

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## *Avis IRSN n° 2020-00088*

<b>Objet ....</b>	Réacteur EPR de Flamanville - Caractérisation du vieillissement sous déformation de matériaux d'apport utilisés pour les soudures des tuyauteries de vapeur principales en exclusion de rupture. Qualification d'une nouvelle électrode enrobée – valeurs de dureté non conformes.
<b>Réf(s) ....</b>	1. Lettre ASN - CODEP-DEP-2019-051046 du 13 décembre 2019. 2. Avis IRSN 2019-00057 du 22 mars 2019.
<b>Nbre de page(s) ....</b>	6

Lors de la réalisation des soudures des tuyauteries de vapeur principales (VVP) en exclusion de rupture du réacteur EPR de Flamanville, plusieurs défaillances sont intervenues aux différentes étapes de la réalisation. 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. EDF a finalement décidé de remettre à niveau avant la mise en service du réacteur, c'est-à-dire refaire, les soudures des traversées de l'enceinte de confinement ainsi que d'autres soudures le nécessitant, en maintenant les premières passes en racine des soudures afin de conserver l'accostage des tuyauteries obtenu lors du montage initial. Enfin, certaines soudures feront l'objet de 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 laissés en l'état ou susceptibles d'être mis en œuvre lors des opérations de réparations ou pour de nouvelles soudures, d'apporter la garantie du respect des exigences qui ont été définies en matière de caractéristiques mécaniques.

L'un des écarts observés entre les propriétés mécaniques attendues et celles observées est la présence d'un phénomène de vieillissement sous déformation (VSD) significatif du matériau d'apport des soudures. Ce phénomène, lorsqu'il se produit, tend à fragiliser le matériau. La fragilisation se traduit par un décalage vers les hautes températures de la température de transition entre les états fragile et ductile du matériau. EDF a donc engagé différents programmes pour quantifier ce décalage induit par le vieillissement sous déformation des matériaux d'apport concernés. Le décalage pris en compte initialement dans les analyses du

**Adresse Courrier**  
BP 17  
92262 Fontenay-aux-Roses  
Cedex France

**Siège social**  
31, av. de la Division Leclerc  
92260 Fontenay-aux-Roses

Standard +33 (0)1 58 35 88 88  
RCS Nanterre 8 440 546 018

risque de rupture brutale était de 15 °C. EDF a retenu un décalage forfaitaire de 40 °C en anticipation des résultats des programmes de caractérisation de chaque matériau d'apport des soudures. Des premiers résultats de quantification du VSD ont été transmis récemment pour certains matériaux d'apport.

En outre, la qualification de l'emploi d'une nouvelle référence d'électrodes enrobées lors des remises à niveau des soudures a été entreprise dans le cadre de la remise à niveau et de la réparation de certaines soudures des CSP. EDF a communiqué depuis décembre 2019 des premières informations sur les résultats de qualification des nouveaux modes opératoires de soudage (QMOS), notamment celles relatives aux réparations et remises à niveau des soudures réalisées manuellement à l'électrode enrobée. Certaines mesures de dureté réalisées à l'occasion de ces qualifications ont dépassé les critères définis par EDF dans son référentiel.

Dans le contexte de ces différents programmes engagés par EDF et toujours en cours, 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 la caractérisation du vieillissement sous déformation des matériaux d'apport et des duretés non conformes observées lors de certaines QMOS.

L'ASN souhaite en particulier recueillir l'avis de l'IRSN sur :

- l'adéquation du programme défini vis-à-vis de l'objectif de caractérisation du VSD des matériaux d'apport : la nouvelle électrode enrobée et le fil massif utilisé en soudage manuel TIG<sup>1</sup> ;
- la conformité des premiers résultats de quantification du VSD obtenus pour ces matériaux d'apport ;
- les premières valeurs de dureté obtenues lors des qualifications de mode opératoire de soudage avec une nouvelle électrode enrobée et sur l'adéquation du plan défini par EDF afin de comprendre le phénomène conduisant à ces duretés observées, et sur le traitement proposé.

L'analyse de l'IRSN présentée ci-après aborde la caractérisation du vieillissement sous déformation pour les deux matériaux d'apport, objets de la demande de l'ASN ; elle est étendue au fil massif utilisé pour les réparations en soudage TIG automatique. La problématique des duretés non-conformes mais également celle de mesures de résilience hors critère observées en limite de zone affectée thermiquement (ZAT) lors d'une autre qualification de mode opératoire de soudage est traitée dans une seconde partie.

#### Caractérisation du vieillissement sous déformation de matériaux d'apport

Le meilleur indicateur d'une éventuelle sensibilité au vieillissement sous déformation d'un matériau est le durcissement qu'il provoque dans ce matériau et qui conduit à observer quasi-systématiquement des valeurs de résistance à la rupture lors d'essais de traction à 300 °C supérieures aux valeurs obtenues lors d'essais à température ambiante. Pour les soudures, la réalisation d'un traitement thermique après soudage à une température voisine de 590 °C réduit fortement les effets de ce phénomène qui n'est alors en principe plus observé. Paradoxalement et pour une raison qui n'est pas identifiée à ce jour, des résultats d'essais de traction à chaud indiquent toujours, malgré la réalisation d'un traitement thermique, une sensibilité au phénomène pour les matériaux d'apport des soudures des circuits secondaires principaux (CSP) du réacteur EPR de Flamanville.

Les essais de quantification des effets du VSD réalisés par EDF permettent la détermination de courbes de transition entre les états fragile et ductile de la zone fondue des soudures, en peau et en racine des joints soudés. Ces courbes sont établies, d'une part, dans l'état qui est celui des soudures après traitement thermique - c'est l'« état détensionné » - et, d'autre part, dans le même état mais complété par un vieillissement artificiel provoqué par un

---

<sup>1</sup> Tungsten Inert Gas

écrouissage de 5% suivi d'une sensibilisation par un séjour de 30 minutes à 250 °C. Ce dernier état est appelé « *état sensibilisé* ». La méthode de quantification retenue par EDF consiste à mesurer le décalage de la température de transition fragile-ductile entre ces deux états et à retenir la plus grande des deux valeurs entre celle observée en peau et celle observée en racine.

L'IRSN considère pour sa part que la quantification du VSD doit cumuler le vieillissement sous déformation naturel qui se produit lors du soudage et le vieillissement artificiel. EDF conteste cette position et considère que la méthode préconisée par l'IRSN revient à intégrer les effets de l'écrouissage à la mesure. Or ces effets sont, selon EDF, indépendants de ceux du vieillissement. De plus, pour EDF, l'écrouissage artificiel de 5% est suffisant à lui seul pour atteindre le maximum du vieillissement sous déformation et le vieillissement naturel n'est pas à prendre en considération puisque déjà présent au moment des essais de réception.

L'IRSN considère que les arguments d'EDF sont à relativiser pour le cas spécifique des soudures des CSP du réacteur EPR de Flamanville. Si un effet de l'écrouissage indépendant du vieillissement peut être observé lors d'essais sur des matériaux de base décrits par la littérature scientifique, ceci n'est pas toujours le cas pour les zones fondues de soudage comme semblent d'ailleurs l'indiquer certains résultats d'EDF. Par ailleurs, si un écrouissage de 5% suivi d'un séjour à 250 °C pendant 30 mn était suffisant pour atteindre le maximum du VSD, le phénomène ne devrait plus être observé sur les soudures après détensionnement, ce qui n'est pas le cas sur les soudures des CSP du réacteur EPR de Flamanville. Les éléments apportés par EDF ne modifient pas l'analyse de l'IRSN qui maintient la position exprimée dans son avis en référence **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** qui a pour objectif de retenir une méthode robuste de quantification des effets enveloppes du vieillissement sous déformation.

EDF a transmis les résultats de quantification des effets du vieillissement sous déformation actuellement disponibles pour des soudures réalisées avec plusieurs types de matériaux d'apport.

Concernant le programme de caractérisation du VSD des matériaux d'apport utilisés en soudage manuel défini par EDF, celui-ci apparaît adapté. Ce programme a d'ores et déjà permis de montrer que la nouvelle électrode enrobée proposée pour les réparations n'est pas sensible au VSD après traitement thermique de détensionnement. Pour le fil utilisé pour les passes de soudage TIG manuel de réalisation des racines, le programme initial apparaît, moyennant le programme complémentaire actuellement en cours, adapté à la caractérisation et à la quantification du VSD pour les zones fondues de soudage obtenues avec ce matériau d'apport. **Les résultats disponibles à ce jour pour ces deux matériaux d'apport peuvent être considérés comme conformes à l'attendu puisqu'ils confirment pour l'un, l'absence de sensibilité au phénomène de vieillissement et, pour l'autre, le caractère enveloppe de la valeur de décalage de 40 °C proposée forfaitairement par EDF.**

S'agissant du fil massif utilisé pour les réparations en soudage TIG automatique, ce dernier présente les signes d'une sensibilité au VSD. Les résultats indiquent qu'en peau des soudures le décalage de la température de transition des courbes de résilience apparaît négligeable, et qu'en racine le décalage observé reste inférieur au décalage forfaitaire de 40 °C proposé par EDF, y compris selon la méthode d'évaluation du VSD recommandée par l'IRSN.

#### Qualification de la nouvelle électrode enrobée – valeurs de dureté non conformes

Lors de la réalisation des nouvelles QMOS nécessaires à la remise à niveau des soudures des CSP du réacteur EPR de Flamanville, EDF a observé deux résultats inattendus. Le premier concerne la dureté sous les dernières passes de soudage s'appuyant sur le métal de base : la dureté maximale définie a été dépassée dans la zone affectée thermiquement par le soudage. Le second concerne des résiliences n'atteignant pas systématiquement les valeurs

minimales requises en limite des zones affectées thermiquement par le soudage. Ces résultats, dont l'un apparaît être dû à la composition chimique du métal de base, sont tous deux liés à la soudabilité métallurgique<sup>2</sup> des tubes avec lesquels les nouvelles qualifications ont été faites. Toutefois, la composition chimique de ces tubes est conforme aux spécifications appliquées pour le projet EPR de Flamanville : le respect des spécifications ne garantit donc pas de façon robuste la soudabilité des matériaux.

**Pour l'IRSN, les compléments et modifications des Évaluations particulières des matériaux pour le nucléaire (EPMN) demandés par l'ASN dans le cadre de la mise en évidence de leur insuffisance en regard de la maîtrise du phénomène de vieillissement sous déformation devront être étendus, à la soudabilité métallurgique des matériaux approvisionnés pour la constitution des CSP du réacteur EPR de Flamanville.**

Sur ce point, EDF a répondu qu'il partageait l'analyse de l'IRSN quant à l'origine de ces résultats inattendus et qu'un programme était en cours afin de caractériser le comportement des matériaux approvisionnés auprès des différents fabricants pour les composants des tuyauteries des CSP.

Les fabricants des tubes qui ont conduit à observer des valeurs non conformes lors des essais de qualification, n'ont pas fourni de tubes pour la constitution des CSP du réacteur EPR de Flamanville, ceux-ci ayant été fournis par deux autres fabricants. Des investigations ont montré que la composition chimique des tubes utilisés pour les nouvelles qualifications présentait des particularités qui permettent, dans certains cas, de les distinguer des tubes utilisés pour le réacteur EPR de Flamanville.

EDF propose des mesures de dureté sous cordon de soudure sur des reliquats de matière disponibles issus des tubes utilisés sur le réacteur EPR de Flamanville dans des conditions visant à reproduire les duretés élevées. Ces reliquats sont choisis par EDF pour être représentatifs de l'ensemble des tubes utilisés sur les CSP du réacteur EPR de Flamanville.

L'IRSN considère que le programme d'essais proposé par EDF est de nature à permettre de reproduire le phénomène ayant conduit aux duretés élevées rencontrées lors des nouvelles qualifications, et qu'il permettra ainsi de vérifier la réalité du phénomène sur les matériaux sélectionnés et issus des CSP du réacteur EPR de Flamanville. **Il apparaît donc satisfaisant.** La vérification de l'exhaustivité des matériaux inclus dans le programme nécessite toutefois de disposer de l'inventaire de l'ensemble des produits constituant les CSP du réacteur EPR.

Concernant la problématique des valeurs de résilience basses en limite des zones affectées thermiquement, les programmes d'EDF comportent, d'une part, l'identification des structures métallographiques, notamment par répliques sur site et, d'autre part, des mesures de résilience et de ténacité ainsi que la vérification de la ductilité dans la plage basse de température du domaine de fonctionnement, mais pour des reliquats des matériaux de base avant soudage.

L'IRSN constate qu'EDF ne propose aucun élément permettant de justifier le comportement suffisamment ductile des soudures en présence d'une zone localisée de plus faible résilience, pouvant affecter par nature toute l'épaisseur de la soudure, et résultant de la réponse métallurgique des matériaux de base aux cycles thermiques imposés par leur soudage.

Or, pour les approvisionnements passés et les soudures déjà réalisées, il est possible que les phénomènes ayant conduit aux résultats inattendus observés lors des nouvelles qualifications se soient également produits. Ils seraient alors le signe de zones localisées où les caractéristiques ne sont pas celles attendues et y sont difficilement

---

<sup>2</sup> Aptitude d'un métal à subir sans dommage toutes les conséquences métallurgiques engendrées par une opération de soudage

mesurables. Ces zones localisées dont les dimensions peuvent s'étendre sur tout ou partie de l'épaisseur soudée, sont susceptibles de modifier le comportement global des assemblages soudés. Aussi, l'IRSN estime-t-il que la démarche d'EDF pour cette problématique n'est pas suffisante. Elle devra être complétée pour justifier que la soudabilité des matériaux constitutifs des CSP du réacteur EPR de Flamanville ne conduit pas, pour les approvisionnements d'origine, à une réponse métallurgique du matériau préjudiciable au comportement global des assemblages soudés.

Ceci conduit l'IRSN à formuler la recommandation en annexe.

Pour les soudures qui restent à réaliser et à réparer, EDF propose de recommencer les qualifications à partir de tubes nouvellement approvisionnés chez l'un des deux fabricants de tubes utilisés pour les CSP du réacteur EPR de Flamanville. Ces nouvelles QMOS comprendront des mesures de résilience en limite de la zone affectée thermiquement. Les résultats de ces QMOS permettront ainsi d'attester la conformité pour les tubes issus du premier fabricant. EDF propose également de compléter ces nouvelles qualifications par des essais de soudage sur des tubes en cours d'approvisionnement chez le second fabricant des CSP du réacteur EPR de Flamanville afin de vérifier la conformité des valeurs de résilience. Ainsi, l'IRSN ne remet pas en cause la pertinence de cette démarche dès lors que la qualité des approvisionnements récents ou futurs en est effectivement maîtrisée. **Le programme proposé par EDF apparaît donc satisfaisant.**

Pour le Directeur général et par délégation,  
Thierry PAYEN

Adjoint à la Directrice des systèmes, des nouveaux  
réacteurs et des démarches de sûreté

**Annexe à l'avis IRSN n° 2020-00088 du 8 juin 2020**

**Recommandation de l'IRSN**

L'IRSN recommande qu'EDF complète sa démarche afin de vérifier que le comportement global des assemblages soudés des circuits secondaires principaux du réacteur EPR de Flamanville, issus des approvisionnements d'origine, est suffisamment ductile et tenace.