

Fontenay-aux-Roses, le 7 septembre 2022

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2022-00184

Objet	EDF – REP – Réacteurs de 900 MWe – Stratégie de maintien en service des coudes moulés du circuit primaire principal – Volet nouvel END 100 % de la surface interne – Coude E du réacteur n° 2 de Saint-Laurent B.
Réf.	[1] Lettre ASN – CODEP-DEP-2019-025552 du 19 juillet 2019. [2] Lettre ASN – CODEP-DEP-2022-008545 du 18 février 2022.

Les circuits primaires principaux (CPP) des réacteurs des paliers 900 MWe et 1300 MWe sont équipés de coudes moulés en acier austénoferritique¹ dont la phase ferritique subit un vieillissement sous l'effet de la température de fonctionnement du CPP. Il en résulte un abaissement de certaines propriétés mécaniques telles que la résilience² et la ténacité³. La démonstration par EDF de la tenue en service des coudes moulés des réacteurs concernés a fait l'objet de travaux importants depuis les années 1980. Cette démonstration repose sur la compréhension de la problématique du vieillissement thermique affectant ces coudes et sur la connaissance des défauts inhérents au procédé de fabrication par moulage statique qui pourraient, combinés au vieillissement thermique, augmenter le risque de rupture brutale.

Parmi ces coudes, sur le palier 900 MWe, trois coudes de type « E », constituant le raccordement de la branche chaude à la cuve, à savoir ceux du réacteur n° 2 de la centrale de Saint-Laurent B, du réacteur n° 4 de la centrale de Dampierre et du réacteur n° 4 de la centrale du Tricastin, font l'objet d'une justification du maintien en service au-delà de leur quatrième visite décennale, en postulant un défaut de référence dans les analyses à la rupture brutale de dimensions 7 mm de hauteur par 40 mm de longueur (notées par la suite, de manière simplifiée, 7x40 mm), voire de dimensions 3x20 mm.

En cohérence avec les conclusions du Groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires (GP ESPN) qui s'est tenu le 23 mai 2019 sur la stratégie de suivi en service de ces composants, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a formulé, dans sa lettre en référence [1], la demande n° 2-A rappelée en annexe n° 2,

¹ Les aciers inoxydables austénoferritiques contiennent généralement de 20 à 30 % de chrome, de 2 à 10 % de nickel et une teneur en azote comprise entre 0,1 et 0,3 %. Ils présentent une proportion significative de ferrite dans une matrice austénitique.

² La résilience est la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie quand il se déforme sous l'effet d'un choc en présence d'une entaille.

³ La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure.

de mettre en œuvre des examens non destructifs (END) adaptés pour assurer l'absence de défauts de fabrication de dimensions inférieures à 10x40 mm. De plus, l'ASN considère que la « *justification des défauts présents dans les coudes ne permet pas d'écarter, avec un haut niveau de confiance, la présence potentielle de criques de solidification⁴, inhérentes au procédé de moulage* » (cf. annexe n° 2) [1]. En effet, ces criques peuvent présenter une ouverture si faible que les procédés de contrôles non destructifs mis en œuvre à l'issue de la fabrication, y compris radiographiques, ne peuvent pas garantir leur détection.

EDF a donc engagé le développement d'un procédé d'END par courants de Foucault⁵ (CF), en vue de détecter la présence de défauts de dimensions minimales de 3x20 mm, présentant un ligament⁶ inférieur à 10 mm depuis la surface interne du coude. La première mise en œuvre de ce procédé est prévue au cours de la quatrième visite décennale du réacteur n° 2 de la centrale de Saint-Laurent B.

Par sa lettre en référence [2], l'ASN a souhaité recueillir l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur l'adéquation des performances du procédé END retenu par rapport aux exigences définies dans le cahier des charges fonctionnel et la revue des exigences d'EDF, pour le cas spécifique du coude E (de référence 48E) du réacteur n° 2 de Saint-Laurent B.

1. COHÉRENCE DE L'OBJECTIF DU PROCÉDÉ DE DÉTECTION PAR CF AVEC LES CARACTÉRISTIQUES DES DÉFAUTS TECHNOLOGIQUEMENT REDOUTÉS

Sur la base de plusieurs profils de défauts relevés sur des coudes en fin de fabrication, le cahier des charges fonctionnel établi par EDF précise que les défauts sont composés d'un assemblage de petites facettes de défauts plans élémentaires, globalement coplanaires. Certaines de ces petites facettes peuvent être reliées par des « ponts de matière ». Néanmoins, la revue des exigences d'EDF, faisant suite à ce cahier des charges, restreint largement la portée des performances requises en détection. Les exigences portent sur la détection des défauts composés de facettes jointives, c'est-à-dire sans pont de matière, que ce soit selon leur hauteur ou leur longueur.

Pour l'IRSN, certains relevés de défauts du dossier d'EDF montrent que l'étendue des ponts de matière, aussi bien selon la longueur que la hauteur des défauts, est très variable et peut aller jusqu'à plusieurs millimètres. Des simulations numériques réalisées par l'IRSN montrent une chute significative de l'amplitude du signal CF en considérant la présence de ponts de matière. L'IRSN considère donc que leur présence influe très nettement sur les performances en détection par CF. **De ce fait, l'IRSN estime qu'EDF doit développer, mettre en œuvre et qualifier un procédé de contrôle optimisé pour la détection des défauts réels, conformément à la demande de l'ASN émise en 2019, avec la prise en compte des ponts de matière.**

2. ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DU PROCÉDÉ DE DÉTECTION PAR CF

Dans le cas des matériaux en acier austénoferritique moulé, des variations locales du taux de ferrite engendrent une variation du signal du capteur à CF et conduit ainsi à un niveau de bruit⁷ important. Ce phénomène rend d'autant plus complexe la détection des défauts enfouis par un procédé par CF, plus apte à détecter des défauts

⁴ Les criques de solidification peuvent apparaître lors du refroidissement rapide du métal en fusion au contact du moule ou lors de la rencontre de deux fronts de solidification perpendiculaires à la paroi.

⁵ Les capteurs à courants de Foucault sont généralement composés, d'une part d'un bobinage émetteur qui induit un courant dans le matériau conducteur à contrôler, d'autre part d'un récepteur de champ magnétique qui détecte la déviation locale de ce courant induit en cas de présence d'un défaut.

⁶ Le ligament est défini comme étant la distance entre la surface de la pièce et le défaut enfoui.

⁷ Au cours d'une acquisition avec un capteur CF, des phénomènes tels que l'apparition de vibrations lors du déplacement ou la non-homogénéité des propriétés électromagnétiques du matériau à inspecter, sont susceptibles de faire varier le signal CF et de masquer celui généré par le défaut que l'on souhaite détecter.

débouchants ou très proches de la surface inspectée. L'analyse de l'IRSN a porté sur les résultats obtenus par le procédé de détection par CF des défauts enfouis, puis débouchants.

Détection des défauts enfouis

Les essais de validation réalisés à ce jour par EDF indiquent qu'un défaut enfoui à 10 mm n'est pas détecté, même dans des examens en laboratoire présentant des conditions expérimentales plus favorables que celles attendues sur site (maquettes planes sur lesquelles le déplacement du capteur est parfaitement maîtrisé, entailles électroérochées parallélépipédiques...). De plus, les niveaux de bruit, mesurés sur différentes maquettes, sont supérieurs au niveau de bruit maximal permettant de garantir une détection satisfaisante des défauts sans pont de matière. À ce stade, aucune valeur de niveau de bruit n'est donnée dans le cas réel d'examens du coude E sur site. Enfin, les performances de la configuration de détection des défauts avec ponts de matière ne sont pas mentionnées.

Compte tenu du niveau de bruit relevé par EDF lors des essais de validation et de l'absence de prise en considération des défauts avec ponts de matière, l'IRSN estime que pour garantir l'absence de défauts réels enfouis dans ce type de composant, EDF ne peut pas se contenter d'un seul END surfacique par CF et doit mettre en œuvre un ou plusieurs moyens END complémentaires dans le volume.

À la suite des échanges techniques en fin d'expertise, EDF a décidé de modifier les caractéristiques du « *défaut réel minimal présentant une nocivité préjudiciable* » et a programmé une action pour faire évoluer en cohérence le cahier des charges fonctionnels et la revue des exigences. Cette évolution repose principalement sur une évaluation de la nocivité mécanique des défauts, en tenant compte de leur pont de matière, calculée avec un outil numérique développé par EDF. Cette démarche conduit désormais EDF à exclure les ponts de matière de grande étendue, particulièrement préjudiciables à une bonne détection par procédé CF. En définitive, pour EDF, le procédé CF permettra de détecter la facette du défaut la plus proche de la peau interne.

EDF modifie donc sa stratégie qui repose principalement sur des évaluations de nocivité mécanique avec une méthodologie mise à jour fin juillet 2022. Cette méthodologie n'a alors pas pu faire l'objet d'une expertise de l'IRSN. Or l'évaluation de sa robustesse est nécessaire avant de valider la nouvelle définition du défaut nocif à détecter et, par conséquent, les révisions du cahier des charges fonctionnel et de la revue des exigences programmées par EDF pour le coude E du réacteur n° 2 de Saint-Laurent B.

Par conséquent, dans l'attente des éléments apportés par EDF pour la qualification du nouveau dossier et compte tenu de l'échéance de la quatrième visite décennale du réacteur n° 2 de Saint-Laurent B, l'IRSN formule la recommandation n° 1 présentée en annexe 1.

Détection des défauts débouchants

Les défauts les plus nocifs vis-à-vis de la tenue mécanique à la rupture brutale, tels que présentés dans la stratégie de maintenance des coudes moulés d'EDF, sont les défauts débouchants situés en peau interne du coude moulé.

Aucun ressuage n'a été mis en œuvre par EDF depuis la mise en service du coude. Aussi, même si aucune dégradation en service n'est identifiée à ce jour, il est important pour l'IRSN qu'EDF garantisse l'absence de tels défauts pour le coude E du réacteur n° 2 de Saint-Laurent B, conformément à la demande de l'ASN en 2019 (cf. annexe n° 2).

Les défauts débouchants sans pont de matière, de 20 mm de longueur, paraissent détectables par le procédé par CF. Toutefois, le procédé développé se focalise sur la détection de défauts sur une étendue de ligament comprise entre 0 (débouchant) et 3 mm, ce qui conduit à sélectionner des fréquences de contrôle par CF assez basses. Or la fréquence classiquement privilégiée pour détecter des défauts débouchants dans les matériaux austénoferritiques est plus élevée. De plus, la détection des défauts technologiquement redoutés présentant des ponts de matière n'est pas revendiquée par EDF.

De ce fait, l'IRSN conclut qu'il serait plus pertinent qu'EDF mette en œuvre un contrôle spécifique à la détection des défauts débouchants, typiquement en utilisant une technique à CF à plus haute fréquence et présentant une zone active plus réduite.

À la suite du partage de cette conclusion avec EDF en fin d'expertise, EDF considère qu'il n'existe pas de défauts débouchants en peau interne du coude E du réacteur n° 2 de Saint-Laurent B. Sur cette base et les actions citées supra, **EDF ne juge pas utile de réaliser des contrôles spécifiques à la détection des défauts débouchants.**

L'IRSN rappelle, en annexe n° 2, les conclusions de l'ASN concernant ce point et souligne également qu'un défaut de fabrication de grande longueur a été découvert en exploitation en 1980 à la suite d'un contrôle visuel sur un coude E avant une épreuve hydraulique. Consécutivement à cet événement, un nombre important d'indications, non détectées lors des contrôles de fin de fabrication, ont été mises en évidence par ressuage en surfaces internes et externes des coudes moulés. Or la surface interne du coude E du réacteur n° 2 de Saint-Laurent B n'a pas pu bénéficier, lors de cette campagne, d'un ressuage.

Compte tenu de l'ensemble de ces éléments et dans l'attente des éléments apportés par EDF pour la qualification du nouveau dossier, l'IRSN estime que l'absence de défaut débouchant en surface interne n'est pas garantie pour ce coude et formule la recommandation n° 2 présentée en annexe 1.

3. ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DU PROCÉDÉ DE DIMENSIONNEMENT PAR ULTRASON

Après détection d'un défaut par la technique CF, EDF a prévu d'en évaluer les dimensions, dans la profondeur des dix premiers millimètres à partir de la paroi interne, en mettant en œuvre une technique d'examen ultrasonore multiélément⁸. L'objectif initial était d'évaluer les dimensions enveloppes du défaut, ainsi que les localisations et dimensions des éventuelles facettes qui le composent, dans le but d'étudier ensuite sa nocivité à l'aide d'un logiciel.

À ce stade précoce des développements, l'IRSN ne dispose pas des performances consolidées de ce procédé et n'a donc pas pu se prononcer sur son adéquation aux objectifs qui lui sont assignés. L'IRSN attire néanmoins l'attention sur la nécessité de prendre en compte l'influence de la structure métallurgique spécifique aux aciers moulés dans la revendication des performances en dimensionnement pour les défauts réels.

4. CONCLUSION

Dans le cadre de la justification du maintien en service au-delà de 40 ans des coudes moulés en acier austénoferritique du CPP des réacteurs de 900 MWe, l'ASN a demandé à EDF de mettre en œuvre des examens non destructifs (END) adaptés pour assurer l'absence de défauts de fabrication de dimensions inférieures à 10x40 mm, dès lors que des dimensions de défaut plus petites sont prises comme hypothèse dans l'analyse de tenue à la rupture brutale.

EDF a transmis un dossier qui propose la mise en œuvre d'un END surfacique par courants de Foucault pour la détection de tels défauts et d'un END volumique ultrasonore pour évaluer leurs dimensions.

Pour l'IRSN, l'END surfacique par courants de Foucault n'est pas suffisant à lui seul pour garantir la détection des défauts enfouis et devrait être complété par un procédé d'examen volumique. Pour la détection des défauts débouchants par CF, l'IRSN considère qu'il serait plus pertinent d'utiliser une fréquence d'examen plus élevée que celle proposée par EDF et mieux adaptée à l'application visée.

⁸ Un transducteur ultrasonore multiélément est composé par un ensemble de petites pastilles ultrasonores indépendantes. Leur excitation décalée dans le temps permet d'agir sur la direction et la nature du faisceau ultrasonore global émis par le transducteur.

Concernant l'évaluation des dimensions des défauts par méthode ultrasonore, les éléments présentés dans le dossier ne sont à ce stade pas suffisants pour que l'IRSN puisse formuler des conclusions.

L'IRSN note qu'en fin d'expertise EDF a proposé une nouvelle approche de démonstration qui sort du cadre de la présente expertise.

Pour le cas spécifique de la justification du coude E du réacteur n° 2 de la centrale de Saint-Laurent B, en l'absence d'expertise de la nouvelle approche proposée par EDF et compte tenu de l'échéance rapprochée de la quatrième visite décennale de ce réacteur, l'IRSN recommande qu'EDF mette en œuvre d'une part un procédé de contrôle volumique pour détecter des défauts réels enfouis (avec ou sans ponts de matière), d'autre part un procédé de contrôle surfacique supplémentaire, optimisé pour la détection des défauts réels, débouchants en paroi interne, de longueur inférieure à 20 mm.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Hervé BODINEAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

ANNEXE 1 À L'AVIS IRSN N° 2022-00184 DU 7 SEPTEMBRE 2022

Recommandations de l'IRSN

Recommandation n° 1

Pour le cas spécifique du coude 48E du réacteur n° 2 de Saint-Laurent B, en complément du procédé surfacique par courants de Foucault, l'IRSN recommande qu'EDF mette en œuvre, à titre d'expertise lors de la 4^{ème} visite décennale, un procédé de contrôle volumique pour détecter des défauts réels (avec ou sans ponts de matière) et enfouis, afin de garantir le caractère enveloppe des dimensions (hauteur et longueur) du défaut postulé dans l'analyse à la rupture brutale de ce composant. EDF devra qualifier l'ensemble des procédés mis en œuvre.

Recommandation n° 2

Pour le cas spécifique du coude 48E du réacteur n° 2 de Saint-Laurent B, l'IRSN recommande qu'EDF mette en œuvre un procédé de contrôle surfacique supplémentaire, optimisé pour la détection des défauts réels, débouchants en paroi interne, de longueur inférieure à 20 mm.

ANNEXE 2 À L'AVIS IRSN N° 2022-00184 DU 7 SEPTEMBRE 2022

Lettre de suite de l'Autorité de sûreté nucléaire du 19 juillet 2019

Rappel sur la connaissance des défauts présents dans les coudes :

« Une large partie de l'instruction de votre dossier de démonstration de la tenue à la rupture brutale des coudes moulés des réacteurs du palier 900 MWe a été consacrée à la connaissance des défauts présents dans ces coudes. Il en ressort notamment que votre justification des défauts présents dans les coudes ne permet pas d'écarter, avec un haut niveau de confiance, la présence potentielle de criques de solidification, inhérentes au procédé de moulage, à caractère débouchant ou sous-jacent, et mises en évidence dans le cadre du retour d'expérience des fabrications des années 1980. Je note que vous prenez uniquement en compte la présence de défauts de type « retassures » dans ces coudes.

Je vous rappelle qu'une bonne connaissance des défauts présents est nécessaire afin de garantir que les défauts hypothétiques pris en compte dans les études mécaniques présentent des marges suffisantes au regard des défauts réels.

Votre dossier de justification s'appuie principalement sur les contrôles réalisés en fin de fabrication pour justifier la compacité des coudes. Il apparaît néanmoins difficile d'apporter une connaissance suffisante des défauts réels sur la base de ces contrôles de fin de fabrication étant donné :

- que la performance des essais non destructifs n'a pas été établie à l'époque et que de multiples procédures de radiographie ont été employées ;
- la difficulté de garantir la bonne mise en œuvre de ces essais. La revue des irrégularités détectées à l'usine de Creusot Loire Industries a montré l'étendue des types d'écarts possibles en la matière (écart portant sur le type de sources radiographiques, sur le niveau d'activité de la source radiographique, sur le débit de la source, sur la classe du film, sur la distance entre la source et le détecteur, sur le type d'écrans renforçateurs employés, etc.) ;
- **que le bilan des ressuyages effectués lors de la fabrication ne permet pas d'exclure la présence d'éventuels défauts sous-jacents à la peau lors de la réalisation des ressuyages et d'éventuels défauts devenus débouchants après une opération de fabrication comme par exemple un toilettage ;**
- que les rapports de SPN des années 1980 et 1990 ainsi que des rapports d'expertise de Creusot Loire Industries concluent sur l'existence de criques de solidification dans les coudes pour lesquels il n'a pas été apporté de garantie quant à la capacité des contrôles de fin de fabrication à les détecter. »

Rappel de la demande n° 2-A :

« Pour les coudes nécessitant le recours à un nouveau défaut de référence de dimensions inférieures à 10 mm de hauteur et 40 mm de longueur, je vous demande de garantir, par un moyen robuste, l'absence de défauts réels qui seraient, notamment après avoir pris en compte les interactions entre défauts, de dimensions supérieures à ce nouveau défaut de référence et en vous appuyant en particulier sur des procédés d'essais non destructifs qualifiés selon l'article 8 de l'arrêté en référence

Par conséquent, je vous demande de définir, avant fin 2019, un plan d'actions détaillé et de proposer des échéances de réalisation des actions retenues, compatible avec la programmation des 4^{èmes} visites décennales des réacteurs concernés et avec la nécessité de recourir à d'éventuelles nouvelles analyses mécaniques avant cette échéance. »