

Fontenay-aux-Roses, le 7 novembre 2022

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2022-00208

Objet : Coudes en alliage austéno-ferritique issus de la coulée 21816 - Stratégie de maintien en service

Réf. : Lettre ASN - CODEP-DEP-2022-018981 du 24 mai 2022.

Le circuit primaire principal (CPP) des réacteurs de 900 MWe du palier CPY comporte différents coudes en acier austéno-ferritique obtenus par moulage statique. Au début des années 1980, il a été mis en évidence que le matériau de ces coudes subissait un vieillissement thermique aux températures de fonctionnement du CPP, ce qui dégrade certaines de ses propriétés mécaniques, à savoir la résilience et la résistance à la déchirure ductile¹, ce qui tend à réduire la tenue à la rupture brutale. Le phénomène est amplifié avec la température. Ainsi, les coudes moulés dits « chauds » (type C) car situés en amont du générateur de vapeur (GV) sur la branche chaude du circuit primaire, à une température d'environ 320 °C, sont plus affectés que les autres coudes (types A, B, D et E) dits « froids » et situés en aval du GV à une température d'environ 290°C.

Depuis la découverte de ce mode de vieillissement, EDF a engagé de nombreuses actions telles que le lancement de programmes de recherche et développement pour comprendre le phénomène, la relecture des rapports de fin de fabrication des coudes, l'établissement de formules de prédiction de la résistance à la déchirure ductile à l'état vieilli, le suivi en service de coudes. Certains coudes ont aussi été remplacés.

Dans le cadre de ces actions, une coulée — numérotée 21816 — a été identifiée comme particulière car plusieurs coudes issus de cette coulée ont montré des valeurs de résistance à la déchirure ductile à chaud significativement plus faibles que celles établies par les formules de prédiction d'EDF. Cette coulée a servi à la fabrication de six coudes froids — les coudes numérotés 35A, 35B, 36D, 36E, 36A et 36B — et d'un coude chaud — le coude numéroté 36C — remplacé en 2004. Lors de l'analyse des premiers résultats d'un programme expérimental toujours en cours, EDF a identifié qu'une faible pollution en plomb de la coulée de l'ordre de 70 ppm² était à l'origine de la dégradation des propriétés mécaniques à chaud. EDF a alors constitué un dossier qui analyse l'impact de cette pollution sur le vieillissement des coudes et permet de justifier la tenue en service des coudes froids de cette coulée jusqu'à dix années après la 4^e visite décennale (VD4+10). Le coude 36E ne fait pas partie de ce dossier car il bénéficie d'une stratégie spécifique.

¹ La déchirure ductile est le mode de rupture des aciers austéno-ferritiques à chaud.

² Partie par million. 1 ppm = 0,0001 %.

Par la saisine en référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a sollicité l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur les points suivants :

- 1) l'origine de l'atypicité de la coulée 21816 ;
- 2) la représentativité de la teneur en plomb, garantie de l'homogénéité de la répartition du plomb dans les barquettes³ et les lingotins⁴ associés à l'ensemble des coudes sur site et déposés. Au vu de cet examen, il est en outre demandé à l'IRSN de se positionner sur la suffisance de la stratégie d'EDF pour identifier au sein du parc d'éventuels autres composants moulés concernés par une pollution au plomb ;
- 3) la méthode utilisée par EDF pour prévoir spécifiquement l'évolution des caractéristiques mécaniques de cette coulée (prise en compte du vieillissement thermique cumulé à l'effet du plomb) ainsi que l'hypothèse d'absence de modification de la cinétique de vieillissement par le plomb ;
- 4) la justification de la tenue en service des coudes de cette coulée (hors coude 36E qui fait l'objet d'une stratégie spécifique).

Une synthèse de l'expertise menée par l'IRSN et de ses principales conclusions est présentée ci-après.

En vue de quantifier l'effet néfaste du plomb sur les propriétés de l'acier, EDF a mené des observations de la microstructure métallique ainsi que des essais mécaniques sur deux coulées synthétiques réalisées spécialement et dont les compositions chimiques sont très proches de celles de la coulée 21816. Une des deux coulées présente une pollution au plomb d'un niveau similaire à celui de la coulée 21816 et l'autre ne contient pas de plomb. Les résultats de ces caractérisations ont été comparés aux résultats obtenus sur de la matière provenant de la coulée 21816. La baisse des propriétés mécaniques apparaît uniquement à chaud au-delà de 280°C et concerne la striction⁵ et la déchirure ductile. Les résultats de la coulée synthétique polluée au plomb sont cohérents avec les résultats de la coulée 21816 et permettent de quantifier l'effet du plomb par rapport à la coulée non polluée. Pour l'IRSN, EDF a bien réussi à reproduire l'ensemble des phénomènes observés sur la coulée 21816 et les constats sont cohérents avec les cas de fragilisation au plomb cités par la littérature. Cependant, la compréhension du phénomène par lequel le plomb dégrade les propriétés mécaniques de ductilité à chaud reste à déterminer. **Ces éléments amènent l'IRSN à formuler l'observation présentée en annexe.**

Afin d'identifier d'autres coulées éventuellement polluées par le plomb, EDF a entrepris de réaliser des mesures de plomb sur l'ensemble des lingotins des coudes moulés du parc électronucléaire. À ce jour, ce programme, toujours en cours, n'a révélé une présence de plomb que sur une seule coulée et la teneur en plomb est limitée à 35 ppm. L'examen n'a toutefois révélé aucune baisse significative des propriétés de résistance à la déchirure ductile à chaud des composants de cette coulée. Pour EDF, ceci confirme l'existence d'un seuil en deçà duquel le plomb n'a pas d'effet significatif sur les propriétés mécaniques. S'agissant de l'homogénéité de la teneur en plomb, EDF souligne que les mesures des concentrations en plomb réalisées lors de la campagne n'ont jamais montré de différences significatives entre les lingotins d'une même coulée. Des analyses documentaires montrent en outre que, pour des fabrications similaires, une homogénéité de la teneur en plomb est constatée. Pour EDF, la concentration en plomb est homogène au sein d'une coulée.

Par ailleurs, EDF a mené une analyse des documents de fabrication de l'ensemble des pièces moulées en recherchant une baisse atypique des valeurs de striction à chaud. Si certaines coulées ont montré des valeurs de striction à chaud faibles, elles n'ont pas pour autant montré une teneur en plomb significative.

Pour l'IRSN, le plomb est présent de manière homogène dans chaque coulée. Ainsi, une mesure sur lingotin est suffisante et il n'est pas nécessaire d'effectuer des mesures *in situ* sur chaque coude. S'agissant plus

³ Les barquettes sont des excès de matière prélevés sur les coudes en exploitation.

⁴ Les lingotins sont de la matière supplémentaire pour essai coulés en même temps que le coude.

⁵ L'effet de striction est la diminution de la section utile d'une éprouvette de traction pendant la déformation plastique de cette dernière. Par abus de langage, la grandeur appelée striction constitue le pourcentage de perte de cette section à rupture.

spécifiquement de la coulée 21816, les mesures effectuées par EDF sur les lingotins et les barquettes prélevées sur trois coudes en exploitation, tous issus de la coulée 21816, ont montré une teneur en plomb comprise entre 70 et 80 ppm. Une mesure de plomb effectuée lors du remplacement du coude 36C a fourni également une valeur de 70 ppm alors que ce coude est *a priori* le plus pollué de par sa position dans la coulée. Tous ces éléments confirment que le plomb est réparti de manière homogène au sein de la coulée. **Pour l'IRSN, ceci confirme par conséquent la représentativité de la coulée synthétique polluée au plomb au regard de l'ensemble des coudes de la coulée 21816.**

EDF a en outre complété sa démarche par une recherche documentaire de valeurs atypiques de striction à chaud qui n'a mis en évidence aucune nouvelle pollution significative par le plomb. Cette conclusion devra être confirmée à l'issue du programme en cours. L'IRSN considère *in fine* que la stratégie mise en œuvre par EDF pour identifier au sein du parc d'éventuels autres coudes moulés concernés par une pollution au plomb est satisfaisante. L'origine de la pollution est très vraisemblablement une teneur en plomb en excès dans les ferrailles approvisionnées pour la coulée. En effet, certains aciers peuvent contenir du plomb. L'IRSN souligne à cet égard que la teneur en plomb dans les aciers n'est pas systématiquement mesurée et que, même si la mesure est faite, elle n'est ni comparée à un critère chiffré ni retranscrite dans le rapport de fin de fabrication. Pour l'IRSN, l'absence de résultat d'analyse systématique et de seuil de concentration maximale pour le plomb ne permet pas d'écarter une pollution au plomb lors d'une nouvelle fabrication. Toutefois, aucune fabrication de coude moulé en acier austéno-ferritique n'est prévue à ce jour – les coudes sont désormais forgés – et EDF vérifiera systématiquement le taux de plomb pour tous les coudes qui seraient installés à l'avenir, qu'ils soient moulés ou forgés. Le traitement d'EDF est donc satisfaisant pour les coudes. Pour les autres produits moulés (piquages, volutes), il conviendrait qu'une stratégie similaire soit mise en place, basée sur des mesures de teneur en plomb sur lingotins ou sur site en cas d'absence de lingotin avec en parallèle une recherche documentaire de valeurs atypiques.

S'agissant de l'effet du plomb sur la cinétique de vieillissement thermique des coudes, EDF a comparé les propriétés mécaniques des coulées synthétiques avec et sans plomb à différents niveaux de vieillissement. L'ensemble de ces résultats montre que la cinétique reste similaire. La comparaison des résultats des coulées synthétiques vieilles avec les modèles de prédiction du vieillissement d'EDF et les points expérimentaux obtenus sur les autres coudes du parc attestent en outre de la reproductibilité des résultats obtenus par EDF sur les coulées synthétiques. L'IRSN partage ainsi **la conclusion d'EDF selon laquelle le plomb a une influence négligeable sur les cinétiques de vieillissement des coudes moulés**. Ce résultat est cohérent avec les observations réalisées au microscope qui montrent que le plomb reste en décohésion avec la matrice métallique et n'interagirait donc pas avec le vieillissement thermique. **Aussi, la méthode utilisée par EDF pour prévoir spécifiquement l'évolution des caractéristiques mécaniques de cette coulée (prise en compte du vieillissement thermique cumulé à l'effet du plomb) n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.**

EDF a prélevé des barquettes sur les coudes 35A, 36A et 36B, puis les a fait vieillir de manière accélérée jusqu'à atteindre une durée de fonctionnement simulée correspondant à VD4 + 10⁶. La résistance à la déchirure ductile de ces barquettes a été mesurée à différentes températures. À l'issue de ces analyses, EDF a adapté son modèle de prédiction des propriétés de déchirure ductile des coudes en imputant une décote à partir de 280°C, température à partir de laquelle l'effet du plomb est constaté. EDF a retenu une décote pénalisante par rapport aux résultats observés sur les trois coudes. Ce modèle adapté permet alors de calculer la déchirure ductile des coudes froids de la coulée 21816 à l'échéance de la VD4 + 10. Pour l'IRSN cette démarche est acceptable.

À la température de fonctionnement de la branche froide du circuit primaire (environ 290°C), l'IRSN observe que l'effet du plomb se traduit par une décote d'environ 20% des valeurs de la déchirure ductile. Cet effet cumulé à

⁶ C'est-à-dire un vieillissement correspondant à 50 ans de fonctionnement. Pour rappel, les composants issus de la coulée 21816 approchent, à date de rédaction, de 40 ans de fonctionnement.

un taux de ferrite important pour ces coudes conduit probablement à ce que ces coudes présentent des valeurs de déchirure ductile à chaud parmi les plus basses des coudes froids actuellement en service.

Sur la base de ces valeurs, EDF a réalisé des calculs de rupture brutale pour les coudes froids de la coulée (hors le coude 36E) pour l'ensemble des catégories de situations. Les critères mécaniques sont vérifiés. Les calculs menés par EDF ne soulèvent pas de commentaire de la part de l'IRSN. **Ainsi, la justification de la tenue en service des coudes 35A, 36A, 35B, 36B et 36D de la coulée 21816 à jusqu'à l'échéance de la VD4 + 10 est apportée.**

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

ANNEXE À L'AVIS IRSN N° 2022-00208 DU 7 NOVEMBRE 2022

Observation de l'IRSN

L'IRSN estime qu'EDF devrait poursuivre les travaux de recherche permettant d'améliorer la compréhension du phénomène amenant à la dégradation des propriétés mécaniques des coudes moulés dès 280 °C du fait de la présence de plomb.