



Fontenay-aux-Roses, le 23 février 2023

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2023-00029

Objet :	Réacteurs électronucléaires – Tous Paliers Suites de l'instruction du nouveau référentiel d'étude de l'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) et de la méthode d'étude CathSBI
Réf. :	[1] Courrier ASN – CODEP-DCN-2011-013376 du 2 mai 2011. [2] Courrier ASN – CODEP-DCN-2014-032737 du 24 juillet 2014. [3] Courrier ASN – CODEP-DCN-2017-001478 du 12 janvier 2017. [4] Saisine ASN – CODEP-DCN-2021-023193 du 11 mai 2021.

1. CONTEXTE ET HISTORIQUE

L'évolution des connaissances, des conditions d'exploitation des réacteurs et des combustibles utilisés a conduit EDF à engager à partir de 2010 des réflexions sur les évolutions potentielles du référentiel d'étude de l'accident de perte de réfrigérant primaire (APRP), au regard de ses conséquences sur le refroidissement du cœur. Ces réflexions ont mené à la construction d'un nouveau référentiel d'étude de l'APRP.

1.1. ÉVOLUTIONS LIEES A L'APPLICATION DU NOUVEAU REFERENTIEL

Ce nouveau référentiel conduit à des évolutions méthodologiques et d'hypothèses significatives. Tout d'abord, les scénarios de brèches étudiées et les règles d'étude associées sont modifiés. Alors qu'auparavant un découplage était réalisé entre l'analyse des conséquences mécaniques et thermohydrauliques des brèches primaires¹, le nouveau référentiel prévoit de retenir les mêmes brèches (section et localisation sur le circuit primaire) pour les deux volets d'étude des conséquences de cet accident. EDF retient désormais un nombre limité de localisations de brèches, leur taille maximale étant déterminée à partir de calculs dynamiques de mécanique pénalisés². Notamment, ces brèches ont une taille inférieure à celle résultant d'une rupture guillotine d'une tuyauterie primaire doublement débattue. Par ailleurs, un nouveau critère en taux d'oxydation de la gaine des crayons de combustible en transitoire (ECR³), fonction de la teneur initiale en hydrogène dans la gaine, a été défini. L'objectif est de garantir l'absence de rupture de la gaine soumise à une force axiale lors de la trempe en

¹ Ces deux analyses étaient alors fondées sur des hypothèses distinctes (taille et localisation des brèches primaires, par exemple).

² Ces calculs tiennent compte de la rigidité des tuyauteries et de l'existence de dispositifs anti-débattement, limitant le débattement pour certaines localisations de brèches.

³ Equivalent Cladding Reacted.

transitoire d'APRP. Enfin, la méthode d'étude de cet accident a été revue, l'objectif étant notamment de tenir compte de phénomènes physiques jusqu'alors non considérés (les écoulements multidimensionnels dans le cœur et la descente annulaire de la cuve du réacteur ainsi que certains phénomènes liés au comportement du combustible au cours d'un APRP). Cette nouvelle méthode, nommée CathSBI⁴, est fondée sur l'utilisation de l'outil de calcul scientifique (OCS) CATHARE. Elle s'appuie aussi sur un traitement statistique des paramètres d'entrée de l'étude.

1.2. HISTORIQUE DE L'EXPERTISE ASSOCIEE

Entre 2010 et 2014, l'expertise de ce référentiel, menée dans le cadre de la préparation de deux réunions du groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires (GP référentiel APRP n° 1 en 2010 et GP référentiel APRP n° 2 en 2014), a conduit à l'émission de demandes formulées par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) dans les lettres [1] et [2]. Par la suite, la méthode CathSBI a fait l'objet d'une expertise par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) à l'issue de laquelle l'ASN a considéré que la méthode n'était pas acceptable en l'état et a formulé plusieurs demandes [3].

La première application dans le cadre du quatrième réexamen périodique des réacteurs de 900 MWe (RP4 900) de cette méthode, prenant en compte des pénalités afin de couvrir certaines réserves, a montré que les critères techniques d'acceptation en vigueur étaient respectés avec des marges élevées. Toutefois, les résultats des études étaient proches de la zone en température de la gaine (autour de 750 à 800 °C) à partir de laquelle certains phénomènes physiques relatifs au comportement du combustible sont susceptibles de s'activer (ballonnement de la gaine puis contact entre les crayons de combustible, éclatement de la gaine suivi de la relocalisation du combustible dans les zones ballonnées et éclatées), entraînant alors un risque d'emballement puis de dépassement des critères techniques d'acceptation. Du fait de la faible marge par rapport à l'occurrence de ces phénomènes redoutés et des réserves méthodologiques existantes, EDF s'est alors engagé à mettre en œuvre des modifications matérielles sur les réacteurs du palier 900 MWe.

1.3. ÉVOLUTIONS ULTERIEURES

La méthode CathSBI a fait l'objet de modifications entre son expertise initiale par l'IRSN (2014-2015) et sa première application en RP4 900 (2018). Le nouveau référentiel APRP et la méthode CathSBI doivent en outre être appliqués à l'étude d'APRP BI qui sera réalisée dans le cadre du quatrième réexamen périodique du palier 1300 MWe (RP4 1300), ce qui a amené EDF à apporter de nouvelles modifications substantielles à la méthode, notamment dans le but de la rendre applicable aux paliers comportant quatre boucles.

1.4. CONTOUR DE L'AVIS

Par lettre citée en référence [4], l'ASN sollicite l'avis de l'IRSN sur les réponses apportées par EDF aux différentes demandes et actions formulées dans le cadre du GP référentiel APRP n° 2 ainsi que sur l'acceptabilité de la méthode CathSBI, en tenant compte des nouveaux éléments justificatifs apportés par EDF en réponse aux demandes issues des précédentes instructions. L'ASN demande également à l'IRSN d'évaluer l'impact de l'analyse de ces nouveaux éléments dans le cadre de l'utilisation du nouveau référentiel APRP et de la méthode CathSBI pour les études accidentelles de la démonstration de sûreté des réacteurs.

⁴ Cathare Statistique Brèches Intermédiaires.

2. ANALYSE DES REPONSES AUX DEMANDES ISSUES DU GP REFERENTIEL APRP N°2

À la suite de l'examen du nouveau référentiel d'étude de l'APRP en 2014, l'ASN avait considéré [2] qu'il convenait de poursuivre « *l'analyse des résultats expérimentaux internationaux, et ce notamment pour les combustibles de type MOX* » concernant la tenue du combustible au cours d'un APRP. Elle avait en outre demandé à EDF d'apporter des éléments de justification concernant la tenue des crayons de combustible lors d'un séisme survenant après un APRP, au regard du maintien de la refroidissabilité du cœur. Enfin, EDF s'était à cette occasion engagé à apporter des éléments concernant la validité du critère en ECR, et à compléter la base de validation du modèle permettant de simuler le gonflement-éclatement des gaines des crayons de combustible. Les éléments apportés par EDF sur ces thèmes ont fait l'objet d'une analyse par l'IRSN, dont les conclusions sont présentées ci-après.

Ainsi, au sujet de la tenue du combustible au cours d'un APRP, EDF s'est engagé au cours de la présente expertise d'une part à démontrer l'équivalence entre les types de combustible utilisés sur le parc vis-à-vis du phénomène de fragmentation des pastilles de combustible, d'autre part à justifier l'absence de dispersion de particules de combustible au cours de l'accident (voir les engagements n° 1 et n° 2 présentés en Annexe 2). EDF a en outre précisé que, pour le RP4 1300, une approche découplée justifiant l'absence d'éclatement de la gaine serait utilisée, mais qu'elle ne constitue pas la seule démarche permettant de démontrer l'absence de dispersion du combustible au cours d'un APRP. **L'IRSN estime ces engagements satisfaisants. Cependant, l'absence d'éclatement de la gaine permet d'éviter l'activation de certains modèles spécifiques dans la méthode CathSBI, jugés insuffisamment validés par l'IRSN (voir le §3.2.2). Si EDF devait choisir un autre moyen pour démontrer l'absence de dispersion de combustible, il serait alors nécessaire de lever les réserves formulées à propos de ces modèles.**

Concernant la tenue des crayons de combustible, EDF a apporté la démonstration qu'un séisme intervenant pendant la phase de refroidissement à long terme après un APRP n'empêcherait pas le refroidissement du cœur, valorisant dans ce cadre des résultats d'essais spécifiques, **ce que l'IRSN estime satisfaisant.**

Par ailleurs, la révision du critère en ECR fonction de la teneur initiale en hydrogène dans la gaine s'appuie sur une analyse de données expérimentales acquises récemment, à partir d'essais simulant un transitoire de type APRP et réalisés sur des gainages qu'EDF introduit dans ses réacteurs. À la suite de l'expertise de l'IRSN, EDF s'est engagé à modifier ce critère en corrigeant une hypothèse estimée discutable et à réaliser des essais complémentaires dans le dispositif d'essai développé à cette occasion, pour prendre en compte les nouveaux gainages introduits dans les réacteurs d'EDF et améliorer l'état des connaissances (voir les engagements n° 3 et n° 4 présentés en Annexe 2). **Il ressort néanmoins de l'expertise que certains des essais disponibles, écartés par EDF de la base de données retenue pour définir le critère, sont jugés pertinents par l'IRSN. L'IRSN formule à cet égard la recommandation n° 1 présentée en Annexe 1.**

Enfin, le modèle dénommé EDGAR permet de simuler le phénomène de gonflement-éclatement de la gaine et dépend du type de gainage considéré. De manière générale, l'IRSN estime que ce modèle constitue une avancée méthodologique. Toutefois, à l'issue de l'expertise, l'IRSN estime important d'améliorer la qualité prédictive du modèle EDGAR et de renforcer sa robustesse en élargissant la base de données de validation notamment pour certains gainages introduits dans les réacteurs d'EDF ou qu'il prévoit d'introduire. **À cet égard, EDF a pris les engagements n° 5 et n° 6 présentés en Annexe 2. L'IRSN estime ces engagements satisfaisants.**

3. ANALYSE DES EVOLUTIONS RELATIVES A LA METHODE CATHSBI

3.1. ASPECTS LIES AU TRAITEMENT STATISTIQUE

3.1.1. Principes de la méthode et rappel des demandes formulées par l'ASN

La méthode CathSBI repose sur une approche statistique prenant en compte l'ensemble des incertitudes élémentaires affectant les paramètres d'entrée, dont le traitement diffère selon leur nature. Sa déclinaison s'effectue en deux étapes successives :

- la première étape consiste à caractériser le « scénario » pénalisant. Elle repose sur une démarche de détermination des domaines de variation pénalisants des *paramètres d'entrée variables* caractérisant le scénario, en tenant compte des effets couplés, ce qui permet de pénaliser le résultat de la phase ultérieure de propagation des incertitudes ;
- la seconde étape, au cours de laquelle les incertitudes des *paramètres d'entrée incertains* (fixes et affectés d'incertitudes aléatoires⁵ ou épistémiques⁶) sont identifiées et propagées, consiste à déterminer une valeur conservative des paramètres cibles avec un niveau de confiance élevé.

À l'issue du GP référentiel APRP n° 2, l'ASN a formulé la demande D3 [2] visant à « *assurer le conservatisme des études de sûreté faites selon la méthode statistique en traitant les incertitudes, en particulier épistémiques, les plus influentes de manière déterministe ou par une démarche permettant de définir un intervalle de variation pénalisant* ».

Puis, faisant suite à l'analyse de la réponse apportée par EDF à la demande D3 et à l'analyse de la méthode CathSBI, l'ASN a formulé de nouvelles demandes [3] concernant :

- la classification des paramètres d'entrée incertains ;
- le déroulement de la première étape ;
- la justification de la modélisation de certaines incertitudes ;
- la sélection des paramètres d'entrée les plus influents (demande A4).

Les éléments apportés par EDF concernant les trois premiers points sont satisfaisants. Toutefois, au sujet de la modélisation des incertitudes, l'IRSN souligne que le choix des expériences à retenir pour établir l'intervalle d'incertitude d'un modèle physique donné revêt une importance primordiale dans la mesure où il affecte le résultat obtenu *in fine*. **EDF devra donc être attentif à la couverture et à la représentativité des expériences retenues pour établir les incertitudes associées aux paramètres identifiés comme les plus influents dans les prochaines applications de la méthode CathSBI (notamment dans le cadre du RP4 1300).**

Le dernier point, essentiel puisque caractérisant le conservatisme de la méthode, a fait l'objet de nombreux échanges au cours de l'expertise. Les conclusions de ces échanges sont présentées dans le paragraphe suivant.

3.1.2. Conservatisme de la méthode statistique

Pour sélectionner les paramètres d'entrée les plus influents, EDF a développé une procédure spécifique, fondée sur des outils statistiques avancés. Elle est mise en œuvre au cours d'une étape supplémentaire de la méthode appelée « étape D3 », insérée entre les étapes 1 et 2. Dans cette étape D3, à partir d'un grand nombre de calculs,

⁵ Paramètres dits « de type 1 » dans la méthode.

⁶ Incertitudes dues à un manque de connaissance et assimilables à des biais inconnus. Ces paramètres sont dits de « type 2 » dans la méthode.

les paramètres d'entrée les plus influents sont identifiés puis hiérarchisés. Au cours de l'expertise, EDF a confirmé que tous les paramètres d'entrée incertains (ceux associés aux modèles physiques de l'OCS mais également ceux associés aux conditions initiales et aux limites) feront l'objet de ce traitement, **ce que l'IRSN estime satisfaisant.**

S'agissant des paramètres cibles, EDF s'est engagé à la fin de l'expertise (voir l'engagement n° 7 présenté en Annexe 2) à appliquer l'étape D3 vis-à-vis de la déformation de la gaine en complément de l'analyse faite vis-à-vis de la température maximale de gaine, dès lors que des déformations non négligeables sont constatées avant application de la demande D3. En outre, EDF a pris l'engagement (voir l'engagement n° 8 présenté en Annexe 2) de réaliser une étude de sensibilité afin de conforter la robustesse de l'étape D3. **L'IRSN estime ces engagements satisfaisants.**

En synthèse, l'IRSN souligne l'importance et la qualité des développements effectués par EDF et il estime que la procédure ainsi développée, structurée et robuste, permet de répondre à la demande A4 formulée par l'ASN.

Une fois sélectionnés, les paramètres les plus influents sont ensuite pénalisés au titre de la demande D3. Or, certains paramètres d'entrée incertains de la méthode CathSBI font déjà l'objet d'une pénalisation spécifique en amont, afin de compenser des lacunes de validation de l'OCS utilisé (demande B1 de la lettre [3]).

L'IRSN rappelle que cette demande B1 vise à couvrir des lacunes de validation du module 3D de CATHARE, indépendamment de la prise en compte de la demande D3. Elle a pour objectif *in fine* d'obtenir une modélisation ne présentant pas de sous conservatisme manifeste ; **à ce titre, elle doit être appliquée en amont de la méthodologie statistique.**

Bien que considérant que de telles pénalisations biaisent les modèles de l'OCS, EDF a précisé à la fin de l'expertise que les pénalisations résultant des lacunes de validation de l'OCS seraient bien appliquées en amont du traitement statistique de la méthode CathSBI dans le cadre du RP4 1300, **ce que l'IRSN estime satisfaisant.**

S'agissant du niveau de pénalisation à retenir, l'IRSN estime que **le choix de l'exploitant de retenir des valeurs déterministes assurant un taux de couverture de 95 % des valeurs des lois de probabilité associées constitue un niveau de conservatisme global satisfaisant.**

Enfin, EDF s'est engagé à la fin de l'expertise (voir l'engagement n° 9 présenté en Annexe 2) à mettre à jour la note de méthode CathSBI en y incluant la description de la démarche associée à la prise en compte des demandes A4 et D3 de l'ASN, **ce que l'IRSN estime satisfaisant.**

3.2. ASPECTS LIES A LA THERMOHYDRAULIQUE

3.2.1. Outil de calcul scientifique utilisé dans la méthode

EDF a indiqué que les études d'APRP du RP4 1300 seront réalisées à l'aide de l'OCS CATHARE 3, en remplacement de CATHARE 2 jusqu'alors utilisé. La nouvelle version utilisée permet de résorber un écart mis en évidence précédemment et affectant le module 3D de l'outil de calcul. EDF a analysé l'influence du changement de version du logiciel. Pour répondre aux réserves émises par l'IRSN au cours de l'expertise, EDF a pris des engagements pour conforter la non-régression de l'outil de calcul utilisé et la pertinence de la modélisation retenue (voir les engagements n° 10 à n° 14 présentés en Annexe 2). **L'IRSN estime ces engagements satisfaisants.**

Des lacunes de validation ayant par ailleurs été identifiées concernant le module 3D de l'OCS CATHARE, EDF a indiqué qu'il valorisera un programme expérimental pour compléter la validation des écoulements tridimensionnels dans le cœur. Toutefois, pour les écoulements tridimensionnels dans la descente annulaire, en l'absence d'essais suffisamment représentatifs de la situation d'intérêt, EDF a indiqué que des travaux de

comparaison à des calculs de CMFD⁷ seront réalisés. **EDF devra alors apporter des éléments concernant la validation de l'OCS de CMFD utilisé, ce dont il a convenu. De manière générale, l'IRSN souligne l'importance des travaux de validation du module 3D engagés par EDF, notamment expérimentaux. Néanmoins, dans l'attente d'éléments de validation complémentaires, l'IRSN estime nécessaire de maintenir un niveau de pénalisation élevé lorsque le module 3D de CATHARE est utilisé dans des études de sûreté.**

À cet égard, EDF a appliqué dans le cadre du RP4 900 des pénalisations ciblant les effets bénéfiques du module 3D, jugées acceptables par l'ASN. Pour le palier 1300 MWe, EDF prévoit, pour le cœur, de reconduire la pénalisation appliquée et, pour la descente annulaire, de raffiner les maillages axial et radial et de réduire la pénalité par rapport à celle qui avait été appliquée lors de la première application. **Des éléments justificatifs, apportés à la fin de l'expertise, feront ultérieurement l'objet d'une analyse par l'IRSN.**

3.2.2. Modélisation du réacteur et des phénomènes physiques attendus en APRP

Dans la méthode de calcul des aires de brèches du référentiel d'étude de l'APRP, une incertitude sur l'aire de brèche calculée est retenue pour les études thermohydrauliques. La justification de cette incertitude avait été jugée insuffisante par l'IRSN dans le cadre de l'examen du nouveau référentiel d'étude de l'APRP. À cet égard, afin de démontrer le conservatisme des aires de brèches, EDF a indiqué qu'il effectuera des calculs d'évolution temporelle de l'aire de brèche pour les études d'APRP BI qui seront réalisées dans le cadre du RP4 1300, et a également pris l'engagement n° 15 présenté en Annexe 2. **L'IRSN estime que ce programme de travail est adéquat eu égard à l'objectif visé.**

Par ailleurs, la modélisation actuelle des accumulateurs dans CATHARE est simplifiée. Une modélisation détaillée existe bien, mais l'ASN l'a considérée insuffisamment validée, ce qui s'est traduit par la demande B2⁸ de la lettre [3]. Dans le cadre du RP4 1300, EDF se restreint à utiliser la modélisation simplifiée, **ce qui est satisfaisant. En revanche, l'IRSN souligne que la réponse à la demande B2 de la lettre [3] reste à apporter** et qu'elle constitue un préalable à la valorisation de la modélisation détaillée des accumulateurs dans les études d'APRP.

S'agissant de la détermination du scénario pénalisant, les premières évaluations réalisées par EDF pour appliquer la méthode CathSBI au palier 1300 MWe mettent en évidence qu'une brèche localisée sur une branche en U en amont des pompes primaires apparaît plus limitative que la brèche localisée en aval, historiquement pénalisante notamment pour le palier 900 MWe. Des éléments supplémentaires expliquant ce comportement différent ont récemment été apportés par EDF. **Ils seront analysés dans le cadre de l'examen des études d'accidents du RP4 1300.**

Par ailleurs, le ballonnement et l'éventuel éclatement de la gaine de certains crayons de combustible du fait de leur échauffement durant la vidange du cœur font l'objet d'un traitement simplifié dans la méthode CathSBI au travers de l'appel à des modèles dédiés, dans lesquels intervient notamment un paramètre ayant pour objectif de modéliser les effets des crayons voisins du crayon le plus chaud du cœur sur son refroidissement. Toutefois, la valeur de ce paramètre est fixée arbitrairement par EDF. **Compte tenu, d'une part, de l'influence non négligeable de ce paramètre sur la température maximale de la gaine et, d'autre part, de son caractère arbitraire, l'IRSN estime qu'il a vocation à figurer dans la liste des paramètres d'entrée incertains (voir § 3.1) faisant l'objet d'un tirage statistique, et il formule ainsi la recommandation n° 2 présentée en Annexe 1.**

En outre, certains des modèles dédiés ne sont activés qu'en cas d'éclatement de la gaine représentative d'un crayon de l'assemblage de combustible le plus chaud du cœur (CMAC). Des réserves ont été formulées au sujet de ces modèles. EDF a précisé qu'il visait l'absence d'éclatement dans le cadre du RP4 1300, mais il s'est toutefois

⁷ CMFD : Computational Multi-phase Fluid Dynamic, mécanique des fluides numérique multiphasique. Un OCS CMFD permet une modélisation 3D locale des phénomènes physiques multiphasiques.

⁸ « L'ASN vous demande de justifier la capacité de la modélisation des accumulateurs retenue dans le logiciel CATHARE à simuler la cinétique de décharge de ce composant pour les transitoires d'APRP-BI avec des grosses brèches de taille « intermédiaire » ».

engagé (voir l'engagement n° 16 présenté en Annexe 2), à justifier le conservatisme de ces modèles en cas d'éclatement avéré de la gaine du CMAC dans les études d'APRP. **L'IRSN estime cet engagement acceptable.**

Enfin, au cours du transitoire d'APRP, le système d'injection de sécurité injecte de l'eau liquide froide qui transite jusque dans le cœur du réacteur. La phénoménologie complexe associée à cette phase (crayons surchauffés mis subitement au contact d'eau froide) nécessite la mise en œuvre d'un module spécifique de l'OCS pour la représenter. **L'IRSN considère ce module insuffisamment validé lorsqu'il est utilisé à haute pression, et formule donc à cet égard la recommandation n° 3 présentée en Annexe 1.**

3.3. ASPECTS LIES A LA NEUTRONIQUE

Les aspects relatifs à la neutronique dans la méthode CathSBI concernent la détermination de la puissance résiduelle du cœur ainsi que l'élaboration de la distribution axiale de puissance. **À l'issue de son expertise, l'IRSN considère que le traitement de ces deux aspects présente un niveau de conservatisme adéquat au regard de leur importance dans le transitoire d'APRP**, compte tenu notamment de l'engagement pris par EDF de préciser et de justifier certaines hypothèses concernant l'élaboration des profils axiaux de puissance retenus dans les calculs (voir l'engagement n° 17 présenté en Annexe 2).

3.4. ASPECTS LIES AU COMPORTEMENT DU COMBUSTIBLE

En ce qui concerne la prise en compte du comportement du combustible dans la méthode CathSBI, EDF a fait évoluer certaines données d'entrée (notamment le calcul de la pression interne des crayons de combustible et le calcul de la température initiale du combustible avant le transitoire d'APRP, réalisés en amont de l'application de la méthode) et certains modèles (notamment concernant le calcul de la surchauffe de la gaine en cas de contact entre les crayons ballonnés et la relocalisation de combustible en cas d'éclatement de la gaine). **D'une manière générale, ces évolutions sont jugées satisfaisantes.** Toutefois, à l'issue de l'expertise, EDF a pris l'engagement n° 18 présenté en Annexe 2 pour compléter sa démonstration vis-à-vis du calcul de la pression interne. **Par ailleurs l'IRSN souligne que la modélisation de la surchauffe de la gaine en cas de contact entre les crayons ballonnés ne tient pas compte de l'effet de la distribution hétérogène de température au niveau de la surface externe des gaines. Sur ce point, EDF vise l'absence de contact entre les crayons dans les futures applications de la méthode CathSBI, ce qui est satisfaisant.** EDF a en outre précisé que, si cet objectif ne pouvait être atteint, il justifierait alors la pertinence des modèles pris en compte.

4. CONCLUSION

De manière générale, EDF a apporté des évolutions substantielles au référentiel d'étude de l'APRP et à la méthode CathSBI, ce qui a permis de répondre à une majorité des réserves de l'IRSN et des demandes de l'ASN issues des précédentes instructions.

À l'issue de son analyse, l'IRSN considère que les éléments apportés par EDF sont satisfaisants dans leur ensemble. En particulier, l'introduction d'une nouvelle étape intermédiaire de la méthode CathSBI permettant d'identifier de manière structurée et robuste les paramètres les plus influents, et conduisant ainsi à un niveau de conservatisme adéquat du volet statistique, est considérée comme une avancée notable et positive par l'IRSN.

EDF a de plus pris un nombre important d'engagements au cours de l'expertise, qui permettront à terme de conforter la robustesse des études d'APRP, les réserves subsistantes de l'IRSN faisant l'objet de recommandations pour assurer le conservatisme de la démonstration de sûreté.

Enfin, le fait de viser dans les études d'APRP du RP4 1300 l'absence d'éclatement des gaines de combustible et l'absence de contact entre les crayons constitue une approche prudente et satisfaisante. En effet, certains modèles physiques spécifiques faisant l'objet de réserves de la part de l'IRSN ne seront alors pas activés.

Ainsi, au terme de son expertise, compte tenu des engagements formulés par EDF et sous réserve de la prise en compte des recommandations présentées en annexe 1, l'IRSN considère acceptable l'utilisation du nouveau référentiel d'étude de l'APRP et de la méthode CathSBI pour les études accidentelles de la démonstration de sûreté des réacteurs.

IRSN

Le Directeur général
Par délégation
Frédérique PICHEREAU
Adjoint au directeur de l'expertise de sûreté

Annexe 1 à l'avis IRSN n° 2023-00029 du 23 Février 2023

Recommandations de l'IRSN

Recommandation N° 1

L'IRSN recommande qu'EDF révisé le critère en ECR transitoire fonction de la teneur initiale en hydrogène défini dans le cadre de l'accident de perte de réfrigérant primaire pour ses prochaines applications, en tenant compte des résultats des essais semi-intégraux d'APRP du programme SCIP III LOCA 4 et LOCA 2b. À défaut, EDF devra appliquer une pénalité dans les futures études pour garantir leur conservatisme. Cette pénalité devra être justifiée.

Recommandation N° 2

L'IRSN recommande qu'EDF ajoute le facteur de pondération ξ , permettant de modéliser les effets des crayons voisins du crayon chaud sur son refroidissement, à la liste des paramètres de type 2. EDF définira et justifiera les bornes de l'intervalle de variation de ce paramètre, ainsi que le type de loi associée.

Recommandation N° 3

L'IRSN recommande qu'EDF pénalise les effets bénéfiques du module de renoyage, dès lors qu'il est utilisé en dehors de son domaine initial de validation, c'est-à-dire au-delà de 6 bar, et ce dans l'attente d'éléments complémentaires permettant de conforter sa validation.

Annexe 2 à l'avis IRSN n° 2023-00029 du 23 Février 2023

Engagements de l'exploitant

Engagement N° 1

EDF réalisera des essais complémentaires pour démontrer l'équivalence entre le combustible UO₂ et MOX vis-à-vis de la fragmentation fine et de la dispersion de combustible en APRP.

Engagement N° 2

EDF justifiera l'absence de dispersion de combustible en situation d'accident de perte de réfrigérant primaire et ce, pour les combustibles UO₂ et MOX irradiés à hauts taux de combustion.

Engagement N° 3

EDF révisera le critère APRP en ECR fonction de la teneur en hydrogène, en supprimant toute formule de correction des valeurs d'ECR relative à l'amincissement de la gaine, vis-à-vis des valeurs d'ECR expérimentales et du seuil déterminé sur la base de ces valeurs.

EDF étudiera la possibilité de quantifier l'impact du ballonnement sur la température au niveau du ballon, dans son dispositif semi-intégral.

Engagement N° 4

EDF réalisera des essais semi-intégraux APRP sur Optimized ZIRLO (non hydruré et hydruré) dans son dispositif et, à terme, intégrera ces résultats lors d'une mise à jour de la note définissant le critère APRP en ECR.

De plus, EDF continuera à contribuer aux travaux de R&D permettant de progresser dans la compréhension de l'impact de l'hydruration secondaire et de la préoxydation (représentative de l'oxydation de la gaine en réacteur) sur la tenue de la gaine après oxydation à haute température.

Engagement N° 5

EDF mettra à jour la note du modèle EDGAR Zirlo hydruré à 600 ppm en précisant que le modèle n'est pas validé dans le domaine β .

Pour les matériaux de gainage Optimized ZIRLO et Optimized ZIRLO avec liner, EDF inclura, dans les bases d'identification et de validation des modèles EDGAR, des essais couvrant l'ensemble des domaines de phase, y compris le domaine β .

Engagement N° 6

EDF déterminera quels sont les dispositifs expérimentaux pertinents, et dont les données sont disponibles de manière suffisamment détaillée, puis étendra la base de données de validation des modèles EDGAR à des essais issus de ces dispositifs.

Engagement N° 7

EDF appliquera dans les études à venir la demande A4 en déformation dès lors que des déformations non négligeables – de l'ordre de la dizaine de pourcents – seront constatées avant la pénalisation D3.

Engagement N° 8

Une sensibilité à la perturbation du paramètre statistique retenu dans le processus de sélection des paramètres les plus influents (indices PLI) au sein de l'étape D3 (+/-0,9 σ et +/-1,1 σ) sera réalisée à échéance de l'instruction des études VD4 1300.

Engagement N° 9

La note de méthode CathSBI sera mise à jour en y incluant la description de la démarche associée à la prise en compte des demandes A4 et D3 à échéance de l'instruction des études VD4 1300.

Engagement N° 10

EDF évaluera l'impact de l'utilisation de CATHARE 3 par rapport à CATHARE 2, d'une part sans correction du terme de gravité et avec l'option DCOGRID, et d'autre part avec la correction du terme de gravité dans le module 3D et sans l'option DCOGRID à échéance de l'instruction des études VD4 1300.

Engagement N° 11

EDF apportera les éléments confortant la robustesse numérique de la version CATHARE utilisée lors de la prochaine application de la méthode CathSBI à échéance de l'instruction des études VD4 1300.

Engagement N° 12

EDF présentera une étude de sensibilité à la valeur du facteur de perte de charge singulière au sein de la zone dénoyée du cœur pour un scénario de brèche en branche en U du palier 1300 MWe à échéance de l'instruction des études VD4 1300.

Engagement N° 13

L'étude de sensibilité [sur le maillage radial du cœur] présentée dans la Note Framatome [...] « justification du modèle d'évaluation APRP-BI (CathSBI) » [...] sera reprise pour le palier 1300 MWe en intégrant les dernières évolutions de la modélisation à échéance fin 2025.

Engagement N° 14

EDF présentera la comparaison des calculs CathSBI avec et sans raffinement du maillage axial pour les cas de brèches en BU et BF, à échéance de l'envoi des études APRP BI VD4 1300.

Engagement N° 15

EDF vérifiera, pour un des cas de brèche du référentiel du palier 1300, que les efforts sur la tuyauterie rompue, issus des calculs dynamiques d'aires de brèches, ne conduisent pas à un niveau de contraintes susceptible d'empêcher la diminution de l'aire de brèche au cours du temps, de façon concomitante avec la diminution continue des efforts hydrauliques. Un argumentaire permettra d'étendre ces conclusions à l'ensemble des paliers du Parc.

Engagement N° 16

En cas d'éclatement avéré du CMAC, EDF apportera des justifications du conservatisme de la modélisation « coplanaire équivalent » de la couronne centrale du cœur, retenue dans la méthode CathSBI.

Engagement N° 17

Pour chaque application de la méthode CathSBI EDF :

- précisera et justifiera les limites inférieures et supérieures imposées sur les paramètres neutroniques Fz et AO selon la cote de piquage ZFQ ;
- précisera et justifiera les valeurs des écarts des cotes de piquages et des déséquilibres axiaux de puissance entre crayon chaud, crayon moyen de l'assemblage chaud et crayon moyen du cœur ;
- tiendra compte des incertitudes couvrant tous les modes de fonctionnements (SCTR, FPPR, déséquilibre azimutal de puissance et prolongation de cycle) pour le facteur d'élévation d'enthalpie $F\Delta H$.

EDF prendra cette observation en compte dans le cadre des études APRP BI VD4 1300 et des futures applications.

Engagement N° 18

EDF transmettra les éléments permettant de justifier, pour la gestion de combustible ALCADÉ, le conservatisme de la démarche actuelle d'évaluation de la pénalité pour aléas d'exploitation intervenant dans le calcul de la pression interne des crayons de combustible.