



Fontenay-aux-Roses, le 24 septembre 2021

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2021-00159

Objet : Réacteurs électronucléaires EDF – Tous paliers – Instruction des suites du GP relatif aux critères de tenue du combustible – Premier avis

Réf. : [1] Lettre ASN – CODEP-DCN-2021-025021 du 25 mai 2021.
[2] Lettre ASN – CODEP-DCN-2011-013376 du 2 mai 2011.
[3] Lettre ASN – CODEP-DCN-2014-032737 du 24 juillet 2014.
[4] Avis IRSN – 2017-00168 du 22 mai 2017.
[5] Lettre ASN – CODEP-DCN-2019-010454 du 27 mai 2019.

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 et la suffisance de compléments transmis par EDF relatifs aux nouveaux critères de tenue du combustible.

1. CONTEXTE

Dans les réacteurs à eau pressurisée (REP), la gaine des crayons de combustible constitue la première barrière séparant la matière radioactive de l'environnement. Les études déterministes des conditions de fonctionnement de référence visent à démontrer le respect de critères techniques d'acceptation relatifs au comportement de cette première barrière et, plus généralement, du combustible.

Ces critères techniques portent sur des grandeurs représentatives des phénomènes physiques limitatifs, accessibles par le calcul ou mesurables dans le réacteur. Ils sont déterminés sur la base d'expérimentations représentatives des situations rencontrées dans les conditions de fonctionnement de référence¹.

Une grande partie des critères retenus en France par EDF était issue du référentiel de sûreté américain datant des années 1970. Si certains compléments ont été apportés depuis, notamment pour tenir compte des évolutions des conditions d'exploitation des réacteurs, la majorité de ces critères n'avait pas été revue depuis la conception du parc électronucléaire d'EDF, à l'exception de ceux concernant l'accident de perte de réfrigérant primaire² (APRP) qui ont évolué à la suite de l'examen mené en 2010 et en 2014 afin de prendre en compte l'état

¹ Ces critères sont d'autant plus sévères que la fréquence estimée des conditions de fonctionnement est élevée. Ces dernières sont classées en quatre catégories comprenant le fonctionnement normal (catégorie 1), les transitoires incidentels (catégorie 2), les transitoires accidentels de fréquence modérée (catégorie 3) et enfin les transitoires accidentels hypothétiques (catégorie 4).

² L'APRP est un des accidents retenus pour le dimensionnement des équipements de sauvegarde d'un REP. Il correspond à la rupture d'une tuyauterie principale du circuit primaire.

des connaissances sur le sujet, et à l'issue duquel l'ASN a formulé des demandes dans les lettres en références [2] et [3]. C'est pourquoi l'ASN avait demandé que soit réalisé un réexamen ciblé de la pertinence des exigences et des critères relatifs à la tenue du combustible dans le cadre de la préparation d'une réunion du groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires (GPR), dénommée « GP critères » ci-après, tenue le 17 juin 2017. L'objectif de l'expertise menée par l'IRSN [4] était notamment de se prononcer sur l'exhaustivité et la pertinence des critères, en fonction de l'état des connaissances, afin de compléter, si besoin, la démonstration de sûreté.

À l'issue du GP critères, si l'ASN avait considéré que la majorité des évolutions proposées par EDF était acceptable, elle avait toutefois formulé plusieurs demandes dans la lettre en référence [5]. EDF s'était en outre engagé à apporter un certain nombre d'éléments complémentaires.

EDF ayant transmis une grande majorité des éléments attendus, l'ASN a souhaité recueillir l'avis de l'IRSN sur les éléments disponibles à date. Ainsi, en réponse à la lettre de l'ASN en référence [1], l'avis de l'IRSN porte sur les éléments apportés par EDF concernant :

- les critères relatifs à l'ImPG³ retenus pour l'étude de l'accident d'éjection de grappe⁴ (EDG) ;
- l'applicabilité⁵ des critères relatifs à l'ImPG pour les transitoires de retrait incontrôlé de groupe(s) de grappe(s) de commande initié à puissance nulle⁶ (RIGZ) et d'EDG ;
- les critères relatifs à l'oxydation à haute température des gaines en transitoire accidentel (hors APRP).

2. CRITERES RELATIFS A L'IMPG RETENUS POUR L'ETUDE D'EDG

L'étude du transitoire accidentel d'EDG à puissance nulle⁷ vise à s'assurer du respect de plusieurs critères techniques d'acceptation, notamment le critère en variation d'enthalpie⁸.

Dans le cadre de la préparation du GP critères, EDF a défini, pour chaque type de combustible (UO₂ ou MOX) et de matériau de gainage (M5, ZIRLO et ZIRLO Optimisé), des critères en variation d'enthalpie associés à des valeurs limites de largeur de pulse⁹ et de teneur en hydrogène¹⁰. La justification de ces critères nécessitait des compléments qui ont été apportés par EDF après le GP critères ou au cours de la présente expertise.

³ Interaction mécanique entre la pastille et la gaine.

⁴ Le transitoire d'éjection de grappe de commande est l'accident d'insertion de réactivité (en anglais Reactivity-Initiated Accident ou RIA) dimensionnant les limites d'insertion des groupes de grappes de commande. L'apport rapide de réactivité lors d'une éjection de grappe entraîne une excursion de puissance locale dans le combustible au voisinage de la grappe éjectée. Cette énergie est exprimée en calorie par gramme de combustible. La variation d'enthalpie du combustible correspond à cette énergie injectée atténuée des pertes thermiques.

⁵ Les critères de tenue du combustible étant obtenus par l'intermédiaire d'essais sur des crayons de combustible, les critères ne sont applicables que dans des domaines représentatifs des essais réalisés, qui doivent être définis.

⁶ L'incident de RIGZ est un transitoire de réactivité initié à puissance nulle au cours duquel un(des) groupe(s) de grappe(s) est(sont) extrait(s) de manière intempestive à vitesse maximale. Le cœur peut devenir temporairement prompt critique et la puissance du cœur augmente alors très rapidement avant d'être freinée naturellement par les contre-réactions neutroniques du cœur.

⁷ L'étude est réalisée sur l'accident d'EDG initié à puissance nulle dans la mesure où c'est le cas le plus pénalisant.

⁸ Les autres critères vérifiés dans les études de l'accident d'EDG (comme par exemple la pression maximale du circuit primaire ou le nombre de crayons rentrant en crise d'ébullition) ont déjà fait l'objet d'une expertise et ne font pas l'objet du présent avis.

⁹ L'accident d'EDG est un transitoire de réactivité rapide au cours duquel une grappe de commande est éjectée en environ 0,1 seconde (temps considéré dans les études). Lorsque cette EDG se produit à puissance nulle, le cœur peut devenir temporairement prompt critique et la puissance du cœur augmente alors très rapidement avant d'être freinée naturellement par les contre-réactions neutroniques du cœur. Cette phase du transitoire est appelée « pulse de puissance ».

¹⁰ En fonctionnement normal, les gaines des crayons de combustible s'oxydent naturellement. Cette corrosion se traduit notamment par une prise d'hydrogène dans la gaine qui doit toutefois rester limitée et maîtrisée puisqu'elle est de nature à fragiliser sa tenue mécanique.

Pour le combustible UO_2 à gainage M5, EDF a défini, conformément à son engagement, une limite de largeur de pulse pour le transitoire d'EDG¹¹. **La limite de largeur de pulse retenue par EDF est en accord avec la base expérimentale et n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.** Par ailleurs, le critère en variation d'enthalpie reste applicable jusqu'à une certaine limite de teneur en hydrogène. L'établissement de cette limite a fait l'objet d'une analyse dont les conclusions sont présentées dans le paragraphe 3.

Pour le combustible MOX à gainage M5, EDF a réévalué, conformément à son engagement, le critère de variation d'enthalpie à partir d'essais d'insertion de réactivité réalisés spécifiquement sur du combustible MOX¹². Concernant les limites d'applicabilité, EDF retient la largeur de pulse et la teneur en hydrogène associées à l'essai limitatif. **L'IRSN estime donc satisfaisants le critère en variation d'enthalpie et les limites d'applicabilité associées au combustible MOX à gainage M5.**

Pour le combustible UO_2 à gainage ZIRLO et ZIRLO Optimisé, en réponse à la demande n° 1 de l'ASN [5], EDF a présenté de nouveaux calculs prenant en compte les incertitudes sur les données expérimentales¹³. Par ailleurs, l'IRSN note qu'ils ont été réalisés avec une nouvelle version du logiciel de thermomécanique utilisé pour étudier les transitoires de réactivité à pulse de puissance dont la validation doit faire l'objet d'une expertise. **L'IRSN estime donc satisfaisants le critère, sous réserve des conclusions de l'expertise à venir de la validation de la nouvelle version du logiciel de thermomécanique utilisé, ainsi que les limites d'applicabilité spécifiques au combustible UO_2 à gainage ZIRLO ou ZIRLO Optimisé.**

3. APPLICABILITE DES CRITERES RELATIFS A L'IMPG POUR LES TRANSITOIRES DE RIGZ ET D'EDG

Historiquement, la démonstration de sûreté considère qu'en fonctionnement normal la corrosion de la gaine ne doit pas conduire à une épaisseur de zircone dépassant $100 \mu m$ ¹⁴. Si l'on peut considérer que cette limite resterait adaptée pour le gainage ZIRLO, elle n'a plus de sens pour les gainages dits « avancés » tels que le M5 et le ZIRLO Optimisé. En effet, l'utilisation de ces alliages conduit à des épaisseurs de zircone en exploitation significativement plus faibles que celles mesurées pour le Zircaloy-4 (Zy-4) ou le ZIRLO. Dans le cadre de la préparation du GP critères, EDF a donc proposé de ne plus vérifier une épaisseur limite d'oxyde en fonctionnement normal. En remplacement, EDF a proposé de considérer la teneur en hydrogène des gainages pour définir les limites d'applicabilité d'autres critères relatifs au combustible¹⁵. En effet, celle-ci provient de l'oxydation de la gaine pendant l'irradiation et affecte sa tenue dans certaines conditions de fonctionnement. Ainsi, EDF propose des critères relatifs à la tenue mécanique des gaines des crayons de combustible en situation incidentelle (RIGZ) ou accidentelle (EDG, cf.§2) et applicables jusqu'à des teneurs en hydrogène limites qui dépendent du gainage (cf. §3.1). Ces limites doivent par la suite être vérifiées au titre de la conception thermomécanique du crayon de combustible (cf. §3.2).

¹¹ En effet, EDF avait considéré qu'il n'était pas nécessaire de fixer une largeur de pulse dans la mesure où les essais valorisés ont été réalisés avec de très faibles largeurs de pulse, ce qui est pénalisant. Les échanges au cours de l'expertise menée dans le cadre de la préparation du GP critères ont amené EDF à revoir sa position initiale.

¹² EDF ne valorisait pas d'essais réalisés sur du combustible MOX, sa démarche combinant des résultats d'essais sur combustible UO_2 et des simulations numériques.

¹³ Les incertitudes portent sur l'énergie injectée lors de l'essai et sur l'épaisseur d'oxyde du crayon testé.

¹⁴ En fonctionnement normal, la température externe de gaine atteignant environ $350 \text{ }^\circ\text{C}$, la corrosion de sa couche externe par l'eau du circuit primaire est lente : pour les gainages historiques (Zy-4 et ZIRLO), EDF retenait une épaisseur limite de corrosion de $100 \mu m$. EDF n'introduit plus d'assemblage de combustible neuf avec du gainage en Zy-4 depuis 2016, et ce combustible ne devrait plus être rechargé en cœur à partir de 2022.

¹⁵ Dans ce nouveau référentiel, la teneur en hydrogène n'est pas considérée comme un critère de conception à part entière.

3.1. LIMITES D'APPLICABILITE EN TENEUR D'HYDROGENE

En fonction du transitoire, du type de combustible et du matériau de gainage, EDF a défini des critères en s'appuyant sur l'interprétation d'essais représentatifs de transitoires incidentels et accidentels et réalisés sur des tronçons de gaines en Zircaloy-4. Les teneurs en hydrogène des tronçons de gaine testés sont considérées pour définir la limite d'applicabilité du critère :

- lorsque la teneur en hydrogène du tronçon de gaine testé est mesurée, EDF retient cette valeur pour définir la limite d'applicabilité du critère. C'est notamment le cas des essais valorisés pour définir les critères en variation d'enthalpie pour le transitoire d'EDG pour les crayons de combustible UO₂ à gainages ZIRLO et ZIRLO Optimisé et les crayons de combustible MOX à gainage M5. Ce point n'appelle pas de remarque particulière de la part de l'IRSN ;
- lorsque seule l'épaisseur d'oxyde est mesurée, il devient alors nécessaire de déterminer la teneur en hydrogène présente dans le tronçon de gaine. EDF a défini deux corrélations reliant l'épaisseur d'oxyde et la teneur en hydrogène¹⁶ permettant la distinction des nuances de Zircaloy des tronçons de gaine testés¹⁷. Les essais retenus permettent de définir les critères :
 - en variation d'enthalpie pour le transitoire d'EDG pour les crayons de combustible UO₂ à gainage M5. La corrélation « basse teneur » en étain est utilisée,
 - en déformation circonférentielle de gaine pour le transitoire de RIGZ pour les crayons de combustible (UO₂ ou MOX) à gainages M5, ZIRLO et ZIRLO Optimisé. La corrélation « toute teneur » en étain est utilisée.

En réponse à la demande n° 3 de l'ASN [5], EDF a réévalué la corrélation « basse teneur » en étain¹⁸ compte tenu du faible nombre de points de mesures disponibles. **Si EDF n'a pas apporté d'éléments suffisants pour justifier cette réévaluation, il a toutefois indiqué au cours de l'expertise que son utilisation n'est plus nécessaire compte tenu de la disponibilité d'une mesure directe de la teneur en hydrogène pour l'essai concerné. Dès lors, EDF retient cette valeur conformément à la pratique rappelée ci-dessus.**

Concernant la corrélation « toute teneur » en étain, celle-ci repose sur de nombreuses données et présente une qualité statistique satisfaisante [4]. **L'IRSN estime donc satisfaisante l'utilisation de cette corrélation pour déterminer la teneur en hydrogène en fonction de l'épaisseur de la couche d'oxyde.**

En conclusion, l'IRSN estime satisfaisantes les limites d'applicabilité en teneur en hydrogène des critères relatifs à l'ImPG pour les transitoires de RIGZ et d'EDG retenues par EDF.

3.2. VERIFICATION DES LIMITES D'APPLICABILITE RELATIVES A LA TENEUR EN HYDROGENE DANS LES RAPPORTS DE CONCEPTION THERMOMECHANIQUE

Conformément à son engagement pris à l'issue du GP critères, EDF a adapté la démarche visant à s'assurer du respect des limites d'applicabilité en teneur en hydrogène dans les rapports de conception thermomécanique. La nouvelle démarche se décompose en deux étapes :

- la détermination, à l'aide des modèles de corrosion best-estimate implémentés dans les logiciels de thermomécanique, de l'épaisseur d'oxyde enveloppe atteinte en fonctionnement normal. Pour ce faire,

¹⁶ Ces deux corrélations, « basse teneur » et « toute teneur » en étain, sont établies à partir de mesures de l'épaisseur d'oxyde et de la teneur en hydrogène de crayons irradiés sur le parc français.

¹⁷ La composition chimique de l'alliage Zircalloy-4 a été ajustée par les fournisseurs de combustible REP dans les années 90 afin d'améliorer son comportement vis-à-vis de la corrosion en réacteur. La base de données épaisseur d'oxyde/teneur en hydrogène est historiquement constituée de mesures réalisées sur deux nuances dites « haute teneur » (1,5 %) et « basse teneur » (1,3 %) en étain.

¹⁸ La corrélation initialement retenue par EDF reposait sur un faible nombre de points et ne prenait pas en compte les incertitudes de mesure et la dispersion des données.

EDF applique la démarche usuelle qui s'appuie sur l'utilisation d'historiques de puissance enveloppes¹⁹ de la gestion de combustible concernée, ce que l'IRSN juge satisfaisant ;

- la conversion de l'épaisseur maximale d'oxyde en une teneur maximale en hydrogène, à partir de corrélations reliant l'épaisseur d'oxyde et la teneur en hydrogène. Ces corrélations²⁰ couvrent de manière pénalisante tous les points de mesures disponibles, ce qui est également satisfaisant.

L'IRSN estime donc satisfaisante la démarche retenue par EDF visant à s'assurer dans les rapports de conception thermomécanique des crayons de combustible que les limites d'applicabilité des critères sont respectées.

4. CRITERES RELATIFS A L'OXYDATION A HAUTE TEMPERATURE DES GAINES EN TRANSITOIRE ACCIDENTEL (HORS APRP)

Lors de certaines conditions de fonctionnement de dimensionnement de catégories 3 et 4, les gaines de crayons de combustible peuvent atteindre des températures élevées à la suite de leur entrée en crise d'ébullition²¹ et sont alors fragilisées par leur oxydation à haute température.

Dans le cadre de la préparation du GP critères, EDF a proposé, pour ces conditions de fonctionnement, de compléter le critère technique d'acceptation historique en température maximale de gaine de 1482 °C par une limite en taux d'oxydation (ou ECR pour Equivalent Cladding Reacted). Cette nouvelle limite, qui dépend de la température maximale atteinte par la gaine, permet également de prendre en compte le temps pendant lequel la gaine subit des températures élevées. À la suite de l'analyse de l'IRSN et conformément à son engagement, EDF a complété sa démarche²² de définition du critère en ECR.

Pour les crayons ballonnés, en l'absence de nouvelles données²³, EDF prévoit de reconduire le critère en ECR retenu pour l'étude de l'APRP qui est en cours d'expertise dans un autre cadre. En effet, compte tenu des caractéristiques du transitoire d'APRP, EDF estime que ce dernier est plus pénalisant que le critère historique de 1482 °C. **L'IRSN estime acceptable dans le principe de reconduire le critère d'acceptabilité en ECR spécifique à l'APRP, sous réserve des conclusions de l'expertise en cours [3], pour les crayons ballonnés, dans les études des conditions de fonctionnement de dimensionnement de catégories 3 et 4.**

Pour les crayons non ballonnés, EDF prévoit de conserver le critère historique de 1482 °C pour les crises d'ébullition qui durent moins de 17 secondes et a réinterprété les essais sélectionnés pour la définition du critère en ECR pour les crises d'ébullition de durée supérieure. En particulier, EDF a apporté des éléments permettant de justifier que la pénalisation forfaitaire, appliquée à la température des essais de la base de définition du critère en ECR, permet de couvrir les incertitudes associées aux essais. **L'IRSN estime acceptable cette pénalisation**

¹⁹ Il s'agit de l'évolution de la puissance linéique d'un crayon de combustible au cours d'une campagne, utilisée pour les études de conception.

²⁰ EDF a défini une corrélation par matériau de gainage (M5, ZIRLO et ZIRLO Optimisé).

²¹ La crise d'ébullition correspond à l'apparition d'un film de vapeur entourant la gaine qui dégrade son refroidissement et conduit à sa montée rapide en température.

²² Les compléments portent sur la prise en compte exhaustive des phénomènes de fragilisation du combustible dans ces conditions de fonctionnement ainsi que sur la prise en compte des incertitudes sur les données expérimentales utilisées.

²³ EDF envisageait la réalisation d'un programme d'étude dédié. Ce programme n'a, à date, pas permis d'apporter des éléments complémentaires pour ce cas de figure.

forfaitaire pour interpréter l'essai limitatif permettant de définir le critère en ECR pour les crises d'ébullition de durées supérieures à 17 secondes.

Toutefois, l'IRSN souligne que les essais valorisés par EDF ont tous été réalisés sur des tronçons de crayons de combustible non ballonnés à gainage Zircaloy-4. De plus, l'analyse des résultats des nouveaux essais d'oxydation dans des conditions représentatives de l'APRP met en évidence une potentielle dépendance entre l'ECR et le matériau de gainage²⁴ pour les crayons ballonnés. Si EDF considère que ce constat n'est pas directement transposable au cas de crayons non ballonnés, il n'a toutefois pas apporté d'éléments étayés démontrant l'absence de l'effet matériaux sur le critère en ECR. **Ceci conduit l'IRSN à formuler l'observation en annexe.**

5. CONCLUSION

Dans le présent avis, l'IRSN a analysé les compléments apportés par EDF à la suite du GP critères concernant les critères techniques d'acceptation relatifs à la corrosion des gaines et le risque de rupture de gaine par interaction mécanique entre la pastille et la gaine.

Concernant le risque de rupture de gaine par ImPG, l'IRSN estime satisfaisants les critères en variation d'enthalpie, à vérifier dans les études d'EDG, afin de garantir l'absence de ce risque. De plus, l'IRSN estime satisfaisantes les limites d'applicabilité de ces critères et de celui spécifique au transitoire de RIGZ, exprimées en teneur en hydrogène maximale de la gaine des crayons de combustible, à vérifier dans les rapports de conception thermomécanique des assemblages qui présentent à cet égard une nouvelle démarche de vérification jugée satisfaisante.

Concernant les critères relatifs à la corrosion des gaines pour les accidents de catégories 3 et 4 (hors APRP), l'IRSN estime acceptable le critère en ECR défini pour les crayons ballonnés et le maintien du critère historique pour les crayons non ballonnés dans le cas d'une crise d'ébullition inférieure à 17 secondes. Pour ce qui concerne le cas des crayons non ballonnés pour les transitoires présentant une crise d'ébullition de durée supérieure à 17 secondes, l'IRSN estime qu'EDF devrait consolider le critère en ECR retenu par des résultats d'essais complémentaires sur les gainages représentatifs des gestions de combustible actuelles, ce qui fait l'objet d'une observation.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

²⁴ La base expérimentale spécifique à l'APRP contient des essais réalisés sur différents matériaux de gainage (Zy-4, M5, ZIRLO).

ANNEXE A L'AVIS IRSN N° 2021-00159 DU 24 SEPTEMBRE 2021

Observation de l'IRSN

L'IRSN estime qu'EDF devrait réaliser des essais complémentaires d'assèchement sur des gainages M5, ZIRLO et ZIRLO Optimisé afin de consolider le critère technique d'acceptation, dépendant du taux d'oxydation (ECR) et de la température maximale atteinte par la gaine, appliqué aux crayons de combustible non ballonnés et à vérifier dans les études des conditions de fonctionnement et de dimensionnement de catégories 3 et 4 (hors APRP) au cours desquelles une crise d'ébullition supérieure à 17 secondes est attendue.