

Fontenay-aux-Roses, le 3 juillet 2020

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## Avis IRSN n° 2020-00106

Objet...	Colmatage et encrassement des générateurs de vapeur du parc électronucléaire français - Maîtrise des risques associés.
Réf(s) ..	[1] Saisine ASN - CODEP-DEP-2019-030392 du 11 juillet 2019. [2] Avis IRSN 2012-00539 du 12 décembre 2012. [3] Avis IRSN 2019-00098 du 7 mai 2019.
Nbre de page(s) ...	7

Par la saisine en référence [1], l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a sollicité l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur le dossier d'EDF relatif à la maîtrise des risques associés au colmatage des plaques entretoises des générateurs de vapeur<sup>1</sup> (GV).

Le colmatage des plaques entretoises ainsi que l'encrassement<sup>2</sup> des GV peuvent induire des risques pour la sûreté des réacteurs. Les enjeux de sûreté sont principalement liés à l'intégrité des tubes de GV ainsi qu'au comportement du réacteur en situations normales, incidentelles et accidentelles. Le colmatage<sup>3</sup> se matérialise par des dépôts qui réduisent la section de passage du fluide entre les tubes et les plaques entretoises<sup>4</sup> (PE). Cela conduit à une résistance à l'écoulement plus importante que celle prévue à la conception. Ainsi, le colmatage peut modifier le comportement thermohydraulique des GV et les sollicitations mécaniques aux niveaux des tubes, des plaques entretoises et de leurs tirants de fixation dans les GV.

Depuis 2006<sup>5</sup>, de nombreuses études et expertises, notamment en références [2] et [3] ont été menées sur ce phénomène et ses conséquences pour la sûreté. En 2018, EDF a révisé sa stratégie

### 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

<sup>1</sup> Les générateurs de vapeur (GV) des réacteurs à eau pressurisés (REP) sont des échangeurs de chaleur qui utilisent l'énergie du circuit primaire pour transformer l'eau du circuit secondaire en vapeur. Leur surface d'échange est constituée d'un faisceau de tubes dont l'intégrité constitue un enjeu important pour la sûreté.

<sup>2</sup> On appelle encrassement la formation de dépôts à la surface externe des tubes des GV. Les dépôts d'encrassement augmentent la résistance thermique des parois des tubes des GV. Cette résistance plus importante diminue la performance de l'échangeur et affecte la pression de vapeur dans le dôme. Outre la dégradation des performances (rendement), l'encrassement peut poser des problèmes de sûreté.

<sup>3</sup> Le terme « colmatage » est retenu pour désigner la réduction de section du passage du fluide entre les tubes et les plaques entretoises, qui est induite par des dépôts sur les plaques entretoises. Dans une moindre mesure l'encrassement des tubes peut aussi réduire la section de passage.

<sup>4</sup> Les générateurs de vapeur du parc électronucléaire français ont huit ou neuf plaques entretoises. Elles assurent le maintien du faisceau de tubes.

<sup>5</sup> À la suite de plusieurs fissurations par fatigue vibratoire de tubes de GV ayant affecté deux réacteurs de la centrale nucléaire de Cruas (Ardèche) en février 2004 (réacteur n°1), novembre 2005 (réacteur n°4) et février 2006 (réacteur n°4), les effets du colmatage des GV sur la mécanique et la thermohydraulique du GV ont été étudiés tant par EDF que par l'IRSN.

MEMBRE DE

**ETSON**

EUROPEAN  
TECHNICAL SAFETY  
ORGANISATIONS  
NETWORK

de maintenance des GV colmatés du parc. Dans ce contexte, l'ASN demande à l'IRSN d'analyser la pertinence des études thermohydrauliques et mécaniques qui permettent d'établir les valeurs de taux de « colmatage limite » et la pertinence des taux de colmatage retenus par EDF pour garantir un fonctionnement sûr des réacteurs. Ainsi, l'ASN souhaite s'assurer que les hypothèses d'étude et les méthodes d'analyse retenues par EDF pour justifier le maintien en service de GV colmatés ou encrassés sont acceptables.

Conformément à la saisine, l'évaluation de l'IRSN a porté sur les sujets suivants :

- la robustesse de la mesure du colmatage par examen télévisuel (ETV);
- les impacts du colmatage sur les études de sûreté ;
- les impacts du colmatage sur la résistance mécanique des tubes et des internes de GV ;
- l'analyse des taux de colmatage limites permettant de garantir un fonctionnement sûr des GV colmatés du parc.

EDF caractérise, de façon simplifiée, le colmatage d'un GV par deux paramètres qui sont le colmatage moyen de la plaque entretoise supérieure et le profil vertical de colmatage. Ce dernier permet de définir le niveau de colmatage de chaque PE, en s'appuyant notamment sur la mesure du colmatage de la PE supérieure. EDF a défini, à partir d'une analyse issue du retour d'expérience, trois profils verticaux de référence : « piqué haut », « pseudo homogène » et « intermédiaire ». **L'IRSN considère que cette définition de trois profils de colmatage de référence est satisfaisante.**

Ces profils permettent, à l'aide d'études, d'établir le **taux de « colmatage limite »**, c'est-à-dire la valeur du **taux de colmatage moyen de la plaque entretoise supérieure qui permet de couvrir l'ensemble des risques par type de GV du parc.**

#### Robustesse de la mesure du colmatage par examen télévisuel (ETV)

EDF a développé une méthode permettant d'évaluer, par examen télévisuel (ETV), le taux de colmatage moyen d'une plaque entretoise de GV. Les outillages nécessaires à la réalisation des ETV sont introduits au niveau des ouvertures de l'enveloppe du GV. En fonction de la localisation de ces ouvertures, l'examen des plaques entretoises est réalisé par leur face supérieure ou bien inférieure. Les ETV réalisés en face supérieure font l'objet d'un traitement par analyse d'image de certains foliages<sup>6</sup>. Quand le colmatage apparaît sous la forme d'un bourrelet clairement visible à l'intérieur du foliage, l'analyse de ces images est réalisée par un logiciel et permet d'évaluer de manière quantitative le taux de colmatage, avec son incertitude (méthode quantitative). En l'absence de bourrelet de colmatage, l'analyse d'image est réalisée par un opérateur (méthode forfaitaire). Les ETV réalisés en face inférieure permettent une évaluation qualitative du colmatage (présence ou absence de colmatage).

Pour ce qui concerne la méthode quantitative, l'IRSN considère que les sources d'incertitude retenues par EDF ne sont pas exhaustives, ce qui conduit à sous-estimer l'incertitude de l'évaluation du taux de colmatage au niveau d'un foliage. Pour compléter son analyse, EDF s'est engagé à analyser les effets liés à l'orientation et au positionnement de la caméra (engagement n° 1 en annexe). **L'IRSN considère que cet engagement est acceptable.**

Les analyses réalisées au niveau des foliages d'une plaque sont utilisées pour établir le taux de colmatage moyen de cette plaque. EDF a déterminé le nombre de foliages à analyser pour obtenir une certaine incertitude. En appliquant

---

<sup>6</sup> Foliages : interstices en forme de pétale situés entre les tubes et les plaques entretoises au travers desquels circule le fluide secondaire des GV.

cette méthode, l'IRSN a constaté l'apparition d'un biais dans l'estimation du taux de colmatage moyen et obtient des valeurs d'incertitudes supérieures à celles établies par EDF. À l'issue de ce constat, EDF s'est engagé à redéfinir sa méthode d'évaluation du taux de colmatage moyen d'une plaque, en tenant compte des biais d'échantillonnage et de la répartition hétérogène du colmatage (engagement n° 2 en annexe). **L'IRSN considère que cet engagement est acceptable.**

Pour ce qui concerne la méthode forfaitaire, l'opérateur attribue une valeur de taux de colmatage moyen par plaque en fonction de l'aspect et des épaisseurs locales apparentes du colmatage et de l'encrassement, notamment sur la base d'images type. L'IRSN considère que cette méthode est peu fiable et qu'elle ne devrait être employée que pour les taux de colmatage inférieur à 20 %. EDF affirme que l'application de la méthode forfaitaire introduit des conservatismes mais reconnaît ne pas les avoir documentés. C'est pourquoi EDF s'est engagé à apporter un complément d'information sur la méthode forfaitaire (engagement n°3 en annexe). **L'IRSN considère que cet engagement est acceptable.**

#### Impacts du colmatage sur les études de sûreté

Le colmatage modifie le comportement thermohydraulique du GV. Plus précisément, il induit notamment une diminution du taux de circulation (rapport du débit d'eau traversant le faisceau secondaire sur le débit d'eau alimentant le GV) et une augmentation du taux de vide<sup>7</sup> dans la partie diphasique du faisceau.

EDF a analysé l'impact du colmatage sur les études du rapport de sûreté (RDS) et du dossier de protection contre les surpressions (DPS), notamment vis-à-vis du respect des critères de sûreté. EDF a ainsi identifié deux **impacts principaux du colmatage des GV sur les études de sûreté** :

- une diminution de la masse d'eau dans le GV, conduisant à une augmentation de la consommation des réserves d'eau secondaire dans certaines conditions incidentelles ou accidentelles ;
- une modification du comportement dynamique du GV, qui peut entraîner des oscillations des paramètres thermohydrauliques primaires et secondaires.

De plus, l'analyse d'impact réalisée par EDF met en évidence que le colmatage des GV peut aussi modifier le pic de pression primaire ou secondaire pour certains transitoires postulés dans les études de sûreté présentant un risque de surpression.

EDF conclut que l'impact du colmatage sur la consommation des réserves d'eau secondaire est soit nul, soit très faible. **L'IRSN estime acceptable l'analyse réalisée par EDF.** De plus, pour les études concernées des RDS VD4 900 (réacteurs de 900 MWe ayant passé leur 4<sup>ème</sup> visite décennale) et VD2 N4 (réacteurs N4 ayant passé leur 2<sup>ème</sup> visite décennale), le colmatage des GV est pris en compte par l'intermédiaire d'hypothèses quant à la valeur du taux de circulation. **EDF a par ailleurs prévu de faire de même pour le palier 1300 MWe lors d'une prochaine mise à jour du RDS VD3, ce qui est satisfaisant.**

Pour ce qui concerne l'impact du colmatage sur le risque de surpression des circuits primaire et secondaire, EDF a repris certaines études en considérant des taux de colmatage associés aux taux de circulation minimisés cités ci-dessus. EDF conclut que, compte tenu des marges, la présence de colmatage n'est pas de nature à remettre en cause le respect des critères réglementaires. **Bien que les résultats transmis par EDF ne couvrent pas l'ensemble des paliers du parc en exploitation (réacteurs de 900 MWe du palier CP0 exclus), l'IRSN estime que la prise en compte**

---

<sup>7</sup> Le taux de vide peut être défini comme le rapport du volume de la phase gazeuse (vapeur) sur le volume fluide total (eau + vapeur) en un point donné d'un écoulement diphasique.

**du colmatage des GV ne devrait effectivement pas remettre en cause les conclusions des études présentées dans le dossier de protection contre les surpressions.**

Pour ce qui concerne le risque oscillatoire, la démarche d'EDF consiste à évaluer par des études spécifiques le taux de colmatage limite garantissant l'absence d'oscillations divergentes et d'impact significatif sur les marges aux critères de sûreté, mais sans prendre explicitement en compte les effets du colmatage dans les études présentées dans le RDS. Sur le principe, l'IRSN estime cette démarche acceptable. Cependant, afin de garantir le conservatisme des marges mises en évidence par les études de sûreté, l'IRSN estime qu'EDF devrait tenir compte explicitement du colmatage dans les études de sûreté affectées défavorablement par ce phénomène. **EDF a pris un engagement en ce sens, ce que l'IRSN considère satisfaisant.**

Le taux de colmatage limite vis-à-vis du risque oscillatoire a été évalué à l'aide d'un logiciel de thermohydraulique. EDF a identifié les transitoires les plus sensibles à ce risque puis a établi le taux de colmatage limite et le taux de circulation associé permettant d'assurer une répercussion limitée des oscillations sur les paramètres thermohydrauliques primaires. **L'IRSN estime toutefois que les éléments transmis par EDF ne permettent pas d'apporter la démonstration de la capacité du logiciel à évaluer correctement les taux de colmatage limites vis-à-vis du risque oscillatoire.** EDF réalisera donc des études de sensibilité afin de démontrer que l'intervention de l'arrêt automatique du réacteur en cas d'oscillations divergentes permet le retour à un état sûr pérenne (engagement n° 4 en annexe). Par ailleurs, EDF s'est engagé à compléter le dossier de qualification de ce logiciel (engagement n° 5 en annexe). **L'IRSN estime ces deux engagements satisfaisants.**

#### Impacts du colmatage sur la résistance mécanique des tubes et des internes de GV

Pour analyser l'incidence du colmatage sur le risque d'instabilité vibratoire des tubes et la tenue mécanique des internes de GV, EDF s'appuie sur des études thermohydrauliques puis mécaniques.

**Pour ce qui concerne le risque d'instabilité vibratoire**, la chaîne de calcul utilisée permet d'étudier l'écoulement local du fluide et les interactions entre le fluide et les tubes en fonction, notamment, du colmatage et de l'encrassement du GV et ce, pour différents points de fonctionnement. Sous réserve de la qualification du logiciel utilisé pour les études thermohydrauliques, **l'IRSN considère que la démarche et les hypothèses retenues par EDF pour l'analyse du risque vibratoire sont acceptables.**

EDF a appliqué cette démarche à l'ensemble des types de GV du parc, en distinguant les GV de type 51B et les autres. **Pour les GV autres que ceux de type 51B, l'IRSN estime que les taux de colmatage et les points de fonctionnement considérés dans les études permettent de garantir l'absence de risque vibratoire des tubes.** Pour les GV de type 51B, qui par conception ont des tubes non supportés, le risque d'instabilité vibratoire des tubes est prépondérant par rapport aux autres risques. Pour ces GV, EDF n'a pas défini de taux de colmatage limite et réalise des études vibratoires au cas par cas, en fonction des situations de colmatage rencontrées sur les réacteurs pour évaluer ce risque. **L'IRSN considère que cette pratique ne permet pas une gestion anticipée du risque d'instabilité vibratoire des GV de type 51B.** EDF s'est engagé à définir un taux de colmatage limite pour les GV de type 51B (engagement n° 6 en annexe). **L'IRSN estime cet engagement satisfaisant.**

**Pour ce qui concerne la tenue mécanique des internes de tous les types de GV du parc**, EDF retient les profils verticaux de colmatage de type « piqué haut » et « pseudo-homogène » pour maximiser les efforts sur les plaques situées respectivement en partie haute et en partie basse du GV.

Les études thermohydrauliques sont menées pour évaluer les efforts résultant de l'écart de pression induit par le colmatage entre les deux faces des plaques entretoises (PE) et de la plaque de répartition de débit (PRD). Pour chaque

catégorie de situation, les transitoires thermohydrauliques enveloppes sont établis à partir d'une analyse des transitoires issus des rapports de sûreté et des dossiers des situations. Le taux de colmatage considéré, en fonction du type de GV, correspond à un taux de circulation minimisé.

Les études mécaniques permettent d'étudier les sollicitations locales atteintes dans les différents composants des internes (les tirants, les plaques entretoises ou PE, la plaque de répartition de débit ou PRD, et la plaque tubulaire) et les interactions éventuelles entre les tubes et les plaques entretoises en présence de colmatage. Pour ces études, EDF a établi ses propres critères de tenue mécanique dans l'objectif de garantir l'intégrité du faisceau tubulaire en toute situation.

Sous réserve de la validation du logiciel utilisé pour les études thermohydrauliques, qui devra faire l'objet d'une expertise ultérieure, **l'IRSN estime acceptable la démarche et les hypothèses retenues par EDF pour évaluer les chargements thermohydrauliques et la tenue mécanique des internes et du faisceau tubulaire en présence de colmatage.**

EDF a appliqué sa démarche de justification de façon exhaustive pour certains types de GV, et a considéré que ces études étaient suffisantes pour couvrir l'ensemble des autres types de GV du parc. **Cette approche n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

Les études d'EDF montrent le bon comportement mécanique des PE, des PRD, des tirants, des zones filetées et des zones taraudées, en présence de colmatage. **Ceci n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.**

Pour ce qui concerne l'intégrité des tubes (en zone courante et au droit des PE), l'IRSN considère que les justifications d'EDF sont suffisantes. Néanmoins, **l'IRSN souligne l'importance des contrôles périodiques des tubes** qui devraient permettre la détection d'indications susceptibles d'apparaître en présence de colmatage élevé et la prévention des dommages induits.

#### Analyse des taux de colmatage limites

EDF évalue l'impact du colmatage sur la sûreté de façon découplée. Pour chaque type de GV, **EDF détermine un taux de colmatage « limite » qui permet de couvrir l'ensemble des risques.**

**Pour les GV de type 51B**, le risque vibratoire est prépondérant et EDF n'a pas défini de taux de colmatage limite. Ce point a déjà été évoqué plus haut.

**Pour les GV autres que ceux de type 51B**, pour chaque profil vertical, EDF établit un taux de colmatage « limite » en deux étapes. La première étape consiste à rechercher, de façon itérative, un taux de colmatage « limite », qui permette d'écarter le risque d'oscillation. La deuxième étape est une vérification de l'absence de risque vibratoire, de la tenue mécanique des internes et du respect des critères du RDS en cohérence avec le taux de colmatage « limite » établi à la première étape. À l'issue de cette démarche, EDF a déterminé des taux de colmatage limites qui sont cohérents.

EDF va réviser sa stratégie de maintenance des GV en fonction des taux de colmatage limites obtenus pour chaque type de GV. Pour les GV « fortement colmatés », le profil vertical de colmatage sera établi à partir d'ETV réalisés en PE supérieure, complétés par des ETV en plaque inférieure et éventuellement en PE intermédiaire. L'IRSN considère que la détermination du profil vertical de colmatage à partir de mesures ETV complémentaires est acceptable dans son principe. Néanmoins, l'IRSN souligne qu'EDF ne dispose que d'une dizaine de mesures en plaques intermédiaires pour l'ensemble des GV du parc. **C'est pourquoi, l'IRSN considère que seule la valeur du taux de colmatage limite établie par type de GV (hors GV de type 51B) pour le profil vertical « pseudo homogène » est acceptable pour**

analyser l'état de colmatage des GV du parc, tant que le retour d'expérience des mesures de colmatage des plaques intermédiaires reste faible.

Pour l'IRSN, les valeurs limites de colmatage ainsi établies ne doivent en aucun cas être atteintes et la stratégie de surveillance et de maintenance d'EDF doit garantir un état de propreté des GV en conséquence.

#### Conclusion

Les risques liés au colmatage des GV sont connus et ont été étudiés de manière exhaustive par EDF. Il s'agit d'un inventaire en eau secondaire amoindri, d'un pic de pression accru en cas de transitoire accidentel de surpression, du risque oscillatoire des paramètres thermohydrauliques primaires et secondaires, du risque de rupture de tubes de GV par fatigue vibratoire, et du risque de surcharge mécanique des internes des GV. Ces impacts ont fait l'objet d'une analyse pour chaque type de GV du parc. Ces études, réalisées en considérant des hypothèses cohérentes et conservatives, permettent *in fine* d'établir des taux de colmatage limites pour garantir un fonctionnement sûr des GV colmatés.

Un programme de maintenance pluriannuel est déployé pour surveiller le colmatage et le cas échéant remettre en conformité les GV du parc. La surveillance repose sur des mesures du colmatage par ETV. La réduction du colmatage est obtenue par la mise en œuvre de traitements préventifs par nettoyage chimique. Par ailleurs, la limitation (ou stabilisation) du phénomène de colmatage est favorisée par un conditionnement chimique dit à « haut pH », qu'EDF tend à généraliser sur l'ensemble du parc. Pour un réacteur donné, la programmation d'un ETV ou d'un nettoyage chimique est établie en fonction du niveau de colmatage des GV (ETV antérieurs), de la projection de l'évolution du colmatage, et des taux de colmatages limites issus des études.

À l'issue de son analyse, l'IRSN estime que la démarche décrite est cohérente et de nature à garantir un fonctionnement sûr des GV colmatés du parc. Néanmoins, elle doit être consolidée, et EDF a pris des engagements en ce sens concernant la qualification de logiciels de calcul, la détermination de taux de colmatage limites pour les GV de type 51B, la réévaluation des incertitudes associées aux méthodes d'analyse des ETV, et la révision de la stratégie de maintenance. L'IRSN considère **ces engagements satisfaisants**.

Pour le Directeur général et par délégation,  
Olivier Dubois  
Directeur adjoint de l'expertise de sûreté

## Annexe à l'avis IRSN n° 2020-00106 du 3 juillet 2020

### Engagements principaux d'EDF

#### *Engagement n° 1*

Pour l'évaluation du taux de colmatage d'un foliage, EDF s'engage à analyser les effets supplémentaires liés à l'orientation et au positionnement de la caméra. EDF mettra à jour sa méthodologie de détermination des incertitudes de quantification de l'obstruction des passages foliés pour le 1<sup>er</sup> trimestre 2021, et, le cas échéant, modifiera en conséquence le logiciel visant à estimer le taux de colmatage.

#### *Engagement n° 2*

EDF s'engage à redéfinir sa méthode d'évaluation du colmatage moyen d'une plaque afin de tenir compte des biais d'échantillonnage et prévoit une mise à jour de la note technique correspondante pour le 1<sup>er</sup> trimestre 2021. Il prendra en compte le fait que la répartition du colmatage n'est pas homogène sur une plaque entretoise.

#### *Engagement n° 3*

EDF s'engage à apporter un complément d'information et à mettre à jour la note technique portant sur la méthodologie d'évaluation du taux de colmatage dans le cas où l'analyse logicielle ne peut être mise en œuvre et repose sur l'attribution d'une valeur forfaitaire enveloppe pour le taux de colmatage d'un foliage. Cette mise à jour est prévue pour le 1<sup>er</sup> trimestre 2021.

#### *Engagement n° 4*

EDF s'engage à réaliser des études de sensibilité afin d'analyser pour le palier 900 MWe, à l'instar du palier 1300 MWe, l'impact d'oscillations divergentes sur les marges aux critères de sûreté et de vérifier, pour les paliers 900 et 1300 MWe, que l'intervention de l'arrêt automatique du réacteur permet le retour à un état sûr pérenne sans risque oscillatoire.

#### *Engagement n° 5*

EDF s'engage à réaliser un plan de validation en trois étapes visant à compléter le dossier de qualification du logiciel de calcul utilisé pour l'analyse du risque oscillatoire en présence de colmatage, avec des échéances fixées à fin 2020 pour les deux premières étapes et à mi-2023 pour la 3<sup>e</sup> étape. Enfin, EDF examinera l'opportunité d'ajouter une étape de validation supplémentaire (4<sup>e</sup> étape) qui pourra prendre la forme d'une valorisation d'études ou d'essais expérimentaux disponibles dans la littérature scientifique, de la réalisation de nouveaux essais expérimentaux ou d'autres compléments à définir lors d'un point d'arrêt début 2021.

#### *Engagement n° 6*

EDF précise que la périodicité de contrôle par ETV de la PE supérieure des GV 51B est désormais fixée à deux arrêts et s'engage à établir, au 1<sup>er</sup> semestre 2020, le taux de colmatage moyen de la PE supérieure à ne pas dépasser pour se prémunir du risque d'instabilité vibratoire des GV de type 51B.