

**GROUPE PERMANENT D'EXPERTS POUR LES EQUIPEMENTS SOUS  
PRESSION NUCLEAIRES**

**Avis complémentaire à l'avis CODEP-MEA-2022-038445  
relatif aux fissures de corrosion sous contraintes (CSC)  
détectées sur des tuyauteries auxiliaires en acier austénitique  
du circuit primaire principal de différents réacteurs à eau  
sous pression du parc d'EDF**

Réunion tenue à Montrouge et en visioconférence le 13 octobre 2022.

## I

Conformément à la saisine du 9 août 2022 de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) référencée CODEP-DEP-2022-039910, le groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires (GP ESPN) s'est réuni les 22 et 23 septembre 2022, avec la participation de membres du groupe permanent pour les réacteurs nucléaires (GPR), pour traiter de questions particulières relatives au phénomène de corrosion sous contraintes (CSC) affectant des tuyauteries auxiliaires en acier austénitique du circuit primaire principal de différents réacteurs à eau sous pression du parc d'EDF. A l'issue de cette réunion, le groupe permanent a émis l'avis CODEP-MEA-2022-038445 du 30 septembre 2022.

Au vu des échanges lors des séances précitées, le groupe permanent a identifié différents points d'attention pour lesquels il lui est apparu souhaitable d'exprimer sa compréhension de la situation et de formuler des recommandations qui se situent de son point de vue au cœur des enjeux de sûreté.

La séance du 13 octobre 2022 consacrée à la rédaction du présent avis complémentaire a porté sur ces points d'attention. S'agissant d'une rédaction d'avis de groupe permanent, EDF n'a pas participé à la séance.

## II

En amont de l'analyse des points d'attention, le groupe permanent a considéré utile de situer les anomalies induites par le phénomène de CSC au regard d'éléments du retour d'expérience et du référentiel de sûreté.

### ***II.1/ Détection du phénomène : le résultat d'une attitude de vigilance pour la sûreté en exploitation***

En premier lieu, le groupe permanent note que la détection des fissurations affectant des circuits auxiliaires (RRA<sup>1</sup>) et de sauvegarde (RIS<sup>2</sup>) de certains réacteurs des paliers N4 et 1300 MWe est le résultat de la mise en œuvre d'actions de vérification et de maintien de la sûreté en exploitation, utilisant des moyens d'examen non destructif (END) qui ont évolué dans le temps, dans le cadre d'un programme visant à détecter des fissures de fatigue thermique.

A la suite des premières détections, les mesures mises en œuvre par EDF, telles que décrites dans la note de synthèse référencée EDF D455022000237 ind. 3 du 13 juillet 2022, traduisent une attitude proactive dans la recherche de la compréhension des causes et de l'extension du phénomène, mettant en œuvre des investigations de grande ampleur, à la fois par élargissement aux différents circuits et réacteurs et par approfondissement avec des investigations métallurgiques de défauts issus de tronçons déposés, conduisant à plus d'une centaine d'expertises en laboratoire.

---

<sup>1</sup> RRA : système de refroidissement du réacteur à l'arrêt

<sup>2</sup> RIS : système d'injection de sécurité

Aussi, le groupe permanent considère, en l'état du dossier, que la politique de surveillance et la mise en œuvre de techniques d'END ont permis la détection de ces défauts, en amont d'une situation incidentelle ou accidentelle qui aurait pu être initiée ou aggravée par la défaillance d'un des circuits affectés.

## ***II.2/ Une anomalie à caractère générique***

Affectant principalement les réacteurs du palier N4 et des réacteurs de 1300 MWe appartenant au palier P'4, les défauts observés relèvent d'une anomalie générique. Plusieurs circuits d'un même réacteur et plusieurs réacteurs d'un même palier sont en effet concernés.

Une combinaison de conditions (contraintes, matériaux, milieux) pour ce type de circuit a conduit à l'apparition non attendue d'une fissuration par corrosion sous contraintes au voisinage de certaines soudures. L'étendue du phénomène dépend des facteurs clés qui conduisent à son apparition et des différences qui peuvent exister entre les réacteurs, tant dans la conception, la fabrication que l'exploitation.

Le groupe permanent note que l'anomalie concerne des composants considérés comme techniquement remplaçables ou réparables et qu'un scénario de rupture totale d'un circuit RIS ou RRA est couverte par la démonstration de sûreté, tant au titre de la capacité de refroidissement du cœur que de la maîtrise de la réactivité. De même, des situations enveloppes - sur le plan thermomécanique - de la rupture d'un des circuits affectés par ces fissurations sont postulées dans les dossiers de référence réglementaires des équipements sous pression.

Il relève toutefois que l'anomalie rencontrée est susceptible d'affecter simultanément plusieurs circuits RIS et RRA d'un même réacteur, ce qui va au-delà des hypothèses prises dans la démonstration de sûreté.

## **III**

Les points d'attention identifiés par le groupe permanent ont fait l'objet du regroupement suivant :

- la caractérisation et la compréhension du phénomène à l'origine des défauts ;
- la cinétique de croissance des défauts ;
- les mesures compensatoires en exploitation ;
- la surveillance des circuits par les méthodes d'examen non destructif ;
- les analyses mécaniques ;
- la démonstration de sûreté ;
- la stratégie d'EDF pour le traitement de l'anomalie.

### ***III.1/ Caractérisation et compréhension du phénomène à l'origine des défauts***

Le groupe permanent souligne les efforts importants déployés par EDF pour expertiser les indications détectées lors des contrôles non destructifs, confirmées en tant que défaut puis caractérisées comme des fissures de CSC. Il relève également le caractère méthodique des investigations menées par EDF pour la compréhension du phénomène et l'identification d'éléments d'explication ou de différenciation entre les zones, les circuits et les paliers de réacteurs.

La CSC résulte de la conjonction d'un matériau sensible à ce phénomène, de contraintes locales suffisantes et de conditions d'environnement favorables à son apparition. A la différence de circuits élaborés dans des aciers inoxydables austénitiques comparables et utilisés dans la filière des réacteurs à eau bouillante, un phénomène de cette ampleur n'avait quasiment jamais été rencontré dans la filière des réacteurs à eau sous pression. En accord avec les analyses d'EDF, le groupe permanent considère que la température (conditionnée par un phénomène de vortex) et les contraintes thermiques de stratification (résultant de la géométrie des lignes), dans des zones où le matériau présente un niveau important de déformation préalable (zones affectées mécaniquement dans le proche environnement des soudures), constituent des facteurs importants du phénomène observé. A cet égard, le groupe permanent constate que l'évolution de la conception des lignes des circuits RIS et RRA a, au fil des paliers de réacteurs, conduit à éloigner le premier organe d'isolement du circuit primaire, ainsi qu'à mettre en place de longues portions horizontales sujettes à stratification thermique, ce qui peut contribuer à expliquer des différences d'ampleur du phénomène entre les circuits et les paliers.

Le groupe permanent estime que les facteurs considérés par EDF comme de premier rang (température de fonctionnement, zone de vortex, présence de parties horizontales, niveau de dureté à proximité des soudures) constituent des facteurs d'explication convaincants des défauts observés. Pour autant, il souligne qu'il existe une assez forte disparité dans le niveau d'atteinte (à la fois dans la présence ou non de défaut, et dans leur extension circonférentielle et en profondeur) de zones présentant le même niveau de sensibilité au vu des paramètres considérés comme explicatifs. De même, la présence de certains défauts quasiment circonférentiels n'est pas totalement expliquée. Aussi, il considère qu'il convient de poursuivre les travaux pour conforter ou faire évoluer cette compréhension, notamment à l'occasion des résultats de contrôles à venir.

S'agissant du rôle second des paramètres techniques de soudage dans l'occurrence du phénomène, le groupe permanent note, bien qu'il y ait une grande variété de combinaisons de paramètres pour les différents paliers et circuits, que certaines combinaisons semblent plus favorables à l'apparition de CSC. Par ailleurs, l'extension en profondeur de la zone « durcie » de la tuyauterie varie significativement suivant les conditions de soudage. En outre, il souligne que les zones présentant des défauts n'ont pas bénéficié d'un « arasage » (à l'intérieur de la tuyauterie) ce qui ne permet pas de différencier, pour ces zones, le bénéfice de cette disposition, qui est de nature à limiter le risque d'amorçage de la CSC.

Enfin, le groupe permanent rappelle que la teneur en oxygène dissous dans l'eau du circuit primaire constitue un facteur aggravant pour l'amorçage ou le développement de la fissuration observée, ce qu'il a intégré dans la formulation de son avis du 30 septembre 2022.

### ***III.2/ Cinétique de croissance des défauts***

Le phénomène de CSC constitue le facteur d'explication des défauts rencontrés. Ce constat est conforté par les observations menées en laboratoire sur le faciès des défauts, par la dureté – traduisant l'érouissage – mesurée ou simulée des zones où ils se sont propagés et par l'estimation des contraintes.

Le groupe permanent souligne que cette fissuration constitue un endommagement non prévu survenu au cours du fonctionnement des réacteurs concernés. Il est important de pouvoir estimer une borne de la cinétique de propagation dans le cadre de l'évaluation de la résistance des circuits. A cet égard, il a noté qu'aucune transition entre une fissuration intergranulaire (de CSC) et une fissuration transgranulaire n'a été observée, ce qui s'interprète comme une absence d'endommagement additionnel par fatigue. De même, les investigations menées pour quelques prélèvements montrent un état oxydé homogène entre les bords et le front de fissuration, ce qui pourrait permettre de les considérer comme des fissurations anciennes.

Au-delà de ces éléments favorables résultant de l'expertise approfondie en laboratoire de quelques défauts, le groupe permanent a relevé un manque d'explications concernant l'extension circonférentielle importante de certains d'entre eux et l'absence d'éléments probants pour déterminer une valeur qui délimiterait l'extension des fissures dans les zones où elles sont amorcées. De plus, il rappelle que le phénomène n'était pas attendu pour ces configurations de matériau, de conditions de fonctionnement et de sollicitations telles que déterminées à la conception. Aussi, il considère que les éléments existants concernant la cinétique de croissance des fissures, issus de la littérature scientifique pour d'autres conditions, plus usuelles et documentées, de manifestation de la CSC, sont à transposer avec précaution. En conséquence, le groupe permanent recommande que la fixation d'une valeur enveloppe de cinétique soit déterminée avec prudence, tant pour la périodicité des contrôles que pour la détermination de la croissance des défauts postulés dans le cadre de l'évaluation de résistance des circuits aux dommages mécaniques.

En outre, le groupe permanent recommande, dans une démarche de robustesse, qu'EDF estime le niveau de fissuration par CSC qui conduirait à une poursuite de fissuration par fatigue, en intégrant les sollicitations thermiques qui ont conduit à l'apparition de la CSC. Il souligne enfin l'intérêt qu'aurait l'identification d'éléments qui prouveraient que l'extension en profondeur des fissures de CSC se ralentit ou qu'elle resterait limitée, tels que, par exemple, l'influence de la zone de contraintes résiduelles de compression engendrée lors du soudage.

### ***III.3/ Mesures compensatoires en exploitation***

Des mesures compensatoires ont été définies par EDF pour l'exploitation des réacteurs du parc après la découverte des fissures précitées, en vue de détecter les fuites qui pourraient en résulter et de limiter

les transitoires qui pourraient solliciter de manière importante les fissures. Elles comprennent notamment une surveillance renforcée de l'évolution du bilan quotidien des fuites non quantifiées du circuit primaire et l'utilisation des détecteurs d'incendie des locaux traversés par les tuyauteries concernées pour signaler la présence de vapeur d'eau résultant d'une fuite.

Le groupe permanent considère que ces dispositions sont nécessaires et recommande qu'EDF veille tout particulièrement à leur bonne appropriation par le personnel d'exploitation concerné. Il estime en outre que la détection d'éventuelles fuites devrait intervenir au plus tôt. Aussi, il recommande qu'EDF examine la performance des moyens de détection dans les zones où se situent les parties des circuits RIS et RRA susceptibles d'être affectées par le phénomène de CSC.

#### ***III.4/ Surveillance des circuits par des méthodes d'examen non destructif***

Dans le cadre de l'investigation des circuits affectés par le phénomène de CSC ou susceptibles de l'être, EDF a déployé une méthode avancée d'examen non destructif (END) par ultrasons en vue de vérifier l'absence de fissuration par corrosion sous contraintes dans des tuyauteries et soudures en acier inoxydable austénitique.

Cette méthode avancée mise au point par EDF a été déployée en expertise et ne bénéficie pas encore d'une qualification au sens de l'article 8 de l'arrêté du 10 novembre 1999. Le groupe permanent a pris connaissance des développements à la fois quantitatifs (en termes de nombre d'équipements et d'équipes pour les déployer) et qualitatifs, en vue d'aller vers une démonstration de performance. Il relève que la mise en œuvre de la méthode a détecté des défauts de petite dimension (de l'ordre de 1 à 2 mm).

Le groupe permanent considère que, en l'état de la compréhension des facteurs d'occurrence des défauts, les END participent aux lignes de défense pour la tenue des circuits en exploitation. Il recommande donc que leur qualification soit menée rapidement. Dans la mesure où le risque d'apparition de la dégradation est avéré, il rappelle que cette qualification doit démontrer que les performances du contrôle sont aptes à atteindre les objectifs fixés (détection des défauts préjudiciables à l'intégrité de l'appareil telle que prévue par l'article 4 de l'arrêté précité). Au vu du phénomène de dégradation et du faciès des fissures (intergranulaires), il estime que la qualification ne doit pas se limiter à des défauts plans artificiels et doit prévoir des essais sur défauts réalistes. Enfin, la qualification devra préciser l'incertitude associée aux dimensions d'un défaut détecté.

#### ***III.5/ Analyses mécaniques***

Les études menées par EDF selon les méthodes du code RSE-M visent à vérifier l'absence d'amorçage et de déchirure des défauts postulés par une formule enveloppe. De plus, l'ASN a indiqué qu'EDF a également vérifié la tenue de l'équipement au dommage d'instabilité plastique, sur la base d'une section réduite par la taille du défaut.

Les circuits concernés sont constitués de tuyauteries en acier inoxydable d'un diamètre important (supérieur à 25 cm) ; ce type de matériaux présente une grande ténacité, qui se traduit par une forte consolidation après amorçage de la déchirure.

Aussi, le groupe permanent estime nécessaire qu'EDF complète son analyse en déterminant la taille du défaut conduisant à l'instabilité par déchirure. Ces calculs seront réalisés avec les contraintes pertinentes pour leur analyse. S'agissant des contraintes pertinentes, il ne lui apparaît pas nécessaire de retenir les contraintes résiduelles associées au soudage pour l'étude de cette instabilité.

Pour l'évaluation de la résistance à ces différents modes d'endommagement, le groupe permanent recommande l'utilisation de caractéristiques des matériaux prudentes en vue de garantir la prise en compte de la variabilité, pour une nuance d'acier donnée, de l'état tel que construit. Pour autant, il considère légitime d'établir un lien avec les conditions qui ont conduit à l'endommagement. Ainsi, dans la mesure où seul un matériau écroui a pu conduire à la CSC, il est normal de tenir compte d'une limite d'élasticité plus élevée pour la zone écrouie. Par ailleurs, il rappelle qu'il avait souligné, dans son avis du 30 septembre 2022, l'utilité du programme d'essais lancé par EDF portant sur la ténacité de cette zone particulière, affectée mécaniquement, à proximité des soudures.

Le groupe permanent note l'intérêt du calcul fait par EDF de l'évolution d'un défaut hypothétique traversant une tuyauterie et d'une extension circonférentielle d'un angle de 45°, au titre de l'appréciation de l'évolution d'une situation où un défaut non détecté conduirait à une fuite sous chargement. Le groupe permanent souligne cependant que certains défauts observés, bien que non traversants, présentent une extension circonférentielle d'un angle plus important que 45°, pouvant appeler à mener des analyses pour des angles majorés.

Enfin, le groupe permanent rappelle les termes de l'article 13 de l'arrêté du 10 novembre 1999, au sens desquels l'analyse mécanique n'est qu'une des conditions des justifications spécifiques à apporter en cas de non-élimination des fissures.

### ***III.6/ Démonstration de sûreté***

Dans le cadre de cette anomalie, la démonstration de sûreté repose sur les analyses mécaniques qui visent à démontrer que les tuyauteries respectent les critères de tenue mécanique de 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> catégories en présence d'un défaut de dimension supérieure à ceux qui ont constatés sur les réacteurs affectés.

Lors des séances des 22 et 23 septembre, le groupe permanent a pris connaissance de l'étude de robustesse réalisée par EDF portant sur la rupture totale de deux lignes RIS en fonctionnement normal pour les réacteurs de 1300MWe en vue d'en évaluer les conséquences. Il a également pris connaissance de l'analyse de cette étude par l'IRSN. Il a noté dans son avis du 30 septembre 2022 que cette étude, réalisée avec des hypothèses dites réalistes, conclut au respect des critères de sûreté de 4<sup>ème</sup> catégorie avec des marges importantes, lesquels permettent de vérifier le maintien des fonctions de refroidissement du cœur. L'analyse par l'IRSN a également souligné la validité de cette conclusion pour

une gamme étendue d'initiateurs (un nombre plus important de ruptures partielles, plus vraisemblable dans son principe que deux ruptures totales).

Le groupe permanent note que des études analogues sont en cours pour toutes les configurations de circuits classées par EDF comme sensibles : cela concerne, à ce stade, les circuits RRA et RIS du palier N4. Ces études devraient être disponibles avant la remise en fonctionnement des réacteurs correspondants, eu égard à l'ampleur et au caractère inédit de cette anomalie.

### ***III. 7/ Stratégie d'EDF pour le traitement de l'anomalie***

Les actions menées par EDF pour investiguer, comprendre et traiter les défauts liés au phénomène de CSC sont de grande ampleur et ont conduit à arrêter un nombre important de réacteurs. S'agissant des réacteurs pour lesquels des découpes de portions de circuit pour prélèvement de défauts ont été pratiquées, EDF a indiqué préparer et mettre en place des remplacements à l'identique.

Pour les réacteurs en fonctionnement comportant des zones de circuits classées comme très sensibles ou sensibles qui n'ont pas encore été contrôlées, le groupe permanent rappelle l'importance de les investiguer au plus tôt, tant pour vérifier l'absence de dégradation d'une ampleur plus importante que celles qui ont été détectées à ce jour - tant en nombre qu'en profondeur de défauts - que pour compléter le point zéro relatif à l'étendue des anomalies résultant de la CSC. A cet égard, il note qu'EDF a indiqué mener l'ensemble de ces opérations au plus tard en 2023.

Au vu des éléments examinés lors des séances des 22 et 23 septembre, le groupe permanent constate que la stratégie actuelle d'EDF est essentiellement focalisée sur le court terme, avec des remplacements à l'identique et une surveillance par END renforcée, complétés par la mise en œuvre de mesures compensatoires et la réalisation d'analyses dans différents domaines (mécanique, métallurgie, sûreté de fonctionnement). Aussi, il recommande qu'EDF exprime une stratégie pour le moyen et long terme, à l'instar de ce qui a permis le suivi et la remédiation dans la durée des anomalies génériques identifiées par le passé. Si le groupe permanent comprend et partage les difficultés, voire les risques, de définir, dans des délais courts, des modifications d'ampleur, notamment en termes de tracé des circuits, il recommande qu'EDF s'attache à identifier des évolutions pouvant être mises en œuvre rapidement en s'assurant qu'elles n'entraînent pas d'effet défavorable. Ces évolutions pourraient porter, notamment, sur le nombre de soudures, la géométrie des chanfreins, l'état de surface des soudures (arasé ou non), le conditionnement thermique des lignes et la réduction d'apports en oxygène par les moyens d'appoint au circuit primaire.

Le groupe permanent souligne qu'une réparation à l'identique est de nature à conduire à la réapparition des mêmes défauts, appelant à terme au renouvellement d'opérations lourdes de réparation. Bien qu'EDF présente ce choix comme relevant d'un risque industriel, un tel choix est porteur de conséquences notamment en termes de dosimétrie collective des intervenants. C'est pourquoi il recommande que soient considérées avec la plus grande attention les évolutions limitées qui seraient porteuses d'un fort potentiel de gain pour prévenir la réapparition d'un phénomène de CSC, tel l'arasage interne des soudures, s'agissant en particulier de celles ayant présenté les plus grands défauts.

Par ailleurs, étant donné le rôle que vont jouer les contrôles en service dans la vérification du maintien de la sûreté des zones réparées, le groupe permanent considère que la contrôlabilité des zones réparées doit être assurée et facilitée.

S'agissant de la stratégie de traitement des situations d'écart dans l'attente d'une réparation, le groupe permanent rappelle l'importance d'avoir recours à des calculs de résistance aux défauts répondant pleinement aux requis de la réglementation et reposant sur des méthodes d'END aux performances établies. Il a noté, à cet égard, dans son avis du 30 septembre 2022, la position d'EDF sur les méthodes de calcul qui seront mises en œuvre.

\*\*\*\*\*

Enfin, le groupe permanent recommande que soient tirés, dès à présent, les enseignements de ce phénomène de fissuration par CSC pour le réacteur EPR ainsi que pour la conception du réacteur EPR 2 et, de manière générale, des futurs réacteurs.

## **Annexe**

### **Membres du GPESPN ayant participé à la rédaction de l'avis**

M. SCHULER, président

M. AUTRET

M. BUISINE

M. CHAMPIGNY

M. MARTINEZ MARTIN

M. NEDELEC

M. PAYEN

M. PERRAT

M. PERRIN

M. PITOISET

M. ROTTER

M. ROUSSEL

## **Membres du GPR ayant participé à la rédaction de l'avis**

M. CHARLES, président

M. BOUTEILLE

M. DEVOS

M. FRANCARD

M. FRESON

Mme HERVIOU

M. LORINO

M. MBONJO

M. MIRAUCOURT

M. NEDELEC

M. NICAISE

M. RAYMOND

M. SAINT RAYMOND

M. SERVIERE

M. SEVESTRE

M. SIDANER

Mme TOMBUYSES

M. VITTON