

Monsieur le Directeur de la Direction des équipements sous pression

Fontenay-aux-Roses, le 14 mars 2025

AVIS D'EXPERTISE N° 2025-00022 DU 14 MARS 2025

Objet : **EPR2 – Gestion du risque vibratoire de la ligne d'expansion du pressuriseur – Examen du dossier d'identification de l'origine des vibrations et de justification d'une solution de supportage compensatoire.**

Réf. : [1] Avis IRSN n° 2022-00094 du 3 mai 2022.
[2] Avis IRSN n° 2021-00049 du 31 mars 2021.
[3] Saisine ASN – CODEP-DEP-2024-015834 du 18 mars 2024.

En préalable à la mise en service d'un réacteur, des essais de démarrage sont réalisés afin de démontrer que les systèmes, structures et composants fonctionnent conformément aux hypothèses d'étude et qu'ils satisfassent aux critères de conception fixés. Lors des essais menés sur des réacteurs EPR, des vibrations élevées de la ligne d'expansion du pressuriseur¹ (LEP) ont été observées. Les vibrations maximales sont atteintes lorsque la température du circuit primaire est proche de 300 °C (conditions dites « à chaud » en fonctionnement normal).

Lors des essais à chaud (EAC) du réacteur EPR de Flamanville, EDF a mis en évidence un niveau de vitesse vibratoire de la LEP supérieur au critère d'acceptabilité fixé à 12 mm/s RMS². Une valeur proche du double du critère a été enregistrée. Pour remédier à cet écart, EDF a proposé l'ajout sur cette ligne d'un amortisseur dynamique appelé « *tuned mass damper* » (TMD). Le caractère acceptable de cet ajout comme solution aux vibrations excessives constatées a fait l'objet d'un avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) cité en première référence.

Dans le cadre de l'expertise du dossier d'options des branches primaires et de la ligne d'expansion du pressuriseur des réacteurs EPR2, l'IRSN avait examiné la prise en compte de ce retour d'expérience par EDF. L'IRSN avait alors recommandé, dans son avis cité en deuxième référence, que Framatome identifie les origines des vibrations élevées de la ligne d'expansion du pressuriseur observées sur différents réacteurs EPR et présente, à un stade précoce de la conception, les évolutions nécessaires sur les futurs réacteurs EPR2 pour pallier cette problématique de vibrations.

EDF a ainsi présenté une synthèse des analyses menées pour identifier les origines des phénomènes vibratoires de la LEP observés sur des réacteurs EPR puis a détaillé la recherche de solutions afin de limiter les vibrations de la LEP sur les futurs réacteurs EPR2. Ces solutions concernent la prise en compte de tracés alternatifs au

¹ La LEP est un tronçon de tuyauterie appartenant au circuit primaire principal. Pour les réacteurs EPR, elle est connectée à la branche chaude n°3 à une extrémité et au pressuriseur à l'autre extrémité.

² La valeur RMS, pour « *root mean square* », de la vitesse correspond à la moyenne quadratique de ses composantes dans trois directions orthogonales.

tracé de référence et de différents types de supportage de la LEP, puis l'analyse de sensibilité de la solution retenue à des conditions de chargements représentatives.

Par la saisine citée en troisième référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a sollicité l'avis de l'IRSN sur le dossier, présenté par EDF, portant sur la gestion du risque vibratoire de la ligne d'expansion du pressuriseur pour le projet de réacteurs EPR2.

L'ASN a demandé à l'IRSN de se prononcer sur la robustesse des solutions de conception retenues pour la LEP et de son système de supportage proposés par Framatome et EDF, ainsi que sur l'adéquation de la solution retenue pour le réacteur EPR2 en considérant les causes du phénomène vibratoire mises en évidence.

Au 1^{er} janvier 2025, l'ASN et l'IRSN sont devenus l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR). Le présent avis de la Direction de l'expertise en sûreté de l'ASNR vient en réponse à la saisine précitée.

De l'évaluation des documents transmis et des informations apportées par EDF au cours de l'expertise, la Direction de l'expertise en sûreté retient les principaux éléments suivants.

1. CRITÈRE DE VIBRATION

L'évaluation de la sensibilité des lignes de tuyauteries aux vibrations repose sur des relevés de vitesses vibratoires. Pour apprécier cette sensibilité, EDF a retenu une valeur seuil de 12 mm/s RMS. En dessous de ce seuil, une tuyauterie est considérée non sensible. **Pour la Direction de l'expertise en sûreté, l'utilisation de la valeur limite de vitesse vibratoire de 12 mm/s RMS peut être considérée comme fiable et éprouvée. Elle est extraite d'une norme internationale et présente un retour d'expérience positif sur les réacteurs du parc en exploitation.**

2. ANALYSE DES CAUSES DES VIBRATIONS DE LA LEP

L'analyse de l'origine des vibrations de la LEP présentée par EDF est structurée autour de quatre thématiques :

- la coïncidence des modes propres³ structuraux du circuit primaire principal (CPP) avec les modes acoustiques⁴ du fluide primaire ;
- la détermination des mécanismes d'excitation du mode acoustique du fluide et de la LEP ;
- la dépendance de l'amplitude de vibration de la LEP à la température du CPP ;
- la dépendance de l'amplitude de vibration de la LEP au fonctionnement des pompes.

EDF évalue ensuite la transposabilité du phénomène vibratoire de l'EPR à l'EPR2.

2.1. MODES PROPRES DU CPP ET COÏNCIDENCE AVEC LES MODES ACOUSTIQUES DU FLUIDE PRIMAIRE

Les différents modes acoustiques du fluide primaire sont définis par des variations de sa pression. Ces modes excitent l'ensemble du CPP dont la LEP et peuvent la faire entrer en résonance s'ils ont une fréquence proche des fréquences propres de celle-ci. Des calculs mécaniques couplés à l'acoustique (mécano-acoustiques) réalisés par EDF ont permis de reproduire les observations provenant d'un réacteur EPR à l'international. Selon EDF, les modes acoustiques à basse fréquence d'un fluide sont définis principalement par les grands volumes et les restrictions de passage du circuit le canalisant. Les essais réalisés cœur déchargé, puis cœur chargé⁵, sur des réacteurs EPR à l'international n'ont pas influencé les résultats. **La Direction de l'expertise en sûreté convient de la faible influence des assemblages de combustible en cœur sur les vibrations de la LEP.**

³ La vibration de tous les points d'un système mécanique à une fréquence donnée est appelée mode propre de vibration. La fréquence à laquelle le système vibre, est appelée fréquence propre. Lorsqu'un système mécanique vibre, les points oscillent autour de leur position d'équilibre avec des amplitudes différentes. Le mode propre correspondant à la fréquence la plus basse est appelé le mode fondamental.

⁴ Un mode acoustique est l'appellation équivalente du mode propre mais relative aux fluides (liquide ou air).

⁵ Un cœur est dit chargé quand les assemblages de combustible y sont présents. Dans le cas contraire, il est dit déchargé.

2.2. DÉTERMINATION DES MÉCANISMES D'EXCITATION DU MODE ACOUSTIQUE FLUIDE ET DE LA LEP

EDF considère deux sources d'excitation possibles de la LEP : une source mécanique et une source acoustique.

EDF a démontré sur la base des mesures réalisées sur un réacteur EPR à l'international et par calcul que la source mécanique est responsable d'un tiers du niveau de vibration observé. Sur ce point, la Direction de l'expertise en sûreté ne formule pas de remarque.

Concernant la source d'excitation acoustique, EDF n'a pas considéré les différences de conditions de fonctionnement des réacteurs EPR ni, par exemple, l'impact du contrôle-commande ou de tout système connecté au CPP. Les phénomènes locaux, tels que les tourbillons, n'ont été étudiés en détail par EDF que pour le piquage entre la branche chaude n° 3 et la LEP.

Bien que les sources d'excitation identifiées, mécanique et acoustique, soient responsables d'une partie de l'amplitude vibratoire de la LEP, il n'est pas acquis que d'autres sources n'y contribuent pas. En effet, un calcul mécano-acoustique réalisé par EDF pour un réacteur EPR à l'international n'a permis de retrouver que 43 % du niveau de vibration maximale observé sur la LEP au point de mesure de la vitesse maximale. **Ainsi, la Direction de l'expertise en sûreté considère qu'EDF n'a pas pleinement démontré l'absence d'autres sources d'excitation.**

2.3. DÉPENDANCE DE L'AMPLITUDE DE VIBRATION DE LA LEP À LA TEMPÉRATURE DU CPP

Des résultats d'essais réalisés sur un réacteur EPR à l'international, EDF déduit une dépendance de l'amplitude vibratoire de la LEP à la température du CPP. En effet, aucune vibration significative n'est observée en dessous de 260 °C ; cependant, l'amplitude vibratoire est élevée autour de 300 °C. EDF n'a pas effectué de mesure de vibrations entre ces deux températures du CPP. Pour la Direction de l'expertise en sûreté, l'absence de mesure entre ces deux valeurs de température du CPP ne permet pas de caractériser la dépendance de l'amplitude de vibration de la LEP à la température. **Ainsi, EDF pourrait, sur les réacteurs EPR2, réaliser des mesures vibratoires de la LEP et des branches chaudes pour des températures du CPP comprises entre 260 °C et 303 °C (conditions d'arrêt à chaud), afin de conforter son hypothèse de dépendance de l'amplitude vibratoire de la LEP à la température du CPP.**

La Direction de l'expertise en sûreté souligne que la température de 303 °C correspond à un seuil où les conditions de pilotage évoluent. En effet, elles passent d'un pilotage manuel à un pilotage automatique. En outre, lors des essais, les systèmes de contrôle sont davantage sollicités : par exemple, l'actionnement de vannes de contrôle pour stabiliser les paramètres physiques peut engendrer des ondes de pression à la fréquence de sollicitation. **Ainsi, pour la Direction de l'expertise en sûreté, d'autres sources d'excitation vibratoire de la LEP auraient pu être investiguées.**

2.4. DÉPENDANCE DE L'AMPLITUDE DE VIBRATION DE LA LEP AU FONCTIONNEMENT DES POMPES

À partir des essais réalisés sur un réacteur EPR à l'international, EDF a analysé l'influence de différentes configurations de fonctionnement des groupes motopompes primaires (GMPP) sur le comportement vibratoire de la LEP et en conclut que celui-ci est similaire dans les différentes configurations testées. Pour la Direction de l'expertise en sûreté, les configurations de fonctionnement des GMPP étudiées par EDF ne sont pas suffisantes et des configurations complémentaires permettraient de pouvoir conclure quant à l'influence de ce paramètre sur l'amplitude de vibration de la LEP. **Ainsi, EDF pourrait enrichir les essais sur les réacteurs EPR2 avec des configurations de fonctionnement des GMPP qui peuvent davantage influencer le niveau vibratoire de la LEP.**

2.5. TRANSPOSABILITÉ DE LA PROBLÉMATIQUE DE L'EPR À L'EPR2

EDF considère que la seule modification du tracé de la LEP des réacteurs EPR2 n'est pas suffisante pour garantir l'absence de vibrations significatives aux basses fréquences pour ces futurs réacteurs. Les similitudes de conception entre l'EPR et l'EPR2 ne garantissent pas non plus que ce problème sera également observé sur les futurs réacteurs EPR2. À cet égard, la Direction de l'expertise en sûreté constate que les mesures réalisées sur un réacteur EPR à l'international, qui ne présente *a priori* aucune différence de conception avec les autres EPR, mettent en évidence un comportement vibratoire de la LEP différent, avec des mesures de vitesses vibratoires

inférieures au critère de 12 mm/s RMS. **Elle estime que les conclusions, présentées par EDF, concernant la transposition d'un problème dont les causes ne sont pas totalement identifiées, ne peuvent être fermement établies.**

3. ANALYSE DES SOLUTIONS POUR L'EPR2

À la suite de l'étude des sources possibles de vibrations de la LEP sur les réacteurs EPR, EDF considère que le risque vibratoire pour la LEP du réacteur EPR2 n'est pas écarté. En conséquence, des analyses ont été menées pour identifier les possibilités de modifications de conception de la LEP et de son système de supportage. L'objectif de ces modifications est d'amener par conception la réponse vibratoire de la LEP du réacteur EPR2 en deçà du critère de vitesse de 12 mm/s RMS.

Pour cela, EDF a procédé selon les étapes suivantes :

- la réalisation d'une analyse comparative du tracé des LEP des réacteurs du parc en exploitation, ainsi que de différents tracés pour le projet EPR2, afin de déterminer l'influence de ce paramètre sur le comportement vibratoire de la LEP ;
- l'évaluation de différentes solutions de supportage de la LEP vis-à-vis des contraintes de conception ;
- l'analyse de la sensibilité de la solution de supportage retenue à un ensemble représentatif de chargements.

3.1. ANALYSE COMPARATIVE

Selon les paliers des réacteurs du parc en exploitation, les LEP présentent des caractéristiques variables : diamètres et épaisseurs des tuyauteries, longueurs déployées, nombre de coudes, rayons de cintrage des coudes, implantation des piquages sur la branche chaude et présence ou non de supportages de type dispositifs autobloquants (DAB). Les résultats des analyses modales des LEP conduisent EDF à conclure que la variabilité de ces caractéristiques a peu d'impact sur les valeurs des premières fréquences propres observées systématiquement entre 3 et 10 Hz et que le probable ajout d'amortissement au travers de la présence des DAB pourrait avoir un effet bénéfique, mais non maîtrisé. En conséquence, EDF considère que pour augmenter la fréquence des premiers modes, il est nécessaire d'ajouter des supports. **La Direction de l'expertise en sûreté ne remet pas en cause les analyses modales réalisées par EDF, ni ses conclusions.**

Selon EDF, la conception du circuit primaire des réacteurs EPR2 est très proche de celle des réacteurs EPR. En effet, les volumes fluides, les vitesses d'écoulement, les technologies de pompes, les types de discontinuités dans le circuit fluide et les types de supportage du CPP sont similaires. Seule une modification du tracé de la LEP des réacteurs EPR2 a été réalisée afin de prendre en compte un repositionnement du pressuriseur. Cela a pour conséquence d'augmenter légèrement la fréquence du mode le plus pénalisant.

En complément, EDF a réalisé une étude de sensibilité sur deux tracés alternatifs qui minimisent ou maximisent le nombre de coudes. Les analyses modales réalisées concluent à la présence de modes propres dans la plage comprise entre 3 et 8 Hz, plage dans laquelle il peut exister des modes acoustiques du fluide susceptibles de faire entrer en résonance la LEP.

La Direction de l'expertise en sûreté considère que les résultats d'EDF sur l'étude des tracés alternatifs pour la LEP des réacteurs EPR2, complétés des analyses modales réalisées sur les tracés des LEP du parc, sont suffisamment robustes pour orienter la recherche de solutions techniques vers l'ajout de supports à la LEP des réacteurs EPR2 pour réduire l'amplitude de ses vibrations.

3.2. SOLUTIONS DE SUPPORTAGE

EDF a évalué différentes solutions techniques de supportage visant à réduire l'amplitude vibratoire de la LEP. Les supports doivent être localisés à l'endroit où les amplitudes de déplacement sont les plus importants. Ainsi, pour le cas de la LEP des réacteurs EPR2, trois positions ont été identifiées par EDF. À l'issue de son évaluation des avantages et des inconvénients de ces différentes solutions de supportage, EDF conclut que la configuration

reposant sur l'utilisation de supports variables optimisés⁶ (SVO) est la mieux adaptée pour répondre aux différentes contraintes de conception, d'installation, de fonctionnement et d'environnement vibratoire.

Pour la Direction de l'expertise en sûreté, EDF a étudié, conformément aux règles de l'art, un ensemble suffisamment exhaustif de solutions techniques pour réduire l'amplitude vibratoire de la LEP de l'EPR2, ce qui est satisfaisant.

3.3. ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Pour finaliser sa démarche, EDF a réalisé une étude de sensibilité de la solution de supportage retenue. L'objectif de cette étude est d'évaluer la performance de la solution, mais pas de l'optimiser compte tenu des incertitudes qui persistent. Ainsi, EDF a réalisé la comparaison des vitesses vibratoires pour le tracé de la LEP de l'EPR2 sans élément de supportage, dite configuration de référence, et avec trois SVO en considérant plusieurs chargements élaborés à partir de mesures effectuées lors des EAC d'un réacteur EPR à l'international.

Pour EDF, les calculs montrent la robustesse de la configuration avec SVO, pour ce qui concerne la réponse de la LEP, à la variabilité du chargement. Cette robustesse est essentiellement apportée par l'amortissement important des ressorts à câbles, dès que ceux-ci sont sollicités. Pour la Direction de l'expertise en sûreté, la diversité des chargements pris en compte permet de couvrir l'incertitude liée aux sources d'excitation de la LEP.

La Direction de l'expertise en sûreté estime que la solution de supportage retenue par EDF est adaptée en l'état actuel des connaissances du phénomène vibratoire.

4. CONCLUSION

À l'issue de l'expertise du retour d'expérience acquis par EDF lors des essais à chaud menés sur différents réacteurs EPR et des études réalisées, la Direction de l'expertise en sûreté considère que l'identification et la caractérisation des causes de vibration de la LEP, notamment celle d'origine fluide acoustique, sont des sujets complexes qui restent ouverts.

Elle estime que les études réalisées par EDF pour l'EPR ne sont pas suffisamment robustes pour s'assurer d'une identification exhaustive des sources d'excitation à l'origine du phénomène vibratoire observé sur la LEP, ni pour garantir qu'elles seront strictement identiques sur les réacteurs EPR2. Pour améliorer la compréhension de ce phénomène, des mesures vibratoires sur la LEP à plusieurs températures entre 260 °C et 303 °C ainsi que des essais avec des configurations supplémentaires de fonctionnement des GMPP pourraient être réalisés sur les réacteurs EPR2. De même, d'autres sources d'excitation vibratoire de la LEP pourraient être investiguées.

Pour ce qui concerne les solutions visant à limiter les vibrations de la LEP des réacteurs EPR2, la Direction de l'expertise en sûreté considère que les solutions de conception de la LEP et de son système de supportage sont adaptées en l'état actuel des connaissances du phénomène vibratoire.

Pour le Directeur de l'expertise en sûreté

Thierry PAYEN

Adjoint au Directeur de l'expertise en sûreté

⁶ Les supports variables optimisés (SVO) sont des supports à rigidité et amortissement contrôlés. Ils sont constitués de ressorts à câbles. L'amortissement est apporté par une capacité de dissipation d'énergie dans le support grâce au frottement entre les filins constituant le câble des ressorts.