

Fontenay-aux-Roses, le 11 mars 2021

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2021-00040

Objet : Réacteur EPR de Flamanville - Caractéristiques du matériau d'apport d'une électrode enrobée utilisée pour les soudures des circuits secondaires principaux.

Réf. : [1] Lettre ASN - CODEP-DEP-2021-002797 du 20 novembre 2020.
[2] Avis IRSN – 2020-00088 du 8 juin 2020.

Pour la réalisation des circuits secondaires principaux (CSP) de l'EPR de Flamanville, Électricité de France (EDF) a retenu une nouvelle nuance d'acier au carbone-manganèse avec des caractéristiques mécaniques de traction supérieures à celles des nuances utilisées pour les CSP des réacteurs du parc en fonctionnement, notamment ceux de 1450 MWe. Le dossier matériau des CSP de l'EPR de Flamanville qui synthétise l'ensemble des caractéristiques mécaniques, prévoyait à ce titre des essais de résilience¹ à 0 °C et à -20 °C pour les tuyauteries², à l'identique des essais réalisés pour les CSP des réacteurs de 1450 MWe. Certains essais de résilience réalisés à -20 °C sur des assemblages témoins de soudage, exigés par le référentiel technique d'EDF, ont présenté des valeurs individuelles en deçà de la valeur spécifiée de 47 Joules (J).

Le matériau d'apport concerné par ces écarts a été utilisé pour les soudures réalisées manuellement à l'électrode enrobée sur les tuyauteries de vapeur principales (VVP) en exclusion de rupture et sur celles du circuit d'alimentation normale en eau des générateurs de vapeur (ARE), qui font partie des CSP.

Pour les tuyauteries de vapeur principales, ces faibles valeurs de résilience et la détection d'autres écarts, notamment la présence de défauts inacceptables, ont amené EDF à réparer les soudures des tuyauteries VVP concernées avec un nouveau matériau d'apport, répondant aux exigences du référentiel d'exclusion de rupture. De sorte qu'après la remise à niveau des soudures des tuyauteries VVP, le matériau d'apport d'origine ne subsistera que pour les soudures des tuyauteries ARE. Ces tuyauteries n'étant pas en exclusion de rupture, EDF considère que les caractéristiques mécaniques des soudures concernées sont satisfaisantes et a fait évoluer son référentiel technique pour n'exiger pour ces soudures que des essais de résilience à 0°C. En conséquence, EDF a transmis, pour les soudures réalisées avec ce matériau d'apport, un dossier matériau spécifique qui précise les caractéristiques mécaniques à retenir pour les analyses du risque de rupture brutale de ces soudures.

¹ La résilience est la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie quand il se déforme sous l'effet d'un choc en présence d'une entaille.

² Tubes et soudures les reliant.

Par lettre en référence [1], l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a souhaité recueillir l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur les points suivants de la démarche proposée par EDF pour les soudures des tuyauteries ARE de l'EPR de Flamanville réalisées avec ce matériau d'apport :

- la caractérisation des propriétés du matériau des soudures réalisées sur les tuyauteries ARE dans le domaine de transition fragile-ductile³ et dans le domaine ductile ;
- la validité de la méthode utilisée pour établir les données d'entrée du dossier de rupture brutale ;
- la comparaison des données matériaux utilisées pour les soudures des tuyauteries ARE de l'EPR de Flamanville avec celles des réacteurs de 1450 MWe.

Une synthèse de l'expertise de l'IRSN et les principales conclusions associées sont présentées ci-après.

Caractérisation des propriétés du matériau des soudures réalisées sur les tuyauteries ARE dans le domaine de transition fragile-ductile et dans le domaine ductile

EDF a choisi de procéder à des essais mécaniques sur des assemblages soudés ou d'utiliser des résultats déjà existants afin de définir, pour les soudures des tuyauteries ARE réalisées avec ce matériau d'apport, les caractéristiques mécaniques suivantes :

- la corrélation résilience-ténacité⁴ dans le domaine de transition fragile-ductile ;
- la résistance à la déchirure dans le domaine ductile ;
- la caractérisation du décalage de la température de transition dû au vieillissement sous déformation.

Le dernier point relatif au vieillissement sous déformation a fait l'objet d'un avis spécifique de la part de l'IRSN [2] et n'est donc pas abordé dans le présent avis.

La base de données est constituée de résultats d'essais issus d'une maquette réalisée au centre technique de Framatome et de chutes d'assemblages témoins couvrant les soudures des tuyauteries ARE. La maquette a permis de réaliser une cinquantaine d'essais de résilience à différentes températures dans les domaines fragile et de transition fragile-ductile. Dans le domaine ductile, une trentaine d'essais de déchirure ont été réalisés sur les assemblages témoins à différentes températures. La limite entre le domaine de transition fragile-ductile et le domaine ductile a été déterminée à 90 °C par des mesures de fibrosité⁵ et des essais de déchirure. EDF a aussi réalisé une vingtaine d'essais de ténacité sur des éprouvettes prélevées sur la maquette dans le domaine de transition fragile-ductile. À partir des résultats de ces essais, EDF a défini une courbe de transition de résilience minimale et un niveau de résistance à la déchirure dans le domaine ductile. Dans ce dernier domaine, les valeurs les plus basses sont obtenues vers 200°C, ce qui est appelé « *creux de ductilité* ».

L'IRSN note que la maquette a essentiellement été utilisée pour fournir des données dans le domaine de transition fragile-ductile et les chutes d'assemblages témoins ont été utilisées pour fournir des données dans le domaine ductile. La maquette a été fabriquée par une société différente de celle ayant réalisé les soudures sur site et plusieurs années après leur réalisation : ce cas n'est pas prévu par le code de construction RCC-M utilisé pour les soudures de production. Même si la maquette a été réalisée avec l'objectif de se rapprocher au plus près des soudures réalisées sur site, en retenant par exemple des lots de matériaux d'apport ayant été utilisés sur site, l'IRSN estime que cette maquette ne peut pas être considérée comme complètement représentative,

³ Domaine de température conduisant à un comportement du matériau intermédiaire entre le comportement purement fragile observable à basse température et le comportement purement ductile observé à plus haute température.

⁴ La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure.

⁵ Évaluation sur un faciès d'une éprouvette de résilience rompue de la proportion de rupture fragile dans le matériau (une rupture complètement fragile se traduit par un faciès d'aspect 100% cristallin, une rupture complètement ductile se traduit par un faciès d'aspect 100% fibreux).

en particulier les conditions de réalisation ne sont pas similaires. De plus, selon EDF, cette maquette n'a pas été réalisée dans l'optique d'obtenir des valeurs minimales de résilience et de ténacité, compte tenu des paramètres du procédé de soudage. Quant aux assemblages témoins, certains ont fait l'objet de constats d'écart, ce qui peut, selon l'IRSN, mettre en cause leur représentativité.

S'agissant des propriétés minimales des matériaux et en particulier des soudures, l'IRSN estime que leur établissement doit s'appuyer sur des populations conséquentes de résultats les plus représentatifs, notamment lorsqu'il s'agit de les utiliser pour la justification *a posteriori* du comportement des matériaux ou pour le traitement d'écarts sur des équipements importants pour la sûreté. Les caractéristiques mécaniques proposées par EDF pour les soudures des tuyauteries ARE reposent — pour l'IRSN — sur une base de résultats limités et dont la représentativité n'est pas acquise. Il convient donc de la compléter en particulier par des essais de résilience et de ténacité dans le domaine de transition fragile-ductile sur des assemblages soudés en nombre suffisant et représentatifs des soudures réalisées sur site. L'IRSN estime nécessaire le prélèvement de soudures réalisées sur site pour expertise, comme cela a été fait pour d'autres soudures des tuyauteries VVP. Des essais pourront également être menés dans le domaine ductile pour confirmer l'absence d'impact du « *creux de ductilité* » observé à 200 °C sur la valeur retenue de la résistance à la déchirure pour les analyses du risque de rupture brutale. Le choix des assemblages soudés à prélever devra être justifié en se basant sur les paramètres et les conditions de réalisation. **Cela conduit l'IRSN à formuler la recommandation en annexe.**

Validité de la méthode utilisée pour établir les données d'entrée du dossier de rupture brutale

À partir des résultats d'essais disponibles, EDF définit les caractéristiques minimales du matériau d'apport à prendre en compte dans les analyses du risque de rupture brutale pour les soudures des tuyauteries ARE réalisées avec ce matériau. Pour cela, EDF utilise une méthode proche de celle mise en œuvre pour les CSP des réacteurs de 1450 MWe.

Dans le domaine de transition fragile-ductile, la courbe de résilience établie à partir des résultats d'essais permet de garantir le respect des critères de résilience requis à 0°C par le code RCC-M pour les soudures de niveau 1. À partir de la pente de cette courbe, EDF calcule la température d'indexation de la courbe de ténacité minimale du code RCC-M. La définition de cette température d'indexation est une évolution de la méthode utilisée pour les réacteurs de 1450 MWe. La vingtaine d'essais de ténacité réalisés sur maquette confirment que la courbe retenue est bien inférieure dans le domaine de transition fragile-ductile aux résultats d'essais.

Dans le domaine ductile, EDF retient une valeur de 100 kJ/m² pour la résistance à la déchirure ductile pour les soudures des tuyauteries ARE de l'EPR de Flamanville. Il s'agit d'une valeur inférieure à l'ensemble des résultats de déchirure ductile disponibles. Cette valeur est aussi retenue comme limite supérieure de la courbe de ténacité minimale dans le domaine de transition fragile-ductile.

L'IRSN considère que la méthode proposée pour définir les caractéristiques minimales dans les domaines de transition fragile-ductile et ductile, est acceptable dans son principe.

Comparaison des données matériaux utilisées pour les soudures des tuyauteries ARE de l'EPR de Flamanville avec celles des réacteurs de 1450 MWe

La comparaison de l'IRSN se limite à l'aspect matériau des soudures détensionnées des tuyauteries ARE de l'EPR de Flamanville avec celles des réacteurs de 1450 MWe.

De par leurs caractéristiques mécaniques, les soudures des tuyauteries ARE des réacteurs de 1450 MWe sont sollicitées uniquement dans le domaine de température correspondant au palier ductile ou quasi-ductile y compris à l'état vieilli. En revanche, pour le réacteur EPR de Flamanville, compte tenu du matériau d'apport utilisé pour leur réalisation, les soudures des tuyauteries ARE sont sollicitées dans le domaine de transition fragile-ductile pour certaines situations de fonctionnement, d'autant plus si le vieillissement du matériau est pris en

compte. En outre, l'IRSN souligne que, au vu des caractéristiques de certains assemblages témoins, certaines soudures pourraient être sollicitées dans le domaine fragile. Ceci dépendra de la valeur de décalage de la température de transition fragile-ductile induit par le vieillissement sous déformation en cours d'établissement dans un programme dédié.

En ce qui concerne les caractéristiques mécaniques retenues pour les analyses à la rupture brutale, la comparaison des valeurs minimales de ténacité des soudures des tuyauteries ARE des réacteurs de 1450 MWe et du réacteur EPR de Flamanville, montre que celles de l'EPR de Flamanville sont en retrait. Ceci est aussi le cas pour la température de fin du domaine de transition fragile-ductile. Par contre, la valeur de la résistance à la déchirure ductile diffère peu.

Enfin, l'IRSN observe que les soudures réalisées manuellement à l'électrode enrobée sur les tuyauteries ARE de l'EPR de Flamanville présentent une résilience plus faible que celle du métal de base des tubes.

Les soudures détensionnées des tuyauteries ARE de l'EPR de Flamanville présentent donc des caractéristiques inférieures à celles des soudures équivalentes des tuyauteries ARE des réacteurs de 1450 MWe. Cette différence provient, selon l'IRSN, du changement de matériau d'apport et de la mise en œuvre associée.

Conclusion

À l'issue de la présente expertise, l'IRSN estime que le dossier matériau relatif aux soudures des tuyauteries ARE de l'EPR Flamanville doit être complété avec des données issues de soudures prélevées sur site afin de conforter le caractère conservatif des caractéristiques mécaniques retenues dans les analyses du risque de rupture brutale de ces soudures.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Thierry PAYEN

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

ANNEXE A L'AVIS IRSN N° 2021-00040 DU 11 MARS 2021

Recommandation de l'IRSN

L'IRSN recommande qu'EDF complète la base de données utilisée pour définir les caractéristiques mécaniques minimales retenues dans les analyses de rupture brutale des soudures réalisées au moyen de l'électrode enrobée utilisée pour le circuit ARE avec des données issues de soudures prélevées sur site, représentatives des circuits secondaires principaux du réacteur EPR de Flamanville. Le choix des soudures devra être justifié au regard des paramètres de soudage et des conditions de réalisation sur site influençant la ténacité et les caractéristiques de résilience.