



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité

**IRSN**  
INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Fontenay-aux Roses, le 12 mai 2023

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2023-00067

**Objet :** EDF – REP – Corrosion sous contrainte des lignes auxiliaires du circuit primaire principal – Expertise des volets mécanique, cinétique et examens non destructifs

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

Au quatrième trimestre 2021, dans le cadre la deuxième visite décennale du réacteur n° 1 de la centrale de Civaux (1450 MWe) et de la troisième visite décennale du réacteur n° 1 de la centrale de Penly (1300 MWe), EDF a détecté des fissures de corrosion sous contrainte (CSC) à proximité de soudures des tuyauteries des circuits d'injection de sécurité (RIS)<sup>1</sup> et des circuits de refroidissement du réacteur à l'arrêt (RRA). Ce type d'endommagement n'était pas anticipé pour ces circuits. En effet, les contrôles mis en œuvre pour ces circuits avaient pour objectif la recherche de fissures de fatigue thermique.

Dans ce cadre, EDF a engagé un programme d'investigation significatif, prioritairement pour les réacteurs de 1450 MWe. Ce programme a conduit EDF à réaliser de très nombreux examens non destructifs (END) par ultrasons complétés par des expertises métallographiques<sup>2</sup>, qui ont permis de proposer une cartographie des zones sensibles à la CSC pour ces lignes, compte tenu des causes supposées à l'origine du phénomène. Les tronçons considérés sensibles à la CSC des lignes RIS et RRA des réacteurs de 1450 MWe ont été remplacés, à l'identique (même matériau pour les tuyauteries, l'acier inoxydable 316L, et même tracé). Depuis, EDF s'est engagé à procéder de manière analogue pour les lignes RIS des réacteurs de 1300 MWe les plus récents (palier P'4) qui ont une géométrie de ligne RIS et une sensibilité à la CSC similaire à celles des réacteurs de 1450 MWe.

Par ailleurs, EDF s'est engagé à réaliser un état des lieux du risque de fissuration par CSC des lignes RIS et RRA pour l'ensemble de ses 56 réacteurs en exploitation à l'échéance de fin 2025. En fonction des résultats des END, notamment des dimensions des indications pouvant correspondre à des fissures, EDF peut être amené à proposer de laisser en l'état ces défauts pendant plus d'un cycle de fonctionnement, notamment en raison des

- 
- <sup>1</sup> 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.
  - <sup>2</sup> Les expertises métallographiques permettent d'évaluer et de caractériser la microstructure d'un métal et le cas échéant des défauts présents au moyens de différents types de microscopes. La composition chimique et la dureté des matériaux peuvent être évaluées localement.

MEMBRE DE  
**ETSON**

capacités industrielles disponibles pour le remplacement de ces lignes. Le maintien en service d'un défaut plan<sup>3</sup> potentiellement évolutif pendant plus d'un cycle de fonctionnement nécessite néanmoins une dérogation aux exigences réglementaires. À ce titre, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) consulte le groupe permanent d'experts<sup>4</sup> pour les équipements sous pression nucléaires dit « GP-ESPN ». En préparation à cette consultation du GP-ESPN, l'ASN a sollicité, par la saisine en référence, l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur les volets relatifs aux examens non destructifs, aux études mécaniques et à la cinétique de CSC, présentés dans le dossier d'EDF.

## 1. EXAMENS NON DESTRUCTIFS

Le programme d'investigation mis en œuvre par EDF a montré l'inadéquation, pour détecter des fissures de corrosion sous contrainte, du procédé de contrôle ultrasonore utilisé en 2021 pour rechercher des fissures de fatigue. EDF a rapidement optimisé le procédé à cette fin. Toutefois, ce procédé « optimisé » ne permettait ni de détecter de façon fiable et discriminante les fissures de CSC, ni de déterminer leur profondeur. En conséquence, EDF a développé de nouveaux procédés de contrôle : un procédé de contrôle ultrasonore amélioré (UTa), un procédé de contrôle par ressuage et un procédé de contrôle interne associant un examen par courants de Foucault<sup>5</sup> à un examen télévisuel haute définition.

Le procédé de contrôle UTa est fondé sur l'utilisation d'une technologie ultrasonore multiéléments associée à un porteur externe et une technique d'imagerie ultrasonore appelée FMC-PWI/TFM<sup>6</sup>. Ce procédé permet de produire des images ultrasonores, de détecter des fissures et d'en évaluer la hauteur. Bien qu'il ne soit pas encore qualifié selon le référentiel technique d'EDF (code RSE-M<sup>7</sup>) pour répondre aux exigences de l'arrêt d'exploitation du 10 novembre 1999, le procédé UTa développé par EDF en 2022 est mis en œuvre au titre d'un moyen d'expertise, ce qui est acceptable pour une période transitoire.

Dans le cadre du développement du procédé UTa, EDF a comparé les résultats obtenus avec les conclusions d'expertises destructives réalisées au LIDEC<sup>8</sup> pour des soudures déposées, afin d'évaluer les performances de ce nouveau procédé pour la détection et la détermination de la profondeur des fissures de CSC. Sur la base de cette comparaison, EDF s'est prononcé sur les performances du procédé UTa lors d'un comité technique interne. Finalement, EDF considère que le procédé UTa permet de détecter des fissures de CSC de hauteur supérieure ou égale à 2 mm et de caractériser la hauteur de ces fissures avec une incertitude de  $\pm 1$  mm et un biais de -0,1 mm.

**L'IRSN souligne que la mise en œuvre du procédé UTa permet dorénavant d'enregistrer systématiquement les signaux et d'acquérir des imageries, ce qui est de nature à améliorer les performances et la fiabilité des examens, contrairement au procédé « optimisé » de contrôle ultrasonore qui ne disposait pas de ces fonctionnalités d'enregistrement et d'imagerie.**

L'analyse des signaux UTa est cependant complexe en raison du volume d'informations acquises sous forme d'images, mais aussi en raison des nombreux paramètres influents sur l'acquisition de ces images. Interviennent en particulier la géométrie complexe de la paroi externe et de la paroi interne de la tuyauterie aux abords des

<sup>3</sup> Défaut plan : une indication continue de hauteur  $h$  est considérée comme un défaut plan débouchant en surface de hauteur  $h$ , si elle est orientée principalement dans un plan non parallèle à la surface du composant et si une partie du défaut débouche en surface du composant.

<sup>4</sup> Les groupes permanents d'experts sont sollicités par l'ASN pour préparer ses décisions les plus importantes. À cette fin, ils formulent des avis et des recommandations.

<sup>5</sup> Le contrôle par courants de Foucault est fondé sur la circulation de courants électriques induits dans un matériau conducteur et leurs interactions avec un défaut.

<sup>6</sup> Full Matrix Capture-Plane Wave Imaging/Total Focusing Method.

<sup>7</sup> RSE-M : règles de surveillance en exploitation des matériels mécaniques des îlots nucléaires des réacteurs à eau sous pression.

<sup>8</sup> Le LIDEC est un laboratoire d'expertises métallurgiques d'EDF.

soudures pouvant conduire au basculement du traducteur<sup>9</sup>, une perturbation du couplage<sup>10</sup> ou encore des difficultés de reconstruction des images liées aux incertitudes sur la propagation des ondes ultrasonores dans le métal. Cela a conduit EDF à mettre en place une formation spécifique pour les contrôleurs et à réviser à plusieurs reprises la procédure d'analyse. Une analyse de premier niveau est réalisée en application de la procédure et peut conduire à identifier des zones où l'analyse est difficile, voire impossible. En fonction de l'étendue de ces zones, une analyse de second niveau est alors réalisée.

EDF a récemment engagé une évolution des gestes d'analyse pour que certaines questions actuellement traitées au second niveau soient directement examinées par l'analyste responsable, conformément à la pratique habituelle pour les autres END. La révision de la procédure d'analyse sera complétée par la rédaction d'un guide de bonnes pratiques. **L'IRSN souligne qu'EDF doit, du fait de l'abandon du seuil de déclenchement d'une analyse de second niveau, veiller à maîtriser les conséquences de cette évolution organisationnelle en termes de fiabilité de l'analyse et au regard des actions connexes, en particulier la surveillance et la formation des analystes.**

Les techniques d'examen surfacique depuis l'intérieur des tuyauteries, notamment le procédé couplant la technique des courants de Foucault à un examen télévisuel à haute définition, permettent de compléter utilement la mise en œuvre du procédé UTa, par exemple pour les zones non couvertes par celui-ci ou pour les situations où le diagnostic UTa est difficile à établir. Ce procédé de contrôle peut être déployé sur site avec une introduction, depuis un organe d'isolement (sans découpe de tuyauterie), du système d'examen mû par un porteur pouvant se déplacer le long de la tuyauterie, y compris pour des géométries complexes incluant plusieurs coudes. L'examen de plusieurs soudures est ainsi possible avec un coût dosimétrique limité et sans les interférents potentiels d'un contrôle depuis la surface externe de la tuyauterie (calorifuge, voiles de béton, trémies, piquages). Les examens surfaciques depuis la paroi interne peuvent également apporter une information sur le caractère évolutif de la longueur des fissures, grandeur pour laquelle EDF ne revendique aucune performance pour le procédé UTa. **Ceci conduit l'IRSN à formuler la recommandation n° 1 en Annexe 1.**

Pour le procédé d'examen par courants de Foucault, la géométrie complexe de la paroi interne des tuyauteries aux abords des soudures conduit à observer des variations importantes de distance entre le traducteur et la surface. Il est donc nécessaire qu'EDF poursuive l'évaluation des performances de ce procédé en tenant compte notamment de ce paramètre influent.

Le programme d'investigation mis en œuvre par EDF a permis d'obtenir, au premier trimestre 2023, un état des lieux partiel sur l'état de santé des lignes auxiliaires des REP du parc. Ce programme initial se poursuivra jusqu'en 2025, afin d'obtenir un état des lieux plus complet. À ce jour, la fissure de CSC la plus profonde (23 mm, soit environ 85 % de l'épaisseur de la tuyauterie) a été observée aux abords d'une soudure du circuit RIS du réacteur n° 1 de la centrale de Penly. De plus, les contrôles UTa mis en œuvre conduisent EDF à détecter de nombreuses indications, dont la plupart sont caractérisées comme pouvant correspondre à des fissures de CSC ou de fatigue thermique dont la hauteur est faible, majoritairement inférieure à 2 mm, sans pouvoir exclure que ces indications puissent correspondre, dans certains cas, à des défauts technologiques de soudage présents depuis la fabrication et non évolutifs, ou encore à des artefacts. Il est à noter qu'EDF n'est pas en capacité industrielle de remplacer à court terme l'ensemble des lignes auxiliaires concernées par la fissuration par CSC de son parc. En outre, le principe d'optimisation et de justification de l'exposition radiologique des travailleurs conduit également à s'interroger sur l'opportunité d'un remplacement systématique d'une ligne auxiliaire comportant une petite indication associée à un défaut considéré comme potentiellement évolutif. En conséquence, pour chaque indication de défaut notable, EDF établit un dossier de traitement d'écart (DTE), conformément au § A5000 du RSE-M, comportant d'une part une analyse du caractère évolutif du défaut lors du ou des cycles d'exploitation à

<sup>9</sup> Le traducteur est le dispositif qui permet d'émettre et de recevoir les ondes ultrasonores.

<sup>10</sup> Perte d'énergie ultrasonore au passage de l'interface entre le traducteur et la pièce à examiner en raison par exemple d'une lame d'air (manque de couplant entre le traducteur et la pièce).

venir et une justification de la stabilité mécanique de ce défaut pour toutes les situations de fonctionnement, d'autre part d'une analyse de sûreté vis-à-vis du maintien en l'état du défaut.

## 2. ÉTUDES MÉCANIQUES

En présence d'un défaut plan dans une tuyauterie ductile<sup>11</sup>, les risques mécaniques à évaluer sont le risque d'instabilité plastique résultant de la réduction de la section de tuyauterie avec défaut (ligament) et le risque de déchirure ductile.

Le risque d'instabilité plastique du ligament est analysé lors de la conception pour des tuyauteries sans défaut. Dans le présent cadre, les marges vis-à-vis de ce risque sont réévaluées en prenant en compte la réduction de la section en présence du défaut. La méthode d'analyse du risque de déchirure ductile, issue du code RSE-M, consiste en l'évaluation de la force fissurante, qui est fonction de la géométrie de la structure, des matériaux et des dimensions du défaut, en la comparant à la résistance à la déchirure du matériau.

Pour analyser le risque de déchirure ductile, le code RSE-M propose deux options<sup>12</sup>, l'option 1 étant considérée plus sévère que l'option 2. Au cours de l'expertise, EDF a constaté que pour certaines configurations, l'analyse selon l'option 2 est plus sévère que celle réalisée selon l'option 1. L'ASN ayant demandé à EDF d'évaluer la nocivité des fissures de CSC selon l'option 2, EDF a proposé une méthode d'évaluation de la dimension du défaut critique<sup>13</sup> selon l'option 2 en s'appuyant sur les résultats des analyses déjà réalisées selon l'option 1. L'IRSN a indiqué que certaines conditions pourraient remettre en cause le caractère conservatif de la méthode proposée par EDF. En fin d'expertise, EDF s'est engagé à transmettre une analyse d'impact, afin de justifier le conservatisme de sa méthode. Cet engagement est jugé satisfaisant par l'IRSN.

Pour les réacteurs de 1300 MWe du palier P'4, les analyses thermohydrauliques initiales n'avaient pas identifié de phénomène de stratification thermique pouvant s'établir dans les portions horizontales des tuyauteries RIS. Le cas échéant, cette stratification thermique induit des chargements thermomécaniques supplémentaires en fonctionnement normal et peut ainsi accentuer la sensibilité des lignes à la CSC. Pour les réacteurs de 1300 MWe du palier P'4, EDF a donc pris en compte ces chargements supplémentaires dans ses études les plus récentes de stabilité des défauts, ce qui est satisfaisant. EDF s'est également engagé à prendre en compte les incertitudes associées au calcul des coefficients d'échange thermique entre le fluide et la paroi des tuyauteries, ce qui est également satisfaisant.

Compte tenu du grand nombre de soudures des lignes RIS et RRA, EDF a regroupé les soudures par zone de chargement et a sélectionné une soudure « enveloppe » pour chaque groupe. Par la suite, la taille de défaut critique est calculée uniquement pour la soudure sélectionnée et est considérée comme enveloppe pour l'ensemble des soudures du groupe. Au vu du caractère approximatif de la démarche de sélection, l'IRSN estime que le caractère enveloppe de la soudure sélectionnée n'est pas garanti, en particulier lorsque les hypothèses des calculs de la taille de défaut critique sont affinées pour rendre ce calcul moins conservatif. Sur ce sujet, EDF s'est engagé à compléter son analyse sur un cas identifié par l'IRSN pour lequel le caractère enveloppe de la soudure sélectionnée ne paraît pas acquis. **Néanmoins, malgré les incertitudes liées au caractère simplifié de la démarche de sélection des soudures, l'IRSN estime qu'elle est applicable, si la profondeur du défaut détecté**

<sup>11</sup> La ductilité désigne la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement avant sa rupture.

<sup>12</sup> L'option 1 du RSE-M consiste à vérifier l'absence de risque d'amorçage de la déchirure ductile en considérant des coefficients de sécurité plus sévères que ceux exigés par l'arrêté exploitation du 10 novembre 1999 pour ce mode de ruine.

L'option 2 du RSE-M consiste quant à elle à vérifier de manière distincte l'absence de risque d'amorçage et de risque d'instabilité de la déchirure ductile. Pour l'amorçage, les coefficients de sécurité sont ceux exigés par l'arrêté exploitation. Pour le risque d'instabilité de la déchirure ductile, le RSE-M propose une application de coefficients « partiels » à la fois sur les chargements et sur la résistance à la déchirure des matériaux.

<sup>13</sup> Le défaut critique est le plus grand défaut ne conduisant pas au risque de rupture ductile lors des chargements les plus sévères.

**reste relativement petite par rapport à la taille du défaut critique établie pour la soudure « enveloppe » du groupe. Dans le cas contraire, l'IRSN estime qu'une analyse dédiée devrait être réalisée conformément aux exigences de traitement d'écart en cas de détection d'un défaut plan.**

Dans le cadre des analyses de nocivité des fissures de CSC, en constatant que la démarche d'analyse strictement codifiée dans le RSE-M est trop conservatrice, EDF a introduit plusieurs « optimisations » de méthode.

Ainsi, concernant la géométrie des défauts retenus, une hypothèse conservatrice pour l'analyse de nocivité consiste à retenir un défaut axisymétrique. Pour certaines analyses optimisées, EDF retient les dimensions du défaut telles que caractérisées par les contrôles non destructifs. Pour l'IRSN, la valorisation d'une géométrie et d'une position de défaut réel n'est pas remise en cause, dans le principe, sous réserve que le défaut équivalent retenu reste conforme à la codification. Par ailleurs, le positionnement azimutal du défaut retenu peut remettre en cause le caractère pénalisant des moments de flexion déterminés lors des calculs de conception des lignes. **EDF s'engage à considérer un défaut équivalent plan semi-elliptique englobant le défaut supposé conformément au code RSE-M et à réorienter les moments de manière à ce qu'ils sollicitent le défaut. Cet engagement est jugé satisfaisant par l'IRSN.**

Concernant les caractéristiques des matériaux retenues pour l'étude de rupture brutale d'un joint soudé, la pratique conservatrice de l'application du code RSE-M consiste à retenir les caractéristiques mécaniques les plus pénalisantes entre celles du métal de base et celles du métal déposé. Dans le cadre du traitement de la CSC des lignes auxiliaires, une optimisation par rapport à la pratique du code RSE-M est réalisée en proposant un modèle bi-matériau et en considérant un comportement du métal de base à l'état écroui<sup>14</sup>. Cette hypothèse se fonde sur les connaissances actuelles de la phénoménologie de la CSC des aciers inoxydables en milieu primaire nominal<sup>15</sup> et sur le retour d'expérience international, incluant le retour d'expérience d'EDF. Les expertises métallurgiques montrent en effet une corrélation entre une dureté élevée du métal de base<sup>16</sup> dans la zone affectée thermomécaniquement par la soudure (ZATM) et le risque de fissuration par CSC. EDF valorise ce constat en retenant une loi de comportement en traction issue du RCC-MRx<sup>17</sup> pour un taux d'écrouissage de 6,43 %, correspondant à la valeur d'écrouissage minimale pour observer une microdureté supérieure à 240 HV<sub>0,1</sub>. Cette optimisation par rapport à la pratique codifiée a un impact direct sur le calcul de la force fissurante J et permet d'obtenir un gain notable sur la taille du défaut critique obtenue. L'IRSN note que la définition de la courbe de traction du matériau écroui repose sur des corrélations entre la microdureté et le taux d'écrouissage et sur l'utilisation des lois de comportement en traction proposées dans le RCC-MRx pour l'acier inoxydable 316L.

Pour vérifier cette démarche, des essais de traction corrélés avec des mesures de dureté ont été réalisés par EDF, mais uniquement pour un acier inoxydable de nuance 316L à l'état hyperecroui sur lequel différents niveaux de pré-écrouissage en traction sont imposés. L'IRSN estime que les essais réalisés par EDF permettent de justifier la validité de la démarche d'EDF pour le cas d'un matériau pré-écroui en traction uniaxiale. Toutefois, l'IRSN s'interroge sur la validité de cette démarche pour le cas du matériau situé dans la ZATM qui a été soumise à un historique de chargement complexe de nature multiaxiale et cyclique, causé notamment par le soudage, par l'épreuve hydraulique et par les chargements de service. L'IRSN estime que des chargements cycliques locaux, potentiellement élevés dans certaines lignes, pourraient conduire à une évolution de comportement du matériau de la ZATM. **De ce fait, l'IRSN considère que des caractérisations expérimentales réalisées sur du matériau prélevé dans la ZATM de soudures déposées permettraient de valider les hypothèses retenues par EDF concernant le comportement réel du matériau dans cette zone. Pour l'IRSN, cette caractérisation permettrait**

<sup>14</sup> Un métal écroui est un métal qui a subi une déformation permanente (déformation plastique).

<sup>15</sup> Fluide du circuit primaire conforme aux spécifications techniques d'exploitation, notamment en ce qui concerne l'absence de polluants.

<sup>16</sup> Typiquement supérieure à 240 HV<sub>0,1</sub> voire bien supérieure pour certains cas de fissuration observé à l'international.

<sup>17</sup> Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des installations nucléaires hautes températures, expérimentales et de fusion.

**de consolider d'une part les caractéristiques mécaniques utilisées dans le cadre des justifications mécaniques valorisées dans les DTE, d'autre part la compréhension du phénomène d'amorçage et de propagation des fissures de CSC.** Pour autant, l'absence de caractérisation fine ne devrait pas être de nature à remettre en cause les conclusions des études mécaniques d'EDF.

EDF propose de calculer les moments de flexion constituant les chargements mécaniques des lignes de tuyauteries à partir de modèles en élastoplasticité pour valoriser des relaxations induites par la plastification de certaines sections. Si cette optimisation est jugée acceptable dans son principe, l'IRSN note que l'utilisation des valeurs de limite d'élasticité minimales dans les calculs conduit à maximiser les plastifications et à sous-estimer les valeurs de moments de flexion. **À ce sujet, EDF s'est engagé à réaliser une étude de sensibilité vis-à-vis des limites d'élasticité retenues dans les études de justification de défaut à partir d'études élastoplastiques. Cet engagement est jugé satisfaisant par l'IRSN.**

Concernant les chargements retenus dans les analyses optimisées, EDF considère des cumuls de chargements unitaires (pression, expansion thermique, transitoire) issus d'une même situation physique. L'IRSN souligne que cette pratique diffère de celle appliquée au titre de la conception qui considère le cumul des valeurs maximales de ces chargements unitaires enveloppes de l'ensemble des situations d'une catégorie de conditions de fonctionnement. L'IRSN ne s'oppose pas à cette optimisation de cumul de chargements. Toutefois, l'IRSN souligne que si le caractère enveloppe des cumuls utilisés à la conception est par définition évident, rien ne permet de garantir *a priori* le caractère enveloppe des cumuls optimisés proposés par EDF. **À ce sujet, EDF s'engage à vérifier le caractère enveloppe des cumuls physiques retenus dès lors qu'ils sont valorisés en support de la justification du maintien en l'état d'une indication. Cet engagement est jugé satisfaisant par l'IRSN.**

Finalement, concernant les justifications mécaniques pour les défauts laissés en l'état, malgré les quelques réserves méthodologies soulevées par l'IRSN pour lesquelles EDF a pris des engagements, l'IRSN considère que la démarche mise en œuvre par EDF est satisfaisante.

### 3. CINÉTIQUE DE LA CSC

Afin d'évaluer la cinétique enveloppe de propagation des fissures de CSC, des modèles sont utilisés : le modèle CORIOLIS<sup>®</sup> d'EDF et le modèle de l'EPRI<sup>18</sup>. La simulation numérique du soudage permet de définir les contraintes résiduelles<sup>19</sup> utilisées en données d'entrée pour ces modèles. L'ajustement paramétrique de ces modèles s'appuie sur des bases de données expérimentales qui comprennent des essais réalisés entre 280 °C et 360 °C. La base de données d'EDF sera mise à jour en juillet 2023 pour intégrer de nouveaux essais d'EDF et de l'EPRI.

L'IRSN considère qu'en l'état des connaissances et des incertitudes qui caractérisent le présent dossier, il n'est pas possible de déterminer des valeurs enveloppes de cinétique de propagation de manière indiscutable. À cet égard, les résultats des contrôles en service pour le suivi d'indications permettront d'apporter des éléments quantifiés objectifs.

Au cours de l'expertise, EDF a proposé plusieurs valeurs de cinétique, fonction de la sensibilité des lignes à la CSC et de la présence éventuelle de réparation sur les soudures. Certaines d'entre elles appellent des commentaires :

- la valeur de 3 mm/an retenue par EDF pour des indications de plus de 5 mm de hauteur pour les soudures réparées apparaît enveloppe de l'ensemble du REX actuel. Il s'agit également d'une valeur parmi les plus élevées obtenues en laboratoire pour des matériaux avec ce niveau d'écrouissage, en milieu primaire nominal ;

<sup>18</sup> Electric power research institute.

<sup>19</sup> On appelle contraintes résiduelles les tensions internes au matériau qui existent en l'absence de chargement extérieur.

- la valeur de 1 mm/an retenue pour des indications dans des ZATM de soudures non réparées apparaît également comme typique du REX français actuel ;
- la valeur de 1 mm/an retenue pour des indications de hauteur inférieure à 5 mm pour des soudures réparées est moins fermement établie. Son évaluation s'appuie sur des hypothèses fortes concernant les contraintes de fonctionnement et les contraintes résiduelles qui ne peuvent être vérifiées. De ce fait, si l'ordre de grandeur proposé par EDF peut être considéré comme satisfaisant, il convient qu'il soit consolidé par l'acquisition de données supplémentaires issues d'un suivi en service adapté de ces indications.

**En l'état des connaissances et des incertitudes de ce dossier, l'IRSN considère nécessaire d'encadrer, de manière prudente, les valeurs de cinétique à prendre en compte dans les DTE et formule, à cet égard, la recommandation n° 2 en Annexe 1.**

Dans ce cadre, EDF devra définir les règles de suivi en service de ces indications en considérant notamment le besoin de compléter le retour d'expérience permettant de consolider les valeurs de cinétique de propagation des fissures de CSC, en veillant à prendre en compte les particularités des soudures réparées ou des soudures de fermeture des circuits.

## 4. CONCLUSION

Dans le cadre du traitement du phénomène de fissuration par corrosion sous contrainte aux abords des soudures des tuyauteries auxiliaires du circuit primaire des réacteurs de son parc électronucléaire, EDF est amené à proposer le maintien en l'état, pour plusieurs cycles de fonctionnement, de défauts pouvant correspondre à ce mécanisme d'endommagement évolutif. L'IRSN a examiné les éléments techniques en support à la demande d'EDF relatifs aux performances des examens non destructifs, à la méthodologie des études du risque de rupture brutale et à la cinétique de la corrosion sous contrainte.

L'IRSN observe que le procédé de contrôle ultrasonore amélioré (UTa), développé par EDF, permet d'enregistrer les signaux et d'acquérir des imageries, ce qui est de nature à améliorer les performances et la fiabilité des examens. L'analyse de l'imagerie ultrasonore obtenue aux abords de soudures en acier inoxydable austénitique peut néanmoins présenter des difficultés techniques liées d'une part aux conditions d'acquisition des images sur site, d'autre part à l'interprétation qui peut en être faite. L'IRSN considère donc que le déploiement d'une technique de contrôle surfacique mise en œuvre depuis l'intérieur de la tuyauterie apporterait un complément d'information utile permettant d'améliorer la fiabilité de la caractérisation d'un défaut et le suivi de son évolution en longueur. **Cela conduit l'IRSN à formuler la recommandation n° 1 en Annexe 1.**

Pour les études mécaniques du risque de rupture brutale, l'IRSN a expertisé la démarche de sélection des soudures enveloppe par groupe de soudures, ainsi que plusieurs optimisations de méthode appliquées par EDF : la modélisation élastoplastique du comportement des tuyauteries avec prise en compte d'un effet bi-matériau, la valorisation d'une loi de traction spécifique pour le métal de base écroui, la valorisation de la forme et de la position du défaut dans la soudure, les cumuls de chargement issus d'une même situation physique.

L'expertise de l'IRSN a conduit à émettre un certain nombre de réserves. En réponse, EDF a pris des engagements visant à apporter des compléments de justification, rappelés en Annexe 2, qui devraient permettre de répondre à la plupart de ces réserves. Toutefois, malgré les réponses apportées par EDF, l'IRSN considère que la caractérisation du comportement de traction dans la zone affectée thermomécaniquement des soudures déposées pourrait être utile non seulement pour confirmer les hypothèses retenues dans l'analyse de nocivité des fissures, mais également pour une meilleure compréhension du phénomène de fissuration par corrosion sous contrainte. L'absence de caractérisation fine ne devrait cependant pas être de nature à remettre en cause les conclusions des études mécaniques d'EDF.

Le maintien en l'état de défauts pouvant correspondre à des fissures de corrosion sous contrainte nécessite de connaître la cinétique enveloppe de cet endommagement, afin d'évaluer de manière conservative les dimensions

des défauts à l'issue des cycles d'exploitation et de vérifier que les dimensions des défauts propagés restent inférieures à la taille du défaut critique. L'évaluation de cette cinétique enveloppe est rendue difficile par les interrogations qui persistent sur les causes profondes de la CSC, la durée d'amorçage de la fissuration et la grande variabilité de la dimension des fissures observées. La poursuite par EDF de l'établissement de l'état des lieux du parc électronucléaire et le suivi en service des défauts apporteront les éléments techniques qui manquent actuellement pour conforter la cinétique de la CSC, qui reste fondée sur l'évaluation des contraintes résiduelles par simulation numérique du soudage et sur la modélisation de l'amorçage et de la propagation des fissures avec le modèle CORIOLIS<sup>®</sup> d'EDF. En conséquence, l'IRSN estime nécessaire de retenir une approche prudente en considérant une cinétique qui distingue les soudures réparées comportant des défauts de profondeur supérieure ou égale à 5 mm et les soudures susceptibles d'être soumises à des niveaux de contrainte accrus du fait des opérations d'alignement lors du montage des lignes. **À cet égard, l'IRSN formule la recommandation n° 2 en Annexe 1.**

Enfin, l'IRSN note une très forte mobilisation d'EDF sur l'ensemble des thématiques que soulève ce phénomène d'endommagement inattendu. Le traitement industriel de cet écart s'appuie sur le développement et la mise en œuvre d'examen non destructifs innovants. Il nécessite également la réalisation d'un volume d'études et de justifications extrêmement important.

Dans le cadre de sa stratégie de remise en conformité des tuyauteries affectées par la CSC, EDF a fait le choix de remplacer à l'identique l'ensemble des lignes RIS et RRA des réacteurs de 1450 MWe et l'ensemble des lignes RIS des réacteurs de 1300 MWe du palier P'4. Pour l'IRSN, cette approche de remise en conformité est à privilégier autant que possible.

Pour le long terme, l'IRSN considère que ces efforts de recherche des causes profondes, de réparation et de surveillance en exploitation doivent se poursuivre, en particulier afin de disposer en priorité d'un niveau de confiance élevé dans la disponibilité des circuits de sauvegarde RIS de l'ensemble des réacteurs, compte tenu de l'importance de ce circuit pour assurer le refroidissement du cœur et la maîtrise de la réactivité en situation accidentelle.

**IRSN**

Le Directeur général

Par délégation

Hervé BODINEAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté



## ANNEXE 1 À L'AVIS IRSN N° 2023-00067 DU 12 MAI 2023

### Recommandations de l'IRSN

#### **Recommandation n° 1**

L'IRSN recommande que, en cas de questionnement sur la présence, la nature ou le dimensionnement d'une indication détectée par UTa, EDF déploie un END complémentaire surfacique.

#### **Recommandation n° 2**

En cas de maintien en l'état des indications identifiées lors des contrôles effectués au titre du traitement de la corrosion sous contrainte dans les lignes auxiliaires du circuit primaire principal des réacteurs du parc en exploitation, l'IRSN recommande que :

- EDF retienne une valeur de vitesse de propagation de 3 mm par an pour les indications aux abords des soudures réparées de profondeur supérieure ou égale à 5 mm, incertitudes comprises ;
- EDF retienne une valeur de vitesse de propagation de 1 mm par an pour les autres cas de soudures réparées ou non, y compris pour les indications classées en hauteur non mesurable ;
- EDF précise la valeur de vitesse de propagation à retenir pour les soudures de fermeture susceptibles d'être soumises à des niveaux de contrainte accrus du fait des opérations d'alignement.

## ANNEXE 2 À L'AVIS IRSN N° 2023-00067 DU 12 MAI 2023

### Engagements principaux de l'exploitant

#### Engagement n° 1

« EDF réalise actuellement une relecture des ZPNG/ZNA de 122 soudures non déposées qui ont été analysées avec les 3 premiers indices de la procédure d'analyse. L'échéance de cette relecture est fixée au 16 juin 2023. Cette réanalyse répond au projet de recommandation de l'IRSN concernant l'analyse avec le dernier indice applicable de la procédure d'analyse de tous les fichiers d'acquisition présentant des ZPNG/ZNA analysés uniquement au 1er niveau avec la procédure à l'indice A. »

#### Engagement n° 2

« EDF a identifié la nécessité d'améliorer sa connaissance thermohydraulique des bras morts. Ceci a conduit à la préparation de la mise en place d'une instrumentation des lignes RIS BF N4 et P'4 et RRA BC N4 selon une stratégie en deux temps :

- Instrumentation passive (étiquettes thermosensibles) pour évaluer rapidement les variations entre lignes et borner les températures rencontrées sur les tronçons concernés ;
- Puis un programme d'instrumentation active (plus long à mettre en place) qui permet d'enregistrer les variations de température le long des lignes instrumentées. »

#### Engagement n° 3

« La prise en compte des états stratifiés dans les études de justification de défauts de corrosion sous contrainte pour la ligne RIS BF DPY (P'4) sera maintenue par EDF. »

#### Engagement n° 4

« En réponse à l'observation de l'IRSN quant à la couverture des incertitudes par la démarche utilisée pour le calcul des coefficients d'échange dans les études de rupture brutale sur les défauts de corrosion sous contrainte, EDF réalisera une étude pour illustration de la méthode sur un cas concret retenu parmi les études réalisées dans le cadre de l'affaire corrosion sous contrainte (échéance : octobre 2023). »

#### Engagement n° 5

« EDF complétera son analyse comparative présentée dans sa position, par réalisation d'un calcul complémentaire sur le périmètre des nœuds 1 et 7 RIS BF du palier N4 pris en exemple, en considérant des hypothèses méthodologiques homogènes sur la définition des efforts pris en données d'entrée (échéance juillet 2023). »

#### Engagement n° 6

« EDF complétera son analyse d'impact en étendant son périmètre à des nœuds supplémentaires, dont l'analyse à la rupture brutale fait appel à des calculs 3D fissurés basés sur les hypothèses « métal de base écroui » pour la définition des caractéristiques matériaux (échéance : juillet 2023). »

**Engagement n° 7**

« EDF confirme que les dispositions de la recommandation de l'ASN [*considérer un défaut semi-elliptique orienté de manière à être sollicité*] seront appliquées pour les études de justification en l'état d'indications, dès lors qu'elles feront appel à la géométrie réelle du défaut (échéance : immédiate). »

**Engagement n° 8**

« EDF complétera son argumentaire en réalisant une étude de sensibilité vis-à-vis des limites d'élasticité retenues dans les études de justification de défaut à partir d'études élastoplastiques (échéance : octobre 2023). »

**Engagement n° 9**

« EDF complétera ces éléments avec une analyse similaire sur le nœud 344 RIS accumulateurs RRA BF du palier CPO (échéance : 15 juillet 2023).

Pour les futurs dossiers de traitement d'écart, EDF vérifiera le caractère enveloppe des cumuls de sensibilité dès lors qu'ils sont valorisés en support de la justification du maintien en l'état d'une indication (échéance : immédiate). »