

Fontenay-aux-Roses, le 13 janvier 2017

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

**Avis IRSN N°** 2017-00014

**Objet :** Maintien en service des fonds primaires fabriqués par Japan Casting and Forging Corporation  
Générateurs de vapeur équipant les réacteurs de Civaux 1 et Civaux 2

**Réf. :** [1] Lettre ASN CODEP-DEP-2016-016497 du 22 avril 2016  
[2] Lettre ASN CODEP-DEP-2016-050745 du 29 décembre 2016  
[3] Lettre ASN CODEP-DEP-2016-047228 du 5 décembre 2016  
[4] Avis IRSN N° 2016-00369 du 30 novembre 2016

Suite à l'anomalie détectée sur les calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville, EDF a informé l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) que certains fonds primaires de générateurs de vapeur (GV) fabriqués par Creusot Forge et Japan Casting and Forging Corporation (JCFC) pouvaient être affectés de ségrégations majeures positives résiduelles de carbone. Cette anomalie remet en cause les hypothèses relatives au comportement des matériaux prises en compte à la conception pour l'étude du risque de rupture brutale de ces fonds primaires.

L'ASN a demandé à EDF, par la lettre en référence [1], de lui apporter dans les plus brefs délais les éléments permettant de justifier le maintien en service de chacun des équipements concernés.

En particulier, les deux réacteurs de Civaux, de 1450 MWe (palier N4), sont équipés de fonds de GV de fourniture JCFC, issus de lingots de 90 tonnes, potentiellement affectés de ségrégations positives en carbone.

Les situations les plus sévères pour l'analyse du risque de rupture brutale résultent, pour des défauts potentiellement situés en peau externe des boîtes à eau (BAE) des GV, de chocs chauds, tandis que, pour des défauts potentiellement situés en peau interne sur les BAE, ce sont les situations de chocs froids qui sont à prendre en compte.

Ainsi, EDF a transmis un dossier spécifique d'analyse de risque de rupture brutale des fonds de GV JCFC qui équipent les réacteurs de Civaux qui inclut une caractérisation thermohydraulique (pression, température, débit) des transitoires de chocs chauds et de chocs froids sur les boîtes à eau des GV. Les caractérisations retenues par EDF valorisent les règles de conduite normale (RCN) ainsi que les

**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 B 440 546 018

mesures compensatoires mises en œuvre par l'exploitant pour limiter l'occurrence et la sévérité de chocs thermiques sur les fonds primaires concernés.

Par la lettre citée en référence [2], l'ASN sollicite l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) afin de lui permettre de conclure sur le maintien en service des générateurs de vapeur équipant les réacteurs de Civaux 1 et 2. Plus particulièrement, l'ASN souhaite recueillir l'avis de l'IRSN sur les points suivants :

- l'exhaustivité et la pertinence de la caractérisation des transitoires de chocs froids sélectionnés par EDF ;
- l'exhaustivité et la pertinence de la caractérisation des transitoires de chocs chauds sélectionnés par EDF ;
- l'efficacité des mesures compensatoires proposées par EDF en cas de chocs chauds et froids.

### Démarche d'analyse

La démarche d'analyse retenue par l'IRSN se situe dans le cadre du traitement d'une anomalie affectant certains réacteurs du parc en exploitation. Ce traitement vise à acquérir une raisonnable assurance que l'anomalie ne remet pas en cause l'appréciation du risque de rupture brutale des équipements concernés.

L'objectif de l'analyse du risque de rupture brutale d'un équipement est de démontrer l'absence d'initiation d'une rupture à partir d'un défaut connu ou postulé. Cette démonstration requiert plusieurs données d'entrée :

- la taille des défauts connus (s'il en existe) et de ceux qui sont postulés en tenant compte de la limite de détection des moyens de contrôle ;
- les propriétés mécaniques du matériau, notamment la ténacité en fonction de la température, qui est affectée par la teneur en carbone de l'acier ;
- les chargements sollicitant les défauts.

À cet égard, les hypothèses relatives au comportement mécanique et à la taille des défauts adoptées dans ce dossier, respectivement pour la paroi externe et la paroi interne des boîtes à eau des GV JCFC qui équipent les réacteurs de Civaux, sont acceptables. En effet, EDF a notamment tenu compte des concentrations de carbone mesurées sur les fonds de générateurs de vapeur du réacteur de Civaux 2 et de la loi reliant la concentration de carbone au décalage de température de transition fragile-ductile du matériau, validée dans l'avis en référence [4], relatif aux réacteurs de 900 MWe équipés de fonds de GV de type JCFC, pour définir les propriétés de ténacité à considérer. Le réacteur de Civaux 1 n'a pas encore fait l'objet de contrôles. Il conviendra de s'assurer que les résultats des contrôles à venir ne remettent pas en cause les hypothèses du dossier.

Par conséquent, l'analyse de l'IRSN a porté dans ce dossier sur les chargements sollicitant les défauts postulés et donc plus particulièrement sur :

- l'efficacité des mesures compensatoires proposées par EDF en cas de chocs thermiques ;

- l'exhaustivité et la pertinence de la caractérisation des transitoires de chocs thermiques qui ont été sélectionnés par EDF.

### Efficacité des mesures compensatoires

#### Pour limiter les chocs chauds

En complément des préconisations des règles de conduite normale, limitant notamment le gradient d'échauffement lors du démarrage de la tranche, EDF a en particulier retenu les mesures compensatoires suivantes à l'égard des risques de chocs chauds :

- mesures à appliquer lors des arrêts de tranches :
  - lors de la confirmation du noyage de la bulle au pressuriseur, il faut s'assurer que les vannes d'aspersion principales du pressuriseur sont ouvertes afin d'obtenir un écart de température entre le pressuriseur et le reste du circuit primaire inférieur à 15 °C. En cas d'inefficacité de cette mesure, il faut utiliser l'aspersion auxiliaire,
  - en conduite normale, trois pompes primaires sur quatre doivent être arrêtées et débouchées à une température primaire proche de 60 °C. L'arrêt et le débouchage de la dernière pompe doivent satisfaire certaines conditions,
  - la température au refoulement des pompes du système de refroidissement du réacteur à l'arrêt (RRA) doit être maintenue au-dessus de 30 °C tant que le circuit primaire est pressurisable.
- mesures à appliquer lors des redémarrages de tranches :
  - avant le démarrage de la première pompe primaire, il faut s'assurer que la température au refoulement du circuit RRA est supérieure à 30°C, que l'écart de température entre l'amont et l'aval de l'échangeur RRA est inférieur 30 °C et que l'écart entre les températures du métal des GV (ou des lignes vapeur) et la température au refoulement du RRA est inférieur à 30°C,
  - après le démarrage de la première pompe primaire, le réchauffage du circuit primaire doit s'opérer avec un gradient de température ne dépassant pas 14 °C/h jusqu'à ce que la température en branche froide soit supérieure à 60 °C ; les autres pompes ne peuvent être mises en service que lorsque la température primaire en branche froide est supérieure à 60 °C.

L'IRSN estime que ces mesures permettent de se prémunir contre la survenue d'un choc chaud dont l'amplitude dépasserait celle prise en compte dans les analyses du risque de rupture brutale des fonds de GV JCFC ségrévés des réacteurs de Civaux. Ces mesures restent dans le domaine autorisé par les Spécifications techniques d'exploitation (STE) et leur mise en œuvre n'amène pas de risque de régression vis-à-vis de la sûreté.

Toutefois, une des mesures compensatoires consiste à favoriser le fonctionnement avec deux pompes RRA pour limiter le risque de perte de ce circuit et donc le risque de choc chaud associé. Or, l'application de cette mesure augmente le risque de sur-refroidissement lors de la mise en service de la seconde pompe RRA. Pour les réacteurs de 900 MWe, EDF a défini une procédure à appliquer pour

le démarrage de cette seconde pompe RRA afin d'éviter tout sur-refroidissement. L'IRSN constate que, pour le palier N4, à ce jour, EDF n'a pas prévu une telle procédure, alors qu'il n'existe pas, selon l'IRSN, de spécificités associées au palier N4 justifiant cette différence de traitement.

**Par conséquent, l'IRSN estime qu'EDF doit définir une procédure à appliquer lors du démarrage de la deuxième pompe du système de refroidissement du réacteur à l'arrêt afin de limiter le risque de sur-refroidissement du circuit primaire. À cet égard, EDF a fourni récemment des éléments qui sont en cours d'instruction.**

*Pour limiter les chocs froids*

En complément des mesures déjà prises à l'égard des risques de chocs chauds, EDF a retenu les mesures compensatoires suivantes à l'égard des risques de chocs froids :

- mesures à appliquer lors des arrêts de tranches dès lors que le circuit primaire est monophasique :
  - la vitesse de refroidissement du circuit primaire doit être inférieure à 14 °C/h jusqu'à l'arrêt de la dernière pompe primaire,
  - en conduite normale, si le débit dans le circuit primaire est nul, il faut s'assurer que l'écart entre la température de l'eau injectée aux joints des pompes primaires et la « température du primaire » est inférieur à 15 °C,
  - après l'arrêt de la dernière pompe primaire, la pression primaire est amenée à une valeur inférieure ou égale à 7 bar dans les plus brefs délais compatibles avec les contraintes d'exploitation (et notamment avec la réalisation des essais périodiques du chapitre IX des règles générales d'exploitation) ;
- mesure à appliquer lors des redémarrages de tranches : si les pompes primaires sont arrêtées, il faut s'assurer que l'écart entre la température de l'eau injectée aux joints des pompes primaires et la « température du primaire » est inférieur à 15 °C.

L'IRSN estime que les mesures prévues par EDF permettent de limiter la sévérité des chocs froids.

Ces mesures restent dans le domaine autorisé par les STE et leur mise en œuvre n'amène pas de risque de régression vis-à-vis de la sûreté. Ces mesures ne prennent toutefois pas en compte les demandes formulées par l'ASN, par la lettre en référence [3], à l'issue de l'instruction technique réalisée pour les fonds de GV des réacteurs de 900 MWe.

**En particulier, l'IRSN estime qu'EDF doit prévoir une mesure compensatoire visant à limiter l'amplitude d'un éventuel choc froid dû aux cyclages de GV avec l'eau de leur alimentation de secours (procédé visant à accélérer leur refroidissement lors des arrêts pour intervention). À cet égard, EDF a fourni récemment des mises à jour de ses mesures compensatoires qui sont en cours d'instruction.**

En conclusion, concernant l'ensemble des mesures compensatoires, l'IRSN rappelle que la justification de l'exclusion du risque de rupture brutale d'un fond de GV repose notamment sur la bonne application des règles de conduite normale et sur la fiabilité de mise en œuvre des mesures compensatoires. Il importe qu'EDF s'organise pour garantir cette fiabilité. **Par conséquent, l'IRSN**

estime qu'EDF doit intégrer dans les spécifications techniques d'exploitation les mesures compensatoires liées à la prévention des chocs chauds et froids, ainsi que les règles de conduite normales valorisées pour la caractérisation des transitoires. À cet égard, EDF a fourni récemment une demande de modification temporaire des règles générales d'exploitation pour les tranches de Civaux 1 et 2. Cette demande de modification est en cours d'instruction.

#### Exhaustivité et pertinence de la caractérisation des transitoires retenus par EDF

La présence d'une teneur en carbone plus élevée qu'attendue en face externe de certains fonds de GV de fabrication JCFC nécessite d'examiner les contraintes induites par des transitoires de chocs chauds. Compte tenu de l'estimation des propriétés mécaniques en face interne, il est également nécessaire d'examiner les contraintes induites par des transitoires de chocs froids sur les faces internes de ces fonds de GV.

#### Exhaustivité des situations les plus pénalisantes

EDF a tout d'abord réalisé une sélection de chocs chauds et de chocs froids parmi les transitoires les plus pénalisants du dossier des situations (DDS) du circuit primaire principal. EDF a ensuite complété cette sélection par la recherche de transitoires additionnels pénalisants pour le risque de rupture brutale d'un fond de GV, sur la base de l'identification de l'ensemble des sources froides et chaudes susceptibles de provoquer un choc chaud ou une succession de chocs. Ont ainsi été ajoutées :

- deux situations de choc chaud résultant d'une brèche primaire à la sortie du GV en état monophasique ou de la perte du RRA en arrêt à froid ;
- deux situations de choc froid en état d'arrêt à froid qui résultent du redémarrage d'une pompe primaire ou d'une petite brèche primaire en branche chaude en état initial monophasique.

L'IRSN considère que la démarche utilisée par EDF est satisfaisante dans son principe, mais souligne que son application n'a permis d'aboutir à une liste complétée qu'après l'instruction. En effet, l'IRSN a mis en évidence des sources froides et des sources chaudes qui n'avaient pas été identifiées par EDF et qu'il conviendrait de prendre en compte dans le traitement de l'anomalie affectant les fonds de GV, ce qui fait l'objet des observations en annexe 2. Néanmoins, la prise en compte des demandes formulées ci-avant en termes de mesures compensatoires permettra de couvrir ces insuffisances. Par ailleurs, l'exploitation des sources froides et des sources chaudes identifiées n'a pas permis d'aboutir à une liste exhaustive de transitoires pénalisants vis-à-vis des chocs froids ; la déclinaison de la démarche d'EDF n'a en particulier pas permis d'identifier :

- les transitoires de brèche sur le circuit RRA, le RRA étant initialement connecté au circuit primaire, suivis de l'isolement du RRA lors de l'application des procédures de conduite accidentelle ;
- les transitoires mettant en œuvre la conduite en mode gavé-ouvert<sup>1</sup> (ouverture des soupapes du pressuriseur et mise en service de l'injection de sécurité).

Ces points sont repris ci-après.

---

<sup>1</sup> La conduite en « gavé-ouvert » permet l'évacuation de la puissance résiduelle par ouverture des soupapes du pressuriseur et injection d'eau froide dans le cœur via le circuit d'injection de sécurité.

## Pertinence de la caractérisation des situations retenues

### Transitoires de chocs chauds

La caractérisation est redéfinie à partir du DDS en valorisant, le cas échéant pour les transitoires de catégorie 2, les RCN et les mesures compensatoires mises en place pour limiter la sévérité des chocs chauds.

L'IRSN n'a pas de remarque concernant la caractérisation des transitoires de chocs chauds retenus par EDF.

### Transitoires de chocs froids

L'IRSN estime que la caractérisation par EDF des situations de petite brèche primaire n'est pas satisfaisante. Elle ne prend en effet pas en compte le phénomène de vidange des fonds de GV suivi d'un renoyage rapide par l'eau froide amenée par les moyens d'injection de sécurité, susceptible de provoquer un choc froid sévère. Au cours de l'instruction technique, EDF a caractérisé le scénario identifié par l'IRSN. Cependant, pour ce faire, il a utilisé une hypothèse relative au coefficient d'échange thermique entre le fluide et la paroi qu'il considère plus réaliste que celle utilisée conventionnellement. Cette différence méthodologique empêche toute comparaison directe des résultats en termes de facteur de marge<sup>2</sup> entre l'étude de cette situation transmise au cours de l'instruction technique et les autres situations retenues dans le dossier. Bien que la valeur de coefficient d'échange retenue apparaisse faible, des compléments fournis par EDF montrent qu'une accélération notable du refroidissement de la paroi ne conduirait pas à un risque de rupture brutale. Ces éléments permettent à l'IRSN de considérer que l'étude transmise, complétée par des études de sensibilité, est acceptable dans le cadre du traitement de l'anomalie affectant les fonds de GV. Toutefois, l'IRSN estime nécessaire qu'EDF conforte à terme son étude, notamment en approfondissant son analyse de la valeur du coefficient d'échange à retenir. **Ce point fait l'objet de la recommandation n° 1 en annexe 1.**

De plus, les situations de surpression dans le circuit primaire à l'état monophasique ne couvrent pas le cas d'un redémarrage inopportun d'une pompe primaire par l'opérateur à la suite de l'ouverture intempestive de la vanne réglant le débit dans un des échangeurs du RRA. L'IRSN estime qu'EDF doit réaliser une étude du risque de rupture brutale sur la base d'une caractérisation adaptée. **Par conséquent, l'IRSN émet la recommandation n° 2 en annexe 1.**

Dans l'attente, l'IRSN estime qu'EDF doit retenir des dispositions visant à diminuer la probabilité de redémarrage d'une pompe primaire dans ces situations ou apporte des éléments justifiant la probabilité résiduelle de ces situations. À cet égard, EDF a récemment transmis une mise à jour des mesures compensatoires, qui est en cours d'instruction.

Par ailleurs, l'IRSN estime que la caractérisation par EDF des situations de rupture de tuyauterie d'eau alimentaire des GV n'est pas satisfaisante. En effet, cette caractérisation ne prend pas en compte le fait qu'au cours de ce transitoire l'opérateur peut être amené à mettre en œuvre la conduite en

---

<sup>2</sup> Le facteur de marge représente le rapport entre la ténacité du matériau et le facteur d'intensité de contrainte induit par un chargement donné en pointe d'un défaut, réel ou postulé. Le facteur de marge peut faire intervenir des coefficients de sécurité lorsqu'ils sont à prendre en considération. Un facteur de marge supérieur à 1 indique que la ténacité est suffisante pour éviter l'amorçage du défaut.

mode gavé-ouvert. Cette conduite est susceptible de provoquer un choc froid sur les fonds de GV. En première approche, elle peut être assimilée à une brèche primaire au pressuriseur et donc cette situation devrait être couverte par les situations de brèche primaire en 3<sup>ème</sup> catégorie. Néanmoins, cette appréciation reste à conforter. **Ce point fait l'objet de la recommandation n° 3 en annexe 1.**

Enfin, la caractérisation des transitoires de chocs froids fournie par EDF ne couvre pas les transitoires du domaine complémentaire, en particulier les brèches sur le circuit RRA. EDF a, au cours de l'instruction, identifié quatre types de transitoires du domaine complémentaire qui pourraient provoquer des chocs froids sur les boîtes à eau des GV. EDF a apporté des éléments justifiant que ces transitoires sont couverts par les compléments apportés sur les brèches primaires. Dans le cadre du traitement à court terme de l'anomalie affectant les fonds de GV, l'IRSN estime les arguments d'EDF acceptables. L'ensemble de ces appréciations et la liste des transitoires identifiés restent néanmoins à conforter. **Ce point fait l'objet de la recommandation n° 4 en annexe 1.**

### Conclusion

Pour ce qui concerne les sollicitations associées aux chocs chauds, EDF a apporté des justifications de l'absence de risque de rupture brutale des boîtes à eau pour les réacteurs de Civaux. L'IRSN n'a pas de remarque concernant les chargements retenus.

Pour ce qui concerne les sollicitations associées aux chocs froids, l'IRSN estime qu'EDF a apporté des éléments permettant d'estimer que les transitoires de catégories 2 à 4, ainsi que ceux du domaine complémentaire, ne sont pas susceptibles de conduire à des situations où les facteurs de marge seraient inférieurs à 1.

En revanche, au-delà de cette analyse menée dans le cadre du traitement à court terme d'une anomalie, l'IRSN estime que des confirmations et des compléments doivent être apportés, en particulier en ce qui concerne la caractérisation de plusieurs transitoires susceptibles de provoquer des chocs froids (petite brèche primaire de 3<sup>ème</sup> catégorie, situation de surpression à froid de 4<sup>ème</sup> catégorie, rupture de tuyauterie d'eau alimentaire des GV et transitoires du domaine complémentaire), faisant l'objet des quatre recommandations en annexe 1.

Enfin, l'analyse des mesures compensatoires proposées par EDF dans son dossier a mis en évidence un certain nombre d'insuffisances. EDF a fourni récemment sur ce point des éléments qui sont en cours d'instruction.

Pour le Directeur général et par délégation,

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

## Recommandations

### Recommandation n° 1

L'IRSN estime nécessaire qu'EDF définisse, sous six mois, une caractérisation enveloppe des situations (avec et sans reprise de la circulation naturelle) de petite brèche primaire pour les fonds de générateurs de vapeur et réévalue en conséquence les facteurs de marge associés et ce, en justifiant le conservatisme des hypothèses et de la méthode de calcul retenues.

### Recommandation n° 2

L'IRSN recommande qu'EDF présente, sous six mois, la caractérisation d'une situation couvrant le cas d'un redémarrage inopportun d'une pompe primaire par l'opérateur à la suite d'un événement d'ouverture intempestive de la vanne qui régule le débit dans un des échangeurs du circuit de refroidissement, les pompes primaires ayant été arrêtées soit suite à un incident soit par application des procédures de conduite normale, et évalue le facteur de marge minimal associé.

### Recommandation n° 3

L'IRSN recommande qu'EDF présente, sous six mois, une caractérisation enveloppe de la situation de rupture de tuyauterie d'eau alimentaire des générateurs de vapeur avec une conduite en mode gavé-ouvert, et évalue le facteur de marge minimal associé et ce, en justifiant le conservatisme des hypothèses et de la méthode de calcul retenues.

### Recommandation n° 4

L'IRSN recommande qu'EDF définisse, sous six mois, une caractérisation enveloppe des transitoires du domaine complémentaire susceptibles de provoquer des chocs froids sur les fonds de générateurs de vapeur et évalue les facteurs de marge associés et ce, en justifiant le conservatisme des hypothèses et de la méthode de calcul retenues.

## Observations

### Observation n° 1

L'IRSN estime qu'EDF devrait retenir, comme source chaude dans sa démarche d'identification des transitoires additionnels, le réchauffement de l'eau des épingles GV par l'eau du circuit secondaire.

### Observation n° 2

L'IRSN estime qu'EDF devrait retenir, comme source froide dans sa démarche d'identification des transitoires additionnels, le refroidissement de l'eau des épingles GV par l'eau d'alimentation de secours des générateurs de vapeur lors des phases de cyclage.

### Observation n° 3

L'IRSN estime qu'EDF devrait retenir, comme initiateur de chocs thermiques (chaud et froid) sur les boîtes à eau des générateurs de vapeur, l'événement d'ouverture intempestive d'une vanne qui régule le débit dans un échangeur du circuit de refroidissement à l'arrêt, avec arrêt du GMPP en fonctionnement, puis redémarrage inopiné de ce GMPP.