

Paris, le 9 juillet 2012

**Réf. : CODEP-DCN-2012-026566**

**Monsieur le Directeur  
Division Ingénierie Nucléaire  
EDF  
Site Cap Ampère – 1 place Pleyel  
93 282 SAINT-DENIS CEDEX**

**Objet : Réacteurs électronucléaires – Réacteur EPR Flamanville 3  
Corrélation de flux critique pour l'évaluation du rapport de flux thermique critique dans les études de conception thermohydraulique de l'EPR**

**Réf. :** [1] Lettre EDF ENDPJC070140 du 10/10/2007  
[2] Note AREVA NEPD-F DC 10094 révision B (2007-10-04) « FC2002 – Corrélation de flux critique pour les assemblages de combustible AFA-2G et AFA-3G »  
[3] Note AREVA NEPD-F DC 10095 révision C (2007-10-04) « RFBC – Régression pour le calcul du flux critique dans le bas du cœur »

Monsieur le Directeur,

Par lettre citée en référence [1] et dans le cadre de l'instruction anticipée des études de sûreté de l'EPR de Flamanville 3, vous avez transmis à l'ASN les notes décrivant et justifiant les corrélations de flux critique FC2002 et RFBC en références [2] et [3], établies pour les assemblages de combustible AFA-2G et AFA-3G.

Le flux thermique critique à la paroi d'un crayon de combustible dans le cœur d'un réacteur correspond au flux de chaleur entraînant, dans certaines conditions thermohydrauliques, l'apparition d'un film de vapeur continu à la surface de la gaine, ce qui détériore l'échange de chaleur entre le combustible et le fluide caloporteur. Cette « crise d'ébullition » conduit à un échauffement rapide de la paroi du crayon, pouvant entraîner des dégâts sur la gaine si le phénomène n'est pas interrompu. Le rapport entre le flux thermique critique et le flux thermique local est dénommé « rapport de flux thermique critique » (RFTC).

La conception thermohydraulique du cœur vise principalement à se prémunir contre la crise d'ébullition pendant le fonctionnement normal, les transitoires d'exploitation normale et les transitoires de référence de fréquence modérée (conditions de fonctionnement de référence PCC1 et PCC2). Pour les conditions de fonctionnement de référence PCC3 et PCC4, la quantité de crayons de combustible susceptibles d'entrer en crise d'ébullition doit rester inférieure à 10 % du nombre total de crayons.

La prédiction du flux thermique critique ne peut être effectuée de manière théorique. Le flux thermique critique en un point à la surface du crayon combustible en cuve est donc estimé empiriquement à l'aide d'une relation, dénommée « corrélation de flux critique », établie entre des paramètres thermohydrauliques locaux. La forme analytique de la corrélation et ses coefficients numériques sont calculés à partir de résultats expérimentaux obtenus dans des dispositifs permettant de recréer les conditions thermohydrauliques correspondant au fonctionnement normal et accidentel dans la cuve du réacteur.

Les corrélations de flux critique FC2002 et RFBC que vous présentez sont issues de l'interprétation des résultats de plusieurs campagnes expérimentales. Vous indiquez qu'elles peuvent être utilisées pour évaluer le risque d'apparition de la crise d'ébullition dans les cœurs équipés d'assemblages de combustible AFA-XL, AFA-2G, AFA-2GL, AFA-2GE, AFA-3G et AFA-3GL. Vous souhaitez en outre mettre en œuvre ces corrélations pour les études des conditions de fonctionnement de référence du réacteur EPR de Flamanville 3 dont le cœur sera chargé en assemblages de combustible AFA-3GLE.

L'ASN et son appui technique font le constat que la grande majorité des résultats expérimentaux initiaux qui ont servi à la construction de ces deux corrélations concernent des crayons dont la partie chauffante est longue de 8 ou 12 pieds, munis de grilles de mélange de type AFA-XL et AFA-2G. Concernant les assemblages AFA-3GLE, dont la hauteur active de combustible est de 14 pieds, l'ASN et son appui technique considèrent que la base expérimentale initiale comporte un nombre de points expérimentaux trop faible pour assurer, en l'état, la validation de la corrélation FC2002. L'ASN considère, pour les mêmes raisons, que la corrélation RFBC, adaptée au bas de l'assemblage en amont de la première grille d'espacement, ne peut être utilisée sans aménagement.

**En ce qui concerne l'utilisation des corrélations de flux critique FC2002 et RFBC pour les assemblages de combustible AFA-3GLE devant être chargés dans le réacteur EPR de Flamanville 3, l'ASN vous demande de compléter la base expérimentale initiale et de mettre à jour vos notes en références [2] et [3] afin de répondre aux demandes de compléments figurant en annexe 1 avant toute utilisation dans les études des conditions de fonctionnement de référence du rapport de sûreté.**

L'observation des assemblages de combustible après leur période d'irradiation en réacteur a mis en évidence le phénomène de fléchissement des crayons. Cette déformation du faisceau de crayons induit une modification de l'écoulement du fluide caloporteur dans l'assemblage et amène une diminution du flux thermique critique. Un modèle empirique du taux de fermeture du canal entre crayons en fonction de l'épuisement du combustible, appelé « modèle de fléchissement FRAGEMA », a initialement été déterminé à partir de mesures effectuées sur des assemblages de combustible irradiés dans des réacteurs à eau sous pression de 900 MWe. Vous avez depuis complété le nombre de points expérimentaux par des mesures effectuées sur des assemblages de combustible à gainage M5. L'instruction n'a pas permis de s'assurer que le traitement statistique des mesures réalisées sur les assemblages de combustible à gainage M5 donne une valeur conservative du taux de fermeture.

**L'ASN vous demande de répondre à la demande figurant en annexe 2 avant utilisation du modèle de fléchissement FRAGEMA pour les études des conditions de fonctionnement de référence du réacteur EPR de Flamanville 3.**

Enfin, l'ASN note que les corrélations de flux critique FC2002 et RFBC ont été établies sur la base de conditions thermohydrauliques locales calculées par le code FLICA III-F. En conséquence, l'ASN considère que l'utilisation de ces corrélations de flux critique est assujettie à l'emploi de ce code. L'utilisation de ces deux corrélations avec un autre code pour l'évaluation des conditions thermohydrauliques locales nécessiterait, au préalable, la vérification de l'applicabilité des corrélations avec ce code.

Je vous prie d'agréer, Monsieur le Directeur, l'expression de ma considération distinguée.

La directrice générale adjointe,

**Signé par : Sophie MOURLON**

## **Demandes de l'ASN en vue de l'utilisation des corrélations de flux critique FC2002 et RFBC dans les études des conditions de fonctionnement de référence du réacteur EPR de Flamanville 3**

### **A. Base expérimentale utilisée pour les corrélations FC2002 et RFBC**

Le programme expérimental initial sur lequel vous vous êtes appuyé pour bâtir la corrélation de flux critique FC2002 ne comporte qu'un faible pourcentage de points expérimentaux relevés sur des crayons de longueur chauffante égale à 14 pieds. De plus, les essais sur ces crayons chauffants ont été réalisés avec un flux thermique uniforme et des grilles de mélange AFA-XL, différentes de celles qui seront utilisées dans le réacteur EPR de Flamanville 3.

**L'ASN vous demande de réaliser des essais complémentaires afin de vérifier l'applicabilité de la corrélation FC2002 aux assemblages ayant une hauteur active du combustible de 14 pieds, équipés de grilles de type AFA-3G, préalablement à l'utilisation de cette corrélation pour les études des conditions de fonctionnement de référence du réacteur EPR de Flamanville 3. Les conditions d'essais devront notamment prendre en compte différents profils de flux axial (dont des formes piquées en haut du cœur), l'effet d'un tube-guide et la présence des grilles de mélange et de maintien.**

Il est apparu au cours de l'instruction que l'ensemble initial des points expérimentaux a été utilisé pour calculer de manière optimale les coefficients numériques de la corrélation de flux critique FC2002. Il en est de même pour l'ensemble initial des points expérimentaux de la campagne d'essais de flux critique en amont de la première grille de mélange utilisé pour calculer de manière optimale les coefficients numériques de la corrélation de flux critique RFBC.

Il est d'usage, en pratique, de décomposer les valeurs expérimentales en deux échantillons distincts : les données d'optimisation dites « d'apprentissage » et les données de validation (méthode de validation croisée). Les données d'apprentissage sont utilisées pour déterminer les valeurs optimales des coefficients de la formule analytique, les données de validation sont utilisées pour vérifier le bon caractère prédictif de la formulation retenue.

Les coefficients des deux corrélations ayant été optimisés sur l'ensemble des points expérimentaux, ils n'ont pas été validés par rapport à un échantillon de données expérimentales inutilisé dans un premier temps. Cette pratique ne permet pas de s'assurer du bon comportement prédictif des corrélations pour des conditions thermohydrauliques différentes de celles correspondant aux points expérimentaux retenus.

**L'ASN vous demande de vérifier les prédictions des corrélations FC2002 et RFBC sur des données inutilisées lors de la phase d'optimisation des modèles, préalablement à toute utilisation dans les études des conditions de fonctionnement de référence du réacteur EPR de Flamanville 3.**

La forme de la corrélation FC2002 introduit un modèle à deux pentes en fonction du titre thermodynamique du fluide caloporteur avec un raccordement parabolique, la pente étant plus faible pour les titres élevés. Cette forme a été optimisée sur un faible nombre de points expérimentaux à fort titre thermodynamique ; elle manque de validation expérimentale.

**L'ASN vous demande d'apporter la démonstration de la validité de la corrélation FC2002 dans le domaine des titres thermodynamiques élevés.**

## **B. Coefficient de mélange pour les essais FC2002**

La crise d'ébullition est un phénomène local dont la modélisation nécessite la connaissance de l'état du fluide et des conditions de l'écoulement à l'endroit même où la crise d'ébullition est détectée expérimentalement. Le coefficient de mélange entre les canaux de l'assemblage est l'une des données d'entrée de la modélisation, intervenant dans le calcul du mélange turbulent entre canaux voisins. La valeur du coefficient, qui est représentatif de l'ensemble grille de maintien – grille de mélange, est déterminée lors d'essais particuliers, n'allant pas jusqu'au développement d'une crise d'ébullition, réalisés lors des campagnes expérimentales en support à l'établissement de la corrélation FC2002.

Au cours de l'instruction du dossier, vous avez confirmé que ces essais particuliers, préalables à l'établissement de la corrélation de flux critique FC2002, n'avaient été réalisés qu'avec des grilles de mélange de type AFA-XL. Les assemblages de combustible qui seront chargés dans le réacteur EPR-FA3 comporteront des grilles de mélange d'un type différent qui pourraient être caractérisées par un coefficient de mélange différent de celui issu de vos campagnes expérimentales.

**L'ASN vous demande de compléter la base d'essais utilisée en soutien à la corrélation de flux critique FC2002 par des essais spécifiques destinés notamment à caractériser le coefficient de mélange associé aux grilles équipant les assemblages AFA-3GLE du réacteur EPR de Flamanville 3.**

Une valeur conservative du coefficient de mélange, déterminée au cours des essais spécifiques, est utilisée dans les calculs thermohydrauliques servant à calculer les valeurs locales des principales grandeurs physiques lors de l'optimisation des coefficients de la corrélation FC2002.

**Dans l'hypothèse où la valeur du coefficient de mélange retenue pour la phase d'optimisation de la corrélation FC2002 serait remise en cause à la suite des essais spécifiques complémentaires, l'ASN vous demande de mettre en œuvre une démarche permettant d'assurer le conservatisme de la corrélation FC2002, préalablement à toute utilisation de la corrélation dans les études des conditions de fonctionnement de référence du réacteur EPR de Flamanville 3.**

## **C. Coefficient de mélange pour les essais RFBC**

La valeur du coefficient de mélange utilisée dans la corrélation RFBC, qui est représentatif de l'ensemble grille de maintien – grille de renfort en pied d'assemblage, a été prise égale à la médiane de la distribution des coefficients provenant des résultats d'essais de mélange spécifiques. Le coefficient de mélange que vous avez retenu dans la corrélation FC2002 correspond, lui, au 95<sup>ème</sup> centile de la distribution des coefficients issus des essais de mélange réalisés pour cette corrélation.

**Dans la mesure où le coefficient de mélange influe sur les conditions locales du fluide, l'ASN demande que les analyses statistiques portant sur l'incertitude de la corrélation RFBC soient reprises en utilisant une valeur majorante à 95 % du coefficient de mélange.**

## **D. Expression de la corrélation FC2002**

L'expression retenue pour la corrélation de flux critique FC2002 ne fait pas référence à la longueur active du combustible. D'autres corrélations de flux critique utilisent cette longueur comme paramètre dans leur expression. L'instruction du dossier n'a pas permis de conclure sur la pertinence de l'effet de longueur chauffante sur le flux critique. Cependant, la corrélation FC2002 a été établie à partir d'essais réalisés, en très grande majorité, sur des assemblages de longueur 12 pieds.

**L'ASN demande la justification, par une méthode reconnue d'analyse de sensibilité, de l'exhaustivité des paramètres retenus dans la formulation analytique de la corrélation de flux critique FC2002, en tenant compte du résultat des essais complémentaires demandés.**

## **E. Flux thermiques non-uniformes**

L'optimisation des coefficients du facteur de flux non-uniforme (FNU) n'a pas été réalisée sur l'ensemble des données expérimentales disponibles lors de l'établissement de la corrélation FC2002. Ces coefficients ont été calculés à partir des trois premières campagnes expérimentales, utilisées lors de l'établissement d'une ancienne corrélation de flux thermique critique (FC1998). Ces trois campagnes ont été réalisées avec un flux non-uniforme de forme cosinus.

**L'ASN vous demande de justifier l'applicabilité de la formulation du facteur de flux non-uniforme pour différentes formes de flux axial (formes piquées en haut du cœur notamment), préalablement à toute mise en œuvre de la corrélation dans les études des conditions de fonctionnement de référence du réacteur EPR de Flamanville 3.**

## **F. Domaine de validité des corrélations de flux critique**

Le domaine de validité des paramètres de pression, de débit massique et de titre thermodynamique du modérateur a été défini, pour les corrélations de flux critique, à l'aide des valeurs extrêmes testées expérimentalement (minimales et maximales). Certaines zones de ce domaine contiennent un nombre réduit, voire nul, de points d'essais (zones « aveugles »). La validité de la corrélation de flux critique FC2002 n'est donc pas confirmée expérimentalement dans ces zones.

**En l'absence de confirmation physique de la validité des corrélations de flux critique utilisées dans les études des conditions de fonctionnement de référence du réacteur EPR de Flamanville 3 dans les zones non couvertes expérimentalement, l'ASN vous demande de limiter leur domaine de validité aux zones couvertes expérimentalement, notamment en fixant une borne inférieure à l'intervalle de validité en titre thermodynamique.**

Les paramètres thermohydrauliques locaux calculés lors de l'étude des conditions de fonctionnement de référence peuvent, dans certains cas, être situés en dehors du domaine de validité des corrélations de flux thermique critique. En l'absence des études de conditions de fonctionnement de référence pour le réacteur EPR de Flamanville 3, l'ASN et son appui technique ne sont pas en mesure de vérifier que les conditions thermohydrauliques calculées au moment du minimum de RFTC correspondent bien au domaine de validité des corrélations de flux thermique critique.

Durant l'instruction, vous avez indiqué que la probabilité d'entrée en crise d'ébullition était prise égale à 100 % dans les études des conditions de fonctionnement de référence PCC3 et PCC4 lorsque le minimum de RFTC est obtenu pour des conditions thermohydrauliques hors du domaine de validité des corrélations. L'ASN et son appui technique jugent cette disposition conservative.

Cependant, l'ASN et son appui technique remarquent que vous ne proposez pas de pénalité sur le flux thermique critique dans les études de fonctionnement de référence PCC2 qui présenteraient des conditions thermohydrauliques calculées au moment du minimum de RFTC en dehors du domaine de validité des corrélations de flux thermique critique. De plus, l'ASN et son appui technique notent que les conditions thermohydrauliques locales que vous avez fournies durant l'instruction pour les conditions PCC2 à PCC4, et que vous jugez typiques de ces situations, se situent dans des zones du domaine de validité des corrélations de flux critique peu fournies en points expérimentaux.

**L'ASN vous demande de positionner, dans chacun des plans  $(G^1, P^2)$ ,  $(X^3, G)$  et  $(P, X)$  de la corrélation de flux thermique critique utilisée pour évaluer le RFTC minimum, les conditions thermohydrauliques locales au moment du RFTC minimum pour toutes les conditions de fonctionnement de référence du réacteur EPR de Flamanville 3.**

**Dans le cas où ces conditions locales se situeraient hors du domaine de validité des corrélations de flux thermique critique, des dispositions doivent être prises selon le type de situation :**

---

<sup>1</sup> G : vitesse massique locale

<sup>2</sup> P : pression locale

<sup>3</sup> X : titre thermodynamique à l'équilibre

- Pour les conditions de fonctionnement de référence nécessitant la vérification du nombre de crayons de combustible susceptibles d'entrer en crise d'ébullition (NCE), l'ASN vous demande d'appliquer une pénalité sur le flux critique ou sur la probabilité d'entrée en crise d'ébullition pour les canaux dont les conditions thermohydrauliques sont hors du domaine de validité de la corrélation ;
- Concernant les autres conditions de fonctionnement de référence pour lesquelles l'apparition de la crise d'ébullition doit être évitée, l'ASN vous demande de prendre en compte une valeur pénalisée du flux thermique critique dès lors que les conditions thermohydrauliques considérées sont en dehors du domaine de validité de la corrélation.

## **G. Paramètres statistiques associés aux corrélations de flux critique**

L'un des objectifs de l'analyse statistique de la distribution des rapports « flux mesuré/flux prédit par la corrélation » est la détermination de paramètres statistiques utilisés par la suite dans les études de thermohydraulique.

Le traitement statistique classique des campagnes de flux critique suppose que les rapports « flux mesuré/flux prédit par la corrélation » des campagnes soient identiquement distribués et qu'ils suivent une loi normale.

L'analyse de la variance des rapports « flux mesuré/flux prédit par la corrélation » des campagnes expérimentales pour la détermination de la corrélation de flux critique FC2002 a montré une hétérogénéité assez forte. Un traitement mathématique spécifique a été appliqué en amont du traitement statistique classique afin de satisfaire les critères nécessaires à ce traitement. L'ASN considère que le traitement mis en œuvre pour la détermination des paramètres statistiques de la corrélation de flux critique FC2002 manque de justification.

**L'ASN vous demande de réévaluer, à partir de méthodes statistiques conventionnelles, la valeur des paramètres statistiques de la distribution des rapports « flux mesuré/flux prédit par la corrélation » retenues pour la corrélation de flux critique FC2002 et la valeur de la limite de conception associée à l'utilisation de la corrélation.**

L'instruction a montré que la base de données expérimentales retenue pour établir la forme et les coefficients de la corrélation de flux critique RFBC n'était pas représentative du comportement thermohydraulique d'une bi-grille non-mélangeuse (sans ailettes). Pour contourner cette difficulté, vous avez pénalisé la moyenne des rapports « flux mesuré/flux prédit par la corrélation » en utilisant les données de la corrélation FC2002 ; l'écart-type des rapports n'a, quant à lui, pas été pénalisé. L'ASN considère que cette démarche, destinée à pallier la non-représentativité des données expérimentales vis-à-vis des grilles avec ailettes, n'est pas justifiée.

**L'ASN vous demande de réévaluer, à partir de données expérimentales représentatives des grilles sans ailettes, la valeur des paramètres statistiques de cette corrélation et la valeur de la limite de conception associée à l'utilisation de la corrélation.**

## **Demande de l'ASN en vue de l'utilisation du modèle de fléchissement dans les études des conditions de fonctionnement de référence du réacteur EPR de Flamanville 3**

### **H. Pénalités de fléchissement**

Le fléchissement des crayons de combustible à la suite de leur irradiation en cuve n'est pas modélisé dans les études thermohydrauliques. Une « pénalité de fléchissement » est prise en compte dans les calculs et est appliquée au critère de RFTC. Cette pénalité repose notamment sur une loi enveloppe définissant le taux de fermeture du canal en fonction de l'épuisement du combustible, basée sur des mesures de fléchissement d'assemblages irradiés.

Cette loi enveloppe, jusqu'à un épuisement moyen de 44,6 GWj/t, a été initialement établie pour la conception d'EPR à partir de l'exploitation de mesures effectuées sur des assemblages de combustible irradiés dans des réacteurs à eau sous pression de 900 MWe.

Plus récemment, dans le cadre des gestions de combustible ALCADE et GALICE, vous avez réalisé des mesures de taux de fermeture entre crayons sur des assemblages de combustible à gainage M5 jusqu'à des taux de combustion de 58 GWj/t.

L'instruction a mis en évidence que l'exactitude du traitement de ces données mis en œuvre pour déterminer le taux de fermeture « expérimental » reposait notamment sur le fait que l'étage des assemblages de combustible présentant la plus grande dispersion des résultats était également l'étage présentant le plus grand taux de fermeture.

**Afin de s'assurer du caractère conservatif de la valeur du taux de fermeture retenue dans la comparaison avec la condition limite de conception, l'ASN vous demande de transmettre les résultats de mesures sur les assemblages de combustible à gainage M5, soit 64 mesures par étage et pour chaque assemblage de mêmes caractéristiques, ainsi que les étapes permettant de déterminer ce taux de fermeture.**