

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## *Avis IRSN n° 2020-00021*

<b>Objet ....</b>	Écarts relatifs aux traitements thermiques de détensionnement des équipements en exploitation fabriqués par Framatome : programme expérimental d'évaluation des propriétés mécaniques des matériaux
<b>Réf(s) ....</b>	Saisine ASN - CODEP-DEP 2019-048945 du 9 décembre 2019.
<b>Nbre de page(s) ....</b>	6

EDF a informé l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) d'un écart relatif au traitement thermique de détensionnement (TTD) de soudures d'équipements sous pression nucléaires réalisé par un dispositif de chauffage local composé de mouffles équipés de résistances électriques.

Cet écart conduit, selon les cas, à une température de traitement supérieure à la température maximale spécifiée de 620 °C, cas appelé « sur-revenu », ou à une température de traitement inférieure à la température minimale de 595 °C, cas appelé « sous-revenu ». Cet écart concerne des équipements installés dans les réacteurs d'EDF en exploitation ainsi que des équipements du réacteur EPR de Flamanville. Cet avis ne concerne que les équipements installés dans les réacteurs d'EDF en exploitation.

EDF a indiqué que les équipements sous pression nucléaires du parc en exploitation concernés par cet écart sont les générateurs de vapeur (GV) du réacteur n° 3 de la centrale nucléaire du Bugey, du réacteur n° 2 de la centrale nucléaire de Fessenheim, des réacteurs n° 3 et n° 4 de la centrale nucléaire du Blayais, du réacteur n° 4 de la centrale nucléaire de Dampierre, du réacteur n° 2 de la centrale nucléaire de Paluel, ainsi que les générateurs de vapeur GVRP384 et GVRP386 récemment installés sur le réacteur n° 5 de la centrale nucléaire de Gravelines.

Le non-respect de la plage de température de traitement thermique remet en cause les hypothèses relatives aux propriétés mécaniques des matériaux retenues par EDF en tant que données d'entrée des analyses du comportement mécanique des équipements concernés, ainsi que celles relatives aux contraintes résiduelles.

**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

En vue de caractériser cet écart, EDF a rapidement réalisé une première campagne d'essais. Celle-ci a permis d'évaluer les propriétés d'une partie des matériaux concernés par l'écart. EDF propose désormais un programme expérimental plus étendu afin de compléter les caractérisations déjà réalisées. Il comporte un volet « matériau » ainsi qu'un volet « thermique ». Le volet thermique comprend des essais destinés à confirmer les températures minimales et maximales effectivement appliquées lors du traitement des équipements concernés, déterminées en partie par simulation numérique.

Par la saisine en référence, l'ASN demande l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) quant au caractère adapté et suffisant du programme expérimental défini par EDF afin de caractériser l'écart.

L'IRSN présente dans cet avis son analyse du volet « matériau » du programme expérimental. L'analyse du volet « thermique » du programme expérimental requiert, au préalable, une analyse approfondie du modèle de simulation numérique mis en œuvre par EDF. Cette analyse étant en cours, l'avis de l'IRSN quant au caractère adapté et suffisant de la seconde partie du programme expérimental d'EDF afin de caractériser l'écart sera communiqué ultérieurement.

## 1 PROGRAMME D'EDF

L'objectif du volet « matériau » du programme expérimental d'EDF est d'évaluer l'impact de l'écart de TTD sur les propriétés mécaniques du matériau 18 MND5<sup>1</sup> ainsi que sur les températures de transformation métallurgique et le niveau de contraintes résiduelles des matériaux en présence. Ces trois volets du programme d'EDF sont successivement décrits ci-dessous.

Il est à noter que les propriétés mécaniques sont principalement affectées par le sur-revenu. Ainsi, le programme proposé par EDF vise à déterminer les propriétés mécaniques du matériau 18 MND5, notamment dans les cas où la température maximale spécifiée de 620 °C a été dépassée.

*A contrario*, les contraintes résiduelles sont principalement affectées par le sous-revenu. Ainsi, le programme proposé par EDF vise à estimer les contraintes résiduelles du joint soudé dans les cas où la température minimale spécifiée de 595 °C n'a pas été atteinte.

La température de transformation métallurgique AC1<sup>2</sup> de l'acier 18 MND5 est supérieure à la température de 700 °C estimée par EDF comme majorant la température maximale appliquée en cas de sur-revenu lors du TTD. Ainsi, pour la plupart des générateurs de vapeur en exploitation, l'écart de TTD n'a, en principe, pas conduit à dépasser la température de transformation métallurgique. Néanmoins, EDF entend le vérifier. De plus, cette température de transformation métallurgique est susceptible d'être affectée par la présence d'une ségrégation de carbone, telle que la ségrégation identifiée dans la virole basse du GV 335 du réacteur n° 2 de Fessenheim. Pour ce cas, EDF prévoit de déterminer, dans son programme expérimental, la température de transformation métallurgique AC1 minimale du matériau ségrégué afin de vérifier que le sur-revenu occasionné par le TTD en écart n'a pas conduit à la dépasser localement.

---

<sup>1</sup> Les propriétés mécaniques sont déterminées au niveau du métal de base, de la zone affectée thermiquement et du métal déposé par soudage.

<sup>2</sup> AC1 : température de début d'apparition de la phase austénitique à la chauffe.

## 1.1 Propriétés mécaniques des matériaux

Les propriétés de traction à température ambiante et à 350 °C ont d'ores et déjà été mesurées par EDF sur des échantillons d'acier 18 MND5 lors de la première campagne d'essais réalisée par EDF en 2019. En outre, cette campagne a permis d'évaluer les propriétés mécaniques après traitement thermique à des températures comprises entre 600 °C et 700 °C pour le métal de base, et comprises entre 500 °C et 700 °C pour le métal déposé par soudage. Des courbes de transition de résilience ont été construites afin de déterminer le décalage de température de transition de résilience à 50 % de fibrosité par rapport à l'état de référence, correspondant au traitement thermique de qualité pour le matériau de base, et à un TTD nominal à 610 °C pour le métal déposé.

La température de transition de référence à ductilité nulle ( $RT_{NDT}$ ) du métal de base et du métal déposé sera évaluée dans le cadre du programme proposé par EDF pour plusieurs températures de TTD, non définies à ce stade.

Dans ce programme, des compléments de caractérisation sont prévus par EDF. Des essais de traction à température ambiante et à 350 °C seront réalisés et de nouvelles courbes de transition de résilience seront établies pour le métal de base, le métal déposé et la zone affectée thermiquement, à 1 mm et à 4 mm de la ligne de fusion. Ce programme complémentaire portera sur des éprouvettes prélevées, d'une part, dans des tôles planes soudées puis traitées thermiquement en four et, d'autre part, dans des maquettes de virole à l'échelle 1 soudées dans les conditions de réalisation industrielles, puis traitées thermiquement avec les mêmes moyens que ceux utilisés en fabrication. Sept températures de TTD comprises entre 500 °C et 700 °C seront appliquées.

Les procédés de soudage prévus pour réaliser les différentes maquettes, à savoir soudage automatique sous flux solide et soudage manuel à l'électrode enrobée, seront représentatifs des pratiques en atelier. EDF précise qu'une des maquettes à l'échelle 1 assemblera une virole obtenue à partir d'un lingot creux et comportant des ségrégations positives de carbone (côté tête du lingot), et une virole n'en comportant pas. La réalisation de cette maquette vise à couvrir la variabilité de la concentration en carbone des pièces forgées constitutives des équipements sous pression en exploitation.

## 1.2 Températures de transformation métallurgique

Afin de démontrer que le matériau n'a pas subi de transformation métallurgique lors du sur-revenu, EDF réalisera des essais de dilatométrie sur des éprouvettes prélevées dans les tôles planes soudées, au niveau du métal de base et du métal déposé. L'objectif de ces essais est de déterminer la température dite « AC1 », mentionnée ci-dessus, et la température dite « AC3 » à partir de laquelle la structure est entièrement austénitique à la chauffe. EDF prévoit également de déterminer les températures de transformation AC1 et AC3 pour des éprouvettes prélevées au niveau du métal de base et du métal déposé des maquettes à l'échelle 1 du programme expérimental à venir.

## 1.3 Contraintes résiduelles

L'estimation du niveau des contraintes résiduelles en cas de sous-revenu sera réalisée grâce à des essais de relaxation anisotherme, menés en laboratoire sur une partie des éprouvettes du programme. Ces résultats seront complétés par des mesures réalisées par la méthode du trou<sup>3</sup> sur une maquette à l'échelle 1 dédiée à l'évaluation des contraintes résiduelles et représentative d'un joint soudé de générateur de vapeur. Les contraintes résiduelles seront mesurées à trois états : à l'état brut après soudage, après réalisation d'un TTD en four de l'ensemble du joint soudé à 500 °C et après réalisation d'un TTD avec moufles équipés de résistances électriques dans la configuration

<sup>3</sup> La méthode du trou consiste à équiper la structure de jauges de déformation et à réaliser, ensuite, un trou à proximité. Les contraintes résiduelles, présentes avant la réalisation du trou, sont déduites des déformations induites par la réalisation du trou et mesurées par les jauges.

industrielle en écart. Les mesures de contraintes résiduelles seront uniquement réalisées dans des zones en sous-revenu.

## 2 ANALYSE DE L'IRSN

En vue d'évaluer l'impact de l'écart relatif à la réalisation du TTD à l'aide de moufles équipés de résistances électriques, EDF a présenté le programme expérimental détaillé dans la partie précédente. La plage de températures investiguée par EDF est comprise entre 500 °C et 700 °C. La validité de cette donnée d'entrée fera l'objet d'une expertise ultérieure de la part de l'IRSN. L'IRSN note la quantité importante de données qui seront produites dans le cadre de ce programme.

À ce jour, EDF prévoit d'évaluer les propriétés mécaniques d'un acier de nuance 18 MND5 uniquement, en ce qui concerne le métal de base et la zone affectée thermiquement. Or la nuance 20 MND5 a également été utilisée pour la fabrication de certains générateurs de vapeurs qui font l'objet du présent avis ; c'est notamment le cas des viroles du générateur de vapeur PL/203 du réacteur n° 2 de Paluel. L'IRSN considère que, de ce fait, l'évaluation de l'impact de l'écart de TTD sur les propriétés mécaniques de l'acier de nuance 20 MND5 doit être intégrée au programme expérimental. Ce point fait l'objet de la recommandation n°1 en annexe.

En ce qui concerne la détermination des propriétés de traction des matériaux concernés par l'écart de TTD, le programme proposé par EDF n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN. L'IRSN estime que la localisation des éprouvettes qui seront prélevées, leur nombre ainsi que les états thermiques investigués sont suffisants pour évaluer les conséquences éventuelles du sur-revenu sur les propriétés de traction.

L'évaluation des propriétés de résilience des matériaux concernés par l'écart de TTD à l'aide du décalage de température de transition à 50 % de fibrosité n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN. L'IRSN estime que la localisation des éprouvettes qui seront prélevées, leur nombre ainsi que les états thermiques investigués sont suffisants pour évaluer les conséquences éventuelles de l'écart sur les propriétés de résilience en cas de sur-revenu.

L'évaluation des températures de transformation métallurgique AC1 et AC3 n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN. Dans le cas où la température AC1 minimale déterminée expérimentalement resterait supérieure à la température de 700 °C, estimée par EDF comme majorant la température maximale pouvant avoir été atteinte lors du TTD en écart, EDF pourrait alors écarter le risque que le sur-revenu ait localement initié un changement de phase, y compris pour la virole basse du GV 335 du réacteur n°2 de Fessenheim.

En ce qui concerne les contraintes résiduelles, EDF ne prévoit de mesures des contraintes résiduelles que dans les zones de sous-revenu de la maquette à l'échelle 1 dédiée à leur estimation. L'IRSN considère qu'il s'agit là d'un résultat relatif, qu'il convient par conséquent de comparer au niveau des contraintes résiduelles présentes dans les zones de sur-revenu et dans les zones en conformité de traitement thermique. EDF considère que les contraintes sont nulles dans ces deux cas mais, pour l'IRSN, ceci requiert d'être vérifié expérimentalement. En effet, compte tenu de la baisse des propriétés mécaniques du matériau dans les zones de sur-revenu, les marges par rapport aux critères d'amorçage de défaut des analyses de rupture brutale s'en trouvent diminuées. Ainsi, pour l'IRSN, il convient de vérifier que les contraintes résiduelles sont effectivement nulles car, dans le cas contraire, elles nécessiteraient d'être prises en compte dans les analyses du risque de rupture brutale. Ce point fait l'objet de la recommandation n°2 en annexe.

Lors de la réalisation industrielle d'un joint soudé, un certain nombre d'aléas peuvent conduire à devoir réaliser des réparations locales. Dans le programme d'EDF, aucune réparation simulée n'est prévue au niveau du joint soudé sur la maquette à l'échelle 1 réalisée pour l'évaluation des contraintes résiduelles. Cependant, il n'est pas exclu que de

telles réparations aient été réalisées en usine au niveau des joints des générateurs de vapeur des réacteurs en exploitation. De telles réparations ont un impact significatif sur le profil de contraintes résiduelles, notamment si elles sont effectuées en face interne. L'IRSN estime que, à moins d'apporter la preuve qu'aucune réparation n'a été effectuée sur aucun des joints soudés des générateurs de vapeur des réacteurs en exploitation concernés par l'écart, la prise en compte de cette configuration est nécessaire dans le programme. Ce point fait l'objet de la recommandation n°3 en annexe.

En conclusion, sous réserve de la prise en compte des recommandations présentées en annexe de cet avis, l'IRSN estime que le programme d'essais envisagé par EDF est adapté et suffisant pour évaluer l'impact de l'écart de réalisation de traitement thermique de détensionnement sur les propriétés mécaniques des matériaux, sur la température de transformation métallurgique dite AC1, ainsi que sur les contraintes résiduelles.

Pour le Directeur général et par délégation,  
Frédérique PICHEREAU  
Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

Annexe à l'avis IRSN n° 2020-00021 du 10 février 2020

Recommandations de l'IRSN

*Recommandation n° 1*

L'IRSN recommande qu'EDF intègre à son programme expérimental la caractérisation de l'impact de l'écart de traitement thermique de détensionnement sur les propriétés mécaniques d'un assemblage soudé entre viroles en acier de nuance 20 MND5.

*Recommandation n° 2*

L'IRSN recommande qu'EDF effectue des mesures de contraintes résiduelles sur la maquette à l'échelle 1 dédiée à leur évaluation dans les zones de sur-revenu ainsi que dans les zones en conformité de traitement thermique, afin de justifier l'absence de prise en compte de contraintes résiduelles dans ces zones.

*Recommandation n° 3*

L'IRSN recommande qu'EDF procède à l'inventaire des éventuelles réparations des soudures des équipements en exploitation concernés par l'écart de traitement thermique de détensionnement, et, à moins de pouvoir prouver l'absence totale de telles réparations, inclue à son programme expérimental des essais permettant d'évaluer les contraintes résiduelles dans les zones réparées.