

Monsieur le Directeur de la Direction des centrales nucléaires

Fontenay-aux-Roses, le 24 avril 2026

AVIS D'EXPERTISE N° 2026-00042 DU 24 AVRIL 2026

Objet : Validité de la corrélation de flux critique FC2002r en présence de lame d'eau élargie - Réponse à la prescription technique [Étude-B] émise dans le cadre du RP4 900.

Références : [1] Saisine ASNR – CODEP-DCN-2025-014151 du 28 février 2025.
[2] Décision n° 2023-DC-0774 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 19 décembre 2023.

Conformément à la saisine en référence [1], la Direction de l'expertise en sûreté de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR) a examiné l'acceptabilité, sur le plan de la sûreté, de la réponse d'EDF à la prescription technique [Étude-B], rappelée en annexe au présent avis, émise par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) [2] à l'issue du quatrième réexamen périodique des réacteurs de 900 MWe (RP4 900). Cette prescription demande à EDF de réaliser des essais de flux critique¹ pour valider l'applicabilité de la corrélation de flux critique FC2002r en périphérie des assemblages déformés afin d'évaluer le risque d'entrée en crise d'ébullition².

1. CONTEXTE

Les assemblages de combustible se déforment latéralement pendant leur irradiation en réacteur. Cette déformation induit une modification de l'épaisseur de la lame d'eau présente entre les assemblages par rapport à l'épaisseur nominale. L'élargissement de la lame d'eau conduit à une sur-modération des neutrons au niveau des crayons de combustible situés en périphérie de l'assemblage et donc à un accroissement de leur puissance. Le point chaud du cœur se déplace alors du centre de l'assemblage vers les crayons en périphérie. Concernant le risque d'entrée en crise d'ébullition, deux phénomènes antagonistes prennent place. Le fluide en périphérie des assemblages est en effet soumis à :

- une augmentation du flux thermique qui réduit la marge à la crise d'ébullition ;
- une augmentation de la vitesse massique locale qui accroît la marge à la crise d'ébullition.

Peu d'éléments de connaissances disponibles permettent de hiérarchiser ces deux phénomènes. Par ailleurs, la périphérie d'assemblage est caractérisée par une absence d'ailettes de mélange au niveau des grilles, ce qui est défavorable en termes de flux critique.

Une corrélation de flux critique permet, en fonction des conditions thermohydrauliques locales (pression, titre thermodynamique³ et vitesse massique du réfrigérant), de prédire le flux critique et de vérifier le dimensionnement des alarmes et des protections du cœur du réacteur contre le risque d'entrée en crise d'ébullition. Or la corrélation

¹ Le flux critique correspond au niveau de flux thermique qui conduirait à l'apparition de la crise d'ébullition.

² La crise d'ébullition conduit à une forte dégradation des conditions de refroidissement du combustible.

³ Le titre thermodynamique permet d'évaluer le taux de passage du liquide à l'état de vapeur. Il est défini par la différence entre l'enthalpie du fluide et l'enthalpie du liquide à saturation, normalisée par la chaleur latente de vaporisation.

utilisée dans les études de sûreté, appelée FC2002r, est établie sur la base d'essais représentatifs du centre des assemblages de combustible.

C'est la raison pour laquelle EDF a réalisé, à la demande de l'ASN, de nouveaux essais de flux critique pour valider l'applicabilité de la corrélation de flux critique FC2002r en périphérie des assemblages déformés.

Conformément à la saisine en référence [1], la Direction de l'expertise en sûreté a analysé le dispositif expérimental et l'instrumentation mis en œuvre, la modélisation retenue pour le dépouillement des essais de flux critique ainsi que la transposabilité des résultats d'essais aux conditions rencontrées dans le cas d'un réacteur.

Après avoir rappelé les principes d'élaboration d'une corrélation de flux critique, la Direction de l'expertise en sûreté présente ci-après les conclusions de son analyse.

2. RAPPEL DES PRINCIPES D'ÉLABORATION D'UNE CORRÉLATION DE FLUX CRITIQUE

Étant donné les géométries très particulières des assemblages de combustible et des grilles de mélange, la corrélation de flux critique est établie grâce à :

- des essais de mélange permettant de caractériser les coefficients de mélange associés aux grilles des assemblages de combustible ;
- des essais de flux critique permettant d'évaluer, à l'aide d'un outil de calcul de thermohydraulique cœur à l'échelle « sous-canal »⁴, les conditions thermohydrauliques locales pour lesquelles se produit la crise d'ébullition car les paramètres fluides locaux ne peuvent pas être mesurés.

Afin de garantir l'absence de crise d'ébullition, il est nécessaire que la corrélation soit conservatrice, c'est-à-dire qu'elle sous-estime la valeur du flux critique réel. Afin de garantir ce conservatisme, la corrélation peut être volontairement biaisée. Ce biais est introduit via des valeurs de critères issues d'analyses statistiques des écarts observés entre les flux critiques mesurés et ceux prédits par la corrélation. Afin de démontrer l'applicabilité de la corrélation de flux critique FC2002r en périphérie d'assemblage, il est nécessaire de s'assurer que les critères établis pour cette corrélation au centre des assemblages de combustible sont toujours respectés lors de l'analyse des essais dédiés à la réponse à la prescription technique [Étude-B] (en périphérie des assemblages déformés).

3. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET INSTRUMENTATION

En réponse à la prescription technique [Étude-B], EDF a défini un programme expérimental d'essais de flux critique qui ont été réalisés avec un dispositif expérimental et une instrumentation associée qui sont conformes à l'état de l'art. Trois campagnes d'essais de mélange et de flux critique ont été menées sur des sections d'essais représentatives du combustible, de type AFA de conception FRAMATOME, chargé dans les réacteurs de 900 MWe, notamment en termes de hauteur chauffante et de caractéristiques des grilles de mélange en périphérie d'assemblages et ce, pour plusieurs épaisseurs d'espace inter-assemblage (ou lames d'eau). **La Direction de l'expertise en sûreté estime suffisant le niveau de fiabilité des données expérimentales obtenues pour permettre la valorisation des essais de ce programme dans le cadre de la réponse à la prescription technique [Étude-B].**

Néanmoins, le domaine en titre thermodynamique couvert par les essais de flux critique est limité aux valeurs positives, comprises entre 0 et 40 %. Ainsi, les conclusions de la réponse à la prescription technique [Étude-B] sont applicables au domaine de titres thermodynamiques couvert par les essais réalisés. La corrélation FC2002r est valide jusqu'à 40 % et les titres thermodynamiques supérieurs à cette valeur ne présentent pas d'enjeu dans le cadre des études de sûreté. En revanche, **il appartiendra à EDF de justifier la suffisance du conservatisme**

⁴ Le sous-canal est le volume fluide unitaire encadré par quatre crayons de combustible.

des études du rapport de sûreté qui conduiraient à calculer un flux critique en lame d'eau élargie pour des titres thermodynamiques négatifs (fluide sous-saturé).

4. MODÉLISATION RETENUE POUR LE DÉPOUILLEMENT DES ESSAIS DE FLUX CRITIQUE

La modélisation mise en œuvre pour le dépouillement des essais, réalisés en réponse à la prescription technique [Étude-B], est cohérente avec celle retenue pour l'élaboration de la corrélation de flux critique FC2002r pour des crayons situés au centre des assemblages de combustible. En particulier, le même outil de calcul scientifique de thermohydraulique du cœur est utilisé pour le dépouillement ainsi que pour les études de sûreté. Seule la démarche de détermination du coefficient de mélange associé aux grilles diffère de l'approche historique, conduisant à relaxer certains conservatismes. L'analyse d'EDF montre que les critères de la corrélation de flux critique FC2002r sont toujours vérifiés pour les essais du programme expérimental avec lames d'eau élargies, ce qui permet d'attester de la validité de la corrélation pour cette configuration.

Toutefois, cette analyse est réalisée par EDF en sortie de la section d'essais alors que l'instrumentation de détection de la crise d'ébullition est positionnée légèrement en amont, ce qui impacte la valeur du flux critique prédite. **Il appartiendra donc à EDF d'évaluer le biais résultant de l'écart entre la cote de détection de la crise d'ébullition et la cote de calcul du flux critique prédit, et de vérifier qu'il ne remet pas en cause l'applicabilité de la corrélation de flux critique FC2002r pour les lames d'eau élargies.**

En outre, l'analyse proposée par EDF ne justifie pas le choix du maillage axial retenu pour modéliser les essais. Les critères étant sensibles au choix du maillage axial, la cohérence entre celui retenu pour l'analyse des essais et celui retenu pour les études de sûreté devrait être vérifiée. Ainsi, **la Direction de l'expertise estime qu'il appartiendra à EDF de s'assurer de la cohérence entre le maillage axial retenu pour l'analyse des essais et celui retenu pour les études de sûreté.**

Enfin, malgré une légère relaxation du conservatisme du flux critique calculé, liée à la détermination du coefficient de mélange, **la Direction de l'expertise en sûreté a la raisonnable assurance que la modélisation du mélange retenue pour l'analyse des essais reste suffisamment enveloppe.**

5. TRANSPOSABILITÉ DES RÉSULTATS D'ESSAIS AU CAS RÉACTEUR

L'expertise du programme expérimental en support à la réponse d'EDF a mis en évidence un effet non-négligeable des écoulements transverses dans les essais qui simulent l'espace inter-assemblage. En effet, l'écoulement obtenu en sortie de la section d'essais est fortement dissymétrique, ce qui a conduit à des détections de la crise d'ébullition à des localisations où les conditions thermohydrauliques ne sont *a priori* pas les plus pénalisantes. Toutefois, il est observé expérimentalement que le flux critique en périphérie d'assemblage, même en présence de lame d'eau élargie, reste du même ordre de grandeur que celui mesuré pour des configurations représentatives du centre de l'assemblage, ce qui conforte l'exploitabilité des essais dans le présent cadre. Ainsi, **la Direction de l'expertise en sûreté a la raisonnable assurance que les conclusions de l'analyse des essais du présent programme avec la corrélation de flux critique FC2002r sont transposables au cas réacteur. Cette conclusion, notamment la bonne prise en compte des écoulements transverses et leur influence sur le flux critique, mérite toutefois d'être confortée, ce qui devra faire l'objet d'échanges avec EDF.**

Par ailleurs, EDF valorise, dans les études de la démonstration de sûreté, un terme correctif lié à la variation de la section de passage entre les crayons en périphérie d'assemblage, qui ne semble pas être utilisé dans l'analyse des essais dédiés à la réponse à la prescription technique [Étude-B]. **Il appartiendra à EDF de justifier le caractère conservatif de cette différence de modélisation.**

6. CONCLUSION

Nonobstant les points d'attention identifiés lors de l'analyse des campagnes de flux critique réalisées en support à la réponse à la prescription technique [Étude-B], la Direction de l'expertise en sûreté considère que les résultats permettent de conclure à l'applicabilité de la corrélation FC2002r pour la configuration de lame d'eau élargie investiguée. Par ailleurs, l'analyse des résultats disponibles tend à montrer que la corrélation FC2002r reste applicable en cas d'élargissement plus important de la lame d'eau.

Au regard de ces éléments, la Direction de l'expertise en sûreté estime acceptable la réponse d'EDF à la prescription technique [Étude-B].

Pour le Directeur de l'expertise en sûreté

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise en sûreté

ANNEXE

Rappel de la prescription de l'Autorité de sûreté nucléaire

Rappel de la prescription [Étude-B] de la décision n° 2023-DC-0774 du 19 décembre 2023

« Au plus tard le 31 décembre 2024, l'exploitant évalue, par une démarche expérimentale, la validité de la corrélation de flux critique utilisée en périphérie des assemblages déformés. À la même date, il définit le programme de travail à mener pour prendre en compte les enseignements de cette démarche expérimentale et le calendrier associé.

L'exploitant transmet au plus tard le 30 juin 2021 un programme détaillé des configurations d'essais à réaliser. »