

Fontenay-aux-Roses, le 28 juin 2022

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2022-00131

Objet : EDF - REP - Soudures des circuits auxiliaires du circuit primaire principal affectées par la corrosion sous contrainte - Analyse du risque de rupture brutale.

Réf. : Saisine ASN - CODEP-DEP-2022-001563 du 11 février 2022.

Lors de la deuxième visite décennale du réacteur n° 1 de la centrale nucléaire de Civaux, conformément au programme de base de maintenance préventive (PBMP), EDF a mis en œuvre des examens non destructifs sur deux soudures (repérées A11 et A12) du système d'injection de sécurité (RIS)¹ connecté au circuit primaire principal en branche froide, afin de détecter d'éventuelles fissures de fatigue thermique. Des indications ont été mises en évidence lors de ces examens et une extension des contrôles aux soudures voisines a été réalisée conformément aux dispositions prévues dans le PBMP. Les expertises métallurgiques réalisées sur les composants déposés ont permis de conclure à la présence de fissures intergranulaires d'orientation circonférentielle, situées à proximité du cordon de soudure, dont les dimensions peuvent atteindre l'ensemble de la circonférence et plusieurs millimètres de hauteur. Concomitamment, un examen non destructif a mis en évidence des indications similaires sur le réacteur n° 1 de la centrale nucléaire de Penly au niveau d'une soudure (repérée A18) du circuit RIS connecté en branche froide du circuit primaire. Les expertises métallurgiques réalisées ont permis à EDF d'établir que l'origine de ces fissures est un phénomène de corrosion sous contrainte (CSC) des aciers inoxydables austénitiques écrouis² en milieu primaire non pollué.

Par la saisine en référence, l'ASN a sollicité l'avis de l'IRSN sur les justifications de la tenue mécanique des zones concernées par la présence de fissures de CSC, en s'appuyant notamment sur les études du risque de rupture brutale réalisées pour les soudures A11 du palier N4 (réacteurs de 1450 MWe) et A18 du palier P'4 (réacteurs de 1300 MWe). L'expertise de l'IRSN se focalise sur les données matériaux, les cumuls de chargements considérés, les coefficients de sécurité retenus et la méthodologie d'analyse du risque de rupture brutale.

L'enjeu associé aux défauts de corrosion sous contrainte dans un acier inoxydable austénitique est le risque de déchirure ductile instable en cas de chargement thermomécanique excessif. **Ce risque est analysé par EDF, soit**

-
- ¹ Le circuit RIS a pour fonction d'injecter de l'eau à forte concentration en bore en cas de baisse de pression anormale du circuit primaire. Cette injection « de sécurité » est destinée à refroidir le cœur et à maîtriser sa réactivité, notamment en cas de brèche sur le circuit primaire. En fonctionnement normal, il n'y a aucune circulation d'eau dans ces lignes.
- ² L'acier inoxydable austénitique est un alliage de fer, chrome et nickel à faible teneur en carbone. Un métal écroui est un métal qui a subi une déformation permanente (déformation plastique).

en s'appuyant sur les hypothèses du dossier de référence réglementaire (DRR)³ (analyses dites codifiées), soit en s'appuyant sur un corps d'hypothèses plus réalistes selon EDF (analyses dites réalistes).

Pour étudier le risque de rupture ductile, le code RSE-M⁴ propose deux options : une analyse enveloppe des risques d'amorçage et d'instabilité de la déchirure ductile (option 1) et une analyse de manière séparée de ces deux risques (option 2). En règle générale, la deuxième option est moins pénalisante, car elle permet une application de coefficients de sécurité moins élevés pour l'analyse du risque d'amorçage de la déchirure ductile. Pour les analyses réalisées sur les soudures A11 et A18, EDF a fait le choix d'étudier de manière enveloppe le risque d'amorçage de la déchirure et le risque d'instabilité de la déchirure. **Ceci est satisfaisant. Il est toutefois à noter qu'une valorisation de l'option 2 dans les futures analyses pourrait conduire à revoir à la hausse les dimensions de défaut critique⁵ actuellement obtenues avec les analyses menées selon l'option 1.**

L'absence de risque d'amorçage de la déchirure est vérifiée en comparant la force fissurante, représentée par l'intégrale de Rice (J), à la limite d'amorçage de la déchirure du matériau $J_{0,2}$ déterminée à partir de sa ténacité⁶. L'intégrale J peut être calculée soit par les formules analytiques codifiées dans le RSE-M (méthode J sous chargements thermomécaniques combinés), soit par des calculs aux éléments finis sur la base de modèles tridimensionnels avec modélisation de la fissure. **La mise en œuvre par EDF dans ses analyses des méthodes de calcul de J, par formules analytiques ou par éléments finis, n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.**

Le risque d'amorçage de la déchirure est analysé par EDF pour un défaut situé dans la soudure (métal déposé) et dans le métal de base (zone affectée mécaniquement⁷, où les fissures de CSC sont détectées). Seule la ténacité du métal déposé est établie dans le code RSE-M, car elle est plus faible que la ténacité du métal de base. Dans le cadre du présent dossier, EDF a mené une étude bibliographique pour définir une valeur de ténacité minimale pour le métal de base dans un état écroui et vieilli. Selon l'IRSN, au vu des différents éléments issus de la littérature, la définition de cette valeur minimale de ténacité pour le métal de base est acceptable. Toutefois, l'IRSN s'interroge sur la capacité des essais issus de la littérature, réalisés à partir de fissures amorcées par fatigue, à reproduire le comportement d'une fissure de corrosion sous contrainte. **Sur ce point, EDF s'est engagé (cf. Annexe 2) à réaliser des expertises dans les pièces déposées afin de déterminer la ténacité locale du matériau dans la zone de présence des fissures de CSC. Ceci est satisfaisant.**

Par ailleurs, EDF a pris en compte l'écrouissage du matériau dans le calcul de la force fissurante J pour l'analyse codifiée du défaut postulé dans le métal de base de la soudure A11 du palier N4. Le niveau d'écrouissage minimal dans la zone proche du joint soudé est estimé à partir des mesures de dureté réalisées sur un joint soudé déposé et de corrélations entre la dureté et la déformation plastique de l'acier inoxydable austénitique. L'IRSN note que l'écrouissage du matériau peut affecter, d'une part la ténacité du matériau, d'autre part le calcul de la force fissurante. L'effet défavorable de l'écrouissage sur la ténacité est pris en compte dans la définition de la valeur de ténacité minimale pour un matériau à l'état vieilli et écroui. L'effet de l'écrouissage dans le calcul de la force fissurante J peut être favorable ou défavorable en fonction de la nature primaire ou secondaire des chargements⁸. L'IRSN s'interroge sur la prise en compte de l'écrouissage à travers une courbe de traction monotone du matériau écroui sachant que la zone affectée mécaniquement était pré-déformée lors des cycles thermiques de soudage. Par ailleurs, les seules mesures disponibles sont des mesures de dureté, qui établissent un niveau d'écrouissage « global » alors que les aciers de type inoxydable austénitique présentent un

³ Les dossiers de référence réglementaires (DRR) apportent les justifications requises pour les équipements relevant de la réglementation des appareils à pression.

⁴ Règles de surveillance en exploitation des matériels mécaniques des îlots nucléaires REP.

⁵ Le défaut critique est le plus petit défaut dont la taille conduit à un risque de rupture.

⁶ La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure.

⁷ La zone affectée mécaniquement est la zone proche du cordon de soudure dans laquelle le métal est écroui par les cycles de soudage

⁸ Dans le cas général, un chargement est qualifié de primaire lorsqu'il résulte de l'application d'une force sur une structure, il est qualifié de secondaire lorsqu'il résulte de l'imposition de déplacements.

comportement à écrouissage cinématique, c'est-à-dire un comportement dépendant de la direction des chargements à l'origine de l'écrouissage. **EDF s'est engagé (cf. Annexe 2) à réaliser des essais de traction dans la soudure et dans la zone affectée mécaniquement, afin de mieux caractériser le comportement des matériaux dans ces zones. Pour l'IRSN, cet engagement est satisfaisant sous réserve que les essais envisagés par EDF soient réalisés dans plusieurs directions de sollicitation, notamment dans la direction transverse à la soudure qui sollicite les défauts de CSC en ouverture.**

Dans le cadre des analyses réalistes dont l'objectif est d'étudier le risque de rupture en support à des études de sûreté, EDF a fait le choix d'employer un corps d'hypothèses moins pénalisantes que dans les études codifiées. Concernant les chargements retenus, EDF n'a notamment pas réalisé de cumuls entre les transitoires thermohydrauliques les plus pénalisants et les séismes usuellement réalisés dans une approche codifiée. En cours d'expertise, EDF a apporté des éléments de justification pour écarter le risque d'apparition, de manière concomitante, de chargements sismique et thermohydraulique initié par le séisme. **Dans le cadre des analyses réalistes, dont l'objectif n'est pas une justification de maintien en l'état de fissures de CSC sur la durée d'exploitation du réacteur, mais une appréciation plus précise du risque de rupture en support à des études de sûreté, ces hypothèses de chargement sont jugées acceptables par l'IRSN. De même, l'IRSN ne remet pas en cause l'application du coefficient de sécurité de 1,1 retenu par EDF pour étudier l'ensemble des situations de chargement dans les analyses « réalistes ».**

Dans l'ensemble des analyses réalisées, l'effet potentiel des contraintes résiduelles de soudage vis-à-vis du risque de rupture ductile n'est pas pris en compte par EDF. À ce sujet, EDF considère que les contraintes résiduelles constituent des chargements secondaires qui peuvent être relaxés par la déformation plastique. Sur ce point, l'IRSN souligne que des travaux issus de la littérature permettent d'établir l'impact des contraintes résiduelles en fonction de l'intensité du chargement primaire sur le risque de rupture ductile. Selon ces travaux, l'augmentation du niveau de chargement primaire réduit l'influence des contraintes résiduelles, mais l'effet des contraintes résiduelles ne devient négligeable que lorsque le niveau de chargement primaire est élevé, conduisant à une plasticité étendue du ligament⁹. Dans le contexte des soudures impactées par la CSC, **l'IRSN rappelle que le matériau du métal de base est potentiellement très écroui, ce qui limite la plasticité supplémentaire pouvant se développer au fond de la fissure et accroît la contribution des contraintes résiduelles.** En réponse, EDF a établi le profil de distribution des contraintes résiduelles dans l'épaisseur à partir d'une simulation numérique de soudage et de mesures sur maquette de soudage. La contrainte résiduelle axiale est de traction en peau interne de la tuyauterie, puis elle devient de compression en profondeur jusqu'à la demi-épaisseur du joint soudé. Ce type de profil de contrainte résiduelle n'est, selon EDF, pas de nature à contribuer de manière néfaste au risque de rupture ductile des fissures de CSC. Pour l'IRSN, le profil des contraintes résiduelles présenté par EDF n'est potentiellement pas représentatif pour l'ensemble des soudures affectées par la CSC. De plus, l'effet des contraintes résiduelles, estimé par une intégration de la contrainte le long des lèvres de la fissure, ne s'annule pas immédiatement lorsque la fissure entre dans la zone de compression. **Au vu de l'ensemble de ces analyses, l'IRSN estime que, à ce jour, l'impact potentiel des contraintes résiduelles ne peut être négligé dans l'analyse du risque de rupture ductile dû à la présence de fissures de CSC. Ceci fait l'objet de la recommandation de l'IRSN en Annexe 1.**

Concernant les résultats obtenus par EDF pour les soudures A11 du palier N4 et A18 du palier P'4, la hauteur de défaut critique est d'environ 2 à 3 mm selon l'approche « codifiée » sans valorisation de l'écrouissage du métal de base. Pour la soudure A11, la valorisation de l'écrouissage du matériau conduit à un défaut critique de 5 mm de hauteur. Les analyses selon l'approche « réaliste » ont conduit à une hauteur de défaut critique d'environ 4-5 mm de hauteur pour la soudure A11 et de plus de 7 mm de hauteur pour la soudure A18.

⁹ Le ligament est la section restante de matière au niveau de la fissure.

En conclusion, l'IRSN considère que l'approche réaliste proposée par EDF est acceptable dans son principe. Toutefois, certaines hypothèses relatives aux caractéristiques mécaniques des matériaux devront être confirmées par EDF à travers son programme expérimental prévu sur les matériaux déposés des soudures affectées par la fissuration de CSC. Par ailleurs, l'IRSN estime que l'impact des contraintes résiduelles de soudage pour l'évaluation des dimensions de défaut critique doit être quantifié.

Concernant les analyses codifiées, pour certains cas d'étude, l'optimisation de la méthode d'analyse est possible, notamment par la réalisation de calculs en élastoplasticité avec modélisation explicite de la fissure ou par les analyses séparées du risque d'amorçage et d'instabilité de la déchirure ductile, ce qui pourrait conduire à revoir à la hausse les facteurs de marge ainsi que les hauteurs de défaut critique obtenues.

Selon l'IRSN, l'ensemble des points mentionnés ci-dessus devront être considérés par EDF dans le cadre de l'analyse générique à venir de nocivité des défauts dans les circuits auxiliaires affectés par la CSC.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Hervé BODINEAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

ANNEXE 1 À L'AVIS IRSN N° 2022-00131 DU 28 JUIN 2022

Recommandation de l'IRSN

L'IRSN recommande qu'EDF quantifie l'impact des contraintes résiduelles de soudage dans les analyses du risque de rupture ductile des joints soudés des circuits auxiliaires affectés par la fissuration de corrosion sous contrainte dans l'approche réaliste.

ANNEXE 2 À L'AVIS IRSN N° 2022-00131 DU 28 JUIN 2022

Engagement de l'exploitant

EDF prévoit la réalisation d'un programme expérimental pour l'exploitation de matériaux déposés (zones des soudures / Zone affectée mécaniquement) pour caractérisation mécanique, permettant d'apporter des éléments complémentaires sur le comportement du matériau de base dans la zone d'intérêt pour l'étude des défauts de corrosion sous contrainte. Le programme de travail sera transmis à échéance du 27 juin 2022.