

Fontenay-aux-Roses, le 7 mai 2019

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

Avis IRSN/2019-00098

Objet : Colmatage et encrassement des générateurs de vapeur des réacteurs du parc électronucléaire français. Exploitation des données relevées lors des contrôles par courants de Foucault en sonde axiale SAX en vue de l'établissement des profils de colmatage.

Réf. Saisine ASN - CODEP-DEP-2018-043277 du 5 septembre 2018.

Conformément à la demande de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en référence, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a analysé la méthode développée par Électricité de France (EDF) pour évaluer les profils de colmatage des plaques entretoises des générateurs de vapeur (GV) du parc électronucléaire.

Les GV du parc électronucléaire français sont des échangeurs thermiques comportant plusieurs milliers de tubes maintenus par des plaques entretoises. L'eau du circuit primaire échauffée dans le cœur du réacteur circule à l'intérieur des tubes. À l'extérieur des tubes, l'ébullition de l'eau du circuit secondaire permet de produire la vapeur alimentant la turbine. Les plaques entretoises sont ajourées afin de ménager des passages au mélange d'eau liquide et vapeur. Elles sont au nombre de huit à neuf selon le type de GV, réparties environ tous les mètres sur la hauteur du faisceau tubulaire. Les conditions d'exploitation du circuit d'eau et de vapeur alimentant en circuit fermé la turbine et les GV conduisent à un transport d'éléments non volatils dans ce circuit. Ces éléments non volatils proviennent principalement de la corrosion des aciers faiblement alliés du circuit. Ils sont en majorité constitués d'un oxyde de fer, la magnétite. Cet oxyde peut se déposer de façon très compacte dans les passages d'eau des plaques entretoises et réduire fortement, voire boucher totalement, les passages d'eau. Ce phénomène est appelé « colmatage » des plaques entretoises. Le « taux de colmatage » des passages d'eau est défini comme étant le rapport entre la section obstruée par la présence des dépôts et la section initiale.

Un colmatage excessif des plaques entretoises dégrade la sûreté d'exploitation des GV. Les enjeux de sûreté associés à un colmatage excessif sont :

- le risque de perte de stabilité de fonctionnement thermohydraulique des GV ;
- le risque d'endommagement des tubes et des équipements internes des GV ;
- la réduction de la réserve d'eau disponible dans les GV pour le refroidissement du cœur en situation accidentelle.

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 8 440 546 018

À cet égard, l'IRSN considère qu'EDF doit concentrer ses efforts de manière prioritaire sur les conditions d'exploitation permettant de maintenir au meilleur niveau la propreté du compartiment secondaire des GV, notamment par le choix d'une chimie secondaire à haut pH.

Compte tenu de l'état des GV, EDF applique, depuis plusieurs années, une stratégie d'exploitation visant à évaluer régulièrement le taux de colmatage des plaques entretoises. Le profil vertical de colmatage est défini comme étant la variation, selon l'axe vertical, des taux moyens de colmatage au niveau de chacune des plaques entretoises. EDF évalue la sûreté de fonctionnement des GV en considérant le profil vertical du colmatage moyen des plaques entretoises. Des examens télévisuels (ETV) sont régulièrement mis en œuvre pour évaluer le taux de colmatage. Ces ETV sont cependant difficiles à réaliser en raison du faible nombre de points d'accès disponibles pour l'examen du faisceau tubulaire. Ils sont réalisés pour la plaque supérieure qui est la plus accessible. Dans quelques rares cas, des points d'accès complémentaires permettent à EDF d'évaluer également le taux de colmatage pour une plaque entretoise intermédiaire. De manière générale, les ETV ne suffisent pas pour évaluer le profil vertical de colmatage. En conséquence, EDF a développé une méthode complémentaire permettant d'évaluer ce profil.

Dans le cadre du programme de maintenance des GV, EDF met en œuvre, tous les deux arrêts de réacteur pour rechargement, un contrôle des tubes par courants de Foucault (CF) nommé « procédé sonde axiale » SAX⁽¹⁾. EDF exploite les données issues de ce procédé de contrôle par une méthode, appelée IComplexe, de traitement et d'analyse des signaux. L'approche consiste à déconvoluer les signaux par la réponse impulsionnelle de la sonde au voisinage du bord de plaque supérieur, afin d'identifier des variations du signal complexe résultant des CF liées à la présence de magnétite. Des indicateurs de colmatage, calculés à partir du signal déconvolué, sont ensuite définis. Enfin, une méthode statistique est utilisée pour relier ces indicateurs au taux moyen de colmatage par demi-plaque.

Conformément à la saisine de l'ASN en référence, l'IRSN a examiné la méthode IComplexe développée par EDF afin de donner un avis sur les points suivants :

- le traitement du signal complexe déconvolué et la définition des indicateurs ;
- la méthode d'estimation du taux de colmatage à partir des signaux SAX ;
- la vérification de la pertinence de la méthode par une analyse statistique des résultats des examens télévisuels, comparés aux résultats obtenus à partir des signaux SAX ;
- la précision de la méthode d'estimation du profil vertical de colmatage.

Chacun de ces points est traité dans les paragraphes suivants.

Traitement du signal complexe déconvolué et définition des indicateurs

La méthode IComplexe développée par EDF exploite le signal d'une voie différentielle de la sonde SAX, au voisinage des plaques entretoises. Ces signaux CF peuvent être représentés dans le plan complexe et, du fait du caractère différentiel de la sonde SAX, des lobes dans les courbes de Lissajous du signal apparaissent au droit de chaque modification de la géométrie ou des propriétés physiques au voisinage du tube (telle que la présence des bords des plaques entretoises et des colmatages). La première étape de la méthode IComplexe consiste, pour chacune des intersections tube/plaque, à déconvoluer le signal CF obtenu au niveau du bord inférieur de la plaque entretoise (potentiellement colmaté) par le signal CF obtenu au niveau de son bord supérieur (supposé exempt de colmatage). L'algorithme de déconvolution est élaboré d'après la technique de filtrage inverse de Wiener, reconnue pour être

⁽¹⁾ Le « procédé SAX » inclut la sonde axiale SAX à courants de Foucault pour le contrôle du tube de GV à différentes fréquences et dans différents modes (absolu et différentiel), l'instrumentation assurant la démodulation des signaux résultant des courants de Foucault aux différentes fréquences et la procédure de contrôle.

robuste vis-à-vis du bruit de mesure. En l'absence de colmatage, le signal complexe résultant après déconvolution est exclusivement orienté selon l'axe des réels et présente une partie imaginaire quasi nulle. Dans le cas de la présence d'un colmatage sur le bord inférieur de la plaque entretoise, l'analyse de la seule partie imaginaire du signal permet d'obtenir des informations sur la contribution de la magnétite au colmatage. EDF extrait une série d'indicateurs des amplitudes, énergies et écart-types des signatures de la partie imaginaire des signaux.

L'IRSN considère que le traitement du signal complexe déconvolué, en lui-même, paraît fiable dans la mesure où il repose sur des algorithmes classiques et éprouvés. Néanmoins, l'IRSN considère que le choix des indicateurs utilisés par EDF n'est pas satisfaisant :

- d'une part, ces indicateurs exploitent exclusivement les voies différentielles du procédé SAX. Ce choix conduit à devoir respecter l'hypothèse forte d'absence de colmatage au niveau du bord supérieur de la plaque et aucun paramètre de l'algorithme ne permettrait à l'exploitant de détecter une non-vérification de cette hypothèse ;
- d'autre part, le comportement des signaux issus des sondes CF est non linéaire en fonction des paramètres géométriques des dépôts de magnétite et de leurs propriétés électromagnétiques, par ailleurs mal connues. Ainsi, à partir de simulations utilisant un modèle numérique très simplifié, l'IRSN a montré que deux géométries différentes de colmatage (présentant des taux de colmatage distincts) peuvent conduire à des signaux du procédé SAX quasi identiques à une fréquence donnée et, par suite, à des indicateurs quasi identiques. Dans de tels cas, l'estimation du taux de colmatage est forcément erronée pour certaines géométries de colmatage. L'IRSN considère que le choix d'indicateurs fondés sur une seule fréquence n'est pas suffisant pour évaluer de manière représentative le taux de colmatage pour chacune des intersections tube/plaque.

À l'issue de cette analyse, l'IRSN exprime de fortes réserves sur la fiabilité de la détermination des taux de colmatage des GV à partir du traitement des signaux de la sonde SAX développé par EDF.

Méthode d'estimation du taux de colmatage à partir des signaux SAX

Dans une seconde étape de la méthode IComplexe, en vue d'estimer un taux moyen de colmatage par demi-plaque entretoise, EDF a mené une analyse statistique de la base de données disponible, constituée des données acquises sur 16000 tubes issus de 64 GV de types 51B/BI et 68/19 et pour lesquels les résultats d'examen télévisuels sont disponibles (essentiellement au niveau de la plaque supérieure). Par un algorithme d'apprentissage appliqué à la base de données, EDF déduit une fonction qui estime le taux moyen de colmatage par demi-plaque d'un GV à partir des indicateurs. Plusieurs variantes de l'algorithme ont été évaluées par EDF.

Compte tenu de l'importante base de données disponible, le principe de la méthode statistique par apprentissage développée par EDF n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.

Vérification de la pertinence de la méthode par une analyse statistique des résultats des examens télévisuels comparés aux résultats obtenus à partir des signaux SAX

Selon EDF, le principe de la méthode IComplexe est empirique, mais des résultats satisfaisants ont été obtenus en termes d'estimation du taux de colmatage, en valeur moyenne par demi-plaque supérieure, comparés aux mesures réalisées par examens télévisuels (écarts compris entre 3 et 6 %). EDF précise que la méthode augmentera en fiabilité en enrichissant la base de données au fil des années. Il définit également une « estimation relative » du taux de colmatage qui vise à estimer le résultat de l'évaluation du colmatage d'une demi-plaque d'une année donnée, grâce à l'estimation sur cette même demi-plaque réalisée à une année antérieure. Les performances de l'estimation relative sont meilleures de quelques pourcents que l'estimation absolue.

Malgré un niveau d'erreur moyen par demi-plaque acceptable, EDF fait état d'écarts d'évaluation du taux moyen de colmatage pouvant atteindre 20 %, ces écarts pouvant aller dans le sens d'une sous-évaluation des taux de colmatage. EDF attribue ces écarts au manque de représentativité de la base de données disponible, notamment pour les taux de colmatage élevés. L'IRSN note à cet égard qu'aucune information n'est donnée quant au nombre idéal de cas nécessaires dans la base ni au délai requis pour constituer une base de données suffisamment représentative. Par ailleurs, le cas extrême d'un bouchage complet de l'ensemble d'un passage d'eau sous toute la plaque entretoise ne serait pas détecté par la méthode. Et, comme indiqué précédemment, l'IRSN a mis en évidence que des indicateurs quasiment identiques issus des mesures peuvent correspondre à des configurations de colmatage différentes. Ces éléments tendent à montrer que l'estimation du taux de colmatage par la méthode IComplexe n'est pas suffisamment robuste, quantitative et conservatrice.

L'IRSN considère que la seule exploitation des signaux différentiels de la sonde SAX ne permet pas de déterminer de façon fiable le profil vertical de colmatage des GV avec la méthode IComplexe actuelle. Pour atteindre cet objectif, EDF pourrait ajouter des données d'entrée à l'algorithme (telles que des signaux SAX obtenus en mode absolu et à d'autres fréquences). Pour autant, le succès de cette étude complémentaire n'est pas acquis et nécessiterait, a minima, une validation de l'estimation du taux de colmatage au niveau élémentaire des intersections tube/plaque.

Au-delà, comme mentionné dans l'observation en annexe 1, l'IRSN considère qu'une amélioration de la méthode d'évaluation du taux de colmatage pourrait être étudiée par EDF en évaluant des sondes électromagnétiques (à courants de Foucault ou de type flux de fuite) autres que la sonde SAX.

Précision de la méthode d'estimation du profil vertical de colmatage

La précision de la méthode IComplexe, en vue de l'estimation des taux de colmatage, n'est pas définie a priori par EDF. EDF souhaite avant tout établir le type de profil vertical de colmatage qui permet d'établir les données d'entrée des études de sûreté et servent à programmer les nettoyages chimiques des GV. Pour cela, les estimations des taux de colmatage n'étant pas possibles par ETV sur l'ensemble des plaques, EDF utilise la méthode IComplexe et la valeur de référence obtenue en plaque entretoise supérieure par examens télévisuels.

Néanmoins, aucun élément de la part d'EDF n'indique que les paramètres de formation du colmatage sont identiques sur toutes les plaques et que l'hypothèse de bord supérieur propre reste vérifiée au cours du temps au niveau de l'ensemble des plaques entretoises.

En conclusion, l'IRSN considère que la méthode IComplexe développée par EDF ne peut en l'état être considérée comme suffisamment fiable pour évaluer les profils de colmatage des GV avec le niveau de confiance attendu. Des pistes existent pour améliorer la fiabilité de cette méthode, mais l'IRSN considère qu'EDF doit concentrer ses efforts de manière prioritaire sur les conditions d'exploitation permettant de maintenir au meilleur niveau la propreté du compartiment secondaire des GV.

Pour le Directeur général et par délégation,

Olivier DUBOIS

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

Annexe à l'avis IRSN/2019-00098 du 7 mai 2019

Observation

Observation :

L'IRSN considère qu'EDF pourrait évaluer d'autres procédés électromagnétiques (à courants de Foucault ou de type flux de fuite) dans le but d'obtenir une estimation plus fiable du taux de colmatage, voire de sa répartition autour du tube.