

Fontenay-aux-Roses, le 18 janvier 2018

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

Avis IRSN/2018-00011

Objet : Virole basse 335 de Fessenheim 2 - Dossier de justification de la tenue en service - Examens non destructifs et caractérisation des matériaux

Réf. [1] Décision ASN - CODEP-CLG-2016-02945 du 18 juillet 2016 : « Décision suspendant certificat d'épreuve du générateur de vapeur n° 335 fabriqué par AREVA NP ».

[2] Saisine ASN - CODEP-DEP-2017-041895 du 13 octobre 2017 : « Virole basse 335 de Fessenheim 2 - Dossier de justification de la tenue en service - Examens non destructifs et caractérisation des matériaux ».

[3] Saisine ASN - CODEP-DEP-2017-046552 du 16 novembre 2017 : « Virole basse 335 de Fessenheim 2 - Dossier de justification de la tenue en service - Positionnement de la masselotte dans la virole ».

[4] Avis IRSN/2018-00006 du 9 janvier 2018 : « Virole basse 335 de Fessenheim 2 - Dossier de justification de la tenue en service ».

Dans le cadre de l'audit mené sur les dossiers de fabrication de la forge du Creusot, AREVA NP a identifié un chutage insuffisant portant sur la virole basse du générateur de vapeur (GV) n° 335 installé sur le réacteur n° 2 de la centrale de Fessenheim, désignée par « VB 335 » dans la suite de cet avis. Cet écart a été noté au moment de la fabrication mais, en dépit de celui-ci, AREVA NP a déclaré la pièce conforme alors qu'elle ne l'était pas.

L'analyse des conséquences de ce chutage insuffisant conduit à suspecter la subsistance d'une partie de la masselotte<sup>1</sup> dans la partie supérieure de la VB 335.

La potentielle présence au sein de cette masselotte d'éléments de nature à modifier les propriétés mécaniques de l'acier a conduit l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) à suspendre le certificat d'épreuve hydraulique de l'équipement concerné, entraînant l'arrêt du réacteur [1].

Afin d'appuyer sa future demande de levée de cette suspension, AREVA NP a présenté un dossier de justification de la tenue mécanique de la VB 335.

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

---

<sup>1</sup> Masse excédentaire de matière en tête de lingot, normalement éliminée lors de la fabrication.

Ce dossier comprend notamment :

- l'évaluation des dimensions de la zone susceptible de contenir la masselotte et de son positionnement dans l'équipement ;
- la relecture des contrôles de fabrication ;
- l'évaluation des propriétés des matériaux à travers la réalisation et la caractérisation de deux viroles sacrificielles qualifiées de « représentatives » de la VB 335.

Par ailleurs, EDF a procédé à des examens non destructifs, en mode expertise, en vue de justifier l'absence de défaut au niveau de la zone susceptible de contenir la masselotte.

Par les saisines en références [2] et [3], l'ASN a souhaité recueillir l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) à propos de :

- la justesse de la localisation et de l'estimation des dimensions de la zone en anomalie ;
- la capacité de détection de défauts plans d'orientations longitudinale et circonférentielle en peau interne pour les contrôles non destructifs (CND) mis en œuvre par AREVA NP lors de la fabrication ;
- la capacité de détection des défauts plans d'orientations longitudinale et circonférentielle en peau interne pour les examens non destructifs (END) mis en œuvre par EDF, en mode expertise, dans le cadre du traitement de l'écart ;
- l'adéquation entre les examens non destructifs mis en œuvre par EDF en mode expertise et la localisation et l'étendue de la zone en anomalie ;
- l'acceptabilité vis-à-vis de la sûreté des caractéristiques du matériau évaluées dans cette zone<sup>2</sup>.

Les autres volets de ce dossier, à savoir la recherche des transitoires thermohydrauliques les plus sollicitants et les analyses à la rupture brutale, ont été respectivement évalués par l'IRSN dans un cadre séparé [4] et par l'ASN.

La synthèse de l'instruction menée par l'IRSN sur les sujets précités est présentée dans la suite de cet avis. Toutefois, l'IRSN rappelle que les justifications techniques ne constituent qu'un des éléments d'appréciation de la situation actuelle du générateur de vapeur (GV) n°335 installé sur le réacteur n°2 de la centrale de Fessenheim. En effet, s'agissant d'un composant en exclusion de rupture, la démonstration de sûreté repose au premier chef sur le strict respect des procédés de fabrication qualifiés. Or le constructeur n'a pas appliqué tous ces procédés pour ce générateur de vapeur, tout en étant conscient de ce fait.

---

<sup>2</sup> Au sein de la masselotte, l'acier présente une teneur en carbone globalement supérieure à la teneur spécifiée pour la pièce. D'une part, ceci induit une ténacité de l'acier potentiellement plus faible dans cette zone que celle déterminée lors des essais de recette, or les propriétés de recette servent de référence pour les analyses du risque de rupture brutale de l'ensemble de la pièce. Les analyses à la rupture brutale sont donc invalidées pour cette zone. D'autre part, cette zone ayant été soudée lors de l'assemblage de la virole basse avec la virole médiane, la teneur en carbone élevée induit un risque de fissuration à froid après cette opération. La sensibilité à la fissuration à froid est en conséquence à évaluer.

### Localisation et estimation des dimensions de la zone en anomalie

Afin de localiser et d'estimer les dimensions de la zone en anomalie, et afin de disposer de matière permettant la réalisation d'essais de caractérisation des propriétés mécaniques de l'acier, AREVA NP a réalisé deux viroles sacrificielles.

D'après les mesures de teneur en carbone réalisées en tête des deux viroles sacrificielles, AREVA NP a constaté que la zone en anomalie s'étend au maximum sur une hauteur de 150 mm sous le joint soudé qui réalise la liaison entre la virole médiane et la virole basse (VM/VB).

AREVA NP a également utilisé ces viroles sacrificielles pour des analyses métallurgiques superficielles permettant, par comparaison à des analyses similaires sur la VB 355, de confirmer le respect de l'orientation de la virole (par rapport à l'orientation du lingot lors de la coulée) définie à la conception.

L'IRSN reconnaît le bien-fondé de la démarche d'AREVA NP qui s'appuie sur la réalisation et la caractérisation de deux viroles sacrificielles qu'il considère représentatives de la virole d'origine, au vu de leurs conditions de fabrication similaires.

L'IRSN n'a pas de remarque sur l'appréciation par AREVA NP de la position et de l'étendue de la zone en anomalie. Il ressort néanmoins des analyses réalisées par AREVA NP que la teneur en carbone varie significativement le long de la circonférence des viroles sacrificielles, ainsi que d'une virole à l'autre. De telles variations, pour l'IRSN, étaient attendues pour des pièces issues d'un procédé de fabrication par forgeage libre et ceci ne remet pas en cause le caractère représentatif des pièces sacrificielles.

Enfin, l'IRSN considère qu'AREVA NP a apporté des éléments qui permettent d'écarter la possibilité d'une inversion de l'orientation de la virole VB 335 en fabrication : la zone en anomalie se situe sans équivoque en tête de virole, à la jonction avec la virole médiane.

### Capacité de détection de défauts plans d'orientations longitudinale et circonférentielle en peau interne par les contrôles non destructifs (CND) mis en œuvre par AREVA NP lors de la fabrication

Lors des CND réalisés entre 2008 et 2010 au moment de la fabrication, AREVA NP a mis en œuvre différentes méthodes de contrôle au titre de la spécification d'équipement. La relecture des contrôles de fabrication n'a pas amené AREVA NP à remettre en cause ses conclusions initiales. Tous les contrôles ont été mis en œuvre conformément au référentiel alors en vigueur et les indications détectées ont été réparées.

Afin de vérifier la capacité des méthodes à détecter les défauts plans semi-elliptiques d'orientations longitudinale et circonférentielle proches de la paroi interne dans la partie forgée de la VB 335 et dans la soudure de jonction de la virole basse (VB) et de la virole médiane (VM), l'IRSN a analysé l'ensemble des procédures de contrôle (méthode par ressuage, magnétoscopie, radiographie, ultrasons) et a réalisé ses propres simulations pour étayer son analyse.

**Concernant la soudure** de la jonction VB/VM, les défauts en surface sont détectés par magnétoscopie. Dans le volume de la soudure, les défauts longitudinaux<sup>3</sup> et transverses<sup>4</sup> sont détectés par radiographie et par ultrasons.

<sup>3</sup> Selon la direction parallèle à l'axe de la soudure.

<sup>4</sup> Selon les deux directions perpendiculaires à l'axe de la soudure.

L'analyse de l'IRSN conclut que les méthodes mises en œuvre par AREVA NP lors des CND en fabrication de la soudure de la jonction VB/VM garantissent la détection d'un défaut plan d'orientation longitudinale ou circonférentielle de dimensions 5 mm x 30 mm dans la soudure, **ce qui est satisfaisant.**

**Concernant la partie forgée** de la VB 335, les défauts en surface sont détectés par ressuage. Dans le volume de la pièce, les défauts plans longitudinaux<sup>5</sup> et transverses<sup>6</sup>, proches de la paroi interne, sont détectés par ultrasons.

Aucune méthode n'a été mise en œuvre pour détecter les défauts d'orientation circonférentielle<sup>7</sup> car la présence de ce type de défauts est très peu probable au stade final de la pièce, au vu du procédé de forgeage. **Ceci n'appelle pas de remarque de l'IRSN.**

L'IRSN estime que la capacité de détection des défauts longitudinaux dans le volume de la pièce en paroi interne de la partie forgée est **satisfaisante** pour des défauts désorientés de moins de 10° par rapport à la verticale et de dimensions 5 mm x 30 mm.

En outre, pour les défauts transverses, l'IRSN constate qu'AREVA NP a réalisé les contrôles en ondes longitudinales (OLO°) conformément au référentiel en vigueur à la date de fabrication de la virole et n'a pas noté d'indication. Toutefois, l'exigence portant sur l'un des critères de notation, à savoir le rapport « R » d'affaiblissement de l'écho de fond, a évolué au plan normatif depuis cette date et est devenue plus conservatrice. L'IRSN considère que les niveaux prescrits par la norme européenne NF EN 10228-3 constituent le niveau minimal à respecter lors des contrôles, *a fortiori* pour un matériel en exclusion de rupture. Ainsi, ce critère devrait être mis à jour dans les spécifications de contrôle pour les futurs contrôles de fabrication, ce qui n'est pas le cas à l'heure actuelle. **L'IRSN émet à ce sujet l'observation en annexe 2.**

Le point précédent ne concernant que la capacité de détection des défauts transverses, **l'IRSN n'a pas de remarque sur la capacité des contrôles réalisés en fabrication à détecter les défauts plans d'orientation longitudinale en peau interne dans la partie forgée de la VB 335.** Les défauts circonférentiels ne sont pas recherchés en fabrication.

Capacité de détection des défauts plans d'orientations longitudinale et circonférentielle en peau interne pour les examens non destructifs (END) mis en œuvre par EDF, en mode expertise, dans le cadre du traitement de l'écart, et adéquation de ces contrôles avec la localisation et l'étendue de la zone en anomalie

Un contrôle par ultrasons en mode expertise de la partie forgée de la VB 335 et de la soudure a été réalisé en 2016 par EDF, au titre du traitement d'écart. Cette expertise prend en considération les défauts mécaniquement les plus défavorables, c'est-à-dire des défauts plans semi-elliptiques proches de la paroi interne (jusqu'à 10 mm de profondeur par rapport à la paroi interne de la virole) et perpendiculaires à la paroi interne, d'orientation longitudinale ou circonférentielle, de dimensions 5 x 30 mm.

Afin de vérifier la capacité des méthodes à détecter les défauts plans d'orientation longitudinale ou circonférentielle en peau interne dans les zones examinées, l'IRSN a analysé l'ensemble des documents d'expertise d'EDF (cahier des charges, programmes d'expertise, rapport d'expertise et avis d'expertise) et a réalisé ses propres simulations. **L'IRSN estime que la capacité de détection du défaut cible est satisfaisante.** Toutefois, l'IRSN

<sup>5</sup> Orientés suivant l'axe de symétrie de la virole.

<sup>6</sup> Orientés parallèlement à la paroi interne de la virole.

<sup>7</sup> Orientés parallèlement à la circonférence de la virole.

constate qu'EDF n'a pas réalisé de contrôle à l'aide du capteur ultrasonore OLO°. Or, comme indiqué ci-dessus, les contrôles réalisés par AREVA NP au stade de la fabrication ne correspondent pas aux exigences actuelles de la norme européenne NF EN 10228-3 pour une classe de qualité de niveau 3. EDF s'est engagé à réaliser ce contrôle conformément à la norme européenne au cours du 1<sup>er</sup> trimestre 2018, ce qui est satisfaisant.

L'étendue, suivant la hauteur de la virole, de l'examen réalisé est directement corrélée à la hauteur de la portion de virole non chutée lors de la fabrication. AREVA NP aurait dû chuter 510 mm et le plan de chute montre qu'AREVA NP a certainement chuté une portion d'environ 150 mm. EDF a défini la zone d'expertise autour de l'axe de la soudure de jonction VB/VM comme s'étendant sur 50 mm du côté virole médiane et sur 310 mm du côté de la virole basse, ainsi que sur la partie courante de la virole basse à partir de 240 mm sous la soudure et sur une étendue de 600 mm.

**Au vu du plan de chute et des dimensions de la zone en anomalie, l'IRSN estime que les zones examinées par les contrôles non destructifs en mode expertise couvrent convenablement la zone de la virole en anomalie et le joint soudé.**

#### Caractéristiques du matériau

L'augmentation de la teneur en carbone au droit de la soudure d'assemblage entre la virole basse et la virole moyenne accroît le risque d'apparition d'un phénomène de fissuration à froid. Pour évaluer ce risque, AREVA NP a réalisé des essais d'implant<sup>8</sup>. Deux essais ont été réalisés. AREVA n'a observé aucune fissure et en conclut que les précautions opératoires mises en œuvre en atelier pour souder un matériau à teneur enrichie en carbone sont suffisantes pour garantir une absence de sensibilité à la fissuration à froid. **Ceci n'appelle pas de remarque de l'IRSN.**

Concernant les caractéristiques de ténacité à retenir pour les analyses à la rupture brutale dans la zone en anomalie, AREVA NP propose de retenir la courbe minimale de ténacité issue du code RCC-M (annexe ZG). Cette courbe est indexée sur la  $RT_{NDT}$ <sup>9</sup> de recette de la VB 335. AREVA NP a vérifié que les résultats des mesures de ténacité (110 essais) réalisées sur des éprouvettes de la zone en anomalie de la seconde des deux viroles sacrificielles (VB 335-C) sont enveloppés par la courbe de ténacité minimale indexée sur la  $RT_{NDT}$  de recette de la VB 335. Pour AREVA NP, ceci confirme que les propriétés déterminées lors des essais de recette demeurent pertinentes pour l'analyse du risque de rupture brutale dans la zone en anomalie.

Par ailleurs, AREVA NP a estimé la différence entre les températures de transition fragile-ductile mesurées en zone en anomalie et en zone de recette par des essais de flexion par choc sur des éprouvettes issues de la première des deux viroles sacrificielles (VB 335-B). Cette différence est de 45°C.

Pour l'IRSN, l'estimation robuste de la ténacité minimale dans une zone en anomalie d'un composant en exclusion de rupture, à partir d'une pièce sacrificielle dont la représentativité présente certaines limites, reste la détermination de la  $RT_{NDT}$  dans cette zone, puis l'utilisation de la courbe de l'annexe ZG du RCC-M indexée sur cette  $RT_{NDT}$ . Dans le cas présent, AREVA NP n'ayant déterminé la  $RT_{NDT}$  en zone d'anomalie d'aucune des deux viroles

---

<sup>8</sup> L'essai d'implant consiste en la réalisation d'un cordon de soudage sur une éprouvette entaillée et chargée mécaniquement en traction. L'existence d'une fissuration éventuelle est vérifiée à l'issue de l'essai. Une fissuration indiquerait que les conditions de soudage ne permettent pas de se prémunir du risque de fissuration à froid.

<sup>9</sup>  $RT_{NDT}$  : température de référence à ductilité nulle, déterminée au moyen d'essais de résilience et d'essais de Pellini, selon le paragraphe MC1240 du code RCC-M (en °C).

sacrificielles, l'IRSN estime que ces essais sont à réaliser. Ceci conduit l'IRSN à formuler la **recommandation n° 1 en annexe 1**.

Les essais de ténacité n'ont été réalisés par AREVA NP que sur la seconde des deux viroles sacrificielles (VB 335-C). Les données recueillies ne permettent donc pas d'apprécier la variabilité de propriétés entre les pièces forgées. La connaissance des propriétés mécaniques de la zone macroségrégée en tête des lingots creux étant par ailleurs très faible, l'IRSN estime nécessaire de compléter ces données à l'aide de résultats acquis sur la première virole sacrificielle (VB 335-B). Ceci conduit l'IRSN à formuler la **recommandation n° 2 en annexe 1**.

Parmi les essais de flexion par choc réalisés sur la première virole sacrificielle, l'IRSN relève l'observation de plusieurs cas de rupture intergranulaire à 0 °C sur des éprouvettes de Charpy V (mesure de résilience) prélevées en zone ségrégée. Un tel mode de rupture n'est pas attendu à 0 °C sur les nuances 16-18 MND 5 pour des pièces à l'état non-irradié. L'IRSN considère que ces éprouvettes nécessitent des compléments de caractérisation également mentionnés dans la **recommandation n° 2 en annexe 1**.

L'ensemble des données restant à acquérir devront également permettre d'établir un facteur de transposition des résultats obtenus sur les viroles sacrificielles à la virole installée sur le site de Fessenheim 2. Un tel facteur étant absent du dossier d'AREVA NP, l'IRSN émet la **recommandation n° 3 en annexe 1**.

#### Conclusion de l'IRSN

L'IRSN partage l'appréciation par AREVA NP de la position et de l'étendue de la zone en anomalie au sein de la virole basse du générateur n° 335 du réacteur n° 2 de Fessenheim.

Concernant les contrôles réalisés, l'IRSN n'a pas de remarque sur leur capacité à détecter les défauts recherchés dans la partie forgée de la VB 335 et dans le joint soudé avec la virole médiane, tant pour les contrôles réalisés en fabrication par AREVA NP que pour ceux récemment réalisés par EDF dans le cadre du traitement d'écart. L'IRSN estime que les zones examinées par EDF dans le cadre du traitement d'écart couvrent convenablement la zone de la virole en anomalie et le joint soudé.

L'IRSN souligne le bien-fondé de la démarche d'AREVA NP qui a consisté à réaliser deux viroles sacrificielles pour ses investigations, en particulier pour la caractérisation du matériau. Néanmoins, l'IRSN estime que la démarche de caractérisation des propriétés du matériau dans la zone en anomalie est insuffisante. Elle nécessite par conséquent d'être complétée, ce qui fait l'objet des recommandations formulées en annexe 1.

Pour le Directeur général et par délégation,

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'Expertise de Sûreté

Annexe 1 à l'Avis IRSN/2018-00011 du 18 janvier 2018

Recommandations

Recommandation n° 1 :

L'IRSN recommande qu'AREVA NP vérifie, en préalable à la levée de la suspension du certificat d'épreuve du générateur de vapeur n° 335, que la courbe de l'annexe ZG est applicable en zone ségrégée de virole issue de lingot creux, et pour cela réalise la mesure de :

- la RTNDT en zone ségrégée de la VB 335-B à plusieurs azimuts uniformément répartis sur la circonférence de cette virole sacrificielle ;
- la RTNDT en zone ségrégée de la VB 335-C à plusieurs azimuts uniformément répartis sur la circonférence de cette virole sacrificielle ;
- la RTNDT de recette de la VB 335-B.

Recommandation n° 2 :

L'IRSN recommande qu'AREVA NP mesure, sous six mois, les propriétés de ténacité dans la zone ségrégée de la VB 335-B, au moyen d'éprouvettes CT prélevées dans cette zone, afin de vérifier l'absence d'impact du comportement singulier observé sur les résultats d'éprouvettes de résilience.

L'IRSN recommande en outre que des investigations expérimentales complémentaires soient réalisées, sous six mois, en zone ségrégée de la VB 335-B, afin d'expliquer l'apparition de faciès de rupture intergranulaire sur des éprouvettes Charpy V à 0°C.

Recommandation n° 3 :

L'IRSN recommande qu'AREVA NP définisse la  $RT_{NDT}$  d'indexation de la courbe ZG pour les analyses de rupture brutale en intégrant un facteur de transposition supérieur ou égal à la différence de  $RT_{NDT}$  entre zone de recette et zone ségrégée, la plus élevée des deux viroles sacrificielles VB 335-B et VB 335-C.

Le cas échéant, AREVA NP devra reprendre les analyses de rupture brutale en préalable à la levée de la suspension du certificat d'épreuve.

Annexe 2 à l'Avis IRSN/2018-00011 du 18 janvier 2018

Observation

Observation :

L'IRSN considère qu'AREVA NP devrait modifier, dans la procédure de contrôle par ultrasons en OLO° des pièces forgées, le seuil de prise en compte de l'affaiblissement de l'écho de fond pour être conforme à la classe de qualité 3 de la norme européenne (NF EN 10228-3) référencée par le RCC-M depuis 2008.