

Fontenay-aux-Roses, le 16 novembre 2020

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2020-00180

Objet :	Réacteur EPR de Flamanville – Réparations et remises en conformité des soudures des tuyauteries de vapeur principales selon un procédé avec électrode enrobée sur des tubes réalisés par le fabricant historique.
Réf. :	[1] Lettre ASN - CODEP-DEP-2020-036072 du 21 juillet 2020. [2] Avis IRSN 2020-00088 du 8 juin 2020.

Plusieurs défaillances sont intervenues aux différentes étapes de la réalisation des soudures des tuyauteries de vapeur principales (VVP) en exclusion de rupture du réacteur EPR de Flamanville. Ces défaillances ont donné lieu à des écarts de deux types : des propriétés mécaniques ne respectant pas les exigences définies par Électricité de France (EDF) dans son référentiel et la présence de défauts inacceptables. En conséquence, EDF a décidé de remettre à niveau, c'est-à-dire de refaire, avant la mise en service du réacteur, les soudures des traversées de l'enceinte de confinement ainsi que d'autres soudures le nécessitant, en maintenant les premières passes en racine afin de conserver l'accostage des tuyauteries obtenu lors du montage initial. Par ailleurs, certaines soudures feront l'objet d'une justification de leur caractère acceptable en l'état et les défauts inacceptables réparés. L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé à EDF, pour l'ensemble des matériaux des soudures des tuyauteries VVP laissées en l'état, ainsi que pour les matériaux susceptibles d'être mis en œuvre lors des opérations de réparation ou pour de nouvelles soudures, parmi lesquels une nouvelle électrode enrobée, d'apporter la garantie du respect des exigences qui ont été définies en matière de caractéristiques mécaniques.

Lors de la réalisation des qualifications de mode opératoire de soudage (QMOS) nécessaires à la remise à niveau des soudures des tuyauteries VVP, EDF a observé deux nouveaux écarts par rapport au référentiel sur les assemblages de qualification de la nouvelle électrode enrobée. Le premier concerne la valeur de dureté sous les dernières passes de soudage s'appuyant sur le métal de base : la valeur limite haute a été dépassée dans la zone affectée thermiquement par le soudage (ZAT). Le second écart concerne des résiliences n'atteignant pas systématiquement les valeurs minimales requises en limite des ZAT. D'une manière globale, ces écarts peuvent remettre en cause le comportement ductile et tenace des liaisons soudées, comme l'indiquait l'IRSN dans son avis cité en référence [2].

Selon EDF, le premier écart est dû à la composition chimique du tube approvisionné pour réaliser les assemblages de qualification. Le second est dû à la présence sur d'autres tubes d'une structure métallographique inattendue.

Ils relèvent tous les deux de la soudabilité métallurgique des tubes avec lesquels les assemblages de QMOS ont été réalisés. Les tubes sur lesquels ces écarts ont été relevés n'ont pas été approvisionnés auprès du fabricant historique qui a fourni les tubes pour le projet EPR de Flamanville. Toutefois, ces tubes ont été approvisionnés selon les mêmes spécifications que les tubes montés sur site, et sont conformes aux spécifications appliquées pour les approvisionnements du projet EPR de Flamanville.

EDF a défini et mené plusieurs programmes d'investigations et de nombreux essais visant à la compréhension des écarts observés et a évalué si les tuyauteries VVP montées sur site pouvaient être concernées.

Au regard de ces écarts, l'ASN a souhaité recueillir, par lettre citée en référence [1], l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) à propos de l'acceptabilité des éléments de justification transmis par EDF en vue de la mise en œuvre de l'ensemble des opérations de soudage (réparation et remise en conformité) envisagées avec une nouvelle électrode enrobée sur les tubes réalisés par le fabricant historique.

L'analyse de l'IRSN présentée ci-après aborde successivement la question de la non-conformité des duretés puis celle des valeurs de résilience en limite des ZAT.

Duretés élevées en bordure de zone affectée thermiquement par le soudage

EDF a mené un programme d'essais de dureté sous cordon à partir du tube où l'écart de dureté a été découvert et de reliquats de matière représentatifs des tubes des circuits secondaires principaux (CSP) montés sur site. À l'issue de ce programme, des duretés élevées ont été retrouvées en ZAT sur le tube incriminé. Ce programme apparaît donc pertinent pour vérifier si ces duretés élevées peuvent être rencontrées sur les reliquats de matière. Ce programme a montré aussi que les mesures de dureté après un traitement thermique de détensionnement dépassaient localement, sur les reliquats de matière, le critère défini par EDF dans son référentiel. L'IRSN constate que, dans les conditions sévères de ces essais, la réponse métallurgique de ces reliquats de matière n'est pas fondamentalement différente de celle du tube incriminé dans les QMOS ayant présenté des duretés élevées. Néanmoins, il n'est pas attendu, selon EDF, de dégradation des caractéristiques mécaniques — notamment de ténacité — dans la zone affectée thermiquement quand bien même la dureté serait non conforme. Ce point sera étayé par des essais sur maquettes spécifiques en cours de définition.

L'IRSN remarque que les procédures de soudage utilisées pour le montage des tuyauteries des CSP ne prévoyaient pas de dispositions particulières permettant de s'affranchir de la présence éventuelle de zones locales à dureté élevée. Néanmoins, huit coupons témoins ont été réalisés en cours de montage avec le tube qui a conduit aux valeurs de dureté les plus élevées parmi les reliquats de matière du programme d'essais évoqué ci-dessus. Les mesures de dureté de ces huit coupons témoins respectent le critère en ZAT des soudures effectuées sans précaution particulière. Pour l'IRSN, ceci constitue un élément favorable vis-à-vis de la présence éventuelle de zones locales à dureté élevée sur les tubes montés sur site. Par ailleurs, sur ces coupons témoins, tous les essais de pliage réalisés ont donné des résultats satisfaisants. Il en est de même pour les essais de pliage¹ réalisés sur les quatre assemblages de qualification présentant des duretés non conformes. Compte tenu des très fortes déformations imposées lors de ces essais de pliage, ceci reste le signe, pour l'IRSN, du comportement global ductile des assemblages soudés malgré la présence de zones locales à dureté élevée. Sur ces huit coupons témoins, comme sur les QMOS non conformes en dureté, les essais de résilience ont donné des résultats conformes en ZAT. Ceci indique que la résistance à l'effet d'entaille² en ZAT reste acceptable.

¹ L'essai de pliage consiste à soumettre une éprouvette rectiligne de section pleine, posée sur deux appuis, à une déformation irréversible par pliage. L'éprouvette est pliée jusqu'à l'obtention d'un angle défini par l'action d'un poinçon.

² La résistance à l'effet d'entaille désigne la propriété du matériau qui s'oppose à la propagation d'une fissure.

Concernant le risque de fissuration à froid³ que pourrait occasionner la présence de zones locales de dureté trop élevées, EDF a réalisé de nouveaux contrôles en complément des contrôles de fabrication initiaux. Ils n'ont pas conduit à identifier — à la connaissance de l'IRSN — d'indication pouvant correspondre à des défauts liés à un phénomène de fissuration à froid.

En conclusion, l'IRSN considère que si la présence de zones où la valeur de dureté est non conforme ne peut être totalement exclue sur les assemblages soudés des CSP, leur comportement global n'en apparaît pas pour autant altéré du fait du volume très limité de ces zones. Pour l'IRSN, le maintien de ces éventuelles zones n'a donc pas de conséquence pour la sûreté dès lors qu'elles ne présentent pas de défaut de type fissuration à froid comme l'attestent les résultats de contrôles. Par ailleurs, les dispositions de soudage retenues pour la poursuite du chantier devraient permettre de s'affranchir de la présence de telles zones. L'IRSN considère donc que le sujet a été traité de manière satisfaisante par EDF.

Résiliences basses en zone affectée thermiquement à la distance de 4 mm par rapport à la zone de liaison

Des résiliences non conformes ont été relevées dans la ZAT à une distance de 4 mm de la zone de liaison sur des assemblages de qualification de soudage réalisés récemment. EDF a établi un lien entre ces résultats non conformes en résilience et la microstructure métallographique aiguillée des tubes incriminés, structure qui ne correspond pas à la microstructure ferrito-perlitique⁴ granulaire attendue pour les tuyauteries en acier carbone-manganèse à l'état normalisé des CSP de l'EPR Flamanville. Les examens métallographiques par réplique réalisés sur tous les tronçons accessibles sur site montrent, selon EDF, des microstructures ferrito-perlitiques attendues : le phénomène mis en évidence lors des qualifications n'est donc pas présent sur les tubes montés sur site.

Plusieurs éléments permettent, selon EDF, de garantir avec un haut niveau de confiance le respect des critères de résilience sur les tubes montés sur site. Tout d'abord, la conformité des résiliences aux spécifications d'approvisionnement des tubes et le niveau élevé des résiliences mesurées dans le métal de base. Ensuite, le rappel de la faible baisse de résilience observée en ZAT à 4 mm de la zone de liaison pour les soudures des CSP du palier N4. Enfin, la conformité des résiliences observées sur des assemblages soudés réalisés avec des approvisionnements récents.

L'IRSN relève néanmoins que des mesures de résilience dans la ZAT à une distance de 4 mm de la zone de liaison n'ont pas été réalisées lors des QMOS initiales ni sur les coupons témoins de soudage réalisés en cours de montage des tuyauteries VVP. La question principale reste alors celle de la représentativité des matériaux sur lesquels s'appuie EDF par rapport aux tubes montés sur site.

Dans son analyse, l'IRSN identifie que les caractéristiques mécaniques minimales de traction (limite d'élasticité, charge à la rupture) relevées sur les tubes utilisés pour les qualifications ayant conduit à des résiliences non conformes restent toutes supérieures aux valeurs maximales relevées sur les tubes du fabricant historique et approvisionnés pour l'EPR de Flamanville. Ces populations ayant des caractéristiques mécaniques de traction totalement disjointes sont le signe, pour l'IRSN, de matériaux correspondant à des situations métallurgiques différentes et qui ne sont pas *a priori* assimilables.

Un tube fabriqué récemment par le fabricant historique à partir d'un lingot issu d'une des coulées utilisée pour l'EPR de Flamanville a servi à la réalisation d'un assemblage témoin. Ce tube présente des caractéristiques mécaniques de traction qui s'inscrivent parfaitement dans la population des caractéristiques mécaniques des tubes pris en compte dans l'analyse précédente de l'IRSN. La structure de ce tube, ferrito-perlitique, est conforme à l'attendu et les résultats de résilience en ZAT du coupon témoin sont conformes. Tous ces éléments indiquent pour l'IRSN que la situation de ce tube reste raisonnablement transposable aux tubes de ce fabricant

³ La fissuration à froid peut apparaître dans certaines conditions après soudage lors du refroidissement.

⁴ Microstructure d'acier ferritique dans laquelle des îlots de perlite, plus durs, sont enclavés.

montés sur l'EPR de Flamanville, contrairement à celle des tubes qui ont conduit, lors des QMOS, à des résiliences localement hors critère. Ceux-ci présentent une microstructure inattendue et des caractéristiques mécaniques de traction anormalement élevées qui ne correspondent pas à celles des tubes montés *a priori* sur site.

Ainsi, l'IRSN considère que les tubes ayant conduit à une résilience non conforme en bordure de ZAT d'assemblages soudés ne correspondent sans doute pas à l'acier visé initialement par les spécifications d'approvisionnement. Ces tubes relèvent vraisemblablement d'un approvisionnement imparfaitement maîtrisé.

Ceci conduit l'IRSN à formuler l'observation n° 1 en annexe 2 qui vise à bien comprendre l'origine de l'anomalie.

Concernant l'ensemble des tubes montés sur site, l'IRSN estime nécessaire de vérifier de manière exhaustive qu'aucun élément de tuyauterie des CSP ne présente un matériau correspondant à celui ayant conduit aux écarts observés. **Ceci conduit l'IRSN à formuler la recommandation en annexe 1.** Pour l'IRSN, ce bilan devrait être disponible avant toute opération irréversible de soudage sur les tuyauteries de vapeur principales de l'EPR de Flamanville.

Par ailleurs, EDF devra prendre en compte ce retour d'expérience afin d'une part de compléter son dossier matériaux et d'autre part de renforcer la maîtrise de ses approvisionnements, le cas échéant pour l'EPR de Flamanville, voire pour des projets futurs, en précisant et complétant les exigences définies dans les spécifications applicables.

Enfin, au cours de son analyse, l'IRSN a relevé que certains tubes des tuyauteries de vapeur principales ne respectaient pas, avant soudage, le critère minimal de résilience à 0 °C en valeur moyenne défini dans le référentiel d'exclusion de rupture ou respectaient tout juste le critère. En conséquence, **l'IRSN formule, pour ces tubes, l'observation n° 2 en annexe 2.**

En conclusion, l'IRSN considère que la demande relative à la réparation et remise en conformité des soudures des tuyauteries de vapeur principales du réacteur EPR de Flamanville selon un mode opératoire de soudage avec une nouvelle électrode enrobée et pour des tubes approvisionnés auprès du fabricant historique est acceptable du point de vue de la sûreté, sous réserve de la prise en compte de la recommandation en annexe 1 du présent avis.

IRSN
Le Directeur général
Par délégation
Thierry PAYEN
Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

ANNEXE 1 A L'AVIS IRSN N°2020-00180 DU 16 NOVEMBRE 2020

Recommandation de l'IRSN

L'IRSN recommande qu'EDF procède à un bilan complet des approvisionnements des tuyauteries des CSP du réacteur EPR de Flamanville. En complément des caractéristiques chimiques déjà recensées, ce bilan devra inclure l'ensemble des caractéristiques mécaniques mesurées en regard des épaisseurs et des caractéristiques mécaniques relevées lors des qualifications techniques correspondantes.

ANNEXE 2 A L'AVIS IRSN N°2020-00180 DU 16 NOVEMBRE 2020

Observations de l'IRSN

Observation N°1

L'IRSN considère qu'EDF devrait identifier les paramètres métallurgiques de la fabrication des tubes à l'origine des difficultés rencontrées lors des qualifications de mode opératoire de soudage avec une nouvelle électrode enrobée et ayant conduit à des résultats non conformes lors des essais de résilience réalisés en zone affectée thermiquement.

Observation N°2

L'IRSN considère qu'EDF devrait évaluer les conséquences d'une baisse en résilience pour les tronçons soudés des tuyauteries de vapeur principales de l'EPR de Flamanville redevables de l'exclusion de rupture, afin de montrer que le comportement global des soudures reste néanmoins suffisamment ductile et tenace.