

Fontenay-aux Roses, le 23 mai 2024

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2024-00073

Objet : EDF – REP – Corrosion sous contrainte des lignes auxiliaires du circuit primaire principal – Expertise du programme de suivi renforcé des mesures en oxygène dissous

Réf. : [1] Avis IRSN N° 2022-00189 du 14 septembre 2022.
[2] Saisine ASN – CODEP-DEP-2023-048268 du 31 août 2023.

Au quatrième trimestre 2021, dans le cadre la deuxième visite décennale du réacteur n° 1 de la centrale de Civaux (1450 MWe) et de la troisième visite décennale du réacteur n° 1 de la centrale de Penly (1300 MWe), EDF a détecté des fissures de corrosion sous contrainte (CSC) à proximité de soudures des tuyauteries des circuits d'injection de sécurité (RIS)¹ et des circuits de refroidissement du réacteur à l'arrêt (RRA). Ce type d'endommagement n'était pas anticipé pour ces circuits. La doctrine de maintenance d'EDF identifie un risque de fissuration par fatigue thermique pour les lignes auxiliaires connectées au circuit primaire principal. Le matériau de ces tuyauteries auxiliaires (acier inoxydable de nuance 316L) présente une très bonne résistance à la CSC en milieu primaire nominal des Réacteurs à eau sous pression (REP). Les rares cas de fissuration par CSC de ce matériau en milieu REP sont généralement associés à des épisodes de pollution (par des ions sulfates ou chlorure par exemple) ou à des conditions de fabrication particulières ayant conduit à une déformation anormalement élevée de l'acier (écrouissage). En revanche, les conditions initiales d'exploitation des Réacteurs à eau bouillante (REB) ont conduit à l'observation de nombreuses fissures de CSC dont l'origine est associée à la production d'espèces chimiques oxydantes dans le cœur par l'effet de la radiolyse² de l'eau. Les conditions d'exploitation des REB ont depuis été modifiées afin de limiter ce mécanisme de fissuration³.

Les conditions d'exploitation des REP requièrent l'injection d'une petite quantité d'hydrogène dissous dans l'eau du circuit primaire principal. Sous l'effet de la radiolyse, cet hydrogène va permettre de recombinaison les espèces oxydantes également formées dans le cœur par la radiolyse de l'eau (oxygène et peroxyde d'hydrogène notamment).

¹ 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.

² La radiolyse est la décomposition de la matière sous l'effet des rayonnements ionisants.

³ Notamment par l'ajout de faible quantité de d'hydrogène

Dans le cadre d'une expertise précédente [1], l'IRSN a néanmoins identifié que les injections d'eau d'appoint en branche froide du circuit primaire principal (avant le passage de l'eau dans le cœur) ne bénéficient pas immédiatement pas de l'effet bénéfique de la radiolyse de l'eau dans le cœur qui permet de recombinaison l'oxygène et l'hydrogène dissous. Pour les réacteurs dont les bâches REA bore⁴ contiennent de l'oxygène, ces injections d'eau d'appoint pourraient constituer un élément aggravant pour le risque de CSC.

Par la saisine en première référence [2], l'Autorité de sûreté nucléaire a sollicité l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur l'analyse du programme de contrôle mis en œuvre par EDF pour ce qui concerne la composition chimique du fluide primaire.

1. PROGRAMME RENFORCÉ MIS EN ŒUVRE PAR EDF

Dans le cadre de la recherche des causes profondes du phénomène de CSC des lignes auxiliaires, EDF a engagé un programme de suivi renforcé de la teneur en oxygène dissous dans le fluide primaire de ses réacteurs. Le programme est mis en œuvre par EDF sur plusieurs réacteurs. Dans son programme initial, EDF a retenu les réacteurs n° 3 et 4 du Tricastin, les réacteurs n° 1 et 2 de Chinon B, le réacteur n° 2 de Flamanville, les réacteurs n° 3 et 4 de Cattenom, les réacteurs n° 1 et 2 de Penly et les réacteurs n° 1 et 2 de Civaux, en considérant les critères suivants :

- des réacteurs de différente puissance nominale (900 MWe, 1300 MWe et 1450 MWe) ;
- des réacteurs « témoins », non affectés par le phénomène de corrosion sous contrainte et des réacteurs affectés par ce phénomène ;
- des réacteurs avec des bâches REA bore sous ciel d'azote (eau désaérée) et des réacteurs avec des bâches sous toit flottant (eau non désaérée) ;
- des réacteurs dont la puissance est modulable et des réacteurs fonctionnant à puissance stable (selon le prévisionnel d'exploitation en vigueur au moment du choix des réacteurs).

Ce programme a les caractéristiques suivantes :

- les mesures sont réalisées quand le réacteur est en puissance (état RP) ;
- les mesures sont renforcées dans la mesure où elles passent d'une mesure mensuelle à une mesure quotidienne, voire en continu ;
- les mesures sont effectuées à des endroits où il n'y a pas besoin de faire de modifications matérielles, EDF considérant que créer de nouveaux points de prélèvement induirait un risque de fuite et ne serait pas proportionné aux enjeux de sûreté ;
- la durée du programme est d'un cycle de fonctionnement⁵ et pourrait être étendu, sans que les critères d'extension soient définis.

Ainsi, les mesures renforcées se situent principalement en branche chaude. La réalisation de ce programme a débuté entre mi 2023 et début 2024 suivant les réacteurs.

En fin d'expertise, EDF a proposé plusieurs compléments à son programme :

- une analyse statistique de type « big data » afin de rechercher les causes profondes de la CSC en analysant les données de fabrication et d'exploitation pour chaque réacteur ;
- une extension de la durée du programme jusqu'à la fin de l'année 2024 ;

⁴ Les bâches REA bore sont des bâches d'appoint en eau borée au fluide primaire. Elles sont utilisées dans de nombreuses phases de pilotage de la chimie du circuit primaire et leurs eaux sont injectées en branche froide via la charge RCV ou les joints des pompes primaires.

⁵ Soit typiquement entre 12 et 18 mois en équivalent pleine puissance selon les réacteurs.

- une extension du programme à des états du réacteur hors fonctionnement en puissance afin d'avoir des données sur des états des réacteurs durant lesquels la présence d'oxygène dissous pourrait varier par rapport à l'état RP.

L'ensemble de ces dispositions a été complété par une enquête auprès de divers exploitants internationaux afin de connaître leurs pratiques, tant concernant l'aération des bâches REA bore que leur pratique pour la mesure des paramètres chimiques.

2. EXPERTISE DE L'IRSN

2.1. CHOIX DES POINTS DE MESURE

Le programme de suivi renforcé mis en œuvre par EDF permet de fiabiliser les mesures en branche chaude et de renforcer la connaissance de la quantité d'oxygène dissous dans les bâches REA bore, ce qui constitue une amélioration notable par rapport à l'existant et aux pratiques internationales. Ce programme confirme, pour l'état RP du réacteur, l'absence complète d'oxygène dissous en sortie du cœur du réacteur (en branche chaude), ce qui est conforme à l'attendu. Il ne permet toutefois pas d'accéder à des mesures en branche froide en aval des points d'injections des eaux contenant de l'oxygène dans les zones de plus forte sensibilité à la CSC.

Depuis la mise en évidence de la CSC sur les lignes auxiliaires du circuit primaire, EDF a procédé à des centaines d'exams non destructifs par ultrasons. L'IRSN a analysé ces données, complétées par des résultats de ressurgences et des expertises en laboratoire. Cette analyse permet de comparer l'ampleur relative de l'endommagement par CSC des lignes auxiliaires selon les réacteurs et l'implantation de ces lignes en amont ou en aval du cœur. Le résultat de cette analyse renforce la présomption d'un lien de causalité entre l'ampleur de la CSC observée en branche froide et l'exploitation de bâches REA bore non désaérées.

À cet égard, pour l'IRSN, le programme de mesures renforcées de l'oxygène dissous dans le circuit primaire principal mis en œuvre actuellement par EDF, y compris avec ses compléments, n'est pas satisfaisant puisqu'il ne permet aucune mesure dans les zones où de l'oxygène est présent lors des injections d'eaux d'appoint. Considérant que la CSC constitue un endommagement de la deuxième barrière de confinement inattendu, parfois foisonnant et dont les causes ne sont pas encore clairement établies, l'IRSN estime que la mesure de l'oxygène dissous en aval des points d'injection des eaux d'appoint en branche froide est une action proportionnée aux enjeux de sûreté. De surcroît, certains piquages d'échantillonnages sont déjà présents en aval des injections de ces eaux contenant de l'oxygène sur certains réacteurs du palier 1300 MWe, et pourraient donc être équipés pour effectuer ces mesures. **Ces éléments conduisent l'IRSN à formuler la recommandation n° 1 en Annexe.**

2.2. PÉRIMÈTRE DU PROGRAMME

EDF a retenu 11 réacteurs pour son programme de suivi renforcé de l'oxygène, soit environ 20 % du parc en exploitation. Les critères de sélection retenus par EDF apparaissent pertinents. Néanmoins les incertitudes fortes qui pèsent sur la maîtrise de la chimie dans les zones concernées, ainsi que l'absence de données historiques, font que cet échantillonnage paraît trop faible.

En effet, l'enquête réalisée auprès des exploitants internationaux a montré que les teneurs en oxygène dans les bâches REA bore pouvaient varier d'un facteur 40. La conception des bâches non désaérées et les conditions variables de leur exploitation ne permettent pas d'exclure une telle variabilité pour le parc français. Aussi, pour renforcer la confiance dans les résultats obtenus, l'IRSN estime nécessaire de retenir pour le programme renforcé de suivi de l'oxygène un plus grand nombre de réacteurs avec des bâches non désaérées.

De plus, la quantité réelle d'oxygène injectée dans le fluide primaire ne dépend pas que de celle dans les bâches, mais également de la conduite des réacteurs. Certains des réacteurs du parc d'EDF font l'objet de modulation de

leur puissance, ce qui peut conduire à l'injection de grandes quantités d'eau à partir des bâches REA bore⁶. De même, la maîtrise de la réactivité dans certains états du réacteur, autres que RP nécessite une injection d'eau borée. Pour l'IRSN, cette variabilité dans les conditions d'exploitation des réacteurs appelle à augmenter le nombre de réacteurs retenus pour le programme de suivi renforcé.

Enfin, EDF n'envisage de déployer ce programme que sur un cycle, ou plus « *selon les résultats* ». Pour l'IRSN, une durée aussi courte ne permettra pas d'établir de corrélation robuste entre les mesures et les différents modes de conduite. La proposition d'EDF d'extension du programme jusqu'à la fin de l'année 2024 ne fera que rajouter 6 mois de mesure sur certains réacteurs, ce qui pour l'IRSN est insuffisant pour assurer une représentativité statistique satisfaisante des mesures réalisées.

En revanche, pour l'IRSN, la proposition d'étendre les mesures pour des domaines d'exploitation des réacteurs autres que le fonctionnement en puissance contribue à une meilleure compréhension de l'influence des diverses phases d'exploitation des réacteurs sur les évolutions de la chimie dans le CPP. Il convient de considérer notamment les domaines d'exploitation pour lesquels la puissance du réacteur est nulle car durant ceux-ci, en l'absence de radiolyse, l'oxygène n'est pas consommé dans le cœur.

Les arguments exposés supra conduisent donc l'IRSN à formuler la recommandation n° 2 en Annexe.

3. CONCLUSION

Dans le cadre de la recherche des causes profondes du phénomène de CSC affectant les lignes RIS et RRA du Parc, EDF a proposé un programme étendu de la mesure en oxygène dissous dans certains réacteurs. Ce programme est déployé au fur et à mesure des arrêts des réacteurs retenus. Il permet de fiabiliser les mesures en branche chaude et d'avoir une meilleure connaissance des termes sources dans les bâches REA bore, ce qui constitue une amélioration notable par rapport à l'existant et aux pratiques conventionnelles à l'international.

Toutefois, ce programme ne permet pas d'accéder à des mesures dans les zones les plus concernées par la CSC, car EDF n'envisage pas de modifications matérielles qui permettraient de prélever le fluide primaire à l'emplacement où la teneur en oxygène pourrait être la plus élevée. Ceci fait l'objet de la recommandation n° 1. De plus, le nombre de réacteurs et la durée prévue pour la mise en œuvre de ce programme, tant temporelle que concernant les domaines d'exploitation du réacteur retenus, ne permettent pas d'assurer une représentativité suffisante des mesures. **Ceci fait par conséquent l'objet de la recommandation n° 2.**

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Hervé BODINEAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté



Hervé
BODINEAU
2024.05.23
07:44:01 + 02'00'

⁶ En tant qu'élément neutrophage, le bore contribue à ajuster la puissance des réacteurs.

ANNEXE À L'AVIS IRSN N° 2023-00073 DU 23 MAI 2024

Recommandations de l'IRSN

Recommandation n° 1

L'IRSN recommande qu'EDF mette en place des moyens de mesure de la teneur en oxygène dissous dans les zones d'intérêt, soit au niveau de la ligne de charge RCV, soit au niveau de la branche froide en aval des injections d'eaux d'appoint.

Recommandation n° 2

L'IRSN recommande qu'EDF :

- étende le périmètre des réacteurs faisant l'objet d'un suivi renforcé de la teneur en oxygène du circuit primaire principal en incluant plus de réacteurs du palier 1300 MWe, ainsi que des réacteurs du palier 900 MWe dont la bache REA bore a été aérée après leur mise en service. De même, l'IRSN considère qu'EDF doit d'ores et déjà étendre la durée de son programme de suivi de la teneur en oxygène du CPP sur plusieurs cycles afin d'assurer une représentativité satisfaisante des mesures ;
- étende son programme de suivi renforcée de la teneur en oxygène du circuit primaire principal dans les domaines d'exploitation AN/GV, API et AN/RRA du réacteur, en cas de maintien prolongé dans ces domaines (au-delà des durées cibles prévues par les procédures normales d'exploitation de mise à l'arrêt ou de redémarrage du réacteur), afin d'évaluer la teneur en oxygène notamment en branche chaude pour des états où les phénomènes de radiolyse dans le cœur sont moins actifs que dans l'état pleine puissance.