



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Fontenay-aux-Roses, le 29 novembre 2024

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2024-00171

Objet : Poursuite de l'exploitation des réacteurs de 1300 MWe au-delà de la quatrième visite décennale – Expertise des dossiers relatifs à la tenue en service des cuves – zone de cœur et aux méthodes de calculs mécaniques mobilisées dans la révision des dossiers de référence réglementaire.

Réf. : [1] Lettre ASN – CODEP-DEP-2023-053717 du 29 septembre 2023.
[2] Lettre ASN – CODEP-DEP-2024-004364 du 24 janvier 2024.
[3] Lettre ASN – CODEP-DCN-2016-007286 du 20 avril 2016.
[4] Lettre ASN – CODEP-DEP-2015-042999 du 13 avril 2016.
[5] Lettre ASN – CODEP-DEP-2020-045660 du 7 décembre 2020.

Dans le cadre du quatrième réexamen périodique des réacteurs du palier 1300 MWe (RP4 1300), Électricité de France (EDF) met à jour les dossiers de référence réglementaire (DRR) du circuit primaire principal (CPP) et des circuits secondaires principaux (CSP). Cette mise à jour des DRR RP4 1300, qui s'étend jusqu'à fin 2025, prend en compte le retour d'expérience (REX) du quatrième réexamen périodique des réacteurs du palier 900 MWe (RP4 900) et l'utilisation des nouvelles méthodes¹ de calcul suivantes pour les justifications mécaniques :

- la méthode Roche : cette méthode permet d'évaluer de manière réaliste les efforts sismiques inertiels dans les lignes auxiliaires du CPP et les lignes des CSP ;
- la méthode de relaxation des moments secondaires : elle permet d'optimiser les moments dans les boucles primaires en prenant en compte la plastification de la ligne.

De plus, EDF prévoit de mettre en œuvre une simplification, par rapport à l'application dans le cadre du RP4 900, de la méthode de prise en compte des effets de l'environnement du circuit primaire dans les études de fatigue des DRR du palier 1300 MWe.

Enfin, EDF a transmis à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) la mise à jour du dossier de justification de la tenue en service de la zone de cœur des cuves des réacteurs de 1300 MWe pendant la période de 10 ans suivant leur quatrième visite décennale (VD4).

Dans ce contexte, par lettres citées en référence [1] et [2], l'ASN sollicite l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur les points suivants :

¹ Ces méthodes dites « nouvelles méthodes » sont dénommées ainsi car elles n'ont pas, ou pas complètement, été instruites dans le cadre des dossiers précédents et leur application n'a pas fait l'objet d'un positionnement de l'ASN.

MEMBRE DE
ETSON

- pour ce qui concerne l'application des nouvelles méthodes de calcul pour l'établissement des DRR du palier 1300 MWe :
 - l'acceptabilité de la méthode Roche et son cadre d'application,
 - l'acceptabilité de la méthode de relaxation des moments secondaires appliquée au palier 1300 MWe et la validation des torseurs d'efforts en cas de remplacement de composants primaires,
 - la transposabilité de la méthode de prise en compte des effets d'environnement primaire du palier 900 MWe au palier 1300 MWe et le conservatisme des valeurs forfaitaires retenues pour l'identification des zones à analyser dans les études de fatigue,
- pour ce qui concerne la tenue en service de la zone de cœur des cuves des réacteurs du palier 1300 MWe :
 - les valeurs de fluence maximale au niveau des viroles et des joints soudés à l'état VD4+10 ans,
 - l'estimation des caractéristiques mécaniques des matériaux à VD4 +10 ans,
 - l'extension de la zone de cœur au regard du risque de rupture brutale,
 - le réexamen des transitoires thermohydrauliques les plus sollicitants,
 - les résultats des études mécaniques de justification d'absence de risque de rupture brutale.

Les conclusions de l'expertise menée par l'IRSN ainsi que les principaux engagements pris par EDF dans ce cadre sont présentées ci-après.

1. MÉTHODE ROCHE ALTERNATIVE

La méthode Roche adaptée par EDF, dite « méthode Roche alternative » dans la suite, est développée sur la base d'une méthode codifiée dans le RCC-MRx², pour traiter des chargements sismiques inertiels. Elle s'applique aux lignes auxiliaires en acier inoxydable austénitique du CPP et aux lignes des CSP et permet de tenir compte de manière approchée des effets de la plastification de certaines sections des tuyauteries. La plastification a pour effet de réduire les moments de flexion par rapport à une évaluation de ceux-ci par un calcul en élasticité.

La méthode Roche alternative permet d'évaluer un coefficient d'abattement et la part des moments sismiques inertiels sur laquelle ce coefficient est appliqué. Les tronçons des lignes de tuyauteries ramifiées sont regroupés suivant les règles de l'art du calcul des tuyauteries. Pour chaque regroupement le coefficient d'abattement minimal est retenu.

La validation de la méthode Roche alternative et l'analyse de son conservatisme sont réalisées sur une série de calculs pour les configurations suivantes :

- quatre lignes de tuyauterie REP issues du parc français (trois lignes des réacteurs du palier 1300 MWe et une ligne des réacteurs du palier 900 MWe) ;
- une ligne dénommée « ELSA », représentative de tuyauteries des réacteurs REP, qui a fait l'objet d'essais expérimentaux sur table vibrante ;
- une « batterie de calculs » réalisée sur une ligne de tuyauterie des réacteurs du palier 900 MWe, en faisant varier les paramètres géométriques (le diamètre, l'épaisseur et la portée entre les supports, 30 calculs).

Les résultats obtenus par l'application de la méthode Roche alternative sont comparés avec ceux obtenus par des calculs de référence aux éléments finis en élastoplasticité. La comparaison des résultats montre que certains cas obtenus avec cette méthode présentent un sous-conservatisme par rapport aux calculs en élastoplasticité.

² Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des installations nucléaires hautes températures, expérimentales et de fusion.

L'IRSN n'a pas de remarque sur le développement de la méthode Roche alternative et juge satisfaisant, dans son principe, la démarche de validation de cette méthode. L'IRSN estime cependant que le sous-conservatisme occasionnellement observé ne doit pas être couvert par les incertitudes inhérentes à la méthode d'établissement des résultats de référence. Par ailleurs, l'IRSN constate que le choix de découpage en tronçons dans le cas des lignes de tuyauteries ramifiées pourrait être une source d'incertitude non négligeable. Pour l'IRSN, cette incertitude pourrait diminuer le conservatisme de la méthode, voire entraîner son non-conservatisme.

En outre, EDF a présenté une démonstration pour étendre l'application de la méthode Roche alternative aux cas des lignes de tuyauteries en acier ferritique. Pour l'IRSN, le choix fait par EDF pour approcher la loi décrivant le comportement de ces aciers, différente de celles des aciers inoxydables austénitiques, peut conduire à une surestimation du coefficient d'abattement des moments sismiques inertiels.

Compte tenu de ses conclusions, l'IRSN formule la Recommandation n° 1 en ANNEXE 1.

2. MÉTHODE DE RELAXATION DES MOMENTS SECONDAIRES

Dans le cadre de la mise à jour des DRR pour le RP4 900, EDF a valorisé une méthode de relaxation des moments secondaires pour le calcul des moments considérés dans les études de risque de rupture brutale du CPP. Les moments dits « secondaires » sont ceux qui résultent de déplacements imposés aux tuyauteries, par opposition à ceux qui résultent de forces imposées qui sont dits « primaires ». La relaxation est apportée par la plastification de certaines sections des tuyauteries du circuit primaire principal sous l'effet des déplacements imposés.

Dans le cadre du RP4 900, l'expertise par l'IRSN de cette méthode s'est limitée aux valeurs des moments secondaires relaxés, notamment ceux associés aux opérations de remplacement des générateurs de vapeur (RGV) et de remplacement des tuyauteries primaires en branche froide (RTBF).

Pour l'établissement des DRR RP4 1300, EDF a également retenu cette méthode de relaxation des moments secondaires pour définir les valeurs des torseurs d'efforts retenus à l'issue des RGV et des remplacements des composants du circuit primaire (RCCP) du palier 1300 MWe.

Le développement de la méthode a été réalisé en deux phases. Une première approche, dite « approche proportionnelle », permet un développement analytique moyennant l'hypothèse que tous les chargements appliqués varient proportionnellement à une grandeur unique. Compte tenu du fait que les efforts extérieurs réellement imposés aux tuyauteries sont en général non proportionnels, une formulation incrémentale est développée, dite « approche complète », qui permet de prendre en compte l'effet lié à la séquence d'application des chargements au cours du temps. Pour sa mise en œuvre, cette seconde approche nécessite de recourir à un outil de calcul. **L'ensemble de ces développements n'appelle pas de remarque de l'IRSN.**

Une démarche de vérification et de validation a été mise en œuvre tout au long du développement de ces deux approches. **Cette démarche est jugée satisfaisante par l'IRSN.**

La validation de l'approche complète met en évidence une légère sous-estimation des moments relaxés pour certains cas tests par rapport aux résultats de référence obtenus par des calculs aux éléments finis en élastoplasticité. L'IRSN estime que les sous-estimations identifiées pourraient être compensées par la prise en compte d'un effet de ressort³ « enveloppe » dans la ligne, en particulier lorsqu'elle est longue, comme c'est le cas pour les branches chaudes et froides. **Cependant, pour une géométrie plus complexe, avec des tronçons droits plus courts comme pour le cas de la branche en U, aucune analyse n'est produite. Pour l'IRSN, un**

³ Dans cette méthode, l'effet de ressort d'une portion de ligne désigne l'apparition de déformations plastiques dans une zone très localisée alors que les déformations restent élastiques ailleurs.

complément de validation de la méthode de relaxation des moments secondaires devra donc être apporté. Ce point fait l'objet de l'Engagement n° 1 en ANNEXE 2, que l'IRSN juge satisfaisant.

En outre, l'IRSN souligne que l'ASN avait pris position à l'issue du GP ESPN du 10 juin 2015 pour le palier 900 MWe et avait précisé que la méthode de relaxation des moments secondaires développée « *vise à rendre acceptable par un calcul plus réaliste des chargements qui pourraient conduire à des dépassements de critères* » et que les moments secondaires pouvant être relaxés concernent « *surtout [les] chargements additionnels car non prévus à la conception comme les moments créés par les remplacements des générateurs de vapeur ou ceux induits par l'écart physique du dôme* » [3].

Cependant, l'IRSN constate qu'EDF ne distingue pas les différents types de chargements (prévus à la conception ou additionnels) dans l'application de cette méthode. Ainsi, cette méthode est appliquée au cumul des chargements considérés comme secondaires, incluant le chargement thermique prévu initialement à la conception. **Si EDF souhaite mettre en œuvre sa méthode pour relaxer les efforts associés aux chargements liés à la dilatation thermique déjà prévus à la conception, l'IRSN considère qu'une analyse d'impact de cette prise en compte sur la justification d'absence de risque de rupture brutale des tuyauteries du CPP devra être préalablement réalisée. Ceci conduit l'IRSN à formuler la Recommandation n° 2 en ANNEXE 1.**

La démarche adoptée par EDF pour déterminer les déplacements résiduels et les torseurs d'efforts associés aux opérations de RGV et de RTBF réalisées sur les réacteurs du palier 900 MWe est reconduite pour ceux du palier 1300 MWe. Cette démarche n'appelle pas de remarque de l'IRSN, car elle prend en compte l'ensemble des incertitudes liées à l'accostage et au retrait de soudage dans le calcul des efforts apportés par ces opérations. **L'IRSN considère donc acceptables les torseurs d'efforts déterminés par EDF pour les opérations de RGV et de RCCP du palier 1300 MWe.**

3. FATIGUE ENVIRONNEMENTALE

Le facteur d'environnement noté F_{en} a été introduit dans les DRR à l'état RP4 900 afin de prendre en compte les effets de l'environnement du circuit primaire dans les études de fatigue. Il est applicable à l'ensemble des zones du CPP, hors métal de base ferritique revêtu, et de ses lignes auxiliaires. Le dossier justificatif a été examiné en vue de la mise à jour des DRR RP4 900.

La méthode développée par EDF permet de recenser les zones dites « sentinelles », zones estimées comme potentiellement affectées par les effets de l'environnement au regard de leur comportement en fatigue.

À l'issue de l'expertise de l'étude de transposabilité du REX du palier 900 MWe au palier 1300 MWe fournie par EDF, l'IRSN considère que les différences entre ces deux paliers relatives aux transitoires thermiques et aux géométries des structures ne remettent pas en cause l'applicabilité de la méthode de sélection des zones sentinelles dans les études RP4 1300.

L'IRSN note néanmoins qu'EDF a retenu comme données d'entrée celles de l'état « VD3 1300 + RGV » lors de l'identification des zones sentinelles en RP4 1300. **Il appartient à EDF de justifier que la mise à jour des transitoires thermiques dans le référentiel RP4 n'est pas de nature à remettre en cause la sélection des zones sentinelles.**

Enfin, EDF réalise, pour chaque zone sentinelle identifiée, l'évaluation précise des effets de l'environnement à l'aide des calculs dits « détaillés ». Dans le cadre du RP4 1300, EDF adopte la même méthode de recensement des zones sentinelles que celle appliquée antérieurement pour le RP4 900, mais en simplifiant une de ses étapes : les corrélations utilisées pour estimer le facteur F_{en} sont remplacées par des valeurs forfaitaires, déterminées sur la base du REX RP4 900. **Pour l'IRSN, les valeurs forfaitaires retenues sont conservatives et la simplification de la méthode de recensement est acceptable.**

Ainsi, l'IRSN considère que la méthode simplifiée appliquée par EDF permet d'avoir la raisonnable assurance d'identifier l'ensemble des zones pertinentes pour la prise en compte des effets de l'environnement dans les analyses de fatigue des DRR RP4 1300.

4. TENUE EN SERVICE DES CUVES – ZONE DE CŒUR – JUSQU'À LEUR VD4 + 10 ANS

La tenue en service de la zone de cœur⁴ des cuves des réacteurs du palier 1300 MWe est justifiée par des analyses du risque de rupture brutale de celles-ci. L'estimation des caractéristiques mécaniques des matériaux des viroles de cuve et de leurs joints soudés à l'échéance de VD4 + 10 ans comporte deux étapes principales : la première étape consiste à estimer le flux neutronique reçu depuis le démarrage des réacteurs (ou fluence) par les viroles de cœur au point le plus irradié, dit « point chaud », ainsi qu'au droit des défauts détectés dans certaines cuves ; la deuxième étape vise à évaluer la fragilisation des matériaux de la cuve sous l'effet de cette fluence. En fonction des situations thermohydrauliques retenues, l'évaluation des chargements susceptibles de solliciter un défaut, réel ou postulé, dans toutes les situations de fonctionnement incidentel et accidentel est réalisée. Cette dernière permet la détermination du facteur d'intensité de contrainte qui sera comparé avec la ténacité⁵ du matériau à l'état vieilli.

Fluence reçue par les cuves

L'évaluation de la fluence est obtenue par EDF au moyen d'une chaîne de calcul neutronique et des données issues du programme de surveillance de l'irradiation (PSI) des cuves. **L'IRSN s'est assuré que les projections de fluence, dix ans après la VD4 de chaque réacteur, aux points chauds et au droit des défauts détectés, sont suffisamment conservatives pour être retenues comme données d'entrée pour l'évaluation des caractéristiques des matériaux constitutifs de la zone de cœur.**

Dans l'objectif de limiter le niveau de fluence reçue par les viroles de cœur, EDF prévoit d'introduire, en périphérie du cœur, au droit des points chauds, des grappes neutrophages en hafnium. Ceci permettrait, selon les estimations d'EDF, de réduire le flux neutronique d'environ 30 % à proximité de ces points chauds. **L'IRSN estime que le niveau de réduction de flux réellement obtenu ne pourra être validé qu'après l'analyse des résultats de l'expérimentation de suivi dosimétrique avec et sans grappes en hafnium en cours de réalisation dans le réacteur n°2 de Saint-Alban. Ce point fait l'objet de l'Engagement n° 2 en ANNEXE 2, que l'IRSN juge satisfaisant.**

Par ailleurs, au fil de l'exploitation des réacteurs, la zone de cœur s'étend. Au cours de l'expertise, EDF a apporté des éléments pour évaluer les limites de cette zone à l'échéance de VD4 + 10 ans, avec une méthode jugée satisfaisante par l'IRSN. Il apparaît que la zone de cœur n'intégrera pas de matériaux présentant des caractéristiques mécaniques différentes de ceux faisant déjà l'objet d'un suivi. De plus, le niveau de fluence au niveau de ces nouvelles parties de la zone de cœur reste très faible au regard de celui évalué au point chaud du cœur. **L'extension de la zone de cœur ne remet donc pas en cause les hypothèses retenues pour évaluer la fragilisation de la cuve.**

⁴ La zone de cœur correspond aux parties de la cuve pour lesquelles la fluence estimée à la fin d'un cycle d'irradiation dépasse une valeur seuil.

⁵ La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure.

Examens réalisés en zone de cœur

Le corps de la cuve est constitué de pièces forgées en acier ferritique, soudées entre elles et revêtues d'acier inoxydable en paroi interne. Les procédés de fabrication, en particulier pour les premières cuves des réacteurs du palier 1300 MWe, ont généré quelques défauts à l'interface entre l'acier ferritique et le revêtement dénommés « défauts sous revêtement » (DSR). Trois cuves de réacteurs de 1300 MWe comportent des DSR qui n'ont pas montré d'évolution à l'issue des examens non destructifs menés lors des dernières visites décennales. **L'IRSN considère que les examens non destructifs réalisés par EDF en paroi interne des cuves pour détecter ce type de défauts sont satisfaisants.**

Toutefois, l'IRSN relève les points suivants :

- compte tenu de l'extension de la zone de cœur irradiée des cuves des réacteurs du palier 1300 MWe en RP4, il existe certaines zones non couvertes par le procédé d'examen non-destructif (END) à proximité des supports M⁶ ;
- les dimensions, issues des examens réalisés, d'un même défaut avéré, ne sont pas rigoureusement identiques à chaque visite décennale ; ces différences ne sont pas liées à une évolution des défauts mais aux incertitudes de mesure associées au procédé.

L'incidence de ces deux points au regard de la démonstration d'absence de risque de rupture brutale est détaillée dans la dernière partie de ce chapitre.

Vieillessement des matériaux par irradiation et PSI

L'évolution des propriétés de l'acier de cuve dépend de la composition chimique du métal et de l'irradiation reçue. La fragilisation par irradiation est évaluée par une loi empirique, dite « formule de fragilisation par irradiation » (FFI), établie par EDF. Celle-ci est identique pour toutes les cuves des réacteurs du parc en exploitation. Les valeurs prédites par la FFI sont comparées aux valeurs expérimentales issues du PSI.

La méthodologie d'établissement des valeurs expérimentales de fragilisation par irradiation n'a pas évolué depuis l'analyse réalisée pour le RP4 900. Des éprouvettes provenant de l'acier de chaque cuve sont irradiées en réacteur dans des capsules. La localisation de ces capsules dans la cuve, en des points recevant un flux neutronique supérieur à celui reçu par la cuve, permet d'anticiper le vieillissement par irradiation. Les valeurs de fluence évaluées pour les éprouvettes des capsules d'irradiation permettent de couvrir les valeurs de fluence sur la cuve attendues à l'échéance de VD4 + 10 ans. **Ceci est satisfaisant.**

Certaines valeurs de fragilisation provenant du PSI du réacteur n°1 de Penly dépassent la valeur calculée par la FFI. Ces capsules sont dites en « sur-fragilisation ». Les résultats d'essais de ténacité de l'acier irradié provenant de ce réacteur ne montrent toutefois pas de risque particulier à l'égard du risque de rupture brutale pour cette cuve et l'IRSN a vérifié qu'au vu de son niveau de fragilisation, le cas du réacteur n° 1 de Penly est bien couvert par le dossier générique. EDF poursuit ses expertises pour déterminer si ces dépassements trouvent leur origine dans des effets métallurgiques locaux non liés à la fragilisation par irradiation.

L'IRSN a constaté que le taux de couverture des résultats expérimentaux par la FFI est légèrement inférieur au taux qu'elle doit assurer. EDF s'est engagé à réviser la formule de fragilisation par irradiation en intégrant l'ensemble des résultats provenant des capsules irradiées (cf. Engagement n° 3 en ANNEXE 2). **Cet engagement est jugé satisfaisant.** Cependant, il apparaît que le taux de couverture, qui est susceptible d'évoluer au fur et à mesure de la réception de nouveaux résultats expérimentaux, n'est pas une information clairement identifiée dans la documentation d'EDF et que sa fréquence de mise à jour n'est pas formellement définie. **Ainsi, l'IRSN formule la Recommandation n° 3 en ANNEXE 1.**

⁶ Les supports M, situés en partie inférieure des cuves, assurent le maintien radial des équipements internes de cuve.

Sélection et caractérisation des transitoires thermohydrauliques

La démonstration de la tenue en service des cuves nécessite d'identifier les transitoires les plus pénalisants pour chaque catégorie de situations à laquelle un coefficient de sécurité est associé. L'analyse thermohydraulique a pour but, d'une part de sélectionner les situations donnant lieu aux transitoires les plus sévères parmi l'ensemble des situations de fonctionnement pouvant être rencontrées par la cuve, d'autre part de caractériser les transitoires retenus (évolutions temporelles de la pression, de la température et des débits) afin de définir les chargements thermomécaniques utilisés en tant que données d'entrée de l'analyse du risque de rupture brutale des viroles de cuve et de leurs joints soudés à l'échéance de VD4 + 10 ans.

L'analyse de l'IRSN a porté sur la sélection des transitoires étudiés par EDF et sur le caractère pénalisant de la description thermohydraulique retenue pour chaque transitoire.

Sélection des transitoires

La vérification de l'exhaustivité des transitoires retenus a pour objectif de s'assurer que les transitoires les plus sévères dans chaque catégorie ont bien été considérés.

EDF a réalisé de nombreuses analyses afin de montrer que toutes les situations présentant les risques de choc thermique froid les plus importants sur la cuve ont bien été traitées dans son dossier. Cette vérification a été menée selon différentes approches, notamment par la prise en compte des transitoires du domaine complémentaire⁷ et par la recherche de transitoires additionnels au dossier des situations (DDS) obtenus en cumulant une défaillance aux situations de deuxième ou de troisième catégorie. Des transitoires supplémentaires à étudier ont ainsi été identifiés et pris en compte. Par ailleurs, le retour d'expérience des expertises concernant les anomalies de ségrégation de carbone qui affectent certains fonds primaires de générateurs de vapeur du parc en exploitation et les calottes de la cuve de l'EPR de Flamanville a également été considéré.

En l'état des connaissances, l'IRSN considère que les transitoires les plus sévères pour chaque catégorie de situations ont bien été identifiés.

Caractérisation des transitoires retenus

Situations de 2^e catégorie

Les situations de 2^e catégorie sont définies dans le DDS pour couvrir les situations de fonctionnement normal et perturbées dues à des dysfonctionnements des régulations ou de certains systèmes, en retenant les variations maximales de pression, de température et de débit envisageables. **L'IRSN n'a pas de remarque sur la caractérisation des transitoires de 2^e catégorie issus du DDS. Par ailleurs, EDF a défini, au titre de la robustesse, un transitoire enveloppe de toutes les situations de 2^e catégorie du DDS, ce qui est satisfaisant.**

Situations de 3^e catégorie

Les transitoires de 3^e catégorie les plus pénalisants pour la tenue de la cuve sont les transitoires de petites brèches primaires. À ce titre, leur caractérisation a fait l'objet de développements spécifiques pour répondre aux demandes de l'ASN issues des GP ESPN VD3 1300 + 10 ans [4] et VD4 900 + 10 ans [5] et intégrer le retour d'expérience de ces expertises.

⁷ Le domaine complémentaire est constitué de situations pour lesquelles EDF a défini des dispositions complémentaires qui permettent de ramener à un niveau acceptable les conséquences sur le cœur d'autres initiateurs que ceux pris en compte dans le dimensionnement conventionnel de base, et qui peuvent inclure des défaillances multiples. Les initiateurs retenus, issus des études probabilistes de sûreté, sont ceux présentant un risque de fusion du cœur.

La caractérisation des transitoires de petite brèche primaire est réalisée par EDF à l'aide d'une chaîne de calculs mettant en œuvre plusieurs outils de calcul. Il est donc nécessaire de s'assurer du conservatisme de cette chaîne de calcul et des différentes corrélations utilisées.

À l'issue de l'analyse des éléments fournis par EDF, l'IRSN estime qu'EDF a répondu de manière satisfaisante aux demandes de l'ASN et a démontré le conservatisme de la chaîne de calcul, en particulier de la corrélation utilisée pour déterminer les coefficients d'échange thermique entre le fluide et la paroi de la cuve.

Pour caractériser les transitoires de petite brèche primaire, plusieurs configurations doivent être analysées en fonction de la taille de la brèche, de sa localisation et des hypothèses retenues pour les systèmes permettant de refroidir le circuit primaire. En particulier, un transitoire de petite brèche primaire peut générer un choc froid sur la cuve dans une configuration dite non dénoyée⁸, par injection d'eau froide dans le circuit primaire rempli d'eau initialement chaude, ou dans une configuration dite dénoyée⁹, avec des phases à cinétiques variables de dénoyage et renoyage de la descente annulaire de la cuve.

Concernant les transitoires non dénoyés, les cas pénalisants identifiés à l'issue des calculs de sensibilité différent de ceux retenus dans le dossier cuve VD3 + 10 ans, puisqu'ils considèrent une brèche localisée en branche froide et non en branche chaude. EDF n'a pas fourni d'analyse satisfaisante visant à expliquer la remise en cause par les récentes études du caractère pénalisant des brèches en branche chaude. Néanmoins, il existe un conservatisme intrinsèque pour l'étude des brèches en branche froide, la chaîne de calcul utilisée ne prenant pas en compte le fait qu'une partie du débit d'eau injecté par le système de sauvegarde est perdue à la brèche. **Le cas pénalisant de brèche en branche froide du dossier devrait donc couvrir les cas de petite brèche en configuration non dénoyée. Toutefois, il appartient à EDF de conforter cette conclusion.**

Concernant les transitoires dénoyés, en réponse à un engagement pris dans le cadre du dossier VD4 900 + 10 ans, EDF a mené des calculs, complétés par une analyse par jugement d'ingénieur, qui a conclu à l'absence de transitoire conduisant à un dénoyage profond de la descente annulaire de la cuve. En support à son expertise, l'IRSN a également réalisé des calculs, sans toutefois couvrir de manière exhaustive l'ensemble des paramètres potentiellement influents. Ces calculs montrent un dénoyage plus prononcé que celui obtenu par EDF, ce qui démontre que la suffisance des études réalisées par EDF pour identifier les cas pouvant conduire à un fort dénoyage n'est pas établie. **Pour répondre à cette réserve et compte tenu du délai imparti, EDF a évalué de manière enveloppe l'impact d'un fort dénoyage de la descente annulaire suivi d'un rapide renoyage par l'injection d'eau froide, ce qui est satisfaisant.**

Situations de 4^e catégorie et du domaine complémentaire

Compte tenu des justifications et compléments apportés par EDF au cours de l'expertise, l'IRSN estime acceptables les caractérisations thermohydrauliques des transitoires de 4^e catégorie retenus. Par ailleurs, en réponse à une demande de l'ASN [4], EDF a considéré les transitoires du domaine complémentaire afin de compléter la recherche de scénarios conduisant à des situations pénalisantes pour la cuve. **Les caractérisations retenues ont été définies de manière découpée afin de couvrir l'ensemble des transitoires à étudier à ce titre, ce qui est satisfaisant.**

Démarche d'analyse du risque de rupture brutale de la cuve – zone de cœur

La méthodologie et les principales hypothèses de justification de l'absence de risque de rupture brutale de la zone de cœur irradiée des cuves des réacteurs du palier 1300 MWe sont reconduites des dossiers de tenue en

⁸ La configuration dite « non dénoyée » correspond à un transitoire durant lequel le niveau d'eau dans la cuve ne passe pas durablement sous la génératrice inférieure de la branche froide.

⁹ La configuration dite « dénoyée » correspondant à un transitoire avec un niveau d'eau durablement sous la génératrice inférieure de la branche froide, qui peut mener à un dénoyage profond de la descente annulaire de la cuve.

service des cuves des réacteurs de 1300 MWe en VD3 et de celles des réacteurs de 900 MWe en RP4. Un niveau de contraintes résiduelles de soudage dans les joints soudés des viroles de cuve de 70 MPa est pris en compte dans les analyses mécaniques du RP4 1300. **L'IRSN rappelle que la justification de cette valeur devra être confirmée par le programme d'essais d'EDF en cours de réalisation. Ce programme d'essais, quant à lui, n'appelle pas de remarque particulière de l'IRSN.**

Pour les justifications mécaniques, deux types de défauts ont été étudiés :

- le défaut générique est assimilé à un défaut sous revêtement dont les dimensions correspondent à celles garanties par le procédé de contrôle qualifié ;
- les défauts avérés dont les dimensions sont celles déterminées par les END effectués, majorées des incertitudes associées.

L'IRSN s'interroge sur la prise en compte de l'évolution des dimensions du défaut avéré de la cuve du réacteur n° 1 de Flamanville (FLA1) dans les calculs mécaniques. La hauteur du défaut retenue en RP4 1300 est inférieure à celle retenue pour la VD3 1300. L'IRSN convient que l'utilisation de la taille de défaut mesurée lors de la VD3 1300 ne serait pas de nature à remettre en cause la conclusion quant à l'absence de risque de rupture brutale pour la cuve de FLA1. Néanmoins, l'IRSN estime que la taille de défaut retenue pour l'évaluation du risque de rupture brutale devrait être issue de l'application d'une méthodologie générique prenant en compte tous les résultats de mesures réalisées lors des visites décennales successives pour évaluer la taille de défaut réelle et son éventuelle évolution dans le temps. **Pour l'IRSN, il appartiendra à EDF de formaliser la méthodologie de détermination de la taille des défauts avérés à partir des résultats des examens non-destructifs réalisés lors des visites décennales successives et en considérant toutes les sources d'incertitudes.**

S'agissant des supports M nouvellement inclus dans la zone de cœur irradiée, bien que les éléments fournis par EDF permettent de démontrer l'absence de risque de rupture brutale pour le défaut générique, l'IRSN estime que la démonstration n'est pas complète puisque l'absence de DSR dans ces zones n'est pas démontrée. Ainsi, le risque de rupture brutale ne peut pas être complètement écarté dans les zones non examinées au niveau des supports M. **Ce point fait l'objet de l'Engagement n° 4 en ANNEXE 2, que l'IRSN juge satisfaisant.**

En dehors des deux points spécifiques mentionnés supra, **l'application de la méthodologie de calcul des marges à la rupture brutale à l'aide d'une méthode simplifiée analytique et d'une méthode tridimensionnelle élastoplastique, ainsi que les données d'entrée utilisées, n'appellent pas de remarque de l'IRSN.** Concernant les résultats des analyses du risque de rupture brutale associé au défaut générique et aux défauts avérés, **les facteurs de marge obtenus sont tous supérieurs à 1, ce qui permet de justifier l'absence de risque de rupture brutale des cuves des réacteurs de 1300 MWe à l'échéance de VD4 + 10 ans. Ceci est satisfaisant.**

5. CONCLUSION

À l'issue de son expertise, concernant les méthodes de calcul mobilisées dans la révision des DRR RP4 1300, l'IRSN considère que l'application de la méthode Roche alternative nécessite un renforcement de son conservatisme. L'IRSN considère acceptable l'application de la méthode de relaxation des moments secondaires mais estime qu'EDF devra réaliser une analyse d'impact sur la prise en compte des chargements liés à la dilatation thermique pour la justification d'absence de risque de rupture brutale des lignes du circuit primaire principal.

Concernant la prise en compte de l'effet de l'environnement primaire dans les analyses de fatigue, l'IRSN considère que la méthode d'identification des zones sentinelles est transposable du palier 900 MWe au palier 1300 MWe et que sa simplification pour l'application à l'élaboration des DRR des réacteurs du palier 1300 MWe est conservative.

Concernant la tenue en service de la zone de cœur des cuves des réacteurs de 1300 MWe pendant la période de 10 ans suivant leur quatrième visite décennale, l'IRSN estime qu'EDF a justifié l'absence de risque de rupture brutale associé aux défauts génériques postulés aux points les plus irradiés et aux trois défauts avérés sur l'ensemble des cuves des réacteurs du palier 1300 MWe.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Thierry PAYEN

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

ANNEXE 1 À L'AVIS IRSN N° 2024-00171 DU 29 NOVEMBRE 2024

Recommandations de l'IRSN

Recommandation n° 1

L'IRSN recommande qu'EDF intègre à sa méthode d'abattement de la part secondaire des moments sismiques inertiels des provisions suffisantes et appropriées pour garantir son conservatisme systématique en vue d'une application aux lignes de tuyauteries réelles pour l'établissement du dossier de justification d'absence de risque de rupture brutale et pour les calculs de supports du palier 1300 MWe, notamment pour couvrir les incertitudes liées :

- au « découpage » en tronçons dans le cas des lignes de tuyauteries ramifiées ;
- à la loi décrivant le comportement des aciers ferritiques.

Recommandation n° 2

L'IRSN recommande qu'EDF évalue l'impact de la prise en compte de la relaxation des moments secondaires de dilatation thermique sur la justification d'absence de risque de rupture brutale des lignes du circuit primaire principal des réacteurs de 1300 MWe jusqu'à la VD4 + 10 ans.

Recommandation n° 3

L'IRSN recommande qu'EDF vérifie, au minimum tous les deux ans, que le taux de couverture des données de fragilisation par irradiation des matériaux de cuve par la loi de fragilisation par l'irradiation en vigueur au moment de cette vérification reste au moins égal à celui visé lors de l'élaboration de cette loi.

ANNEXE 2 À L'AVIS IRSN N° 2024-00171 DU 29 NOVEMBRE 2024

Engagements principaux d'EDF

Engagement n° 1

EDF réalisera d'ici le 30 juin 2026 un calcul tridimensionnel élastoplastique sur une branche en U intégrale pour compléter le dossier de validation de la méthode.

Engagement n° 2

Le rapport d'expérimentation et l'analyse sur la valeur de réduction de flux au point chaud sera transmis à l'ASN et à l'IRSN à fin 2025.

Engagement n° 3

La nouvelle FFI en cours d'élaboration par EDF, dont les éléments justificatifs seront transmis en juin 2025, sera utilisée dans le dossier de rupture brutale de la zone de cœur des cuves du palier 900 MWe, à l'occasion de leur réexamen périodique VD5.

Engagement n° 4

EDF réalisera une étude de sensibilité mécanique à la taille du défaut dans les zones, appartenant à la zone de cœur, non-examinées par le procédé qualifié autour des supports M à échéance fin 2025.