



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Fontenay-aux-Roses, le 6 juin 2023

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2023-00075

Objet : Réacteur EPR de Flamanville – Stratification dans les lignes auxiliaires des systèmes RCV et ASG.

Réf. : Lettre ASN - CODEP-DEP-2023-004401 du 26 janvier 2023.

1. CONTEXTE

Dans le cadre de l'évaluation de conformité de l'ensemble chaudière du réacteur EPR de Flamanville (EPR FA3), Framatome a informé l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) de l'absence de prise en compte de la stratification thermique¹ dans les lignes de charge et de décharge du système de contrôle chimique et volumétrique du réacteur (RCV), et dans celles du système d'alimentation de secours des générateurs de vapeur (ASG). La stratification thermique sur les lignes des systèmes RCV et ASG accroît les chargements auxquels ils sont soumis.

En réponse à la demande de l'ASN, Framatome a notamment établi des programmes d'instrumentation de ces lignes, afin de conforter les hypothèses de chargements associées à ces phénomènes. Les mesures seront réalisées lors des essais de requalification d'ensemble du réacteur EPR FA3.

Dans ce cadre, l'ASN sollicite l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), par la lettre citée en référence, pour une analyse qui se déroulera en deux temps :

- étape 1 : évaluer la représentativité et la couverture des essais au regard des situations² d'intérêt, ainsi que la suffisance de l'instrumentation sur les lignes des systèmes RCV et ASG ;
- étape 2 : évaluer les résultats des essais instrumentés et leur cohérence avec les données et hypothèses des études mécaniques considérées.

Le présent avis porte sur l'étape 1 de l'analyse.

¹ Stratification thermique : différence de température entre la génératrice supérieure et inférieure de la section de tuyauterie.

² Une situation est un état de fonctionnement des équipements, qui est décrit par des conditions thermohydrauliques (évolution temporelle des conditions de pression, température et débit) de l'équipement, de l'ensemble ou de l'installation.

MEMBRE DE
ETSON

2. LIGNES DE CHARGE ET DE DECHARGE RCV

2.1. PHENOMENES THERMOHYDRAULIQUES

Une ligne auxiliaire est en configuration dite « bras morts » lorsqu'elle est isolée du fluide primaire circulant dans le circuit primaire principal (CPP) à un moment donné lors du fonctionnement du réacteur, et n'est donc pas le siège d'un débit d'eau.

Dans cette configuration, un vortex (tourbillons pénétrants induits par la recirculation du fluide primaire) peut s'insérer dans la partie non isolable³ de la ligne auxiliaire. La portion de la ligne auxiliaire dans laquelle le vortex pénètre est chauffée par ce dernier, à une température proche de celle du fluide dans la tuyauterie principale débitante. Si le front de vortex atteint le premier organe d'isolement, celui-ci est réchauffé directement par le vortex.

Dans les autres cas, lorsque le front de vortex se situe dans un tronçon ascendant ou horizontal, une boucle de convection naturelle⁴ s'établit au-delà du front de vortex. Cette boucle transfère efficacement la chaleur et se propage soit jusqu'au premier organe d'isolement, soit jusqu'à un tronçon vertical descendant (celui-ci arrêtant alors le transfert de chaleur par convection, l'effet de la gravité s'y opposant). Lorsque le phénomène de convection naturelle s'établit dans un tronçon horizontal, une stratification thermique apparaît dans ce tronçon.

Une fiche type, établie à partir du retour d'expérience (REX) des campagnes d'instrumentation menées sur différents réacteurs du parc en exploitation, est appliquée pour caractériser⁵ les états permanents et les transitoires vus par ces lignes en configuration bras morts.

2.2. LIGNES DE CHARGE RCV

Les deux lignes de charge RCV de l'EPR FA3 sont connectées respectivement en branche froide (BF) n°2 et n°4. La géométrie du tronçon non isolable de ces lignes est la suivante :

- ligne de charge RCV connectée en BF2 : un tronçon⁶ vertical ascendant suivi d'un tronçon horizontal, puis un nouvel enchaînement tronçon vertical ascendant / tronçon horizontal ;
- ligne de charge RCV connectée en BF4 : un tronçon vertical ascendant suivi d'un tronçon horizontal.

La conception du piquage de chaque ligne de charge sur la tuyauterie primaire principale de l'EPR FA3 est spécifique car il dispose d'une manchette thermique, qui devrait limiter la pénétration du front de vortex dans ces lignes, et par suite la stratification dans les tronçons horizontaux.

2.2.1. Caractérisations des effets bras morts

En configuration bras morts, le piquage vertical ascendant favorise la montée du fluide chaud, et il est supposé de manière pénalisante que le vortex arrive jusqu'au coude reliant ce tronçon au tronçon horizontal qui suit.

³ Partie non isolable : partie comprise entre le piquage sur la boucle primaire et le premier organe d'isolement.

⁴ Le fluide en contact avec le front de vortex se réchauffe et monte sous l'effet de la diminution de sa densité. Le fluide réchauffé est remplacé par du fluide plus froid et plus dense, qui se réchauffe à son tour, et la boucle de convection naturelle s'établit ainsi dans la partie ascendante ou horizontale.

⁵ Définition des conditions de pression, température et débit dans la ligne.

⁶ Les tronçons sont repérés à partir du tronçon piqué sur la boucle primaire.

Au-delà du front de vortex, une boucle de convection naturelle est considérée, conduisant à l'apparition d'une stratification thermique dans les tronçons horizontaux non isolables de ces lignes.

Ainsi, les tronçons verticaux ascendants sont considérés « chauds », à la température du circuit primaire, et les tronçons horizontaux stratifiés.

Pour les situations de 2^e catégorie⁷, deux approches ont été utilisées par EDF pour prendre en compte la stratification thermique dans les lignes de charge lorsqu'elles passent en configuration bras morts à la suite de leur isolement. Elles consistent, pour la première à définir un transitoire unique enveloppe, et pour la deuxième, à optimiser ce transitoire.

Pour les situations de 3^e et 4^e catégories, le profil de température avec stratification défini pour les états permanents est appliqué à l'instant initial.

L'IRSN estime que l'ajout de transitoires pour prendre en compte la présence de la stratification thermique dans les lignes de charge RCV de l'EPR FA3 est satisfaisante. Néanmoins, le caractère enveloppe de la caractérisation bras morts retenue devra être confirmé par le programme d'instrumentation de ces lignes.

2.2.2. Essais avec instrumentation spécifique

EDF a établi un programme d'instrumentation des deux lignes de charge RCV, afin de mesurer l'évolution de la température dans ces lignes lors de leur isolement. Dans la configuration d'essai retenue par EDF, la température initiale dans les lignes de charge est « chaude » (environ 280 °C, pour une température primaire moyenne d'environ 303 °C).

Des couronnes de thermocouples seront positionnées en différents points des lignes de charge, en particulier dans les tronçons horizontaux où la stratification est attendue. Sur la ligne de charge connectée en BF n°2, l'instrumentation située sur le second tronçon horizontal non isolable est positionnée à proximité du premier organe d'isolement. **L'IRSN a estimé qu'il serait pertinent d'ajouter une seconde couronne de thermocouples au milieu de ce tronçon, compte tenu des phénomènes de convection naturelle⁸, ce qu'EDF s'est engagé à faire.**

De plus, l'essai instrumenté prévu sera réalisé une fois sur chacune des lignes de charge RCV. **L'IRSN souligne positivement le fait que les deux lignes de charge, qui possèdent des géométries différentes, soient instrumentées lors des essais. Cependant, l'IRSN estime que la réalisation d'un essai unique n'est pas suffisante compte tenu de la variabilité des configurations conduisant à des phénomènes de stratification.**

Par ailleurs, l'IRSN note qu'aucun essai d'isolement des lignes de charge RCV avec une température initiale « froide » (50 °C) n'est prévu, alors que cette configuration est la plus pénalisante au regard de la stratification thermique dans les zones d'intérêt. De ce fait, l'IRSN estime que le caractère enveloppe de la caractérisation bras morts retenue ne peut être vérifié par l'essai prévu par l'exploitant.

À l'issue de l'expertise, EDF s'est engagé à réaliser sur chacune des lignes de charge RCV un essai supplémentaire avec un isolement initié « à froid », sous réserve que soient réunies les conditions de succès de cet essai pendant les essais de requalification d'ensemble du réacteur. L'IRSN estime que l'engagement d'EDF est satisfaisant sur le principe, et note qu'EDF a prévu des dispositions pour limiter les risques associés à cet essai. Si malgré ces dispositions, il n'était pas possible de réaliser l'essai avec isolement « à froid », une

⁷ Les situations sont classées en trois catégories, en fonction de leur fréquence d'occurrence estimée.

⁸ Si les thermocouples sont situés à l'extrémité de la boucle de convection, dans la zone de retournement de l'écoulement, les différences de température mesurées risquent d'être plus faibles par rapport à celles existantes dans les zones stratifiées plus centrales.

instrumentation pérenne pourrait selon l'IRSN être mise en place sur les lignes de charge RCV durant l'exploitation du réacteur, afin de s'assurer du caractère enveloppe de la caractérisation bras morts retenue.

2.3. LIGNES DE DECHARGE RCV

Sur l'EPR FA3, le tronçon non isolable de la ligne de décharge RCV est constitué d'un tronçon vertical descendant suivi d'un tronçon horizontal. Le front de vortex est supposé arriver dans le tronçon horizontal mais sans atteindre le premier organe d'isolement. Ainsi, le tronçon vertical descendant et une partie du tronçon horizontal, jusqu'au front de vortex, sont considérés « chauds », à la température du circuit primaire. Le tronçon horizontal au-delà du front de vortex est supposé stratifié.

Pour les situations de 2^e catégorie, parmi les deux transitoires définis pour décrire le passage de la ligne de décharge en configuration bras morts, seul un transitoire présente une durée d'isolement suffisante de la décharge pour considérer l'apparition de la stratification dans le tronçon non isolable horizontal au-delà du front de vortex. Dans cette configuration, l'amplitude de la stratification attendue est très faible (4°C). Ainsi, aucun programme d'instrumentation n'est prévu pour la ligne de décharge RCV.

Pour les situations de 3^e et 4^e catégories, le profil de température stratifié défini pour les états permanents s'applique, la durée d'isolement de la décharge pouvant être suffisamment longue pour permettre la mise en place d'une stratification dans la ligne. Pour ces transitoires, l'IRSN note, d'une part, que les chargements stratifiés sont conformes au REX du parc en fonctionnement, d'autre part que seuls les transitoires enveloppes en termes de pression, température et débit sont retenus dans les calculs mécaniques. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Au vu de ces éléments, l'IRSN a la raisonnable assurance que la caractérisation bras morts définie pour la ligne de décharge RCV de l'EPR FA3 est enveloppe, et estime acceptable de ne pas réaliser d'essais avec une instrumentation spécifique sur cette ligne.

3. LIGNES ASG

3.1. PHENOMENES THERMOHYDRAULIQUES ET CARACTERISATION ASSOCIEE

La tuyauterie ASG (tronçon horizontal connecté au générateur de vapeur (GV) jusqu'au coude de transition vers la partie verticale) est le siège d'un phénomène de stratification thermique⁹, lors de la mise en service des pompes ASG ou lors de l'isolement de l'ASG. La caractérisation de ce phénomène est réalisée à partir du REX des EPR à l'international et de calculs CFD¹⁰.

L'IRSN souligne que la situation simulée ici correspond à un écoulement en convection naturelle, configuration dans laquelle les outils de calcul scientifique (OCS) CFD peuvent présenter des lacunes de validation et des incertitudes élevées. **À l'issue de l'expertise, EDF s'est engagé à transmettre le dossier de validation de l'OCS utilisé, ce qui est satisfaisant sur le principe.** Par ailleurs, des essais avec instrumentation spécifique sont prévus afin de s'assurer du caractère enveloppe de la caractérisation retenue pour la stratification thermique.

⁹ La stratification thermique est due à la présence de deux fluides à des températures très différentes : un fluide « froid » issu du système ASG, et un fluide « chaud » provenant de la recirculation à travers le tore d'alimentation du GV, à une température proche de la saturation.

¹⁰ Computational Fluid Dynamics (CFD) : un logiciel de thermohydraulique de type « CFD » permet de représenter les écoulements de fluide à l'échelle locale par résolution des équations de Navier-Stokes moyennées en temps et en espace, sur une discrétisation du domaine constituée de mailles de l'ordre du millimètre au centimètre.

3.2. ESSAIS AVEC INSTRUMENTATION SPECIFIQUE

L'essai prévu par EDF est un essai d'injection d'ASG à plein débit en arrêt à chaud dans un GV pressurisé, suivi de sa mise hors service. Concernant l'instrumentation, des thermocouples répartis sur trois anneaux seront installés autour de la tuyauterie horizontale d'une ligne ASG, et un thermocouple sera mis en place sur la partie verticale qui suit.

Au cours de l'expertise, EDF a indiqué que l'essai ne serait pas réalisé à la température initiale maximale retenue dans les caractérisations CFD, mais à une température légèrement inférieure (5 °C). Cependant, cette configuration d'essai correspond bien au transitoire de catégorie 2 le plus pénalisant pour l'ASG au regard du phénomène de stratification redouté. EDF conservera de manière pénalisante pour les études mécaniques la caractérisation de stratification enveloppe définie à partir des calculs CFD, **ce que l'IRSN souligne positivement. De plus, l'IRSN estime que ce conservatisme pourrait permettre de couvrir les incertitudes de modélisation ou d'éventuels biais de modélisation associés à ces calculs CFD.**

En revanche, l'IRSN a estimé que disposer de mesures sur une seule ligne ASG lors d'un essai unique n'est pas suffisant, compte tenu de la variabilité des phénomènes et des configurations à couvrir. Pour répondre à cette réserve, EDF s'est engagé à instrumenter une deuxième ligne ASG pour disposer d'éléments complémentaires, ce qui est satisfaisant.

4. CONCLUSION

Au terme de son expertise, compte tenu des engagements pris par EDF et moyennant la réalisation de l'essai avec isolement « à froid » des lignes de charge RCV, l'IRSN considère que les essais envisagés sur les lignes des systèmes RCV et ASG sont représentatifs et permettent de couvrir les situations présentant des phénomènes de stratification thermique, et que l'instrumentation prévue sur ces lignes est suffisante.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Olivier DUBOIS

Directeur adjoint de l'expertise de sûreté