



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Fontenay-aux-Roses, le 20 septembre 2023

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2023-00140

Objet : Réacteurs électronucléaires EDF – Tous paliers – Démarche ΔC_b appliquée au domaine complémentaire.

Réf. : [1] Lettre ASN – CODEP-DCN- 2022-054208 du 21 octobre 2022.
[2] Lettre ASN – CODEP-DCN-2021-034392 du 23 juillet 2021.

Conformément à la demande de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) citée en référence [1], l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a examiné le bien-fondé de l'utilisation de la démarche dite « ΔC_b » d'évaluation de la réactivité du cœur à la suite d'un arrêt automatique du réacteur (AAR), pour certains transitoires du domaine complémentaire¹. EDF envisage de mettre en œuvre cette démarche dans le cadre du quatrième réexamen périodique des réacteurs du palier 1300 MWe (RP4 1300).

1. CONTEXTE

Dans le cadre des études du domaine complémentaire pour le RP4 1300, EDF rencontre des difficultés pour démontrer le maintien de la sous-criticité du cœur lors des transitoires du domaine complémentaire de perte totale des alimentations électriques (H3) ou de défaillance de cause commune des tableaux électriques LH (DCC-LH) avec la méthode historiquement utilisée de calculs de réactivité « MAR 3D ».

Cette dernière suppose, de façon très conservatrice, la disparition instantanée de l'anti-réactivité apportée par l'isotope 135 du xénon à un instant dit « de bascule », alors que cette disparition est progressive après l'arrêt du réacteur (voir Annexe 3). L'instant de bascule à une concentration en xénon nulle correspond à l'instant où la concentration en xénon passe sous sa valeur initiale. Il sépare ainsi la phase « court-terme » à concentration de xénon constante et la phase « long-terme » à concentration de xénon nulle.

Pour les réacteurs de 1300 MWe, les calculs effectués avec la méthode MAR 3D induisent un instant de passage à une concentration en xénon nulle particulièrement précoce. Ainsi, la démonstration du maintien de la

¹ L'objectif de la démarche d'étude du domaine complémentaire est de définir la liste des dispositions complémentaires (manuelles ou automatiques) visant à ramener à un niveau acceptable les conséquences d'événements déclencheurs moins probables, généralement plus complexes, que ceux pris en compte dans le dimensionnement conventionnel de base (appelé domaine de dimensionnement).

MEMBRE DE
ETSON

sous-criticité pour les transitoires H3 et DCC-LH avec cette méthode conduirait selon EDF à identifier le besoin de modifications matérielles à mettre en œuvre, disproportionnées au regard de l'enjeu réel de sûreté.

C'est pourquoi EDF souhaite utiliser la démarche « ΔC_b » pour démontrer la maîtrise de la réactivité au cours de ces transitoires, car cette dernière prend en compte la disparition progressive du xénon, évitant ainsi la sur-pénalisation inhérente à la méthode « MAR 3D » au moment du passage à une concentration en xénon nulle. EDF prévoit d'appliquer cette démarche aux transitoires H1², H3 et DCC-LH du domaine complémentaire. Toutefois, l'expertise de l'IRSN, ainsi que les échanges avec l'exploitant, ont porté sur les principes de la démarche indépendamment des transitoires pour lesquels elle est appliquée.

Afin de répondre à la demande de l'ASN, l'expertise de l'IRSN a porté sur :

- le principe de la démarche ;
- les modalités de prise en compte des incertitudes, pénalités et provisions (IPP) considérées par EDF ;
- l'acceptabilité de l'adaptation du niveau de conservatisme de la démarche selon la fréquence de l'initiateur considéré.

2. PRINCIPE DE LA DÉMARCHE

Le principe de la démarche « ΔC_b » repose sur le calcul des différences de concentration en bore (Cb) critique³ entre un état initial, réacteur en puissance, et un état final caractérisé par le temps écoulé depuis l'arrêt automatique du réacteur et la température atteinte. Les calculs des différences de Cb doivent prendre en compte les différents postes d'incertitudes, les pénalités et éventuelles provisions⁴.

La différence entre les deux Cb critiques permet d'évaluer la quantité de bore à injecter dans le circuit primaire pour maintenir le cœur sous-critique, notamment en raison de l'apport de réactivité induit par la baisse de température du modérateur.

Cette approche est différente de celle mise en œuvre par la méthode « MAR 3D » qui utilise directement des calculs de réactivité. **Néanmoins, l'IRSN ne formule pas de remarque sur ce changement d'approche.**

La démarche « ΔC_b » se veut plus représentative du comportement physique du cœur que la méthode « MAR 3D » en considérant une disparition progressive dans le temps du xénon. Cette approche est donc moins conservatrice. En particulier, le calcul de la réactivité est désormais associé au phénomène physique de disparition progressive du xénon et dépend de la capacité des opérateurs à réaliser les actions prévues dans la conduite accidentelle dans les délais conventionnels retenus pour ces études du domaine complémentaire.

Ainsi, au regard de la réduction des conservatismes de la démarche « ΔC_b » la démonstration de la capacité des opérateurs à réaliser ces actions dans les délais prévus doit être apportée. À cet égard, lors de l'expertise portant sur le retour d'expérience de l'exploitation des réacteurs du parc EDF sur la période 2018-2019, EDF s'est de manière générale engagé à identifier et documenter « *dans le cadre de la réalisation des études de sûreté du domaine de dimensionnement et du domaine complémentaire [...] la nécessité d'utiliser des délais « adaptés » et de justifier les délais retenus en fonction des scénarios étudiés et des règles d'études applicables* ».

² Perte totale de la source froide.

³ Il s'agit de la concentration en bore correspondant à l'atteinte des conditions dans lesquelles le cœur est à l'état critique (la réaction nucléaire en chaîne est stabilisée).

⁴ Des provisions peuvent être retenues pour tenir compte d'aléas de gestion. Elles ne relèvent donc pas de la démarche en elle-même.

3. MODALITÉS DE PRISE EN COMPTE DES INCERTITUDES, PÉNALITÉS ET PROVISIONS

Étant donné que la démarche « ΔC_b » valorise l'anti-réactivité apportée par l'isotope 135 du xénon au cours du temps, EDF définit une pénalité dédiée couvrant notamment la variabilité des états initiaux en termes de concentration du xénon. La détermination de cette pénalité s'appuie sur un algorithme de sélection des configurations de cœur dont l'objectif est de limiter le nombre de calculs neutroniques à réaliser tout en assurant la représentativité des cas retenus vis-à-vis du domaine de fonctionnement autorisé. EDF a indiqué qu'il sera vigilant sur ce point, ce qui est acceptable sur le principe.

Pour ce qui concerne les autres IPP considérées, le seul commentaire de l'IRSN porte sur l'incertitude liée au point de fonctionnement initial du réacteur. Cette incertitude permet de couvrir le fait que le cœur peut voir, lors du fonctionnement, sa puissance et la température moyenne du circuit primaire varier légèrement autour des valeurs de consignes, notamment en raison des incertitudes de mesures associées.

La note de démarche « ΔC_b » prescrit un cumul quadratique des deux postes d'incertitudes relatifs à la puissance thermique du cœur et à la température moyenne du circuit primaire. Ceci suppose l'indépendance des variations de ces deux paramètres physiques. Pour l'IRSN, elles sont au contraire en partie corrélées. À la fin de l'expertise, EDF a transmis des premiers éléments indiquant l'indépendance de certaines composantes associées à ces deux incertitudes. **L'IRSN estime que ces éléments sont en l'état insuffisants pour justifier le choix d'un cumul quadratique des incertitudes sur le point de fonctionnement, ce qui le conduit à formuler la recommandation n° 1 présentée en Annexe 1.**

Par ailleurs, l'IRSN souligne que cette recommandation s'applique sur le principe également à la méthode « MAR 3D » qui retient la même hypothèse d'indépendance entre ces deux postes d'incertitudes.

Globalement, à l'exception de la modélisation de l'anti-réactivité apportée par le développement du xénon, le niveau de pénalisation de la démarche, avec l'intégralité des postes d'IPP, est similaire à celui de la méthode « MAR 3D ».

Enfin, EDF s'est engagé au cours de l'expertise à compléter la note de démarche sur certains points relatifs à la couverture des états initiaux et à l'insertion des grappes de commande (voir Annexe 2), ce que l'IRSN estime satisfaisant.

4. ADAPTATION DU NIVEAU DE CONSERVATISME

La démarche « ΔC_b » telle que définie par EDF prévoit une adaptation du niveau de conservatisme pour le transitoire de DCC-LH, dont la fréquence d'occurrence est plus faible que celle d'autres transitoires du domaine complémentaire, notamment H1 et H3. EDF précise que cette adaptation est cohérente avec la possibilité⁵ d'adapter le niveau de pénalisation de la méthode évoquée par l'ASN dans sa lettre en référence [2]. Concrètement, cela signifie que certains des postes d'IPP ne sont pas retenus dans les calculs de réactivité pour le transitoire DCC-LH. Néanmoins, les études du domaine complémentaire doivent permettre de démontrer le respect des critères d'acceptabilité avec un taux de couverture élevé. Par conséquent, l'IRSN estime que cette adaptation ne constitue pas une bonne pratique *a priori*. EDF n'a d'ailleurs pas transmis d'éléments permettant de se positionner sur l'acceptabilité *a priori* de ces relaxations. À cet égard, des considérations uniquement probabilistes peuvent s'avérer insuffisantes pour justifier des relaxations de conservatismes. Il convient

⁵ « Conformément à la méthode retenue pour l'EPR, l'ASN vous demande de conserver comme référence le principe de pénalisation des hypothèses des conditions de fonctionnement complémentaires, afin de démontrer que les critères d'acceptabilité sont respectés avec un taux de couverture élevé (typiquement 95 %). Toutefois, pour des situations de fréquence d'occurrence très faible, si la démarche de pénalisation de référence s'avère disproportionnée au regard des enjeux de sûreté, une adaptation pourra être acceptée. Elle devra alors être justifiée et l'absence d'effet fautive sur les conclusions de l'étude devra être démontrée ».

notamment de tenir compte de la sévérité des conséquences qui seraient induites par les situations objet de l'étude avant d'effectuer des relaxations qui conduiraient à ne plus assurer leur mitigation avec un haut niveau de confiance. Ces justifications, qui sont par nature spécifiques aux cas étudiés, peuvent en outre difficilement être fournies dans le cadre générique de développement d'une nouvelle démarche.

Par conséquent, afin d'assurer un niveau de conservatisme adapté, l'IRSN estime que l'ensemble des postes d'IPP doivent être *a priori* pris en compte de manière déterministe pour l'ensemble des transitoires du domaine complémentaire pour lesquels la démarche « ΔCb » est appliquée. Ceci conduit l'IRSN à formuler la recommandation n° 2 présentée en annexe 1.

En revanche, conformément à la demande de l'ASN mentionnée précédemment, et sous réserve de justifications appropriées, une relaxation du niveau de conservatisme pourrait être considérée acceptable par l'IRSN dans les études de sûreté.

5. CONCLUSION

À l'issue de l'analyse des éléments apportés par EDF au cours de l'expertise, l'IRSN estime satisfaisant le principe de la démarche « ΔCb » pour l'étude des transitoires du domaine complémentaire concernés, et juge acceptable la valorisation de l'évolution temporelle de l'anti-réactivité apportée par le xénon.

En outre, EDF a pris au cours de l'expertise des engagements afin de préciser certains points relatifs à la méthode, ce que l'IRSN estime satisfaisant.

Toutefois, pour assurer un niveau de conservatisme adapté à l'enjeu de sûreté associé, l'IRSN estime que la démarche doit prendre en compte un mode de cumul conservatif pour l'incertitude sur le point de fonctionnement, ainsi que le cumul déterministe de tous les postes d'IPP identifiés par la démarche, ce qui fait l'objet de recommandations de l'IRSN.

Enfin, cette nouvelle démarche présente un conservatisme moindre vis-à-vis de la couverture temporelle des actions qui doivent être mises en œuvre dans la conduite accidentelle. Il est donc primordial de s'assurer de la capacité des opérateurs à réaliser les actions prévues dans la conduite accidentelle dans les délais conventionnels.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

ANNEXE 1 À L'AVIS IRSN N° 2023-00140 DU 20 SEPTEMBRE 2023

Recommandations de l'IRSN

Recommandation n° 1

L'IRSN recommande qu'EDF retienne un mode de cumul des postes d'incertitudes liés à la température moyenne du primaire et la puissance du cœur pour lequel il aura justifié le caractère suffisamment conservatif sur la base d'éléments quantifiés, et ce dès les études réalisées dans le cadre du RP4 1300. À défaut, un cumul déterministe devra être retenu.

Recommandation n° 2

Afin d'assurer un taux de couverture élevé pour les conditions de fonctionnement du domaine complémentaire, l'IRSN recommande que la démarche « ΔC_b » retienne un cumul déterministe de l'ensemble des postes d'incertitudes pénalités et provisions identifiés par la méthode.

ANNEXE 2 À L'AVIS IRSN N° 2023-00140 DU 20 SEPTEMBRE 2023

Engagements de l'exploitant

Engagement n° 1

EDF clarifiera, dans une montée de version de la note de démarche, les passages où sont évoqués les filtrages afin de préciser que la démarche autorise la mise en œuvre de ces filtrages et que les éléments donnés pour la VD4 1300 ne sont qu'illustratifs dans le cadre de cette note.

Engagement n° 2

EDF explicitera, dans une montée de version de la note de démarche que, pour la fin de cycle, l'intervalle d'épuisement retenu pour étudier la variabilité du xénon devra couvrir *a minima* la plage [80 ; 100] % d'avancement dans le cycle.

Engagement n° 3

EDF modifiera, dans une montée de version de la note de démarche, le paragraphe relatif à la prise en compte de la sur-insertion des groupes de compensation de puissance pour rendre la démarche non adhérente à la valeur de la pénalité de sur-insertion des groupes de compensation de puissance.

ANNEXE 3 À L'AVIS IRSN N° 2023-00140 DU 20 SEPTEMBRE 2023

Illustration de l'évolution du xénon après un arrêt automatique du réacteur

L'isotope ^{135}Xe présente la particularité d'avoir une capacité d'absorption extrêmement élevée des neutrons, ce qui induit des conséquences significatives sur la réactivité et sur la conduite du réacteur, en puissance et en état d'arrêt. Sa concentration dans le cœur évolue dans le temps : il apparaît par décroissance radioactive de l'isotope ^{135}I (avec une demi-vie d'environ 7 heures), et peut disparaître par capture d'un neutron ou par décroissance radioactive (avec une demi-vie d'environ 9 heures). Ces effets sont donc à prendre en compte dans la démonstration de sûreté.

La Figure 1 présente un exemple d'évolution physique du xénon après un arrêt automatique du réacteur (courbe bleue). Le principe de la méthode « MAR 3D » vis-à-vis du xénon est illustré par la courbe orange : le xénon est considéré figé à son niveau initial dans un premier temps, puis totalement disparu dès l'instant où la concentration passe sous sa valeur initiale. La démarche « ΔC_b », quant à elle, se rapproche de la courbe bleue dans son principe, mais en définissant une pénalité dédiée afin de garder un certain conservatisme.

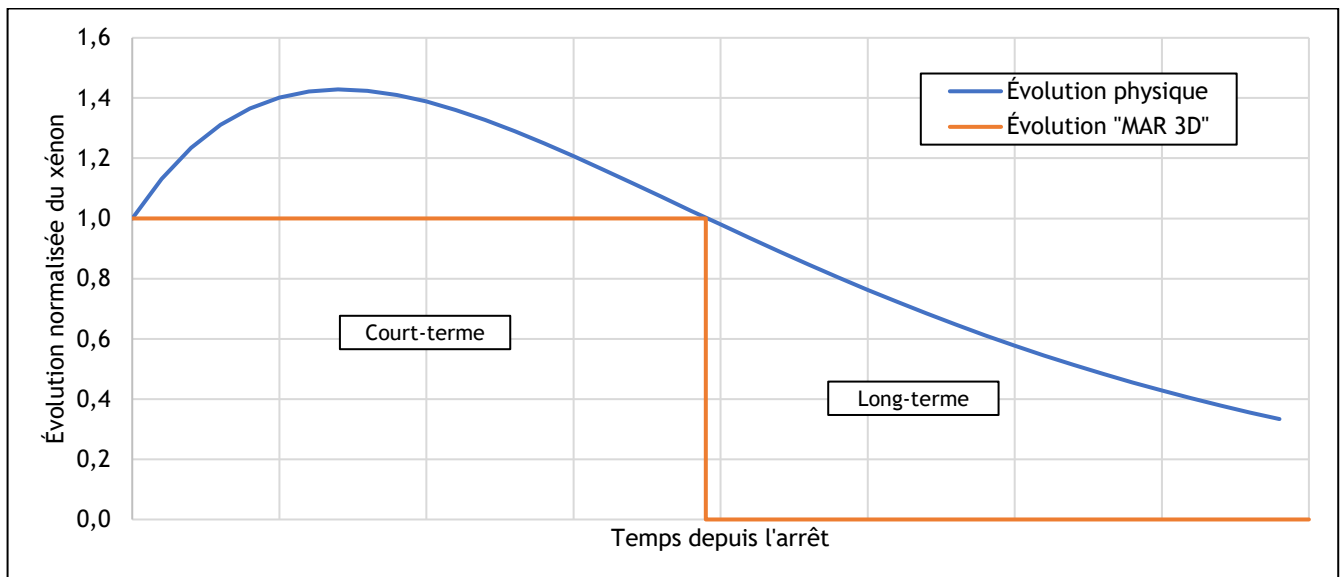


Figure 1 : Illustration de l'évolution de la concentration de l'isotope xénon ^{135}Xe dans un cœur de réacteur nucléaire.