

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## Avis IRSN n° 2020-00099

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>Objet ....</b>         | Poursuite de l'exploitation des réacteurs de 900 MWe jusqu'à la VD4+10 ans.<br>Instruction du dossier cuve - viroles de cœur en vue d'un troisième avis du GP<br>ESPN  |
| <b>Réf(s) ....</b>        | 1. Lettre ASN CODEP-DEP-2017-045329 du 9 novembre 2017.<br>2. Avis IRSN/2018-00295 du 8 novembre 2018.<br>3. Lettre ASN CODEP-DEP-2018-058304 du 28 février 2019.<br>4. Lettre ASN CODEP-DEP-2018-060413 du 17 avril 2019.<br>5. Avis IRSN/2019-00221 du 2 octobre 2019.<br>6. Lettre ASN CODEP-DEP-2019-046852 du 3 janvier 2020.<br>7. Lettre ASN CODEP-DEP-2019-046233 du 13 décembre 2019. |
| <b>Nbre de page(s)...</b> | 6  |

À l'occasion du réexamen périodique associé aux quatrièmes visites décennales (VD4) des réacteurs de 900 MWe, EDF a transmis à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) un dossier afin de justifier la tenue en service de la zone soumise à l'irradiation des cuves (nommée zone de cœur) pour la période de 10 ans après les VD4. Ce dossier a été expertisé à deux reprises par l'IRSN en 2018 (avis de l'IRSN [2] en réponse à la saisine de l'ASN [1]) et en 2019 (avis de l'IRSN [5] en réponse à la saisine de l'ASN [4]). Les conclusions des expertises de l'IRSN ont été présentées lors de deux réunions du Groupe permanent d'experts en charge des équipements sous pression nucléaire (GP ESPN) le 20 novembre 2018 et le 15 octobre 2019. À l'issue de ces réunions, l'ASN a formulé des demandes à EDF par les courriers [3] et [6].

L'instruction menée en 2018 a permis de conclure sur plusieurs volets : les caractéristiques des défauts génériques et avérés à analyser, la démarche d'estimation des fluences reçues par les cuves, la méthode d'analyse du risque de rupture brutale. Lors de l'instruction de 2019, l'IRSN a notamment expertisé la démarche de recherche des transitoires les plus pénalisants ainsi que leur caractérisation (évolution temporelle de pression, de température et des coefficients d'échange thermique entre le fluide et la paroi). L'IRSN a estimé que l'aptitude au service des cuves des réacteurs n°1 du Tricastin et n°2 du Bugey était démontrée jusqu'en VD4+10 ans, compte tenu notamment des marges significatives mises en évidence par les analyses mécaniques. Ces deux réacteurs sont les premiers à réaliser leur VD4. Toutefois, l'instruction de plusieurs points qui présentent un impact sur l'appréciation des marges vis-à-vis du risque de rupture brutale de la zone de cœur des cuves a dû se poursuivre afin de pouvoir statuer sur l'aptitude au service jusqu'en VD4+10 ans des cuves des autres réacteurs de 900 MWe. En particulier le classement des transitoires de brèche sur le circuit primaire principal ainsi que la justification du niveau des contraintes résiduelles à retenir dans les joints soudés circulaires ont été l'objet de nouveaux échanges avec EDF. Par ailleurs, les résultats d'analyse du risque de rupture brutale associé aux défauts génériques et

**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

aux défauts avérés des cuves de 900 MWe n'étaient pas disponibles à l'issue de l'instruction de 2019 pour l'ensemble des transitoires thermohydrauliques enveloppes, notamment pour les défauts postulés dans le joint soudé et pour certains défauts avérés. Ces points ont donc fait l'objet d'une troisième saisine de l'ASN [7].

## 1 CONTOUR DE L'EXPERTISE DE L'IRSN

Par sa nouvelle saisine [7], l'ASN souhaite recueillir l'avis de l'IRSN sur les éléments complémentaires transmis par EDF dont l'examen n'a pas pu être entrepris ou finalisé à l'issue des instructions réalisées en 2018 et en 2019, qui concernent notamment :

- les éléments apportés par EDF concernant la justification du niveau de contraintes résiduelles de 70 MPa retenu pour les études des joints soudés circulaires de la zone de cœur,
- la catégorisation des brèches primaires à prendre en compte dans les études mécaniques,
- les éléments apportés par EDF concernant l'analyse du risque de rupture brutale pour les scénarios de brèche primaire présentant les phénomènes de dénoyage et renoyage de l'espace annulaire tels que caractérisés à l'issue de l'expertise de 2019,
- les calculs de facteurs de marge pour les transitoires découplés<sup>1</sup> de deuxième catégorie et du domaine complémentaire<sup>2</sup> pour les viroles et les joints soudés en présence du défaut générique,
- les calculs de facteurs de marge pour les cuves présentant des défauts avérés, pour l'ensemble des transitoires retenus y compris les transitoires découplés pour la deuxième catégorie et le domaine complémentaire.

Le présent avis répond à la saisine [7] et concerne l'ensemble des cuves du palier de 900 MWe en dehors de celles des réacteurs de Fessenheim dont le fonctionnement au-delà de la VD4 n'est plus envisagé, ainsi que de celles du réacteur n°1 du Tricastin et du réacteur n°2 du Bugey qui ont déjà fait l'objet d'un avis de l'ASN [6].

Il est à noter qu'au début de la présente expertise, EDF s'est engagé à transmettre l'ensemble des éléments permettant de répondre aux différents points cités ci-dessus à l'exception de l'évaluation des facteurs de marge associés aux transitoires découplés de 2<sup>e</sup> catégorie et du domaine complémentaire pour les défauts avérés des cuves de 900 MWe. Toutefois, les VD4 des réacteurs concernés par les défauts avérés dans la zone de cœur de la cuve sont prévues bien au-delà de la présente expertise. De ce fait, l'ASN a accepté d'exclure ces éléments du cadre de la présente expertise de l'IRSN.

## 2 NIVEAU DE CONTRAINTES RESIDUELLES DANS LES JOINTS SOUDES DE LA ZONE DE CŒUR

À la suite des échanges dans le cadre du GP du 15 octobre 2019, EDF a transmis des éléments complémentaires afin de justifier le niveau de contraintes de 70 MPa retenu actuellement dans le dossier de tenue des cuves de 900 MWe jusqu'à VD4+10 ans. Cela consiste en, d'une part, les mesures de contraintes résiduelles sur un joint soudé de forte épaisseur en acier

<sup>1</sup> Un transitoire découplé est un transitoire qui ne correspond pas à une situation physique susceptible d'être rencontrée sur les réacteurs. Ce transitoire est construit de manière à envelopper plusieurs situations physiques possibles.

<sup>2</sup> Le domaine complémentaire est constitué de situations postulées pour lesquelles EDF a défini des dispositions complémentaires qui permettent de ramener à un niveau acceptable les conséquences d'autres initiateurs que ceux pris en compte dans le dimensionnement conventionnel de base, et qui peuvent inclure des défaillances multiples. Les initiateurs retenus, issus des études probabilistes de sûreté, sont ceux présentant un risque de fusion du cœur. Dans leur étude, la cuve est supposée intègre.

SA508, réalisées dans le cadre du programme NNUMAN<sup>3</sup>, et d'autre part, les calculs de contraintes résiduelles réalisés par EDF pour un joint soudé revêtu représentatif des joints soudés circulaires des cuves de 900 MWe.

En ce qui concerne les mesures issues du programme NNUMAN, l'IRSN estime que les différences de forme du chanfrein de soudure par rapport aux cuves des réacteurs de 900 MWe rendent difficile une transposition directe des résultats issus de ce programme au cas des joints soudés de la zone de cœur. Par ailleurs, ce programme montre que la valeur maximale de contraintes résiduelles sur toute l'épaisseur de la soudure pourrait atteindre 100 MPa après traitement thermique de détensionnement. Les simulations numériques réalisées par EDF permettent quant à elles de comprendre l'évolution des contraintes résiduelles au cours des différentes étapes de soudage et de traitement thermique, en particulier en ce qui concerne l'impact du revêtement. Toutefois, l'IRSN estime que la capacité de cette simulation numérique à reproduire avec précision le comportement des matériaux et donc les contraintes lors des différentes étapes de soudage et de traitement thermique reste à valider. En particulier, le niveau de précision de la loi de comportement élasto-visco-plastique pour simuler un soudage et un traitement thermique demeure inconnu.

Nonobstant ces réserves sur les éléments de justification apportés par EDF, l'écart entre la valeur de contraintes résiduelles retenue par EDF (70 MPa) et la valeur maximale issue de la littérature (100 MPa) [5] est modéré et n'a pas d'impact sur la conclusion de la tenue des cuves du palier CPY pour lesquelles les marges dans les joints soudés sont importantes. Pour certaines cuves du palier CP0 (réacteurs n° 3 à 5 du BUGEY) le choix de cette valeur pourrait présenter un enjeu dans l'appréciation des marges vis-à-vis du risque de rupture brutale de ces cuves. L'IRSN considère qu'EDF devrait donc poursuivre les études et recherches concernant le niveau des contraintes résiduelles dans les joints soudés de la zone de cœur des cuves de 900 MWe après traitement thermique de détensionnement, afin notamment de disposer de résultats de mesure obtenus sur des maquettes représentatives lui permettant de conforter les données issues de ses modélisations. À cet égard, en fin d'instruction, EDF s'est engagé à poursuivre les études concernant le niveau de contraintes résiduelles dans les joints soudés de la zone de cœur des cuves 900 MWe après traitement thermique de détensionnement. Un programme de travail, incluant des mesures sur maquettes, sera communiqué par EDF à l'échéance de mars 2021. Cet engagement est jugé satisfaisant par l'IRSN.

Finalement, si un approfondissement des connaissances sur les contraintes résiduelles dans les joints soudés permettrait d'améliorer l'appréciation des marges pour certaines cuves, l'IRSN estime que retenir un niveau de 70 MPa de contraintes résiduelles est acceptable, en l'état des connaissances, pour l'étude de la tenue des cuves du palier 900 MWe jusqu'à la VD4+10 ans.

### 3 CLASSEMENT DES TRANSITOIRES DE BRECHE PRIMAIRE

La catégorisation des transitoires de brèche du circuit primaire principal a fait l'objet d'échanges lors des réunions du GP ESPN du 10 juin 2015 (GP Orientation VD4 900) et du 20 novembre 2018 (premier GP Cuves 900 VD4+10 ans). Lors de ces réunions, le Groupe permanent a estimé que les justifications transmises par EDF afin de reclasser en quatrième catégorie les transitoires correspondant à des brèches de diamètre équivalent supérieur ou égal à 1 pouce (GP 2015) ou à 2 pouces (GP 2018) n'étaient pas suffisantes. Ces échanges ont conduit à des demandes successives de l'ASN dont la dernière est formulée dans son courrier du 28 février 2019 [3]. En réponse à cette demande, EDF a transmis des éléments complémentaires afin de justifier finalement la pratique jusque-là retenue dans les dossiers de tenue en service des cuves, à savoir la réalisation d'études des brèches primaires jusqu'à 3 pouces avec les coefficients de sécurité de 3<sup>e</sup> catégorie et la réalisation d'étude de brèches de taille supérieure avec les coefficients de sécurité de 4<sup>e</sup> catégorie. Ces éléments complémentaires s'articulent autour de quatre arguments explicités ci-après.

<sup>3</sup> New Nuclear Manufacturing programme : programme de recherche sur les technologies de fabrication des équipements nucléaires pour le futur programme nucléaire au Royaume uni.

Le premier argument est le caractère pénalisant de la pratique française par rapport à l'international vis-à-vis des transitoires de 3<sup>e</sup> catégorie. En effet, la pratique française, en considérant un coefficient de sécurité de 1,6 pour les situations de 3<sup>e</sup> catégorie, est plus pénalisante que plusieurs autres pratiques en vigueur à l'international, qui considèrent un coefficient de sécurité d'environ 1,4 pour les situations de 3<sup>e</sup> catégorie. Par contre, en 4<sup>e</sup> catégorie, la pratique française retient un coefficient de 1,2 alors qu'à l'international le coefficient de 1,4 est maintenu. La différence significative de coefficients de sécurité retenus en France entre 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> catégories confère donc une grande importance au classement des transitoires entre ces deux catégories, et en particulier à la dimension de la plus grande brèche retenue en troisième catégorie.

Le deuxième argument est la similitude, en termes de phénoménologie physique ainsi que de contribution des contraintes d'origine mécanique et thermique, observée pour les transitoires au-delà de 2 pouces dont le transitoire de rupture complète de tuyauterie primaire, classé en 4<sup>e</sup> catégorie. L'IRSN prend note de cette similitude mise en évidence par EDF mais considère qu'elle ne constitue pas en elle-même un argument suffisant justifiant la catégorisation des transitoires.

Le troisième argument revient sur l'origine du classement des transitoires de brèche primaire. Selon EDF, le classement initial des transitoires de brèche jusqu'à 6 pouces en 3<sup>e</sup> catégorie, est issu d'une étude statistique réalisée en 1977 pour le réacteur de Fessenheim 1 s'appuyant sur la base d'un retour d'expérience (REX) américain principalement non nucléaire et sur des jugements d'expert. Toutefois, lors des premières analyses du risque de rupture brutale des cuves réalisées dans les années 1980, une analyse de sensibilité, effectuée selon le référentiel d'analyse mécanique de l'époque, avec notamment la prise en compte de la possibilité d'arrêt de fissure<sup>4</sup>, a conduit à ce que la brèche de 3<sup>e</sup> catégorie la plus pénalisante identifiée soit celle de 3 pouces, valeur considérée depuis comme limite d'analyse en 3<sup>e</sup> catégorie dans tous les dossiers de tenue en service des cuves. Cependant, l'abolition en France<sup>5</sup> de la possibilité de valoriser l'arrêt de fissure a rendu obsolètes les conclusions des premières analyses de sensibilité des années 1980. Selon EDF, si l'évolution des méthodes mécaniques peut conduire à mettre en cause la taille de brèche pénalisante à considérer en 3<sup>e</sup> catégorie, cette interrogation doit également prendre en compte l'état de l'art des estimations de fréquences d'occurrence associées à ces brèches. L'IRSN est en accord avec cette position, qui correspond également à celle du GP ESPN et de l'ASN en 2015.

Le quatrième argument d'EDF consiste donc à réévaluer la fréquence d'occurrence des transitoires de brèches primaires, par la mise à jour de l'étude statistique de 1977, et par la prise en compte du REX des défaillances avérées sur le parc électronucléaire français. L'IRSN considère que ces éléments permettent de confirmer que la probabilité d'occurrence de brèches au-delà de deux pouces est de l'ordre de  $10^{-4}$  par année et par réacteur, valeur généralement admise comme limite entre les transitoires de 3<sup>e</sup> et de 4<sup>e</sup> catégorie. Néanmoins, cette étude ne permet pas de montrer que la fréquence d'occurrence des brèches supérieures à 2 pouces est significativement inférieure à  $10^{-4}$ .

Au final, l'IRSN considère qu'aucun des arguments d'EDF ne permet, à lui seul, de fixer la dimension maximale de brèche à considérer en troisième catégorie. En particulier, l'IRSN considère qu'il semble difficile, vu le faible nombre d'événements représentatifs issus de l'analyse du retour d'expérience et compte tenu de l'incertitude qui en découle, de faire reposer la détermination de cette limite sur les seuls arguments statistiques. Ainsi, l'IRSN considère, comme EDF, que la catégorisation des transitoires de brèches primaires doit tenir compte de l'ensemble des arguments présentés ci-dessus. Alors que les arguments d'EDF semblent indiquer que la brèche de 2 pouces serait la limite entre la 3<sup>e</sup> et la 4<sup>e</sup> catégorie, EDF retient conservativement une limite fixée à 3 pouces. Ce choix permet de maintenir la pratique des études en vigueur dans les dossiers de tenue en service des cuves du parc en

<sup>4</sup> Le gradient thermique produit par un choc froid dans une paroi épaisse en acier induit, du côté en contact avec le fluide froid, des contraintes de traction et, du côté opposé, des contraintes de compression. Un défaut qui serait amorcé dans la portion de l'épaisseur qui est en traction et qui se propagerait jusque dans la portion de l'épaisseur en compression est susceptible de voir sa propagation stoppée sous l'effet de ces contraintes de compression. Il s'agit du phénomène d'arrêt de fissure.

<sup>5</sup> Décision de l'ASN DSIN-GRE/BCCN N 01-0297 relative à la version 2000 du code RCC-M.

exploitation. Dans ces conditions, l'IRSN estime acceptable de fixer à trois pouces la limite de la dimension de brèche à considérer en troisième catégorie pour l'analyse du risque de rupture brutale des cuves des réacteurs de 900 MWe. L'IRSN souligne néanmoins que ce choix n'est acceptable que pour les études de la zone de cœur des cuves, l'impact de cette proposition n'ayant pas été évalué pour les analyses de comportement mécanique des autres composants de la chaudière nucléaire.

De plus, certains phénomènes thermohydrauliques sont particulièrement sensibles à la taille de brèche, pour des brèches de l'ordre de 3 pouces sur certains types de réacteurs, comme par exemple le dénoyage suivi du renoyage de la descente annulaire qui peut entraîner un choc thermique significatif sur la cuve. Ces scénarios ont été étudiés en 3<sup>e</sup> catégorie dans le présent dossier de tenue en service des cuves de 900 MWe jusqu'à VD4+10 ans. Vu les incertitudes et la sensibilité à la taille de brèche, l'IRSN estime que de tels scénarios doivent être étudiés en 3<sup>e</sup> catégorie y compris pour une taille de brèche légèrement supérieure à 3 pouces afin de s'assurer qu'un éventuel effet falaise associé à ces phénomènes ne serait pas couvert par la réduction du coefficient de sécurité entre 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> catégorie. Pour l'IRSN, de tels scénarios doivent donc continuer à être étudiés en 3<sup>e</sup> catégorie pour l'ensemble des dossiers zone de cœur des cuves du parc électronucléaire français.

## 4 ANALYSE DU RISQUE DE RUPTURE BRUTALE DE LA ZONE DE CŒUR JUSQU'À VD4+10 ANS

### 4.1 Risque de rupture brutale associé aux défauts génériques

EDF a transmis l'ensemble des résultats de l'analyse du risque de rupture brutale associé au défaut générique postulé en virole ou en joint soudé.

Pour ce qui concerne les situations de 2<sup>e</sup> catégorie, les facteurs de marge pour les situations pénalisantes (passage de l'arrêt à chaud à l'arrêt à froid, perte de l'alimentation électrique externe sans redémarrage des pompes primaires...) sont tous supérieurs au critère. En 2019, faisant suite à une réserve de l'IRSN quant à la valorisation par EDF de préconisations de conduite normale, non prescriptives, pour justifier l'exclusion de certaines situations de catégorie 2 de l'analyse, EDF a engagé la réalisation d'une étude basée sur un transitoire découplé enveloppe de toutes les situations envisageables de 2<sup>e</sup> catégorie. Les résultats obtenus pour ce transitoire découplé enveloppe ont permis de conclure au respect du critère applicable en catégorie 2, pour le défaut générique postulé en virole de cuve. Pour les défauts postulés en joint soudé, EDF a également démontré le respect des critères applicables, moyennant une relaxation dûment justifiée de la valeur du coefficient d'échange thermique entre le fluide et la paroi pour les cuves des réacteurs du Bugey qui présentent les propriétés mécaniques les plus défavorables parmi les joints soudés des cuves des réacteurs de 900 MWe.

Concernant les situations de 3<sup>e</sup>, 4<sup>e</sup> catégories et du domaine complémentaire, EDF a transmis l'ensemble des résultats d'analyse du risque de rupture brutale. Ces résultats prennent en compte les demandes issues de l'expertise réalisée en 2019, y compris l'action relative aux scénarios de brèches avec dénoyage et renoyage de l'espace annulaire citée par l'ASN dans sa saisine [7]. Selon les résultats obtenus, le critère d'absence de risque de rupture brutale est respecté pour les situations les plus pénalisantes de 3<sup>e</sup>, 4<sup>e</sup> catégorie et celles du domaine complémentaire.

Par conséquent, l'IRSN estime qu'EDF a démontré l'absence de risque de rupture brutale de la zone de cœur des cuves qui ne sont pas concernées par la présence de défauts avérés. Cette conclusion ne s'applique toutefois pas aux cuves des réacteurs concernés par la demande n° 1 de l'ASN dans son courrier [3]. Des analyses particulières répondant à cette demande pour chacune de ces cuves devront être disponibles avant les VD4 de ces réacteurs, VD4 qui auront lieu au-delà de 2025.

## 4.2 Risque de rupture brutale lié aux défauts avérés

EDF a présenté l'analyse du risque de rupture brutale associé aux défauts avérés sur les cuves de Blayais 2, de Bugey 5, de Saint Laurent B1 et de Saint Laurent B2.

L'analyse des défauts détectés a conduit à la démonstration du respect du critère d'absence de risque de rupture brutale pour l'ensemble des défauts détectés sur les cuves concernées, pour les situations les plus pénalisantes de 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> catégories. Toutefois, les analyses pour les situations enveloppes de 2<sup>e</sup> catégorie et du domaine complémentaire ne sont pas, à ce jour, disponibles. Les futures VD4 de réacteurs concernés par les défauts avérés dans la zone de cœur de la cuve étant prévues bien au-delà de la présente expertise, l'ASN a accepté d'exclure ces éléments du cadre de la présente expertise de l'IRSN.

A ce stade, l'IRSN constate, de manière générale, que les marges obtenues pour les défauts détectés sont plus élevées que celles obtenues pour les défauts génériques postulés dans les cuves les plus pénalisantes grâce à une meilleure ténacité et, pour certains défauts, à des chocs thermiques moins violents en considérant la position réelle des défauts avérés. **La transmission par EDF des résultats de l'analyse pour l'ensemble des défauts détectés sur les cuves de 900 MWe lors des transitoires enveloppes de 2<sup>e</sup> catégorie et du domaine complémentaire est nécessaire pour conclure cette analyse.**

## 5 CONCLUSION

À l'issue de son expertise, l'IRSN estime qu'EDF a justifié l'absence de risque de rupture brutale associé aux défauts génériques postulés aux points les plus irradiés des cuves des réacteurs de 900 MWe. Ainsi, selon l'IRSN, l'aptitude au service des cuves qui ne sont pas concernées par des défauts avérés est démontrée jusqu'en VD4+10 ans. Cette conclusion n'est toutefois pas applicable aux cuves des réacteurs concernés par la demande n°1 de l'ASN dans son courrier du 28 février 2019 pour lesquelles des analyses particulières sont prévues par EDF avant les quatrièmes visites décennales de ces réacteurs. Quant aux cuves des réacteurs de 900 MWe concernées par des défauts avérés, l'analyse d'EDF a permis de démontrer le respect des critères pour les situations pénalisantes de 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> catégories, les résultats d'analyse des défauts avérés n'étant toutefois pas disponibles pour les situations enveloppes de 2<sup>e</sup> catégorie et du domaine complémentaire. Ces éléments devront être transmis dans un délai compatible avec leur expertise en vue des VD4 des réacteurs concernés.

Pour le Directeur général et par délégation,

Olivier DUBOIS

Adjoint à la Directrice de l'expertise de sûreté