-dessous.

3 CARACTERISATION DES PRI

EDF a défini les caractéristiques d'un PRI enveloppe à partir du retour d'expérience de fabrication à l'usine de MELOX sur la période 2007-2019. L'IRSN note que cette caractérisation ne tient pas compte du nombre de PRI dans chacune des pastilles considérées pour l'analyse. Ainsi, l'IRSN estime que la démonstration du caractère enveloppe du PRI retenu n'est pas acquise à ce stade. La transmission par EDF d'éléments devant apporter cette démonstration est retardée par les effets de la crise sanitaire actuelle. Dans l'attente de ces éléments justifiant le volume retenu, l'IRSN estime qu'EDF doit considérer un volume de PRI suffisamment enveloppe, tel que celui considéré dans le cadre de la démonstration de sûreté du réacteur n° 1 de Tricastin [8]. Ceci conduit notamment l'IRSN à formuler la Recommandation n° 1 en annexe 1.

4 LEVEE DE LA MESURE PALLIATIVE DE REDUCTION DE L'OCCUPATION DU DOMAINE DE FONCTIONNEMENT

EDF a indiqué que la modification de la couleur de l'alarme de pré-sortie de domaine RPN 414AA était responsable de contraintes d'exploitation, notamment lors de la remontée à puissance maximale. L'alarme de pré-sortie de domaine RPN 900AA n'induit quant à elle pas de contraintes d'exploitation et est bénéfique pour les études d'APRP BI. Ceci conduit EDF, dans le cadre du quatrième réexamen périodique des réacteurs de 900 MWe du palier CPY, à mettre en œuvre le passage à la couleur rouge de cette alarme. L'IRSN ne formule pas d'objection au retour à la couleur jaune de l'alarme RPN 414AA, celle-ci n'apportant pas de gain de sûreté et induisant des difficultés d'exploitation. Pour ce qui concerne la modification de l'alarme RPN 900AA, dans la mesure où celle-ci est bénéfique vis-à-vis des transitoires accidentels d'APRP, l'IRSN estime qu'elle devrait être maintenue pour les réacteurs de 900 MWe exploités en gestion de combustible PARITÉ MOX en référentiel VD2 et VD3. Ceci fait l'objet de l'observation n° 4 en annexe 2.

⁵ Une céramographie permet de caractériser l'état microstructural d'une pastille.

5 DEMONSTRATION DE SURETE ET EFFICACITE DES MESURES COMPENSATOIRES MISES EN ŒUVRE PAR EDF

En transitoires incidentels (catégorie 2), l'intégrité des crayons de combustible doit être assurée, ce qui passe notamment par une démonstration de l'absence de fusion du combustible au sein des pastilles. Or, le risque de fusion est amplifié par la présence de PRI. À cet égard, EDF a réalisé une analyse en deux étapes consistant :

- à déterminer la puissance linéique à fusion en considérant des caractéristiques enveloppes d'un PRI. Ce calcul est réalisé avec un logiciel de thermique du combustible ;
- puis à vérifier que la puissance linéique maximale atteinte en transitoires incidentels ne dépasse pas la puissance linéique à fusion déterminée précédemment. La puissance linéique atteinte est évaluée à l'aide d'un logiciel de neutronique et considère explicitement les caractéristiques des cycles en cours.

Cette démonstration doit être apportée sur toute la hauteur de la colonne combustible (bas, milieu et haut de colonne fissile).

Les évaluations des puissances linéiques à fusion en présence de PRI ayant été réalisées à l'aide du logiciel d'évaluation thermique utilisé pour la démonstration de sûreté du réacteur n°1 du Tricastin, les conclusions de l'IRSN présentées dans l'avis en référence [8] sont reconduites.

EDF a analysé les transitoires de catégorie 2 les plus limitatifs en termes de puissances linéiques maximales atteintes provenant des études VD2-VD3 et VD4 900 CPY en gestion de combustible PARITE MOX en prenant en compte les caractéristiques des cycles en cours et les effets bénéfiques des mesures compensatoires mises en œuvre pour limiter le phénomène de remontée de flux neutronique aux extrémités de la colonne fissile. L'étude d'EDF conclut au respect du critère d'absence de fusion du combustible pour les transitoires de catégorie 2 pour l'intégralité de la colonne fissile en prenant en compte des caractéristiques du PRI issues du retour d'expérience de l'usine de MELOX.

Toutefois, l'IRSN estime qu'EDF doit retenir des conservatismes supplémentaires afin de couvrir le manque de validation du logiciel d'évaluation thermique utilisé et le manque de justification du caractère enveloppe du volume du PRI retenu. L'IRSN estime donc qu'EDF doit compléter sa démonstration en calculant les puissances linéiques à fusion en considérant le PRI retenu dans le cadre de la démonstration fournie en vue du dernier redémarrage du réacteur n°1 de TRICASTIN. Cette démonstration devra être reversée dans les dossiers de sûreté des recharges. Ceci fait l'objet de la recommandation n°1 en annexe 1.

Enfin, sur la base des éléments transmis, l'IRSN estime que les mesures compensatoires mises en œuvre par EDF devraient permettre de démontrer, dans les référentiels VD2, VD3 et VD4, le respect du critère d'absence de fusion du combustible, avec des marges toutefois réduites, en considérant le même PRI que celui utilisé pour la démonstration apportée pour le réacteur n°1 du Tricastin.

6 CONCLUSION

L'IRSN estime satisfaisants les compléments apportés par EDF suite à la précédente expertise, concernant la prise en compte des effets du désalignement des colonnes fissiles sur le phénomène de remontée de flux neutronique et la caractérisation de ce phénomène en partie haute des crayons combustible. Les éléments de démonstration apportés par EDF quant à la tenue des cales en Zy-4 et des cales en acier sont rassurants, mais nécessitent toutefois des compléments pour disposer d'une démonstration complète.

Concernant la suppression de la mesure palliative de réduction du domaine de fonctionnement des réacteurs, l'IRSN estime que la modification de l'alarme RPN 414AA peut être supprimée. Concernant l'alarme RPN 900AA, dans la mesure où la modification est bénéfique et permet de dégager des marges pour l'étude d'APRP BI, l'IRSN estime qu'elle devrait être maintenue en référentiel VD2-VD3, comme en référentiel VD4.

Enfin, dans l'attente des justifications sur le volume du PRI et du dossier de validation du logiciel de thermique utilisé, l'IRSN estime qu'EDF doit apporter dans chaque dossier spécifique de sûreté de recharge de combustible la démonstration du respect du critère d'absence de fusion du combustible en considérant le PRI enveloppe retenu pour la démonstration apportée pour le réacteur n°1 du Tricastin.

Pour le Directeur général et par délégation,
Olivier DUBOIS
Adjoint à la Directrice de l'expertise de sûreté

Annexe 1 à l'avis IRSN n° 2020-00081 du 27 mai 2020

Recommandations de l'IRSN

Recommandation n° 1

Dans l'attente d'éléments de justification complémentaires du caractère enveloppe de l'amas plutonifère retenu et du dossier de validation du logiciel de thermique du combustible utilisé, l'IRSN recommande qu'EDF fournisse, pour chaque réacteur exploité en gestion de combustible PARITÉ MOX, un bilan des marges au risque de fusion de combustible en transitoires de catégorie 2 en considérant un amas de 17 mm³ et 18 %Pu. Ce bilan des marges devra être intégré dans les dossiers de sûreté des recharges (DSS) de ces réacteurs.

Annexe 2 à l'avis IRSN n° 2020-00081 du 27 mai 2020

Observations de l'IRSN

Observation n° 1

L'IRSN estime qu'EDF devrait compléter la démonstration de tenue mécanique de la cale en Zy-4 en transitoires de catégorie 2 en prenant en compte un critère adapté au phénomène mis en jeu et en considérant la gaine à l'état irradié. Par ailleurs, cette démonstration devrait prendre en compte la nature réelle de la liaison opercule-tube de cale.

Observation n° 2

L'IRSN estime qu'EDF devrait compléter la démonstration associée à la tenue mécanique de la cale en acier en transitoires de catégorie 2 en justifiant la limite de déformation uniaxiale retenue et l'applicabilité de la méthode utilisée dans le domaine de température d'intérêt pour la cale. Par ailleurs, cette démonstration devrait prendre en compte la nature réelle de la liaison opercule-tube de cale.

Observation n° 3

L'IRSN estime qu'EDF devrait réaliser des céramographies complémentaires, via des coupes longitudinales et transverses, pour confirmer que l'état de fissuration des pastilles d'extrémités (haute et basse) est similaire à celui d'une pastille en partie courante.

Observation n° 4

Compte tenu de son intérêt pour les transitoires accidentels d'APRP BI, l'IRSN estime qu'EDF devrait maintenir la mesure palliative consistant en la modification de la couleur de l'alarme de pré-sortie de domaine RPN 900 AA en référentiel visite décennale 2 (VD2) et VD3.