

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

**Avis et recommandations relatifs au maintien en l'état, sur
plus d'un cycle, d'indications détectées dans le cadre de la
recherche de fissuration de corrosion sous contrainte (CSC)**

Réunion tenue à Montrouge et en visioconférence les 25 et 26 mai 2023
Avis rédigé les 26 mai et le 7 juin 2023

I

Conformément à la saisine du 28 avril 2023 de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) référencée CODEP-DEP-2023-012304, le Groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires (GPESPN) s'est réuni les 25 et 26 mai 2023, avec la participation de membres du Groupe permanent pour les réacteurs (GPR), à propos du phénomène de corrosion sous contrainte (CSC) affectant des tuyauteries auxiliaires en acier austénitique du circuit primaire principal de différents réacteurs à eau sous pression du parc d'EDF. Dans ce cadre, l'ASN a souhaité recueillir l'avis du groupe permanent sur les conditions de maintien en l'état d'indications de défaut attribuables à de la fissuration par CSC pour une durée supérieure à un cycle de fonctionnement du réacteur concerné. L'avis est en particulier sollicité sur les trois points ci-après :

- le caractère suffisant des moyens mis en œuvre par EDF pour détecter et dimensionner les indications dans l'attente de la qualification des méthodes ;
- la cinétique de propagation à considérer ;
- la méthodologie de détermination des défauts critiques, notamment au regard du risque de rupture brutale.

II

Le Groupe permanent a pris connaissance des rapports d'expertise du dossier qui ont été préparés par l'ASN et l'IRSN. Il a entendu les éléments qu'ils ont présentés portant notamment sur :

- Une mise à jour des informations et connaissances disponibles sur la problématique depuis les précédentes réunions des GP du 22 septembre et 13 octobre 2022 ;
- Les suites du précédent GP du 22 septembre 2022 ;
- La stratégie de contrôle d'EDF et les essais non destructifs associés ;
- La méthode de contrôle par « ultrason amélioré » (UTa) ;
- La cinétique de propagation des fissures de CSC ;
- la méthodologie de détermination des défauts critiques, principalement au regard du risque de rupture brutale.

III

Dans le cadre de la déclinaison du programme de contrôle mis en place par EDF sur le parc des réacteurs en service consécutivement à la mise en évidence de fissures de CSC sur le réacteur 1 de la centrale de Civaux et le réacteur 1 de la centrale de Penly, EDF envisage le maintien en l'état de certaines indications pour des durées supérieures à un cycle de fonctionnement. EDF a transmis à cette fin à l'ASN des justifications particulières, dont les aspects méthodologiques ont fait l'objet de l'instruction menée par l'ASN et l'IRSN et transcrite dans leurs rapports d'expertise.

Ces demandes de maintien en l'état s'appuient notamment sur :

- la connaissance des indications détectées ;
- l'estimation de l'évolution des indications sur la période considérée ;
- la justification par des calculs mécaniques de la stabilité de défauts représentatifs des indications soumis aux chargements incidentels et accidentels.

En préambule, le Groupe permanent rappelle les termes de son avis complémentaire du 26 octobre 2022 traitant de la CSC, indiquant qu'au sens de l'article 13 de l'arrêté du 10 novembre 1999, « l'analyse mécanique n'est qu'une des conditions des justifications spécifiques à apporter en cas de non-élimination des fissures. » En effet, au regard d'un phénomène dont l'ampleur n'était pas attendue, et pour lequel les connaissances relatives à son apparition sur les réacteurs en exploitation évoluent avec le déploiement des actions de contrôle et d'expertise d'EDF, le Groupe permanent appelle à conserver une attitude prudente dans l'appréciation des indications de défaut dont le maintien est envisagé.

De plus, le Groupe permanent note que les méthodes d'examen non destructifs mises en œuvre peuvent laisser subsister des zones de soudures où les contrôles, soit ne sont pas réalisables, soit leurs résultats ne sont pas interprétables. Aussi, le Groupe permanent considère que, dans l'attente de méthodes qualifiées, une stratégie de traitement claire de ces situations doit être définie, notamment en fonction de la dimension des zones et des autres possibilités d'investigation de la soudure, ainsi que des conséquences pour la sûreté de l'existence de potentiels défauts dans les zones correspondantes.

IV

Connaissance du phénomène

Le Groupe permanent note que les investigations menées par EDF sur la corrosion sous contrainte, dont un point a été fait dans ses avis de septembre et octobre 2022, se poursuivent en tenant compte des résultats du programme de contrôles. Le classement établi par EDF sur la sensibilité des lignes RIS et RRA est principalement fondé sur les chargements en exploitation. A cet égard, le Groupe permanent souligne l'intérêt d'améliorer la connaissance de ces chargements, en s'appuyant sur un programme, engagé par EDF, d'instrumentation de ces lignes pour mieux apprécier les phénomènes thermohydrauliques.

Au vu de résultats nouveaux marquants, en particulier l'identification d'une fissure profonde proche d'une soudure hors lignes sensibles, mais réparée au montage, EDF considère que ce classement en sensibilité des lignes RIS et RRA ne peut pas s'appliquer aux soudures réparées, ce que le Groupe permanent partage. **Le Groupe permanent note et souligne l'importance d'une stratégie de contrôle spécifique des soudures réparées, ce qu'EDF a engagé sur la base d'une catégorisation des types de réparation.**

Par ailleurs, les expertises menées à la suite des résultats de contrôle continuent de montrer que, pour deux soudures homologues de circuits identiques, y compris sur un même système au sein d'un même réacteur, la présence de CSC n'est pas systématique. Cela traduit une dispersion statistique des valeurs des différents paramètres. Cela traduit également le fait que l'apparition de la CSC n'est pas liée à un paramètre prédominant unique, mais à la concomitance de plusieurs facteurs propres à chaque soudure.

Au-delà, des résultats de contrôle ont également montré que, pour des soudures homologues de circuits identiques, il peut être constaté des défauts dus à des phénomènes de CSC, de fatigue thermique ou l'absence de dégradation (exemple des soudures A13 de Cattenom 3). Cela pourrait provenir de phénomènes thermohydrauliques locaux différents. Le Groupe permanent note que les expertises ont mis en évidence le cas d'une soudure où une fissure s'est propagée alternativement par fatigue thermique et par CSC. Cela renforce le besoin d'investigations complémentaires.

Bien que le classement en sensibilité au regard de la fissuration par CSC des lignes RIS et RRA établi par EDF ne soit pas remis en cause, en l'état des connaissances, comme outil de priorisation des investigations, le Groupe permanent considère que le programme de contrôle par sondage prévu par EDF pour les soudures non réparées sur les années 2023 à 2025 est nécessaire pour faire face aux incertitudes quant aux conditions d'apparition des fissures et compte tenu de l'importance pour la sûreté des circuits correspondants. A cet égard, le Groupe permanent considère que les investigations envisagées sur d'autres circuits, notamment la ligne d'expansion du pressuriseur, sont nécessaires et doivent être mises en œuvre dès que possible.

Examens non destructifs

Le Groupe permanent souligne les efforts de développement réalisés par EDF pour la mise en œuvre industrielle d'un nouveau procédé dans un délai contraint. Ce moyen de contrôle par ultrasons amélioré (UTa) est d'ores et déjà utilisé à titre d'expertise. Compte tenu de sa mise en œuvre à grande échelle, le Groupe permanent rappelle sa recommandation du 26 octobre 2022 d'aboutir à la qualification du procédé au sens de l'article 8 de l'arrêté du 10 novembre 1999. **Cette qualification est importante pour apporter le niveau de confiance attendu sur les performances de détection et de dimensionnement de défauts.**

Le Groupe permanent considère que l'examen par UTa est adapté pour la recherche de fissures de CSC pour les soudures de diamètre compris entre 8 et 16 pouces. Il estime que les performances établies par EDF sur la base d'une corrélation entre signaux et expertises destructives devraient pouvoir être atteintes.

L'interprétation des contrôles est susceptible de révéler des zones non analysables (ZNA). Le Groupe permanent considère qu'il est important, comme EDF s'y est engagée, de faire évoluer rapidement sa procédure d'analyse pour permettre de réduire au maximum le nombre des ZNA ou leurs dimensions. **Dans ce cadre, le Groupe permanent est favorable à l'utilisation autant que possible de méthodes d'END complémentaires dans les cas où l'UTa n'est pas suffisant pour confirmer l'absence de défaut ou caractériser la nature ou la dimension d'une indication.**

La procédure de contrôle ne comporte pas encore de critère pour juger de l'évolution d'une indication entre deux contrôles. De tels critères doivent faire partie de l'examen au titre de la qualification, dont l'objectif est fixé à au premier trimestre 2024.

Enfin, le Groupe permanent souligne l'importance, pour le suivi d'une dégradation apparue en exploitation, de disposer de procédés permettant d'enregistrer les signaux et de réaliser une analyse comparative des contrôles successifs.

Cinétique

Le Groupe permanent rappelle son avis complémentaire d'octobre 2022, indiquant que des valeurs prudentes doivent être retenues pour la cinétique de propagation des défauts. L'état du dossier permet de définir une valeur de la vitesse de propagation « typique » des conditions de fonctionnement. Toutefois, le retour d'expérience a mis en évidence des situations de propagations atypiques, notamment pour quelques soudures présentant des réparations ; ce qui conduit à distinguer le cas des soudures réparées de celles non réparées. Les connaissances relatives à cette cinétique de propagation des fissures de CSC doivent donc continuer à être complétées, ainsi que l'a prévu EDF.

Dans ces conditions, le Groupe permanent formule la recommandation n°1 relative aux valeurs minimales de propagation à adopter pour l'élaboration d'un dossier en soutien au maintien en l'état d'indications.

Dans une situation de maintien en l'état d'indications au-delà d'un cycle, un suivi en service spécifique est réalisé. Compte tenu des incertitudes qui affectent la connaissance de la cinétique des fissures de CSC en situation réelle, le Groupe permanent considère que ce suivi doit être assorti, pour certaines d'entre elles, d'un programme complémentaire de contrôle anticipé. Il formule à cet égard la recommandation n°2.

Au-delà de l'analyse des situations réelles, l'autre contribution aux nouvelles connaissances sur la cinétique est la réalisation d'études des phénomènes d'amorçage et de propagation. Le Groupe permanent note que les modèles utilisés par EDF rendent bien compte des résultats de laboratoire, mais souligne qu'il est moins aisé de définir avec fiabilité les paramètres significatifs rendant compte d'une situation réelle (état d'érouissage réel du matériau, niveau de contraintes apporté par le bridage des lignes à l'assemblage, modification des contraintes locales par une réparation, ...). En particulier, le Groupe permanent formule la recommandation n°3, qui vise à mieux apprécier l'importance des paramètres à retenir dans les simulations et les incertitudes associées.

Enfin, compte tenu des caractéristiques particulières des fissures observées sur la soudure A3ZR1 de Penly 1 (grande profondeur, longueur modérée), le Groupe permanent souligne l'utilité de mieux comprendre, par des études spécifiques, les niveaux de fissuration atteints.

Mécanique

EDF a mené des calculs de résistance à la déchirure en partant d'une démarche codifiée et en effectuant certaines optimisations de calcul. Ces optimisations portent sur les propriétés des matériaux retenues, la détermination des moments appliqués aux structures, basés sur un calcul élastoplastique de ligne, et le choix des cumuls de chargement.

Le Groupe permanent note que les études menées par EDF postulent des défauts axisymétriques, ce qui revêt un caractère conservatif lorsque le défaut n'est présent que sur une section limitée.

Dans l'hypothèse où une géométrie et une position réelles de défaut seraient cependant retenues par EDF pour justifier du maintien en fonctionnement d'un défaut au-delà d'un cycle, le Groupe permanent considère qu'EDF devrait :

- postuler un défaut enveloppant le défaut réel, selon la définition du défaut équivalent du code RSE-M de forme semi-elliptique ;

- assurer que le cumul des moments retenus s'exerçant sur la tuyauterie maximise la sollicitation du défaut retenu.

De plus, différentes études complémentaires sont attendues pour consolider certaines hypothèses faites par EDF dans sa démarche, notamment :

- la réalisation par EDF d'une étude relative à l'influence des coefficients d'échange fluide/paroi sur la détermination des contraintes thermiques dans les soudures ;
- s'agissant de la démarche de regroupement de soudures en vue de déterminer quelques soudures enveloppe du point de vue des chargements, une étude de vérification portant sur une configuration du RIS BF du palier N4 ;
- compte tenu du caractère conventionnel de la valeur figurant dans le code RCC-M, une analyse de sensibilité au niveau retenu de la limite d'élasticité pour les études de justification de défaut mettant en œuvre une détermination des moments appliqués par approche élastoplastique.

Le Groupe permanent a pris connaissance de résultats préliminaires importants obtenus par EDF dans le cadre du programme d'essai de matériaux représentatifs, dont il avait souligné l'utilité dans son avis de septembre 2022. Ces résultats d'essais de déchirure confirment à ce jour le choix de loi de comportement pour le métal de base écroui et montrent également que les valeurs expérimentales de résistance à la déchirure du métal de base écroui ($J_{0,2}$ de 340kJ/m^2 minimum) sont largement supérieures à la valeur retenue pour les calculs de justification (60kJ/m^2). Le Groupe permanent souligne l'importance de confirmer ces valeurs.

Au vu de l'ensemble des éléments ci-dessus, le Groupe permanent considère que la démarche de justification de la tenue mécanique des défauts est acceptable. EDF devra toutefois fournir rapidement les résultats des études précitées pour permettre de confirmer cette position.

Conséquence pour la sûreté de fuites multiples sur les lignes auxiliaires

EDF a mené des études de robustesse prenant en compte la rupture simultanée de deux lignes RIS en fonctionnement normal pour les réacteurs en exploitation. Elles ont permis de montrer, pour cette situation, le respect des critères de sûreté de 4^{ème} catégorie avec des marges importantes, lesquels permettent de vérifier le maintien de la fonction de sûreté « refroidissement du cœur ». Cette conclusion n'appelle pas de remarque du Groupe permanent. Il recommande toutefois qu'EDF examine le cas de fuites de faible débit affectant simultanément l'ensemble des lignes RIS. Le cas échéant, les conditions de gestion de ces situations accidentelles devront être précisées.

Recommandations du Groupe permanent « Equipements sous pression nucléaires » (GP ESPN)

Recommandation n° 1

En l'état des connaissances, le Groupe permanent recommande de retenir, pour l'étude du maintien en l'état des indications imputables à de la corrosion sous contrainte, les valeurs minimales suivantes :

	Défauts de hauteur inférieure à 5 mm	Défauts de hauteur supérieure à 5 mm
Soudures non réparées	1 mm/an	1 mm/an
Soudures réparées	1 mm/an	3 mm/an

Recommandation n° 2

Le Groupe permanent recommande que des contrôles de soudures présentant des indications laissées en l'état soient réalisés en anticipation des échéances du programme de suivi en service propre à l'indication, afin de conforter les valeurs de cinétique retenues. La sélection des soudures de ce programme anticipé tiendra compte des particularités des soudures (par exemple réparées ou ayant subi des contraintes de montage particulières).

Recommandation n° 3

Le Groupe permanent recommande de compléter les études relatives à l'influence des contraintes de montage sur l'estimation de l'amorçage et la cinétique de propagation des défauts pour tenir compte des soudures susceptibles d'avoir été soumises à des contraintes accrues, en particulier les soudures de fermeture des lignes.

Annexe

Membres du Groupe permanent « Equipements sous pression nucléaires » ayant participé à la rédaction de l'avis :

M.	SCHULER	Président
M.	SORRO	Vice-Président

M.	BALAHY	
M.	BILLON*	
M.	BODINEAU*	
M.	BUISINE	
M.	CASSAGNES	
M.	CHALLOT	
M.	CHAMPIGNY*	
M.	CROMBEZ*	
M.	CROMER*	
Mme	DROBYSZ	
M.	GIRAUD	
M.	GONDARD*	
M.	HOUZÉ*	
M.	HYVERT*	
M.	JENDRICH	
M.	LEBLANC*	
M.	LOISEAU	
M.	LONGIN*	
M.	MARTINEZ MARTIN	
M.	NEDELEC	
M.	PAYEN*	
M.	PERRAT*	
M.	PERRIN*	
M.	PITOISET*	
M.	PLANTEVIN*	
M.	ROTTER*	
M.	ROUSSEL	
M.	SPIESS*	

* Experts non présents lors de la réunion complémentaire de rédaction de l'avis du 7 juin 2023

Membres du Groupe permanent « Réacteurs » ayant participé à la rédaction de l'avis :

M.	CHARLES	Président
M.	SIDANER*	Vice-président
M.	BIGOT*	
M.	CHABOD*	
M.	COURTIN *	
M.	DE L'EPINOIS *	
M.	DEVOS	
M.	DUBOIS*	
M.	FRANCARD*	
M.	FRESON*	
Mme	HERVIOU*	
M.	LORINO*	
M.	MBONJO*	
M.	MENAGE	
M.	MIRAU COURT*	
M.	NEDELEC	
M.	NICAISE	
M.	RAYMOND*	
M.	ROCHWERGER*	
M.	SEKRI	
M.	SERVIERE*	
M.	SEVESTRE*	
M.	VITTON	

* Experts non présents lors de la réunion complémentaire de rédaction de l'avis du 7 juin 2023