

Fontenay-aux-Roses, le 26 octobre 2022

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2022-00203

Objet :	EDF – REP – Centrale nucléaire de Cattenom – Réacteur N° 1 – INB 124 Soudures des circuits auxiliaires du circuit primaire principal affectées par la corrosion sous contrainte – Examen des dossiers de traitement d'écart.
Réf. :	[1] Saisine ASN – CODEP-DEP-2022-001563 du 11 février 2022. [2] Avis IRSN – 2022-00189 du 14 septembre 2022. [3] Avis IRSN – 2022-00131 du 28 juin 2022.

Dans le cadre du traitement de l'affaire « Corrosion sous contrainte (CSC) des tuyauteries auxiliaires du circuit primaire principal (CPP) » des REP¹, EDF a mis en œuvre, lors de l'arrêt programmé pour renouvellement du combustible et pour maintenance du réacteur n° 1 de la centrale nucléaire de Cattenom, des contrôles par ultrasons aux abords² de certaines soudures des lignes en branche froide (BF) du système d'injection de sécurité (RIS)³. À l'issue de ces contrôles, EDF a conclu à la présence d'indications potentiellement révélatrices de fissures de CSC et a caractérisé ces indications en hauteur et en longueur.

Sur la base de son évaluation de l'évolution de ces défauts, réacteur en fonctionnement, et des marges sur le risque de défaillance potentielle de la tuyauterie au droit de ces défauts, EDF considère que la garantie d'un fonctionnement en toute sûreté du réacteur pour une période de 12 mois est apportée. En conséquence, EDF propose de redémarrer le réacteur pour une période d'exploitation de 8 mois au plus, sans réparer les portions concernées, et s'engage à les réparer lors d'un arrêt dédié du réacteur au cours du printemps 2023. À l'appui de sa demande de redémarrage, EDF a produit des dossiers de traitement d'écart (DTE) pour justifier le maintien provisoire en l'état des parties présentant des indications de défauts.

¹ REP : réacteur à eau sous pression.

² Le retour d'expérience actuel montre que les fissures de CSC sont amorcées dans les tuyauteries aux abords immédiats des soudures dans la zone dite « affectée mécaniquement » par les opérations de soudage. Les soudures ayant une microstructure austénoferritique différente du matériau austénitique des tuyauteries, elles seraient moins sensibles à la CSC que le matériau de base, du fait de leur proportion de ferrite plus importante.

³ Le circuit RIS a pour fonction d'injecter de l'eau à forte concentration en bore en cas de baisse de pression anormale du circuit primaire. Cette injection « de sécurité » est destinée à refroidir le cœur et à maîtriser sa réactivité, notamment en cas de brèche sur le circuit primaire.

Par la saisine en référence [1], l’Autorité de sûreté nucléaire a sollicité l’avis de l’Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur les DTE relatifs à ces indications.

1. DOSSIER D’EDF

Lors de l’arrêt du réacteur n° 1 de Cattenom, EDF a mis en œuvre un contrôle par Ultrasons amélioré (UTa) pour la détection et la caractérisation de fissures de CSC dans les tuyauteries auxiliaires du CPP.

EDF revendique une garantie de détection des fissures de CSC de hauteur supérieure ou égale à 2 mm et d’extension supérieure ou égale à 15 mm. La caractérisation en hauteur des défauts est associée à une incertitude de $\pm 1 \text{ mm}^4$ à 2 écarts types avec un niveau de confiance d’environ 95%. Le programme de contrôle des lignes RIS BF mis en œuvre par EDF lors de l’arrêt en cours de ce réacteur comporte un échantillonnage de 17 soudures sur un total de 52 soudures pouvant être affectées par un phénomène de CSC sur les lignes RIS BF.

Parmi ces 52 soudures, la totalité des soudures qui ont fait l’objet de réparations lors des opérations de fabrication initiale a été contrôlée, soit 11 soudures. Les réparations des soudures modifient le champ des contraintes résiduelles de soudage⁵ qui sont un des moteurs de la CSC. Cette redistribution des contraintes pourrait expliquer que la fissure de CSC la plus profonde expertisée à ce jour en laboratoire pour les réacteurs de 1300 MWe soit observée pour le circuit RIS BF du réacteur n° 1 de la centrale nucléaire de Penly pour une soudure réparée (soudure M8 de la ligne RIS BF de la boucle 3 avec une profondeur maximale relevée sur coupe métallographique de 4,4 mm). En conséquence, EDF a proposé de réaliser un contrôle exhaustif des soudures réparées des lignes RIS BF du réacteur n° 1 de Cattenom.

À l’issue de ces contrôles et à l’instar du réacteur n° 1 de Penly, c’est aux abords d’une soudure réparée que l’indication la plus profonde a été relevée par l’examen par ultrasons. Cette indication concerne la soudure A9 de la ligne RIS BF n° 1 (A9-BF1), avec une profondeur maximale déterminée par ultrasons de $5,1 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Pour les réacteurs de 1300 MWe du palier P’4, l’épaisseur des tuyauteries concernées du circuit RIS est d’environ 26 mm. La seconde indication la plus profonde est observée pour la soudure A18 de la ligne RIS BF n° 2 (A18-BF2) avec une hauteur estimée de $3,7 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Les contrôles réalisés pour les autres soudures concluent à la présence d’artefacts⁶ ou de défauts sans hauteur mesurable (soit inférieure à 2 mm selon EDF).

EDF propose de maintenir en l’état les indications caractérisées comme des défauts plans pour une période d’exploitation ne dépassant pas 8 mois. Cette proposition s’appuie notamment sur deux DTE pour les zones des soudures A9-BF1 et A18-BF2 qui comprennent la caractérisation et la nature de chacun des défauts, une analyse de leur évolution, une analyse de leur nocivité, ainsi qu’une évaluation des conséquences sur la sûreté des installations et des risques pour la sécurité du personnel. Concernant la cinétique d’évolution des défauts, EDF considère que le mécanisme d’endommagement est uniquement la CSC et retient une vitesse de propagation enveloppe de 0,5 mm/an, lorsque le réacteur est en fonctionnement. EDF constate que sur l’ensemble des soudures expertisées, aucune fissure de fatigue n’a été détectée. Ainsi, le risque de cumul des phénomènes de CSC et de fatigue n’est pas considéré par EDF. EDF indique toutefois avoir initié une analyse quantitative du risque de propagation par fatigue des fissures amorcées par CSC.

⁴ L’incertitude est de $\pm 1 \text{ mm}$ avec un biais de +0,1 mm ce qui conduit à un intervalle de confiance de +1,1/-0,9 mm.

⁵ Les contraintes résiduelles sont les tensions internes au matériau à température uniforme et en l’absence de chargement extérieur. Les contraintes résiduelles de soudage proviennent des phénomènes de dilatation et de contraction du métal lors des phases de fusion et de solidification du métal d’apport ainsi que de la répétition de ces cycles thermiques lors de la réalisation des nombreuses passes de soudage.

⁶ Un artefact pour un contrôle ultrasonore est un signal qui ne provient pas d’un défaut mais d’une autre source échogène (par exemple une perturbation géométrique).

EDF a réalisé des analyses de nocivité des défauts détectés aux abords des soudures A9-BF1 et A18-BF2. Pour les tuyauteries en acier inoxydable austénitique en présence de fissures, les modes de ruine à considérer sont le risque d'instabilité du ligament⁷ restant et le risque de rupture ductile.

Le risque d'instabilité du ligament restant est le risque de ruine plastique sous l'effet des chargements primaires⁸. La présence du défaut réduit la section résistante de la tuyauterie et accroît ce risque. EDF a donc calculé les marges vis-à-vis de ce mode de ruine en considérant une sous-épaisseur causée par la présence du défaut. Les évaluations faites par EDF montrent des marges significatives vis-à-vis de ce mode de ruine.

Le risque de rupture ductile est quant à lui lié à la singularité des contraintes locales générée par un défaut plan de type fissure. Ce risque est associé à un phénomène d'amorçage et de déchirure instable du défaut. Il doit être évalué en considérant l'ensemble des chargements primaires et secondaires. Afin de justifier l'absence de risque de rupture ductile, EDF suit la démarche proposée par le code RSE-M⁹ (démarche dite « option 1 ») qui permet de vérifier de manière conjointe les risques d'amorçage et d'instabilité de la déchirure en considérant des marges supplémentaires vis-à-vis de l'amorçage.

L'absence de risque d'amorçage de la déchirure est vérifiée en comparant la force fissurante, représentée par l'intégrale de Rice (J), à la limite d'amorçage de la déchirure du matériau $J_{0,2}$ déterminée à partir de sa ténacité¹⁰. EDF appuie son analyse sur des calculs par la méthode aux éléments finis élastoplastiques qui prennent en compte la présence du défaut. La déformation (l'écrouissage) du métal de base aux abords des soudures est prise en compte par EDF, d'une part dans la définition de la courbe de traction, d'autre part dans la détermination de la résistance à la déchirure ductile. Dans son analyse, EDF considère les chargements thermomécaniques les plus pénalisants issus du dossier de référence réglementaire (DRR)¹¹ des réacteurs du palier 1300 MWe. Le risque de rupture ductile est analysé en considérant la ténacité la plus défavorable entre le métal de base écroui et le métal déposé. Les modèles de calculs thermomécaniques permettent d'évaluer la hauteur du défaut critique, qui est le plus grand défaut ne conduisant pas au risque de rupture ductile lors des transitoires les plus sévères. L'absence de risque de rupture ductile est démontrée si la hauteur des défauts présents dans les soudures ne dépasse pas la hauteur du défaut critique.

Dans les dossiers de traitement d'écart des soudures A9 et A18, les défauts considérés dans les études de nocivité sont de forme axisymétrique. La hauteur de défaut retenue par EDF pour l'analyse est égale à la hauteur du défaut mesurée par les END, incertitudes comprises, majorée d'une estimation de propagation de 0,5 mm pour une durée de fonctionnement de 12 mois.

Pour la soudure A18-BF2, la hauteur du défaut critique est initialement calculée en considérant les cumuls enveloppes des chargements thermomécaniques du DRR. La hauteur critique obtenue est de 4,3 mm, alors que la hauteur de défaut retenue est de 5,2 mm. La justification n'est donc pas acquise à ce stade. Une optimisation de calcul est ensuite proposée par EDF en considérant des cumuls de chargements moins pénalisants. La nouvelle hauteur critique ainsi obtenue est de 5,4 mm, ce qui permet à EDF de conclure à l'absence de risque de rupture ductile initiée par la présence de défaut dans cette soudure.

⁷ Le ligament est la section restante de matière au niveau de la fissure.

⁸ Dans le cas général, un chargement est qualifié de primaire lorsqu'il résulte de l'application d'une force sur une structure, il est qualifié de secondaire lorsqu'il résulte de l'imposition de déplacements.

⁹ RSE-M : code publié par l'AFCEM réunissant les Règles de Surveillance en Exploitation des Matériels Mécaniques des Ilots Nucléaires des REP.

¹⁰ La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure.

¹¹ DRR : dossiers de référence réglementaires, ensemble de documents devant être constitués par les exploitants en réponse aux exigences de l'arrêté du 10 novembre 1999 modifié relatif à la surveillance de l'exploitation du CPP et des CSP des REP qui incluent notamment le dossier des situations, le dossier d'analyse de comportement et le dossier d'analyse de rupture brutale.

Pour ce qui concerne la soudure A9-BF1, EDF estime que la hauteur du défaut critique est supérieure à 8 mm et la hauteur retenue du défaut est de 6,6 mm. Ceci montre, selon EDF, l'absence de risque de rupture brutale au droit de cette soudure pour une durée de fonctionnement de 12 mois.

Concernant l'évaluation des conséquences sur la sûreté, EDF a réalisé une étude de robustesse qui montre que la rupture doublement débattue de 2 lignes RIS sur les 4 lignes RIS du réacteur n° 1 de Cattenom conduit à des marges importantes par rapport aux critères de sûreté relatifs à la capacité de refroidissement du cœur. EDF considère également que la rupture franche et concomitante de 2 lignes RIS est improbable pour les tuyauteries en acier inoxydable austénitique des lignes RIS, qui présentent un comportement ductile à la déchirure.

2. ANALYSE DE L'IRSN

2.1. MÉTHODE ET STRATÉGIE DE CONTRÔLE

La fissuration par CSC des tuyauteries RIS a été découverte par EDF dans le cadre de contrôles en maintenance réalisés en visite décennale au titre de la surveillance du risque de fatigue thermique dans des zones faiblement sollicitées pour ce mécanisme d'endommagement. La méthode de contrôle utilisée est qualifiée pour la détection de fissure de fatigue thermique. En comparaison aux fissures de fatigue thermique, les fissures de CSC sont le plus souvent multi-amorcées et présentent des faciès de corrosion intergranulaires¹² de géométrie complexe. La méthode de contrôle utilisée lors des visites décennales s'appuie sur une technique de contrôle ultrasonore manuelle sans enregistrement des signaux. Cette méthode de contrôle n'est pas assez performante et fiable pour la détection et la caractérisation¹³ de fissures de CSC. En conséquence, EDF a développé une nouvelle technique de contrôle ultrasonore multiéléments permettant d'enregistrer les signaux, d'afficher une imagerie ultrasonore en temps réel et d'analyser les signaux en différé. Cette méthode est actuellement utilisée en mode expertise¹⁴. La démarche de qualification sera lancée début 2023 avec un objectif de qualification dans l'année 2023. Les performances de cette technique de contrôle ont été établies par EDF en comparant les signaux ultrasonores obtenus pour des fissures de CSC avec les expertises métallographiques de ces défauts. Plusieurs soudures prélevées sur les lignes RIS de réacteurs constituent la base de données utilisée par EDF pour évaluer la performance du procédé de contrôle ultrasonore.

L'IRSN considère que l'utilisation d'un procédé de contrôle ultrasonore permettant d'enregistrer les données et de pouvoir les analyser en différé par des experts avec des outils d'imagerie ultrasonore apporte de meilleures garanties de traçabilité et de fiabilité que le procédé de contrôle historique utilisé précédemment en visite décennale. L'IRSN observe que le nouveau procédé de contrôle permet à EDF d'évaluer la hauteur des défauts, sous réserve que les conditions de contrôle soient satisfaisantes. Cela constitue un progrès important par rapport au procédé de contrôle historique. Enfin l'IRSN considère que l'utilisation d'une base de données composée de fissures de CSC extraites de lignes RIS apporte une meilleure garantie de la représentativité de ces défauts pour établir les performances de contrôle.

¹² La corrosion intergranulaire se propage par attaque des joints des grains dans le matériau. Le profil des fissures qui résultent de ce phénomène est très tourmenté (les dimensions typiques d'un grain austénitique dans une tuyauterie forgée en acier inoxydable de nuance 316L est de l'ordre de quelques dizaines de microns).

¹³ La caractérisation a pour objet de statuer sur le caractère parasite ou non d'une indication et de déterminer sa nature, sa position et ses dimensions.

¹⁴ Selon le référentiel RSE-M utilisé par EDF pour la maintenance des REP, une démarche d'expertise a pour objet d'expliquer et d'évaluer le résultat d'un examen non destructif, à partir des connaissances disponibles et de démonstrations accompagnées d'un jugement professionnel, cette démarche est applicable pour un procédé de contrôle non qualifié ainsi que cela est prévu à l'article 8 par la circulaire associée à l'arrêté d'exploitation du 10 novembre 1999.

L'IRSN observe cependant que la configuration de contrôle est très complexe : les soudures ne sont pas arasées en paroi interne, la pente de délardage¹⁵ peut être forte et les abords de soudure sont déformés par le retrait de soudage. Le profil interne de la soudure est le plus souvent de géométrie complexe ce qui contribue à générer des échos ultrasonores parasites. La microstructure métallurgique austénoferritique de la soudure constitue un milieu hétérogène et anisotrope qui perturbe la propagation des ondes ultrasonores. La présence de la soudure génère un bruit dit « de structure » et des échos parasites qui peuvent également, en plus des échos de géométrie, perturber l'analyse du contrôle des abords des soudures où sont recherchées les fissures de CSC. De plus, plusieurs soudures ont fait l'objet de réparations lors de la fabrication. Dans certains cas, les réparations conduisent à modifier la forme initiale du chanfrein de soudage et à augmenter le volume de la soudure ce qui peut réduire les performances du contrôle. Les paramètres géométriques et les propriétés du matériau de la soudure et de ses abords font partie des paramètres influents à prendre en compte dans une démarche de qualification répondant aux exigences de l'arrêté d'exploitation du 10 novembre 1999. EDF s'est engagée dans cette démarche de qualification, mais lors de l'arrêt actuel du réacteur n° 1 de Cattenom, le nouveau procédé de contrôle ultrasonore reste utilisé en mode expertise et repose sur la valorisation d'une base de données comportant plus d'une centaine d'exams ultrasonores. Ces essais ont permis à EDF d'évaluer statistiquement les performances du procédé UTA pour détecter et caractériser des fissures de CSC. Néanmoins, la prise en compte complète des paramètres influents des contrôles ne sera réalisée que dans le cadre de la qualification du procédé.

En conséquence, l'IRSN considère que la revendication par EDF des performances de détection et de caractérisation des fissures de CSC dans les lignes auxiliaires du CPP par ultrasons ne présente pas les garanties apportées par un procédé qualifié. Aussi, les résultats de ces contrôles doivent être considérés avec une grande prudence dans le cadre des dossiers de traitement d'écart du réacteur n° 1 de Cattenom.

Le périmètre des contrôles ultrasonores retenu par EDF pour l'examen des abords des soudures des lignes RIS du réacteur n° 1 de Cattenom est exhaustif quant aux soudures réparées en fabrication, mais se limite à un échantillonnage de l'ensemble des soudures des lignes RIS pouvant être affectées par la CSC. Les résultats des contrôles ne montrent pas, pour ce réacteur, une plus grande sensibilité à la CSC systématique des soudures réparées. De plus, l'IRSN observe que seuls les abords de la soudure A17 du circuit RIS BF de la boucle 2 ont été contrôlés avec un résultat concluant à la présence d'un artefact ou d'un défaut sans hauteur mesurable alors qu'une fissure significative de 3 mm de profondeur a été expertisée aux abords de cette même soudure de la boucle 3 du réacteur n° 1 de Penly qui présente la même géométrie de ligne. Dans l'état actuel des connaissances, l'IRSN ne peut pas exclure que des fissures de CSC puissent être présentes dans les soudures A17 non contrôlées des autres lignes RIS BF du réacteur n° 1 de Cattenom.

En raison d'une stratégie de contrôle par échantillonnage des lignes RIS BF du réacteur n° 1 de Cattenom, l'IRSN considère que la garantie de détection dans les lignes RIS BF du défaut de CSC potentiellement le plus nocif n'est pas apportée par EDF.

2.2. RÉSULTATS DES CONTRÔLES

À l'issue des contrôles ultrasonores, deux soudures présentent des indications de hauteur supérieure à 2 mm pour une extension supérieure à 15 mm :

- la soudure réparée A9 de la ligne RIS BF de la boucle 1 :
 - abord amont¹⁶, indication #1 de hauteur max = 5 mm +1,1/-0,9 mm ;
 - abord amont, indication #2 de hauteur max = 3,9 mm +1,1/-0,9 mm ;

¹⁵ Le délardage est une opération d'usinage ou de meulage permettant d'accoster le diamètre interne des 2 embouts de tuyauterie à souder.

¹⁶ L'amont et l'aval des abords des soudures sont définis par rapport au sens de circulation du fluide.

- la soudure A18 de la ligne RIS BF de la boucle 2 :
 - abord amont, indication #1 de hauteur max = 3,15 mm +1,1/-0,9 mm ;
 - abord aval, indication #2 de hauteur max = 3,6 mm +1,1/-0,9 mm.

EDF a analysé les résultats ultrasonores sur la base d'une procédure dite « procédure d'analyse ». Celle-ci a été mise à jour lors de la campagne de contrôle sur le réacteur n° 1 de Cattenom. L'analyse de premier niveau des résultats, en application stricte de cette procédure, conduit à identifier des zones non couvertes par les contrôles. Afin de réduire le périmètre de ces zones non couvertes, EDF réalise une analyse dite « de second niveau » faisant appel à des experts EDF qui prennent en compte des éléments complémentaires à la procédure d'analyse.

L'IRSN constate, d'une part que les procédures ne sont pas encore stabilisées et nécessitent d'être régulièrement mises à jour par EDF, d'autre part que les différentes interprétations par des experts d'EDF influent fortement sur les résultats des contrôles en termes de détection et caractérisation des indications.

L'IRSN observe que, pour la soudure A9-BF1, l'analyse EDF de deuxième niveau n'identifie pas de zones non couvertes pour l'abord amont et conclut à une zone de contrôle non couverte sur 27% de la circonférence de la tuyauterie pour l'abord aval. Pour les indications du côté amont de cette soudure, l'analyse de deuxième niveau conclut à des défauts assimilables à des défauts plans sans se prononcer sur l'origine de ces indications (CSC, fatigue, défaut technologique de soudage...). L'analyse de second niveau observe que la signature acoustique du plus grand défaut est atypique et ne plaide pas en faveur de la présence d'un endommagement par CSC de hauteur importante, sans pour autant pouvoir exclure cette origine.

Pour l'abord amont de la soudure A18-BF2, l'analyse de second niveau d'EDF conclut à une zone non couverte de 44%.

L'IRSN observe que pour des soudures dont les abords présentent des indications ultrasonores pouvant correspondre à des défauts de CSC de hauteur supérieure à 3 mm, des zones étendues sont non couvertes. L'IRSN considère qu'EDF n'apporte pas une information complète sur l'état de santé des abords de ces soudures.

Compte tenu de ces réserves sur les performances du procédé de contrôle ultrasonore, d'un contrôle par échantillonnage des soudures des lignes RIS BF et d'un contrôle des abords de deux soudures suspectées d'une fissuration par CSC comportant des zones non couvertes, l'IRSN considère que le bilan des contrôles n'apporte pas un niveau de confiance suffisant sur l'état de santé des lignes RIS BF du réacteur n° 1 de Cattenom.

2.3. TRAITEMENT DE L'ÉCART

La fissuration par CSC est un mécanisme d'endommagement évolutif dont il est difficile d'estimer la cinétique enveloppe en raison des nombreuses incertitudes sur les paramètres influents (sensibilité du matériau, niveau de contraintes, environnement). Pour les lignes auxiliaires du CPP, c'est un phénomène de grande ampleur qui a été découvert de façon inopinée lors de contrôles réalisés au titre de la recherche de fissuration par fatigue thermique dans le cadre des visites décennales du réacteur n° 1 de Civaux et du réacteur n° 1 de Penly. L'état de l'ensemble du parc électronucléaire d'EDF au regard de cet endommagement n'est pas encore connu et aucune situation équivalente n'est connue au niveau international pour un acier inoxydable austénitique de cette nuance très courante (304L et 316L) à l'état modérément écroui¹⁷ et en milieu REP nominal. La prévision d'évolution de ce type de défaut est donc très difficile à établir et l'IRSN considère qu'une cinétique de 0,5 mm par an constitue une valeur typique mais ne peut pas être considérée dans l'état actuel des connaissances comme une valeur enveloppe comme déjà explicité dans l'avis en référence [2].

¹⁷ Les opérations de soudage induisent par les effets de dilatation au chauffage et de contraction au refroidissement des déformations permanentes modérées du métal de base en bordure de soudure (écrouissage typiquement de l'ordre de 6% pour la configuration d'intérêt).

Par ailleurs, les zones où sont détectées les fissures de CSC sont soumises à des écoulements complexes du fluide primaire desquels résultent des répartitions de température inhomogènes et fluctuantes dans les tronçons de tuyauterie. Ces phénomènes génèrent des chargements cycliques pouvant conduire à une propagation plus rapide des fissures de corrosion sous contrainte, voire à une potentielle propagation par de la fatigue – corrosion. Les expertises réalisées à ce jour sur les tronçons déposés n'identifient pas de cumul des modes de propagation par CSC et par fatigue. Cependant, même si un seul cas de fissure propagée par fatigue est observé sur un défaut généré par le soudage, ce constat montre que les conditions de chargement cyclique sont, dans certaines conditions, suffisantes pour faire propager des défauts par fatigue. Ainsi, selon l'IRSN, il n'est pas possible, à ce jour, d'exclure le risque de propagation par fatigue des fissures amorcées par de la corrosion sous contrainte. **L'IRSN note qu'EDF n'a pas mené d'analyse sur le risque de propagation par fatigue.**

Pour les soudures A9-BF1 et A18-BF2, les marges sont assez élevées vis-à-vis du risque de ruine plastique du ligament restant de la tuyauterie en présence d'un défaut sous l'effet des chargements primaires. **Ce point n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Vis-à-vis du risque de rupture ductile, EDF s'appuie sur une méthode d'analyse proposée par le RSE-M (dite « option 1 ») qui a pour objectif de se prémunir de manière conjointe du risque d'amorçage et du risque d'instabilité de la déchirure ductile. Toutefois, l'IRSN note qu'EDF a réalisé un certain nombre d'optimisations de méthode par rapport à la pratique habituelle d'application de la démarche codifiée dans le RSE-M :

- utilisation des calculs aux éléments finis 3D en élastoplasticité avec la modélisation de la fissure CSC (dits calculs 3D fissurés) ;
- prise en compte de l'effet bi-matériau entre un matériau doux (partie courante de la tuyauterie) et une bande de matériau « dur » (métal déposé de la soudure ou métal de base écroui aux abords de la soudure).

Ces optimisations ont fait l'objet de l'avis de l'IRSN en référence [3]. La première optimisation n'appelle pas de commentaire de l'IRSN. Pour la seconde, l'IRSN rappelle qu'EDF s'est engagé à vérifier le niveau d'écroutissage ainsi que les caractéristiques de traction des matériaux en jeu. Ces résultats ne sont pas disponibles à ce jour.

Pour le cas de la zone aux abords de la soudure A18-BF2, ces optimisations de méthode permettent de justifier l'absence de risque de rupture ductile pour une hauteur du défaut critique de 4,3 mm, soit une hauteur inférieure à la hauteur retenue¹⁸ de 5,2 mm. Aussi, pour cette zone, une optimisation supplémentaire est prise en compte par EDF et porte sur une modification du cumul des chargements réalisé dans le DRR. Le cumul de chargement le plus pénalisant pour cette soudure consiste à appliquer de façon conjointe :

- l'expansion thermique maximale, incluant l'effet induit par l'état de stratification thermique pénalisant dans le tronçon horizontal des lignes RIS, qui se produit en cas d'arrêt et de démarrage de GMPP¹⁹ ;
- l'effet de choc thermique maximal, qui se produit lors d'une dépressurisation incidentelle du CPP qui entraîne le démarrage de l'injection de sécurité.

EDF considère que ce cumul entre deux transitoires différents n'est pas physique et propose d'associer l'effet de l'expansion thermique et l'effet de choc thermique pour un même transitoire thermohydraulique. Pour l'IRSN, si cette hypothèse est acceptable dans le principe, elle devrait être complétée par la démonstration que les deux transitoires retenus et étudiés par EDF permettent effectivement de couvrir l'ensemble des transitoires retenus dans le dossier des situations pour toutes les catégories de fonctionnement.

¹⁸ Pour un défaut que EDF souhaite maintenir en l'état dans l'attente d'une réparation, la hauteur retenue est la somme de la hauteur maximale estimée par les contrôles non destructifs, des incertitudes de mesure et d'une évaluation de la présomption d'évolution de ce défaut pendant la durée de son maintien en l'état.

¹⁹ Groupe motopompe primaire, équipement assurant la circulation du fluide primaire dans le CPP.

Le cas le plus pénalisant retenu par EDF est le transitoire de dépressurisation du CPP qui conduit à une hauteur de défaut critique de 5,4 mm pour la zone de la soudure A18.

Pour le cas de la soudure A9 qui se situe dans le tronçon horizontal de la ligne RIS, quand le réacteur est à puissance nominale, la température de la soudure est considérée homogène et égale à 50 °C. En considérant cette température froide, le choc thermique associé au transitoire de dépressurisation accidentelle du CPP est d'amplitude faible. Dans ces conditions, le défaut critique obtenu pour la soudure A9 a une hauteur supérieure à 8 mm, qui est supérieure à la hauteur retenue de 6,6 mm pour la zone de la soudure A9-BF1.

Selon l'IRSN, l'hypothèse d'une température initiale de 50 °C retenue pour le calcul du transitoire de dépressurisation accidentelle du CPP n'est pas cohérente avec plusieurs observations et conclusions d'EDF présentées dans le cadre générique de l'affaire CSC des circuits auxiliaires du CPP, à savoir :

- la conclusion d'EDF selon laquelle la stratification thermique²⁰ est le facteur prépondérant à l'origine des défauts de CSC ;
- l'analyse de la colorimétrie²¹ des lignes des circuits RIS montrant que la soudure A9 est située dans une zone pouvant avoir un fonctionnement prolongé à haute température ;
- le constat d'EDF selon lequel le phénomène de CSC n'apparaît pas en deçà de 100 °C.

L'IRSN estime qu'EDF doit retenir pour les études de rupture brutale une température maximale de fonctionnement plus élevée pour la zone de la soudure A9, en cohérence avec l'observation d'indications de défaut dans cette zone. Une température de fonctionnement plus élevée induit un choc thermique d'amplitude plus élevée lors de la dépressurisation accidentelle du CPP, et par conséquent, conduit à un défaut critique de hauteur plus faible dans la zone de cette soudure.

En réponse à cette remarque, EDF a réalisé de nouveaux calculs en postulant un état de stratification thermique variant de 180 °C en génératrice inférieure à 300 °C en génératrice supérieure du tronçon horizontal des lignes RIS qui comportent la soudure A9. La prise en compte de cet état initial de stratification thermique, identique à celui retenu pour les réacteurs de type N4, est plus cohérent avec les observations ci-dessus. Toutefois, à ce jour, aucun élément ne permet de vérifier cette hypothèse qui fera l'objet d'un programme d'instrumentation sur les lignes RIS des réacteurs du palier 1300 MWe P'4. En l'absence de calcul de flexibilité des lignes RIS cohérent avec cet état initial, EDF retient l'état d'expansion thermique maximal issu du DRR pour l'analyse de la soudure A9. Les calculs 3D fissurés réalisés avec un défaut axisymétrique postulé aux abords de cette soudure conduisent à un défaut critique de 6,3 mm de hauteur. Sachant que la hauteur de défaut retenu dans cette soudure est de 6,6 mm, l'IRSN estime que l'absence de risque de rupture ductile initiée par le défaut détecté aux abords de la soudure A9 n'est pas démontrée.

De plus, l'IRSN souligne que l'état initial de stratification thermique postulé dans le tronçon horizontal génère des efforts sur l'ensemble de la ligne et note que cet effet n'est pas pris en compte dans le calcul du défaut critique pour la soudure A18. L'IRSN estime que la prise en compte de cet état initial stratifié conduira à une hauteur de défaut critique comprise entre la valeur de 5,4 mm (dernier calcul réalisé pour le transitoire de dépressurisation primaire sans un état initial stratifié) et la valeur de 4,3 mm (calcul initial enveloppe selon les cumuls du DRR). Sachant que la hauteur de défaut à justifier dans cette zone est de 5,2 mm, l'IRSN estime que

²⁰ En fonctionnement normal, un phénomène de stratification thermique, dû à l'apparition d'une boucle de convection naturelle, peut apparaître dans le tronçon horizontal non isolable des lignes RIS. Ce phénomène conduit à avoir de l'eau chaude en partie supérieure de ce tronçon et de l'eau froide en partie inférieure. Cette différence de température conduit à une dilatation différentielle entre la partie supérieure et la partie inférieure de la tuyauterie, ce qui crée des efforts mécaniques élevés sur la ligne RIS (moments de flexion).

²¹ Lors d'un fonctionnement prolongé à température élevée, une couche d'oxyde de couleur « bronze » se forme à la surface de l'acier inoxydable des tuyauteries des lignes RIS.

l'absence de risque de rupture ductile initiée par le défaut de CSC détecté dans la soudure A18 n'est pas démontrée.

En fin d'expertise, EDF a présenté un calcul complémentaire pour la soudure A9 en considérant une géométrie de défaut de hauteur variable dans la circonférence de la tuyauterie :

- dans les zones où la hauteur de défaut est caractérisable, EDF retient la hauteur issue des END, majorée d'une projection de propagation de 0,5 mm, soit deux zones de hauteur 6,6 mm et 5,5 mm ;
- dans le reste de la circonférence (incluant deux indications de hauteur non mesurable et une zone non couverte sur 27%), une hauteur de défaut de 2,5 mm (limite de détection de 2 mm et 0,5 mm de projection de propagation) est considérée.

En considérant le transitoire de dépressurisation incidentelle du CPP partant d'un état de stratification thermique dans le tronçon horizontal de la ligne RIS, EDF obtient un facteur de marge²² minimal de 1,4. EDF s'appuie sur ce dernier calcul pour conclure à l'absence de risque de rupture ductile du défaut retenu aux abords de la soudure A9-BF1 du réacteur n° 1 de Cattenom.

L'IRSN note que la modélisation du défaut aux abords de la soudure A9 en considérant une hauteur variable dans la circonférence de la tuyauterie n'est pas conforme à la démarche de définition de la géométrie de défaut à analyser selon le code RSE-M (annexes 5.1 et 5.2). En effet, le code précise que pour les indications débouchantes, le défaut à analyser est de forme semi-elliptique de hauteur égale à la hauteur maximale du défaut et de largeur issue des examens non destructifs, incertitudes comprises. Dans ce cas de figure, l'application de la démarche proposée par le RSE-M amènerait à considérer un défaut semi-elliptique très étendu sur la circonférence, voire axisymétrique, de hauteur 6,6 mm, afin d'englober les zones comportant des indications ultrasonores de hauteur mesurable et non mesurable, ainsi que les zones non couvertes par les contrôles.

De plus l'IRSN considère qu'en raison de la géométrie complexe des fissures de CSC et de la structure métallurgique complexe de la soudure réparée A9, les résultats issus des examens non destructifs ultrasonores tels que réalisés sur cette soudure ne peuvent donner qu'une estimation partielle de la hauteur et de la longueur des défauts²³ sur toute la circonférence de la tuyauterie. L'IRSN rappelle également la présence d'une zone non couverte par les contrôles de 27% de la circonférence pour l'abord aval de cette soudure. **L'IRSN considère donc que le caractère enveloppe de la géométrie du défaut de hauteur variable dans la circonférence de la tuyauterie n'est pas acquis.**

En ce qui concerne l'analyse mécanique effectuée pour le défaut de hauteur variable, l'IRSN note que les chargements appliqués ne sont pas les plus pénalisants vis-à-vis de ce défaut. En effet, l'objectif des calculs de flexibilité est de déterminer les moments maximaux induits dans la ligne, mais ces calculs ne permettent pas d'obtenir les contraintes maximales pour une position précise dans la circonférence de la tuyauterie.

L'IRSN estime donc que les calculs réalisés par EDF en considérant un défaut de hauteur variable dans la circonférence ne sont pas recevables. Aussi, même si certaines hypothèses devront être validées ultérieurement par EDF (courbes de traction des matériaux, état de stratification thermique, cinétique de propagation...), l'IRSN considère que seules les analyses réalisées pour les défauts axisymétriques postulés dans les zones des soudures A9 et A18, en considérant un état initial de stratification thermique dans le tronçon horizontal, permettent d'obtenir un ordre de grandeur de la hauteur du défaut critique pour les zones de ces soudures. Ainsi, pour la soudure A9-BF1, la hauteur de défaut critique est de 6,3 mm par rapport à la hauteur de défaut retenue de

²² Pour le risque de rupture ductile, le facteur de marge est égal à la racine carrée du rapport $J_{0,2}/J$.

²³ Les examens ultrasonores donnent une image des défauts basée sur leur réflectivité, qui peut être influencée par de nombreux facteurs, notamment pour des fissures de CSC ayant une géométrie complexe (orientation de la fissuration intergranulaire, ramification des fissures...) dans un environnement géométrique et métallurgique complexe au niveau de la racine de la soudure qui perturbe la propagation des ondes ultrasonores.

6,6 mm. Pour la soudure A18-BF2, la hauteur de défaut critique est comprise entre 4,3 mm et 5,4 mm à comparer avec la hauteur de défaut retenue de 5,2 mm. Pour l'IRSN, ces résultats ne permettent pas d'exclure le risque de rupture ductile initiée par les défauts postulés, sur la base des résultats des END, aux abords des soudures A9-BF1 et A18-BF2.

Par conséquent, malgré plusieurs optimisations de méthode par rapport à la pratique habituelle de réalisation des études codifiées²⁴ mises en œuvre par EDF dans ses études de nocivité dont certaines nécessitent des compléments de justification, l'IRSN estime que la démonstration d'absence de risque de rupture ductile causée par les défauts de corrosion sous contrainte détectés aux abords des soudures A9-BF1 et A18-BF2 du réacteur n°1 de Cattenom n'est pas acquise.

3. CONCLUSION

L'IRSN a examiné les dossiers de traitement d'écart relatifs aux indications détectées aux abords de la soudure A9 de la ligne RIS de la branche froide de la boucle 1 du CPP et de la soudure A18 de la ligne RIS de la branche froide de la boucle 2 du CPP du réacteur n° 1 de Cattenom. Ces écarts font suite à la détection d'indications pouvant correspondre à des fissures de corrosion sous contrainte lors du contrôle ultrasonore multiéléments développé pour détecter les fissures de CSC aux abords des soudures des tuyauteries auxiliaires du CPP.

L'IRSN observe que le nouveau procédé de contrôle par ultrasons multiéléments développé par EDF apporte beaucoup d'informations utiles et pertinentes par rapport au procédé historique de contrôle par ultrasons mono-élément sans enregistrement réalisé lors des visites décennales qui est qualifié pour la détection de fissures de fatigue thermique. L'enregistrement des données et le codage du déplacement du traducteur ultrasonore permettent de bénéficier d'outils d'imagerie ultrasonore qui facilitent la détection et la caractérisation des défauts. Cependant, la configuration de contrôle demeure extrêmement complexe avec en conséquence la détection de nombreux artefacts²⁵ qui compliquent l'analyse. L'IRSN observe que pour des tuyauteries possiblement affectées de fissuration par CSC, **EDF ne réalise pas un contrôle de l'ensemble des zones potentiellement sensibles des lignes RIS concernées et que pour les abords de soudures qui font l'objet des indications de fissuration les plus profondes, le procédé développé par EDF n'a pas la capacité de contrôler la totalité de la zone sensible à la CSC.**

Concernant la justification du maintien en service des défauts des soudures A9 et A18, l'IRSN ne partage pas l'analyse d'EDF de la présomption d'évolution du défaut, compte tenu notamment du niveau de compréhension et de connaissances du phénomène de corrosion qui est sans équivalent au niveau international et pour lequel EDF ne dispose pas d'un retour d'expérience suffisant en raison de la découverte inopinée de cet endommagement. Par ailleurs, les zones où sont détectées les fissures de CSC sont soumises aux phénomènes d'écoulements du fluide primaire et de stratification thermique de nature complexe. Ces phénomènes génèrent des chargements cycliques de nature à accélérer la propagation des fissures de corrosion sous contrainte. **Selon l'IRSN, il n'est pas possible, à ce jour, d'exclure le risque de changement de mode de propagation en fatigue – corrosion des fissures amorcées par de la corrosion sous contrainte.**

Les analyses du risque de rupture brutale des soudures affectées par de la CSC s'appuient sur la démarche codifiée avec toutefois plusieurs optimisations relatives à la modélisation thermomécanique, aux comportements des matériaux et aux situations de chargement considérées. Ces optimisations sont acceptables dans le principe, mais certaines nécessitent des compléments de justification de la part de l'exploitant. Malgré

²⁴ Les calculs « codifiés » s'appuient sur des codes de construction (RCC-M) ou d'exploitation (RSE-M) qui proposent une approche prudente et déterministe, dans l'objectif de répondre aux exigences des réglementations relatives aux équipements sous pression nucléaires et à la surveillance de l'exploitation du CPP et des CSP des REP.

²⁵ Échos parasites dont l'origine n'est pas clairement établie (échos de géométrie, bruit de structure, petits défauts de fabrication, changement de modes...).

ces optimisations de méthode qui sont de nature à restituer des marges par rapport aux calculs conformes à la pratique habituelle des études codifiées, les hauteurs de défaut critique obtenues pour les zones des soudures A18 du circuit RIS en BF2 et A9 du circuit RIS en BF1 sont très proches, voire inférieures, aux hauteurs de défaut retenues par EDF dans le dossier de traitement d'écart de ces soudures. Ainsi, pour l'IRSN, la démonstration d'absence de risque de rupture ductile causée par les défauts de corrosion sous contrainte détectés dans les soudures des lignes RIS BF 1 & 2 du réacteur n° 1 de Cattenom n'est pas suffisamment robuste pour couvrir l'ensemble des réserves formulées dans le présent avis, en particulier vis-à-vis des examens non destructifs et de la cinétique de propagation des défauts.

De ce fait, compte tenu des sources d'incertitude importantes identifiées lors de la présente expertise, l'IRSN considère que les dossiers de traitement d'écart présentés par EDF n'apportent pas de garanties suffisantes dans l'état actuel des connaissances. Aussi, dans l'objectif d'une exploitation avec un niveau de sûreté acceptable, l'IRSN estime qu'il convient qu'EDF poursuive l'évaluation de l'état de santé des lignes RIS en branche froide du réacteur n° 1 de la centrale nucléaire de Cattenom.

IRSN

Le Directeur général
Jean Christophe NIEL

