

**Référence courrier :**  
CODEP-DEP-2023-058176

**Monsieur le Directeur**  
**Division Production Nucléaire**  
**Site Cap Ampère**  
**1, Place Pleyel**  
**93282 SAINT-DENIS Cedex**

Dijon, le 21 mars 2024

**Objet : Tenue en service des fonds primaires des générateurs de vapeur de fabrication JCFC et FLC.**

**Références :** [1] Avis du GP-ESPN du 16 octobre 2019  
[2] Avis du GP-ESPN du 17 octobre 2023  
[3] Avis de l'IRSN N°2021-00039  
[4] Avis de l'IRSN N°2023-00143  
[5] Décision ASN CODEP-DCN-2021-024002 du 14/06/2021  
[6] Courrier ASN CODEP-DEP-2021-026358 du 7 juillet 2021  
[7] Courrier ASN CODEP-DEP-2022-011528 du 10 mars 2022  
[8] Courrier EDF - D455021010809 du 22 novembre 2021  
[9] Fiche réponse EDF - D455021010737 Ind. 0 du 25 novembre 2021  
[10] Courrier EDF - D455022002909 du 10 mai 2022  
[11] Courrier CODEP-DCN-2023-048685

Monsieur le Directeur,

À la suite de la découverte d'une anomalie de macro-ségrégation positive en carbone sur les calottes de la cuve de l'EPR, les investigations menées ont montré que certains fonds de générateur de vapeur (GV) étaient également concernés par des macro-ségrégations de carbone. Il s'agit de 23 fonds fabriqués par JCFC (Japan Casting and Forging Corporation) et de 20 fonds fabriqués par FLC (Framatome Le Creusot) répartis sur 17 réacteurs. Ces 43 fonds de GV ont été fabriqués entre la fin des années 1980 et la fin des années 1990.

Une première réunion du groupe permanent d'experts pour les équipements sous pression nucléaires (GP ESPN) a eu lieu le 16 octobre 2019 [1] afin de présenter un état d'avancement des études relatives aux conséquences de ces ségrégations. Cette première présentation au GP ESPN concernait le programme d'essais mené sur des pièces sacrificielles relatives aux fonds JCFC réalisés à partir d'un lingot de 120 tonnes.

Votre programme d'étude a depuis été revu et complété pour couvrir les fonds JCFC issus d'un lingot de 90 tonnes et les fonds FLC. Les justifications que vous avez produites ont été expertisées par l'IRSN, qui a remis les avis en référence [3] et [4].

À la suite de la conclusion des expertises de l'IRSN, l'ASN a sollicité le GP ESPN pour statuer sur l'ensemble des études réalisées visant à justifier la tenue en service des fonds de générateur de vapeur de fabrication JCFC et FLC présentant des zones de ségrégation en carbone.

Cette réunion du GP ESPN s'est tenue le 17 octobre 2023 et le GP ESPN a émis l'avis en référence [2].

Vous trouverez en annexe mes conclusions et demandes qui résultent des expertises réalisées et de cet avis.

Je vous prie d'agréer, Monsieur le Directeur, l'expression de ma considération distinguée.

**Le directeur général adjoint**

*Signé*

**Julien COLLET**

## Annexe : demandes de l'ASN

### 1. Matériaux

#### 1.1 Cas des fonds JCFC

Les programmes d'essais réalisés vous ont permis de déterminer que les fonds de fabrication JCFC présentent une macro-ségrégation positive en carbone uniquement en zone centrale, qui peut atteindre le  $\frac{1}{4}$  épaisseur depuis la peau externe du fond.

Pour justifier la tenue mécanique de ces fonds, vous avez choisi de vous appuyer sur la réalisation d'essais sur des pièces dites « de justification » présentant un taux de carbone légèrement plus élevé que les fonds en service. Au regard de l'avis de l'IRSN [3] et de l'avis du GP-ESPN [2], l'ASN considère que les essais réalisés sur ces pièces de justification sont suffisants pour permettre d'évaluer les propriétés des matériaux d'une manière représentative et suffisamment conservative.

Vous avez ainsi démontré que la ségrégation en carbone des fonds JCFC ne remettait pas en cause la tenue à la rupture brutale des fonds lors des transitoires les plus pénalisants. En effet, l'augmentation de la teneur en carbone dans les zones ségréguées, combinée à une vitesse de trempe élevée, conduit à obtenir en peau externe une structure métallurgique bainitique enrichie en martensite revenue, bénéfique vis-à-vis des propriétés mécaniques.

La présence de martensite pourrait cependant accélérer le vieillissement thermique des fonds de GV. Comme le vieillissement des structures martensitiques dans le métal de base n'est pas traité par le code RCC-M, vous vous êtes engagé à poursuivre un programme expérimental de vieillissement thermique afin d'obtenir des valeurs de décalage de  $RT_{NDT}$  consécutives à ce vieillissement pour les zones martensitiques. Les résultats de ce programme sont attendus en 2029.

#### **Demande 1 :**

**Tenir régulièrement informée l'ASN de l'exécution des différentes étapes de ce programme et lui présenter les résultats obtenus dès qu'ils seront disponibles.**

#### 1.2 Cas des fonds FLC

Les fonds FLC se répartissent en deux familles suivant leurs conditions de fabrication. De la même manière que pour les fonds JCFC, trois pièces de justification ont été utilisées pour la caractérisation métallurgique et mécanique des fonds de ces deux familles. Au vu du programme expérimental réalisé, la première famille présente une ségrégation jusqu'au  $\frac{3}{4}$  de l'épaisseur depuis la peau externe et une langue de ségrégation enfouie au niveau des tubulures, tandis que la seconde famille présente une ségrégation uniquement en zone centrale sur  $\frac{1}{4}$  de l'épaisseur, depuis la paroi externe.

Du point de vue des propriétés mécaniques, les essais réalisés montrent que la ségrégation en carbone a notamment pour effet d'abaisser la ténacité du matériau et donc d'augmenter la température de

transition ductile-fragile  $RT_{NDT}$ . Cette augmentation a été évaluée de manière pénalisante à 40 °C, au niveau du  $\frac{1}{4}$  épaisseur, pour les deux familles.

Pour ces fonds, il est donc nécessaire de tenir compte de l'influence des ségrégations sur les propriétés mécaniques, et de vérifier leur tenue à la rupture brutale en prenant en compte cette augmentation de la  $RT_{NDT}$ . En effet, ce décalage de  $RT_{NDT}$  met à jour les hypothèses retenues dans le dossier d'analyse du comportement (DAC) initiaux, ce qui vous a conduit à reprendre les études de rupture brutale, à travers des études pour la sélection des transitoires pénalisants (§2 du présent courrier) et la reprise de calculs mécaniques (§4).

À la suite de l'expertise de l'IRSN, le groupe permanent considère dans son avis [2] que les programmes expérimentaux que vous avez menés pour les fonds FLC sont pertinents et suffisants pour établir l'impact des ségrégations sur les propriétés mécaniques des matériaux, et que les hypothèses relatives aux propriétés des zones ségréguées sur lesquelles s'appuient les études de tenue à la rupture brutale mentionnées au paragraphe 4 sont ainsi justifiées. L'ASN estime en conséquence que les résultats du programme de caractérisation, qui s'appuient sur l'utilisation des trois fonds de justification, sont recevables et que le décalage de  $RT_{NDT}$  retenu pour les analyses évoquées ci-dessus est suffisamment pénalisant.

## 2. Thermohydraulique

Pour l'étude des conséquences de l'impact des ségrégations sur les propriétés mécaniques des fonds FLC, en préalable à l'analyse mécanique du comportement des défauts, les situations donnant lieu aux transitoires les plus sévères doivent être sélectionnées dans chaque catégorie de situations. En premier lieu, vous avez sélectionné deux types de situations susceptibles d'induire un risque de rupture fragile :

- les transitoires conduisant à un choc chaud pressurisé ;
- les transitoires conduisant à un choc froid pressurisé.

Le choc chaud conduit à mettre en tension la  $\frac{1}{2}$  épaisseur externe des fonds tandis que le choc froid conduit à mettre en tension la  $\frac{1}{2}$  épaisseur interne.

Une fois les transitoires thermohydrauliques associés à chaque catégorie de situations sélectionnés (2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup>, 4<sup>e</sup> catégories), vous avez réalisé une caractérisation de ces transitoires soit à partir de profils « enveloppes » établis par jugement d'ingénieur, soit à l'aide des logiciels CATHARE 2 ou MANTA.

Par ailleurs, le choix du coefficient d'échange entre le fluide et la paroi constitue un paramètre dimensionnant dans l'estimation des contraintes mécaniques qui résultent d'un transitoire thermohydraulique. Pour établir son avis en référence [3], l'IRSN a mené une analyse visant à vérifier la pertinence de l'évaluation de ce coefficient d'échange calculé par CATHARE, en particulier l'acceptabilité de retenir une corrélation d'échange réaliste. À l'issue de cette analyse, l'IRSN a estimé que l'utilisation d'un coefficient d'échange réaliste n'était pas acceptable et qu'une pénalisation de ce paramètre était nécessaire pour tenir compte des incertitudes de la corrélation retenue et pour couvrir les différents phénomènes physiques pouvant se produire dans les boîtes à eau (BAE) des GV. Le type de convection prépondérant au moment de l'atteinte du facteur de marge minimal a également fait l'objet d'échanges.

Pour répondre aux points soulevés par l'expertise de l'IRSN, vous avez transmis des analyses complémentaires en vue d'illustrer l'influence du coefficient d'échange sur le facteur de marge qui résulte des études de rupture brutale. Dans ces calculs complémentaires, réalisés sur le fond FLC du réacteur n° 4 du CNPE du Bugey en situation de choc froid pour le transitoire le plus pénalisant mécaniquement, à savoir le transitoire APRP de 3 pouces, le coefficient d'échange thermique entre le fluide et la paroi initialement retenu a été doublé. Les calculs mécaniques réalisés en tenant compte de cette pénalisation d'un facteur 2 du coefficient d'échange ont montré que le risque de rupture brutale restait écarté.

À l'issue de son expertise, l'IRSN a considéré que votre démarche de sélection permet d'identifier les transitoires les plus sévères par catégorie. S'agissant des caractérisations, les remarques de l'IRSN ont porté uniquement sur les situations de 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> catégories pour lesquelles le coefficient d'échange est calculé par CATHARE. Les calculs mécaniques fournis par EDF, prenant en compte un doublement de ce paramètre, permettent néanmoins de statuer pour le présent dossier.

Au regard de cette expertise et de l'avis du groupe permanent [2], l'ASN considère ainsi que les situations à prendre en compte dans les analyses mécaniques ont été finalement identifiées et caractérisées de façon acceptable dans le cadre du dossier relatif aux ségrégations des fonds de GV.

Toutefois, bien que les incertitudes liées à la définition du coefficient d'échange soient considérées comme sans impact sur la validité des conclusions relatives à la tenue mécanique des fonds dans ce dossier, les différentes interrogations émises par l'IRSN sur les coefficients d'échange retenus pour l'estimation des températures de paroi calculées par CATHARE lors d'un transitoire d'exploitation ne sont pas spécifiques à l'étude de la tenue en service des fonds ségrévés. L'ASN estime que, pour les dossiers à venir, vous devrez apporter des justifications robustes sur les valeurs retenues pour ce coefficient d'échange.

#### **Demande 2 :**

**Tenir compte des remarques émises par l'IRSN relativement à la détermination du coefficient d'échange fluide paroi dans l'étude des effets des transitoires thermohydrauliques dans le cadre des futurs dossiers de justification mécanique des équipements du CPP-CSP.**

### **3. Essais non destructifs**

Votre démarche de justification, dans le cadre de ce dossier, s'est également appuyée sur des essais non destructifs pour vérifier l'absence de défaut de nature à porter préjudice à la tenue mécanique des fonds.

Pour les zones centrales des fonds, vous avez effectué, en plus de la relecture des contrôles de fin de fabrication, des recherches de défaut par ressuage pour les défauts débouchant en peau externe et par ultrasons (procédé UT TOFD) pour les défauts enfouis. Dans les deux cas, aucune indication notable n'a été détectée.

Pour certains fonds de GV de fabrication JCFC (DAM3, SLB1, CIV1 et 2, TRI4), il n'a pas été réalisé d'usinage en peau externe lors de leur fabrication, ce qui rend non efficace la réalisation de contrôles par ressuage. Vous aviez par ailleurs indiqué qu'il y avait un risque d'apparition de défauts en peau

externe liés aux opérations de mise en forme et de traitement thermique. L'ASN vous a ainsi demandé d'étudier la possibilité de réaliser un examen non destructif (END), autre que le ressuage, de la surface externe de la zone centrale non usinée [6, 7, 8].

Vous avez estimé que cet END n'était pas nécessaire et vous avez transmis en support à cette position une analyse de résistance à la rupture brutale avec un défaut de grandes dimensions (défaut de 20 x 120 mm débouchant en peau externe) et un avis d'expert justifiant que les examens TOFD réalisés sont en capacité de détecter un tel défaut malgré la zone morte que constitue la couche non usinée [9, 10, 11].

**Après consultation du GP ESPN et au vu son avis [2], l'ASN considère que le manque de pertinence des contrôles par ressuage ne remet pas en cause la démonstration de l'absence de risque de rupture brutale pour ces fonds.**

**Pour autant, l'ASN considère que de tels composants non ruptibles doivent faire l'objet d'un usinage de l'intégralité de leur surface, au titre des bonnes pratiques de fabrication, ce dont vous tiendrez compte pour les fabrications à venir.**

S'agissant des défauts enfouis, le procédé UT TOFD ne garantit la détection que pour 110 mm à partir de la surface externe, ce qui est inférieur à la ½ épaisseur pour certains fonds. Au-delà, EDF a utilisé le procédé UT TOFD à titre exploratoire sur certains fonds de cette famille (SLB2, CHB1, DAM4, BUG4, GV1 et 2 de DAM2), sans détecter de défaut.

Concernant les zones des tubulures, les défauts débouchants ont été recherchés par magnétoscopie en fin de fabrication puis par ressuage en exploitation. Aucun défaut de ce type n'a été noté.

Pour les défauts enfouis, vous avez démontré que le procédé de contrôle de fin de fabrication (UT OT45°) permet de détecter des défauts circonférentiels, mais il n'existe pas de garantie sur la détection d'éventuels défauts longitudinaux. En considérant notamment les procédés de fabrication de ces fonds, qui permettent de limiter le risque de présence de défauts enfouis (il s'agit de pièces forgées), le GP a conclu dans son avis [2] que cette réserve n'était pas de nature à remettre en cause son appréciation globale selon laquelle le risque de présence d'un défaut plus nocif que les défauts postulés dans les études mécaniques pouvait être écarté.

L'ASN note toutefois que vous vous êtes engagé, dans une démarche de défense en profondeur, à étudier le développement d'un procédé d'examen permettant de détecter la présence de défauts longitudinaux dans la zone des tubulures.

### **Demande 3 :**

**Tenir régulièrement informée l'ASN de l'avancée des travaux concernant la faisabilité d'un nouveau procédé de contrôle pour les défauts d'orientation longitudinale.**

#### 4. Analyses mécaniques

Pour les fonds JCFC, les démarches de caractérisation des matériaux mentionnées précédemment montrent que les propriétés mécaniques ne sont pas affectées de manière à remettre en cause la tenue mécanique des fonds de GV à la rupture brutale.

L'ASN a estimé que cette étude et ses conclusions étaient acceptables et vous a autorisé par la décision [5] à procéder à la levée des mesures compensatoires d'exploitation vis-à-vis des chocs chauds et froids mises en place lors des premières phases de traitement de ce dossier. Cet accord porte sur tous les réacteurs équipés exclusivement de fonds JCFC. Le GP ESPN a confirmé dans son avis [2] qu'il estimait ces conclusions recevables.

Pour les fonds FLC, le GP ESPN considère dans son avis [2] que les analyses mécaniques de rupture brutale qui tiennent compte des mesures compensatoires d'exploitation appliquées aux générateurs de vapeur équipés de fonds FLC et des conséquences des ségrégations sur le décalage de la  $RT_{NDT}$ , sont de nature à démontrer l'absence de risque de rupture brutale.

Ainsi, l'ASN estime que des mesures compensatoires supplémentaires ne sont pas nécessaires.

Toutefois, pour les réacteurs comportant au moins un fond de GV de fabrication FLC, l'ASN considère que les mesures compensatoires qui sont valorisées dans les études de rupture brutale restent nécessaires à la démonstration de l'absence de risque de perte d'intégrité en exploitation.

#### **Demande 4 :**

**Conformément au courrier en référence [11], vous devez pérenniser l'application des mesures compensatoires mises en œuvre pour la prévention des chocs chauds et froids sur les réacteurs équipés d'au moins un GV dont le fond est de fabrication FLC, au travers des spécifications techniques d'exploitation.**