

Fontenay-aux-Roses, le 11 février 2011

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

Avis/IRSN N° 2011-66

Objet : Corrélations de flux critique pour l'évaluation du rapport de flux thermique critique dans les études de conception thermohydraulique de l'EPR

Réf. Lettre ASN CODEP-DCN-00670-2009 du 21 décembre 2009

L'objet de cet avis est de répondre à la lettre citée en référence par laquelle l'ASN sollicite l'avis de l'IRSN sur :

- les corrélations de flux critique proposées par EDF pour évaluer le risque de crise d'ébullition dans les études de conception thermohydraulique et les études de sûreté de l'EPR FA3 ;
- le caractère générique et la validation des modèles empiriques retenus pour évaluer la pénalité de fléchissement pour l'analyse des conditions de fonctionnement du réacteur EPR.

### PRINCIPES D'ELABORATION DES CORRELATIONS DE FLUX CRITIQUE

Le Rapport de Flux Thermique Critique (RFTC) est calculé à l'aide d'une corrélation de flux critique qui donne sa valeur en fonction des paramètres décrivant l'état local du fluide primaire (pression (P), titre thermodynamique (X), Vitesse massique (G)).

Etant donné les géométries très particulières des assemblages de combustible, 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 code de calcul de type « sous-canal » FLICA III-F, les conditions thermohydrauliques locales pour lesquelles se produit l'ébullition critique car les paramètres fluides locaux ne peuvent pas être mesurés.

La base expérimentale utilisée pour établir la corrélation de flux critique applicable à l'assemblage AFA-3GLE (combustible de référence de l'EPR) est essentiellement constituée par des résultats d'essais d'assemblages combustibles d'AREVA NP effectués sur la boucle OMEGA du CEA (Centre d'études nucléaires de Grenoble) et sur la boucle de l'université COLUMBIA de New-York. Les faisceaux de crayons utilisés pour les essais, appelés grappes, sont composés de 25 crayons chauffants, disposés

#### 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 B 440 546 018

en réseau carré 5 x 5, soutenus par des grilles. Les essais sont généralement réalisés à l'échelle géométrique 1 et pour des conditions thermohydrauliques représentatives des conditions réacteur.

Les formulations analytiques retenues pour les corrélations de flux critique font intervenir des coefficients qui sont déterminés par une méthode itérative d'optimisation linéaire, consistant à minimiser la somme des écarts quadratiques entre les flux critiques mesurés et les flux critiques prédits.

## **ANALYSE DE LA CORRELATION DE FLUX CRITIQUE FC2002**

EDF propose d'utiliser la corrélation de flux critique établie par le concepteur AREVA NP (dénommée FC2002) pour évaluer le risque d'apparition de la crise d'ébullition dans les cœurs des REP équipés d'assemblages de combustibles de type AFA-XL, AFA-2G, AFA-2GL, AFA-2GE, AFA-3G (sans et avec Grilles Intermédiaires de Mélange) et AFA-3GL (sans et avec Grilles Intermédiaires de Mélange). La corrélation FC2002 est fondée sur des essais modélisant les grilles mélangeuses de type AFA-XL et AFA-2G, munies d'ailettes (dites mélangeuses) et situées dans la partie courante de l'assemblage du combustible.

### **Suffisance de la base d'essais de mélange**

L'IRSN note que les essais de mélange n'ont été réalisés qu'avec des grilles de mélange de type AFA-XL, les performances thermohydrauliques des grilles AFA-2G et AFA-3G n'ayant pas été évaluées. En conséquence, l'IRSN n'est pas en mesure de se prononcer sur l'applicabilité des coefficients de mélange aux assemblages équipés de ce type de grilles. L'IRSN considère nécessaire que soient caractérisées les performances en mélange des grilles de l'assemblage AFA-3GLE qui équiperont les réacteurs EPR, d'où la recommandation n°1.

De plus, l'IRSN estime que la variété des configurations testées est insuffisante pour démontrer le caractère enveloppe de la valeur du coefficient de mélange retenu pour les études permettant de déterminer les paramètres de la corrélation FC2002. Ce constat conduit à la recommandation n°2 en annexe.

### **Suffisance de la base d'essais de flux critique**

De manière générale, l'IRSN estime que le niveau de couverture des essais de flux critique réalisés avec une grappe de longueur chauffante de 12 ft (pieds) est satisfaisant. Compte tenu des essais réalisés, l'IRSN considère que la corrélation FC2002 peut être utilisée pour évaluer le Rapport de Flux Thermique Critique (RFTC) dans les cœurs des réacteurs équipés d'assemblages de longueur chauffante 12 ft avec des grilles de type AFA-XL et AFA-2G, sous réserve de la prise en compte des recommandations 5 et 6.

Toutefois, l'IRSN note que le programme expérimental présente des lacunes importantes pour les assemblages de longueur chauffante 14 ft pour lesquels une seule campagne de 30 essais (sur 1609 essais) a été réalisée. De plus, l'IRSN souligne que la base de données expérimentales 14 ft est uniquement constituée de résultats d'essais réalisés avec une forme de flux uniforme. L'IRSN considère donc que le caractère très limité du programme expérimental 14 ft et son faible niveau de couverture ne permettent pas de garantir l'applicabilité de la corrélation FC2002 pour l'assemblage 14 ft.

En conséquence, l'IRSN estime qu'EDF doit compléter son dossier par des éléments démontrant l'applicabilité de la corrélation FC2002 aux assemblages 14 ft équipés de grilles de type AFA-3G, et ce conformément à la recommandation n°3 figurant en annexe. L'IRSN considère que cette démonstration devra s'appuyer sur des résultats d'essais supplémentaires de flux critique prenant en compte différents profils de flux axial, l'effet de la présence éventuelle d'un tube-guide, la présence des grilles de mélange et de maintien représentatives de l'AFA-3G.

*Optimisation et validation de la corrélation FC2002 et du facteur de flux non uniforme (FNU)*

L'IRSN note que la corrélation FC2002 revêt une forme analytique complexe, faisant intervenir des paramètres thermohydrauliques considérés comme ayant une influence sur le flux critique, des paramètres géométriques ainsi que des coefficients numériques dont les valeurs sont déterminées sur la base de résultats expérimentaux. L'IRSN considère qu'EDF doit justifier de manière probante l'exhaustivité des paramètres retenus dans la formulation analytique, et notamment l'absence d'influence significative de la longueur chauffante, ce qui fait l'objet de la recommandation n°4 en annexe.

De plus, l'IRSN attire l'attention sur le fait que les coefficients de la corrélation ont été optimisés en utilisant l'ensemble de l'échantillon des valeurs expérimentales et qu'ils n'ont donc pas été validés par rapport à des données non utilisées en phase d'optimisation. L'IRSN considère que la corrélation FC2002 doit être validée sur des données n'ayant pas servi à l'optimisation des coefficients de la formulation analytique, conformément à la recommandation n°5.

Pour tenir compte de la distribution axiale de flux non-uniforme, les valeurs du flux critique prédit sont corrigées par un facteur de flux non-uniforme (FNU), dont les coefficients sont ajustés à partir d'essais réalisés avec des flux non-uniformes. L'IRSN note que le facteur de flux non-uniforme associé à la corrélation FC2002 n'est validé que sur la base d'essais réalisés avec des assemblages de longueur chauffante 12 ft et pour des formes de flux symétriques de type « cosinus ». L'IRSN estime que cette validation du facteur de flux non-uniforme présente des lacunes significatives pour les configurations présentant des flux piqués dans le haut du cœur, représentatifs de ceux rencontrés en situation incidentelle et accidentelle, et des configurations d'assemblages de longueur chauffante de 14 ft.

En conséquence, l'IRSN considère qu'EDF doit apporter des éléments complémentaires permettant de valider la formulation du facteur de flux non-uniforme pour des assemblages de longueur chauffante 14 ft et pour d'autres formes de flux, préalablement à son utilisation dans la démonstration de sûreté, ce qui fait l'objet de la recommandation n°6 figurant en annexe. Cette démonstration s'appuiera sur les résultats d'essais de flux critique prenant en compte différents profils de flux axial, faisant l'objet de la recommandation n°3.

Enfin, l'IRSN attire l'attention sur le fait que la corrélation FC2002 étant établie sur la base de conditions locales calculées par le code FLICA III-F, l'utilisation de la corrélation FC2002 est assujettie à l'utilisation de ce code. Si EDF souhaite utiliser un autre code pour évaluer les conditions locales, il devra vérifier en préalable l'applicabilité de la corrélation à l'aide de ce code.

### Gain en flux critique apporté par la corrélation FC2002

L'IRSN note que le gain en flux critique apporté par la corrélation FC2002 par rapport à la corrélation WRB1 est important, de l'ordre de 8% en relatif pour un flux uniforme. Ce résultat peut s'expliquer par une formulation analytique, une optimisation adaptée aux grilles AFA-XL et AFA-2G et une base de données différentes pour les 2 corrélations. En tout état de cause, l'IRSN considère que la corrélation FC2002 et son facteur de flux non uniforme (FNU) devront faire l'objet d'une validation approfondie pour confirmer ce gain, conformément aux recommandations n°3 et 6 formulées en annexe.

### Qualité de la base de données FC2002

L'IRSN a analysé la base de données des points d'essais de flux critique et des conditions locales de fluide ayant permis l'optimisation de la corrélation FC2002. L'IRSN note que, pour mener à bien cette analyse, le concepteur a dû régénérer la base de données des rapports Flux Mesurés/Flux Prédits (M/P) à l'emplacement de tous les capteurs de mesure de température, dont est issue la base de données au minimum de RFTC.

L'IRSN considère que des incohérences subsistent dans la base de données FC2002 obtenue au minimum de RFTC et qu'elles ne permettent pas de lever, à ce jour, toutes les réserves relatives à la qualité de la base de données FC2002, d'où la recommandation n°7 figurant en annexe.

### ANALYSE DE LA CORRELATION DE FLUX CRITIQUE RFBC

La grille d'extrémité, placée tout en bas de l'assemblage combustible, étant dépourvue d'ailettes afin de réduire la perte de charge subie par le fluide à la traversée du cœur, la corrélation FC2002 n'est par conséquent pas applicable dans le bas du cœur. EDF propose de déterminer le RFTC dans la zone comprise entre la grille d'extrémité inférieure et la première grille mélangeuse au moyen d'une corrélation appropriée (dénommée RFBC - Régression Framatome pour le Bas du Cœur) représentant les performances thermohydrauliques d'une grille non-mélangeuse (sans ailettes).

L'IRSN attire l'attention sur le fait que les configurations d'essais de flux critique et de mélange réalisées pour élaborer la corrélation RFBC ne sont pas représentatives de l'assemblage AFA-3GLE qui sera introduit sur EPR, notamment du fait de l'absence de bi-grille et d'un espacement inter-grille plus important.

De plus, l'IRSN souligne que la démarche retenue pour établir la corrélation RFBC n'est pas adaptée en raison du faible nombre de points d'essais (85) en regard du nombre important de coefficients de la corrélation (17). De plus, l'IRSN note que cette démarche n'est pas cohérente avec celle mise en œuvre pour FC2002, du fait de l'utilisation d'une valeur de coefficient de mélange best-estimate (percentile à 50% au lieu du percentile à 95%) pour le dépouillement des essais de flux critique dédiés à la corrélation RFBC. Sur la base de ces éléments, l'IRSN considère que l'optimisation de la corrélation RFBC doit prendre en compte une valeur majorante du coefficient de mélange, ce qui fait l'objet de la recommandation n°8 en annexe.

Par ailleurs, l'IRSN souligne que les coefficients de la corrélation RFBC n'ont pas été validés sur des données non utilisées en phase d'optimisation. Ce constat conduit à la recommandation n° 9 en annexe.

## DOMAINE DE VALIDITE DES CORRELATIONS DE FLUX CRITIQUE FC2002 ET RFBC

Pour définir les domaines de validité des corrélations FC2002 et RFBC, EDF retient les valeurs extrêmes des paramètres thermohydrauliques atteintes lors des essais de flux critique. A cet égard, l'IRSN souligne que certaines zones de ce domaine contiennent un nombre réduit voire nul de points d'essais. L'IRSN considère donc qu'EDF doit apporter des éléments complémentaires justifiant l'extrapolation du domaine de validité des corrélations FC2002 et RFBC aux zones non couvertes expérimentalement. Dans le cas contraire, le domaine de validité de ces deux corrélations devra être limité aux zones couvertes expérimentalement, ce qui fait l'objet de la recommandation n°10 en annexe.

## APPLICATION DES CORRELATIONS FC2002 ET RFBC DANS LA DEMONSTRATION DE SURETE

### Applicabilité des corrélations aux conditions réacteur

Les études d'accident d'EPR Flamanville 3 n'étant pas disponibles au moment de cette instruction, l'IRSN n'a pas été en mesure de vérifier que les conditions thermohydrauliques locales atteintes au moment du minimum de RFTC sont incluses dans le domaine de validité des corrélations. L'IRSN considère que des dispositions devront être prises en compte par EDF au cas où ces conditions locales se situent en dehors du domaine d'application des corrélations, d'où la recommandation n° 11 figurant en annexe.

### Critères de conception et paramètres statistiques associés aux corrélations de flux critique

Le traitement statistique classique des campagnes de flux critique (détermination des valeurs pénalisées de la moyenne et de l'écart type et du critère de conception par la théorie d'Owen) suppose que les rapports flux mesurés/flux prédits par la corrélation des campagnes soient identiquement distribués et suivent une distribution normale.

L'analyse de la variance des campagnes de la base de données FC2002 ayant montré une assez forte hétérogénéité, l'IRSN note qu'un traitement spécifique leur a été appliqué par le concepteur (renormalisation, puis pénalisation des moyennes) afin de satisfaire les critères autorisant le traitement statistique classique.

En ce qui concerne la corrélation FC2002, l'IRSN souligne que la justification de la pertinence du traitement statistique "sur-mesure" de renormalisation et de pénalisation des paramètres statistiques n'a pas été apportée par EDF. Ce constat conduit à la recommandation n°12 figurant en annexe.

En ce qui concerne la corrélation RFBC, l'IRSN estime que la méthode utilisée pour prendre en compte l'incertitude statistique découlant de l'emploi d'une seule campagne n'est pas justifiée. De ce fait, l'IRSN estime qu'EDF doit réévaluer les paramètres statistiques à partir de données expérimentales représentatives de grilles sans ailettes, ce qui fait l'objet de la recommandation n°13 en annexe.

### Pénalité de fléchissement

Le fléchissement des crayons n'étant pas modélisé explicitement dans les études, il est pris en compte par l'application d'une pénalité, dite « *pénalité de fléchissement* », appliquée au critère de RFTC. La valeur de cette pénalité sur le RFTC résulte de la convolution de deux lois :

- une loi enveloppe définissant le taux de fermeture du canal en fonction de l'épuisement du combustible basée sur des mesures de fléchissement des crayons dans des assemblages irradiés ;

- une loi définissant la pénalité en RFTC en fonction de la déformation du réseau, loi approuvée en avril 1979 par la NRC.

L'IRSN considère qu'EDF doit apporter des éléments complémentaires afin de se prononcer sur le caractère conservatif de la valeur du taux de fermeture retenue dans la comparaison avec la condition limite de conception, ce conformément à la recommandation n°14.

A l'issue de l'examen de l'établissement de la loi NRC 79 par l'IRSN, plusieurs points soulèvent des interrogations (gamme de vitesse massique, profil axial de flux, géométrie ...). L'IRSN constate que, depuis son établissement, aucune réflexion sur le bien-fondé de cette loi n'a été menée par EDF et aucun essai n'a été réalisé pour étayer son caractère générique alors que, pendant trente ans, les conceptions d'assemblages et les conditions d'exploitation ont fortement évolué.

### CONCLUSION

En conclusion, l'IRSN n'a pas d'objection à l'application de la corrélation FC2002 et de son facteur de flux non uniforme pour évaluer le risque de crise d'ébullition dans les cœurs des réacteurs équipés d'assemblages de longueur chauffante 12 ft avec de grilles de type AFA-XL et AFA-2G, sous réserve de la prise en compte des recommandations n°5 et 6 formulées en annexe.

Toutefois, compte tenu des importantes lacunes affectant d'une part le programme expérimental avec des assemblages de longueur 14 ft, d'autre part la validation de la corrélation FC2002 et de son facteur de flux non-uniforme, l'IRSN considère que l'application de la corrélation FC2002 pour évaluer le RFTC dans les cœurs composés de ces assemblages avec des grilles de type AFA-3G n'est pas acceptable en l'état. De plus, pour ce qui concerne le bas du cœur, l'IRSN considère que le nombre de points d'essais est insuffisant pour garantir les performances de la corrélation RFBC en amont de la première grille mélangeuse et la validité des paramètres statistiques associés.

En conséquence, l'IRSN recommande qu'EDF procède aux adaptations nécessaires conformément aux recommandations figurant en annexe, en préalable à l'utilisation de ces deux corrélations pour le réacteur de Flamanville 3 et ce, en amont de sa demande en service.

L'IRSN attire l'attention de l'ASN sur l'ampleur et la complexité des démonstrations restant à fournir par EDF et estime que la certitude d'aboutir à court terme à une justification complète de l'applicabilité des corrélations de flux critique à l'assemblage 14 ft AFA-3GLE n'est pas acquise. De ce fait, l'IRSN estime nécessaire qu'EDF examine dès à présent la mise en œuvre de modalités permettant d'assurer le conservatisme des corrélations retenues dans les études d'accidents de l'EPR et du dimensionnement des seuils sur site utilisés dans le système de protection de l'EPR.

Pour ce qui concerne la pénalité de fléchissement, l'IRSN considère que les modèles de taux de fermeture et de pénalité en RFTC associés peuvent être appliqués, sous réserve de la prise en compte de la recommandation n°14 formulée en annexe.

## Annexe à l'avis IRSN/2011-66 du 11 février 2011 Recommandations

### Corrélation de flux critique FC2002

#### Recommandation 1 :

L'IRSN estime nécessaire qu'EDF complète la base d'essais utilisés en support à la corrélation de flux critique FC2002 par des essais de mélange spécifiques destinés à caractériser les coefficients de mélange associés aux grilles équipant les assemblages AFA-3GLE du réacteur EPR.

#### Recommandation 2 :

L'IRSN estime qu'EDF doit retenir une valeur conservative du coefficient de mélange couvrant l'ensemble des configurations de grappes pour lesquelles EDF souhaite utiliser 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, l'IRSN estime nécessaire qu'EDF mette en œuvre une démarche permettant d'assurer le conservatisme de la corrélation FC2002, préalablement à toute utilisation de la corrélation dans les études de sûreté.

#### Recommandation 3 :

L'IRSN recommande qu'EDF réalise des essais supplémentaires afin de vérifier l'applicabilité de la corrélation FC2002 aux assemblages de longueur chauffante 14 ft équipés de grilles de type AFA-3G, préalablement à l'utilisation de la corrélation FC2002 dans les études de sûreté EPR. Les conditions d'essais devront notamment prendre en compte différents profils de flux axial, l'effet d'un éventuel tube-guide et la présence des grilles de mélange et de maintien.

#### Recommandation 4 :

L'IRSN estime nécessaire qu'EDF justifie par une méthode reconnue d'analyse de sensibilité l'exhaustivité des paramètres retenus dans la formulation analytique de la corrélation de flux critique FC2002.

#### Recommandation 5 :

L'IRSN estime nécessaire qu'EDF vérifie les prédictions de la corrélation FC2002 sur des données non utilisées lors de la phase d'optimisation du modèle. En particulier, la démonstration de la validité de la corrélation FC2002 dans le domaine des titres élevés devra être apportée.

#### Recommandation 6 :

L'IRSN estime nécessaire qu'EDF justifie l'applicabilité de la formulation du facteur de flux non-uniforme pour les assemblages de longueurs chauffantes 12 et 14 ft, et différentes formes de flux axial (formes piquées en haut du cœur notamment), préalablement à toute mise en œuvre de la corrélation dans les études de sûreté. Cette validation devra s'appuyer sur des résultats d'essais représentatifs de l'assemblage AFA-3GLE prenant en compte différents profils de flux axial.

**Recommandation 7 :**

Compte tenu des incohérences qui subsistent à ce jour dans la base de données FC2002, l'IRSN estime nécessaire qu'EDF vérifie le contenu de cette base et, le cas échéant, réévalue les paramètres statistiques de l'incertitude de la corrélation ainsi que la limite de conception d'Owen.

**Corrélation de flux critique RFBC**

**Recommandation 8 :**

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

**Recommandation 9 :**

L'IRSN estime nécessaire qu'EDF valide la corrélation RFBC sur des données non utilisées dans la phase d'optimisation, préalablement à toute utilisation dans les études de sûreté.

**Domaine de validité des corrélations FC2002 et RFBC**

**Recommandation 10 :**

En l'absence de confirmation du comportement physique des corrélations de flux critique utilisées pour les études de l'EPR dans les zones non couvertes expérimentalement, l'IRSN estime nécessaire qu'EDF limite leur domaine de validité aux zones couvertes expérimentalement, notamment en retenant une borne inférieure à l'intervalle de validité en titre thermodynamique.

**Application des corrélations FC2002 et RFBC aux conditions réacteur**

**Recommandation 11 :**

L'IRSN estime nécessaire qu'EDF positionne, dans chacun des plans (G, P), (X, G) et (P, X) de la corrélation utilisée pour évaluer le RFTC minimum, les conditions locales au moment du RFTC minimum pour toutes les conditions de fonctionnement de dimensionnement. Au cas où ces conditions locales se situent dans les zones non ou peu couvertes expérimentalement et en l'absence de confirmation du bon comportement physique des corrélations dans ces zones « aveugles », des dispositions devront être prises selon le type de situations :

- pour les situations accidentelles pour lesquelles le critère de sûreté à vérifier concerne le nombre de crayons susceptibles de rentrer en crise d'ébullition (NCE), l'IRSN estime nécessaire 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 ;
- pour les autres situations où l'on cherche à se prémunir contre l'apparition de la crise d'ébullition et qui rencontreraient des conditions thermohydrauliques en dehors du domaine de validité de la corrélation, l'IRSN estime nécessaire qu'EDF détermine des pénalités sur le flux critique prédit.



**Recommandation 12 :**

L'IRSN estime nécessaire qu'EDF apporte la démonstration de la robustesse du traitement statistique "sur-mesure" (renormalisation et pénalisation) appliqué aux différentes campagnes de la base de données qui impacte directement les caractéristiques statistiques de la distribution des rapports Flux Mesurés/Flux Prédits retenues pour la corrélation de flux critique utilisée dans les études de sûreté.

**Recommandation 13 :**

Concernant la corrélation RFBC, l'IRSN estime nécessaire qu'EDF réévalue les valeurs des paramètres statistiques, et par conséquent la valeur de la limite de conception associée à l'utilisation de la corrélation RFBC, à partir de données expérimentales représentatives des grilles sans ailettes.

**Pénalité de fléchissement**

**Recommandation 14 :**

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'IRSN estime nécessaire qu'EDF fournisse les résultats de mesures disponibles, soit 64 mesures par étage et pour chaque assemblage de mêmes caractéristiques, ainsi que les étapes permettant de déterminer ce taux de fermeture.