

Fontenay-aux-Roses, le 14 septembre 2022

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2022-00189

Objet : EDF – REP – Soudures des circuits auxiliaires du circuit primaire principal affectées par la corrosion sous contrainte – Analyse des causes : volet chimie des fluides.

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 (END) aux abords de certaines soudures des lignes en branche froide (BF) du système d'injection de sécurité (RIS)¹ connecté au circuit primaire principal (CPP), 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 adjacentes a été réalisée conformément au PBMP. Les expertises réalisées par Électricité de France (EDF) 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, lors de la 3^e visite décennale du réacteur n° 1 de la centrale nucléaire de Penly, un examen non destructif a mis en évidence des indications similaires aux abords d'une des soudures du circuit RIS connecté en BF de la boucle 1. Quelques cas de fissuration ont également été découverts à proximité de soudures sur des circuits RRA. Les expertises réalisées ont permis à EDF de conclure que l'origine de ces fissures est un phénomène de corrosion sous contrainte (CSC) de l'acier inoxydable austénitique écroui² en milieu primaire non pollué.

Plusieurs actions sont menées par EDF, notamment :

- l'analyse des causes et la compréhension du phénomène CSC ;
- l'extension et l'optimisation des examens non destructifs ;
- l'analyse des enjeux de sûreté associés pour l'ensemble du parc en exploitation ;
- l'étude de nocivité des défauts de CSC vis-à-vis du risque de rupture brutale des soudures affectées.

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).

Par la saisine en référence, l'ASN a sollicité l'avis de l'IRSN sur l'analyse des causes actuellement proposée par EDF. Si la CSC est multifactorielle et son origine liée aux matériaux, aux contraintes mécaniques s'appliquant aux composants et à la composition chimique des fluides qu'ils véhiculent, cette analyse se focalise en priorité sur l'influence de la chimie et en particulier sur le rôle de l'oxygène dans l'amorçage et la propagation de la CSC en milieu primaire, aux abords des soudures des circuits auxiliaires de tous les réacteurs du parc en exploitation.

1. CONTEXTE ET ENJEUX

L'exploitation d'un réacteur nécessite la surveillance de certains paramètres chimiques au regard des enjeux de sûreté, de radioprotection de l'environnement et de durée de vie de l'installation. Afin de garantir l'intégrité du circuit primaire principal et des circuits auxiliaires, EDF définit les paramètres chimiques à surveiller permettant de garantir la qualité du fluide primaire pour, en particulier, maîtriser le risque de corrosion. Pour ces paramètres, les spécifications chimiques, requises au titre des spécifications techniques d'exploitation (STE)³, précisent notamment les valeurs attendues et/ou limites, la périodicité d'analyse et la conduite à tenir en cas de dépassement d'une valeur attendue ou limite.

2. QUALITÉ DU FLUIDE PRIMAIRE

La qualité du fluide primaire dépend à la fois du conditionnement de base du fluide primaire (teneurs en bore, lithium et hydrogène dissous) et de la présence éventuelle de polluants (essentiellement les halogénures, le sodium et les espèces soufrées).

Dans son analyse des causes, EDF a établi un bilan des dépassements des limites fixées dans les STE pour ces divers paramètres chimiques, pour les quatre réacteurs du palier N4 depuis leur mise en service et pour le réacteur n° 1 de Penly depuis sa première visite décennale. EDF fait état d'un nombre limité de dépassements ponctuels et conclut globalement au respect des valeurs attendues.

Le bilan d'EDF sur la qualité du fluide primaire n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.

Cependant, pour l'IRSN, il serait utile qu'EDF étende son analyse à l'ensemble des réacteurs affectés par la CSC et formule l'observation présentée en annexe 1.

3. MAÎTRISE DU RISQUE DE CORROSION

L'influence de l'oxygène sur l'amorçage et la propagation des fissures dues à la CSC des aciers inoxydables dans les réacteurs nucléaires est bien connue à travers le retour d'expérience des réacteurs à eau bouillante (REB). Il n'existe pas de mesures spécifiques de l'oxygène sur les lignes RIS. La teneur en oxygène est donc estimée à partir du bilan dressé par EDF sur la base de mesures requises au titre des STE et réalisées en branche chaude (BC) du CPP. Outre les arrêts du réacteur avec ouverture de la cuve, la cause principale d'entrée d'air dans le CPP étant liée aux eaux d'appoint⁴, EDF a également dressé un bilan à partir des mesures requises au titre des STE dans les bâches d'eau d'appoint. Ces bilans et les conclusions apportées par EDF ont fait l'objet de l'expertise de l'IRSN.

³ Les spécifications techniques d'exploitation (STE) définissent les règles qui doivent être observées pendant l'exploitation normale de la tranche afin de garantir notamment le fonctionnement correct des systèmes importants pour la sûreté.

⁴ Bâches d'eau d'appoint : lors du fonctionnement du réacteur, les variations de températures et la maîtrise de la chimie en exploitation nécessitent des appoints d'eau dans le circuit primaire. Ces eaux sont apportées par le circuit REA.

3.1. LES TENEURS EN OXYGÈNE DANS LE CPP

En ce qui concerne les teneurs en oxygène dans le CPP, les mesures sont effectuées par EDF en BC une fois par mois depuis 2014 sur l'ensemble des réacteurs du parc en exploitation. En l'absence de mesure, la situation antérieure à 2014 n'est pas connue. Pour EDF, les teneurs mesurées depuis 2014 respectent les valeurs attendues requises au titre des STE. Quelques cas de dépassements de la valeur attendue, considérés ponctuels par EDF, ont été identifiés. Pour ces cas, la valeur limite est respectée.

L'IRSN observe que ces mesures sont réalisées uniquement depuis la BC une fois par mois. Or une partie de l'oxygène dissous est consommée par l'hydrogène dans le cœur sous l'effet du flux neutronique. **La teneur en oxygène dans la BF est donc supérieure à celle mesurée en BC.** Ainsi, l'IRSN considère que des dépassements supérieurs à la valeur limite requise au titre des STE ont pu être possibles en BF entre 2014 et 2021. De plus, pour l'IRSN, la périodicité mensuelle n'est pas suffisante au regard des entrées d'oxygène possible concernant des réacteurs pour lesquels des variations de puissance sont régulièrement faites qui induisent l'utilisation d'eaux d'appoints. À titre d'exemple, sur deux cycles du réacteur n° 1 de Civaux en 2014 et 2015, le nombre de mesures de la teneur en oxygène est très faible au regard de la fréquence des variations de puissance. Ainsi, l'IRSN considère que les mesures mensuelles en BC ne sont pas suffisantes pour rendre compte des entrées d'oxygène en BF.

EDF considère qu'il « *est peu probable que des teneurs proches de la valeur limite de 100 µg/kg [...] soient durablement présentes dans la branche froide du RCP⁵. En complément, l'hydrogène présent dans le fluide primaire permet de garantir que les espèces oxydantes sont consommées rapidement, évitant un risque d'accumulation de ces espèces [...] et assurant un milieu réducteur* ». Sa position repose sur une superposition de mélange des fluides quasi-instantané en branche froide. Or l'IRSN rappelle qu'aucune mesure en branche froide n'a été réalisée et ne peut donc valider les calculs. De surcroît, la teneur en oxygène dissous dans le CPP mesurée a dépassé, sur de nombreux réacteurs les huit dernières années, la valeur théorique maximale calculée par EDF.

En fin d'expertise, EDF s'est engagé à réaliser « *à court terme, un suivi renforcé de la teneur en oxygène dans le fluide primaire de quelques tranches représentatives des différents paliers* ». L'objectif pour EDF est d'identifier la capacité à mettre en œuvre des mesures de la teneur d'oxygène du fluide primaire, autrement qu'en BC, via le circuit REN⁶. **Pour l'IRSN, le fait de déporter les mesures en oxygène de la BC à la BF constituerait une amélioration incontestable pour la maîtrise de la teneur en oxygène dans le fluide primaire. Néanmoins, l'IRSN considère que même si la mesure de l'oxygène dans le CPP était effectuée en branche froide, la fréquence des mesures et la conduite à tenir en cas de dépassement de la valeur limite ne sont pas adaptées et doivent être renforcées. Ceci conduit l'IRSN à formuler une recommandation en annexe 2, en sus des éléments également expertisés au § 3.2.**

Enfin, les mesures n'étant effectuées que depuis 8 ans, les conclusions sur **l'effet de la teneur en oxygène dans le CPP sur l'amorçage de la CSC doivent être prises avec précaution.**

⁵ RCP est l'acronyme anglais pour CPP.

⁶ Circuit d'échantillonnage piqué sur le circuit primaire.

3.2. LES TENEURS EN OXYGÈNE DANS LES BÂCHES D'EAUX D'APPOINT

En ce qui concerne les teneurs en oxygène des bâches d'eaux d'appoint, les spécifications chimiques n'indiquent aucune valeur attendue, mais précisent une valeur limite pour les bâches REA⁷ eau. Les mesures sont très régulières (en continu ou trois fois par semaine). Aucune prescription n'est donnée sur la teneur en oxygène dans les bâches REA bore⁷.

Concernant les bâches REA eau, l'IRSN a pris connaissance du REX des conditions d'exploitation qui indiquent des dépassements de la teneur en oxygène sur ces bâches au-delà de la valeur limite, par exemple dans le cas du réacteur n° 1 de Civaux en 2021. Plusieurs réacteurs ont également eu des eaux d'appoint provenant des bâches REA eau avec une teneur en oxygène dépassant la valeur attendue et parfois proche de la valeur limite.

Concernant les bâches REA bore, l'IRSN observe que, la technologie des bâches variant d'un palier à l'autre, celles-ci ont une teneur en oxygène dissous variable, la qualité des eaux allant de désaérée (palier CPO), à probablement aérée (paliers 1300 MWe et N4). Or EDF ne connaît pas la teneur en oxygène dans ces bâches puisqu'aucune prescription n'est donnée au titre des STE. De ce fait, pour certains réacteurs, leurs contributions aux entrées d'oxygène dans les circuits ne sont pas nécessairement négligeables. Pour l'IRSN, les appoints d'eaux par la bâche REA bore sont vraisemblablement la source principale d'entrée d'oxygène sur les paliers N4 et 1300 MWe. En tout état de cause, les entrées d'oxygène sont significativement plus élevées que sur le palier CPO du fait de la différence de conception de ces bâches.

Par conséquent, compte-tenu des éléments présentés ci-dessus et du volume moyen des eaux d'appoint injectés par cycle, l'IRSN considère que le fluide au niveau des jonctions en BF entre le CPP et les circuits RIS pourrait contenir une teneur en oxygène significative.

En fin d'expertise, EDF s'est engagé à réaliser un programme de mesure des teneurs en oxygène dans le fluide primaire corrélé aux appoints des réservoirs REA-eau et REA-bore pour évaluer l'impact ou l'absence d'impact sur les teneurs rencontrées. EDF prévoit ainsi, « à moyen terme, de statuer sur la nécessité de faire évoluer les spécifications chimiques d'exploitation concernant la maîtrise de l'oxygène dans le circuit primaire et/ou les circuits auxiliaires tels que REA ». Cet engagement ne renforce pas, à court terme, la fréquence des mesures, ni la conduite à tenir en cas de dépassement de la valeur limite. **Si l'engagement d'EDF comporte des actions importantes sur le fond, pour l'IRSN, il ne constitue pas une réponse adaptée au regard de la possibilité d'actionner des leviers permettant d'éliminer un aggravant connu d'un mode d'endommagement avéré. À ce titre, l'IRSN formule une recommandation en annexe 2.**

3.3. LIEN ENTRE LA TENUEUR EN OXYGÈNE ET LE RISQUE DE CORROSION

L'IRSN a évalué la conséquence de la présence d'oxygène sur le risque de corrosion. Le potentiel électrochimique⁸ est le paramètre physique qui régit le risque de corrosion pour les aciers inoxydables. Il dépend de la teneur en oxygène, ainsi que de la vitesse d'écoulement du fluide. Sur la base des connaissances disponibles, l'IRSN a évalué la valeur du potentiel électrochimique dans les lignes du circuit RIS en BF. En l'absence d'étude réalisée dans les conditions d'un REP⁹, l'IRSN s'appuie sur des travaux réalisés dans des conditions d'un REB dont les conclusions, à dire d'experts, devraient être largement transposables. En considérant les vitesses de fluide dans les lignes du circuit RIS évaluées par EDF, **l'IRSN constate que le potentiel électrochimique pourrait être situé au-delà du seuil de sensibilité à la CSC tiré du REX d'exploitation des REB.**

⁷ Bâches REA eau et bore : le circuit REA s'alimente auprès de bâches d'eaux d'appoint qui permettent d'injecter respectivement, une eau pure, bâche dite REA eau, et une eau notablement chargée en acide borique, bâche dite REA bore.

⁸ Grandeur électrochimique, exprimée en Volts ou millivolts, qui caractérise l'état de réactivité d'une surface et est lié à la réponse en corrosion du métal.

⁹ REP : réacteur à eau sous pression.

L'IRSN mentionne également un élément de REX d'exploitation relatif à la CSC. Les eaux d'appoint sont également injectées au niveau des joints des GMPP¹⁰ et deux cas de fissuration par CSC de vis en acier inoxydable austénitique 316L écroui dans des GMPP du réacteur n° 2 de Civaux ont été découverts en 2012.

Sur ces questions, EDF propose également d'engager « *un projet de R&D dans lequel sera étudié l'effet du potentiel de corrosion et de la température sur la CSC, pour différentes vitesses de circulation du fluide. Les résultats de ces études de R&D seront intégrés, à moyen terme, aux modèles d'amorçage et de propagation de la CSC* ». Pour l'IRSN, l'engagement d'EDF devrait permettre à terme d'apporter des éléments de connaissances précieux pour préciser les conditions conduisant au développement de la CSC dans les tuyauteries en acier inoxydables dans les conditions d'exploitation des réacteurs du parc français. **Cependant, dans l'attente de l'obtention et de l'intégration de ces nouvelles connaissances, l'IRSN estime qu'il convient de réduire le risque à la source en opérant, autant que faire se peut, un contrôle plus strict de l'oxygène présent dans les eaux d'appoints, ce qui fait l'objet de la recommandation en annexe 2.**

Ceci pourrait entraîner des modifications matérielles, la technologie actuelle de certaines bâches ne permettant pas immédiatement d'atteindre cet objectif. Même si des solutions technologiques existent, voire sont appliquées par EDF sur d'autres réacteurs (par exemple, la bâche d'eau ASG de l'EPR sera dégazée par ajout d'hydrazine), l'IRSN est conscient que des analyses seront nécessaires pour les mettre au point pour cette application précise. **Cependant, l'IRSN considère que l'objectif de désaération est primordial pour limiter la CSC au cours de l'exploitation des réacteurs.**

La présence de l'oxygène dissous dans les zones concernées par la CSC constituerait un aggravant qui permettrait d'expliquer certaines observations sur le parc : CSC majoritairement en branche froide, sur les paliers les plus récents, ce qui est a priori contre-intuitif pour ce phénomène d'endommagement.

3.4. CONSÉQUENCES DE LA TENEUR EN OXYGÈNE SUR LA CINÉTIQUE DE CORROSION

Comme le montrent les données disponibles à ce jour, la vitesse de propagation des fissures dues à la CSC dépend fortement de la teneur en oxygène dans le fluide primaire. Des travaux expérimentaux dans les conditions représentatives du fonctionnement des circuits auxiliaires sont prévus par EDF afin de compléter les connaissances issues des modèles théoriques et numériques. Toutefois, les résultats de ces travaux ne seront pas disponibles, à court terme. **C'est pourquoi, l'IRSN considère qu'EDF devra adopter une démarche prudente pour définir une valeur de vitesse de propagation de fissure CSC enveloppe.**

En l'état du dossier, il est probable que pour une soudure non réparée, la vitesse instantanée de fissuration évolue progressivement avec la profondeur. **Dans ce cas, pour une chimie parfaitement désaérée, une vitesse instantanée de 0,5 mm/an paraît un ordre de grandeur réaliste pour une fissure de quelques mm de profondeur.**

Dans le cas où la teneur en oxygène dissous ne serait pas parfaitement maîtrisée, des vitesses plus élevées sont à considérer¹¹.

¹⁰ GMPP : Groupe motopompe primaire.

¹¹ Pour une chimie aérée en continu, un facteur 7 est proposé par l'EPRI (Electric Power Research Institute).

4. CONCLUSION

La présence d'oxygène dans le fluide primaire constitue un aggravant du risque de corrosion sous contrainte dans les circuits en acier inoxydable austénitique, tels que ceux du système d'injection de sécurité.

La cause principale de présence d'oxygène dissous dans ces circuits est l'injection d'eaux d'appoint dans le circuit primaire principal. De ce fait, EDF s'est engagé à mener des actions qui permettront à terme de quantifier plus précisément l'effet de l'oxygène sur l'initiation et la cinétique de développement de fissures de corrosion sous contraintes dans des conditions représentatives de celles du parc en exploitation.

Dans l'attente de l'obtention et de l'intégration de ces nouvelles connaissances, l'IRSN estime qu'il convient d'une part de réduire le risque en opérant un contrôle plus strict de l'oxygène présent dans les eaux d'appoints, d'autre part de contrôler plus fréquemment la teneur en oxygène du fluide primaire.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Hervé BODINEAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

ANNEXE 1 À L'AVIS IRSN N° 2022-00189 DU 14 SEPTEMBRE 2022

Observation de l'IRSN

L'IRSN estime qu'EDF devrait étendre ses analyses des cas de dépassement des valeurs limites en lithium et en hydrogène dissous ainsi qu'en polluants (chlorures, fluorures, sodium et sulfates) à tous les réacteurs pour lesquels des fissures de corrosion sous contrainte sont mises en évidence dans les tuyauteries en acier inoxydable des circuits auxiliaires. La mise en évidence des fissures devra intégrer les signaux des examens non destructifs (et non seulement les expertises en laboratoire) lorsque ceux-ci sont jugés fiables.

ANNEXE 2 À L'AVIS IRSN N° 2022-00189 DU 14 SEPTEMBRE 2022

Recommandation de l'IRSN

Pour limiter les risques de CSC des aciers inoxydables en fonctionnement, l'IRSN recommande, pour tous les paliers, qu'EDF :

- garantisse, autant que faire se peut, l'emploi d'eau désaérée dans les bâches REA eau et bore. À ce titre, EDF devra définir une valeur d'alerte dans les spécifications chimiques dédiées, lui demandant d'engager les actions nécessaires pour revenir sous la valeur d'alerte. En cas de dépassement de la valeur d'alerte, les appoints d'eau devront être limités à ceux de plus faible volume ;
- augmente sa périodicité de mesure de l'oxygène dans le circuit primaire principal, en cohérence avec les meilleures pratiques internationales, et définisse, en cas de dépassement de la valeur limite, un délai maximal pour revenir vers une valeur attendue définie dans les spécifications chimiques.