



Fontenay-aux-Roses, le 12 juin 2024

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

AVIS IRSN N° 2024-00087

Objet : Réacteurs électronucléaires d'EDF de 1300 MWe – RP4 1300 – Examen des études probabilistes de sûreté de niveau 2 relatives aux événements internes (EPS2 RP4 1300).

Réf. :

- [1] Saisine ASN - CODEP-2023-DCN-2023-029208 du 1^{er} juin 2023.
- [2] Lettre ASN - CODEP-DCN-2013-013464 du 28 juin 2013.
- [3] Courrier ASN - CODEP-DCN-2021-034392 du 23 juillet 2021.
- [4] Courrier ASN - CODEP-DCN-2019-009228 du 11 décembre 2019.
- [5] Règle fondamentale de sûreté (RFS) 2002-01 du 26 décembre 2002 relative à l'utilisation des études probabilistes pour la sûreté des installations nucléaires de base.
- [6] Avis IRSN n° 2024-00012 du 31 janvier 2024.
- [7] Avis IRSN n° 2024-00076 du 28 mai 2024.

Par la saisine en référence [1], l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a sollicité, dans le cadre du quatrième réexamen périodique des réacteurs nucléaires de 1300 MWe (RP4 1300), l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur l'étude probabiliste de sûreté de niveau 2 (EPS2) développée par EDF pour évaluer le risque de rejets radioactifs associé aux événements internes à l'installation.

Outre les données et hypothèses retenues dans l'EPS2 ainsi que la prise en compte des demandes afférentes à cette étude formulées par l'ASN dans les courriers en références [2] et [3], l'IRSN a examiné la prise en compte des modifications matérielles et intellectuelles proposées par EDF pour répondre aux objectifs de sûreté du RP4 1300, ainsi que les enseignements de l'EPS2 quant à l'adéquation et la suffisance de ces modifications au regard des objectifs du réexamen.

1. INTRODUCTION

En 2019, l'ASN a statué par le courrier cité en référence [4] sur les objectifs de sûreté à atteindre pour le RP4 1300. L'ASN a ensuite présenté ses attentes concernant les études à mener par EDF, formulées initialement en 2021 [3] puis mises à jour pour tenir compte d'éléments de contexte apportés par EDF.

Les réévaluations de sûreté menées à l'occasion du RP4 1300 (à l'instar du RP4 900) tiennent compte de l'évolution des connaissances et des pratiques, du retour d'expérience acquis sur le parc électronucléaire français ou à l'international, et doivent permettre d'améliorer le niveau de sûreté des réacteurs de 1300 MWe avec des objectifs proches de ceux applicables aux réacteurs de nouvelle génération.

Les EPS constituent un des éléments sur lesquels s'appuie la démarche de réévaluation de sûreté d'EDF. Elles permettent en effet, en complément des études déterministes, d'identifier d'éventuels besoins d'amélioration des dispositions de conception ou d'exploitation [5].

2. INSTALLATION DE RÉFÉRENCE ET PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE

EDF a mis à jour l'EPS2 1300 relative aux événements internes à l'installation pour qu'elle soit représentative de l'état des réacteurs en tenant compte des modifications (matérielles et intellectuelles) prévues dans le cadre du RP4 1300, notamment les modifications dites « post-Fukushima ».

En plus des modifications valorisées dans l'EPS1 [6], EDF a ainsi modélisé dans l'EPS2 RP4 1300 les dispositions nouvelles suivantes, conçues pour la gestion des accidents avec fusion du cœur :

- l'étanchéification du puits de cuve et du local RIC¹ pour garantir un étalement à sec du corium² après la rupture de la cuve ;
- le canal de transfert du corium entre le puits de cuve et le local RIC (l'étalement du corium hors de la cuve étant prévu à la fois dans le puits de cuve et le local RIC) ;
- le système de renoyage passif du corium (ouverture de trappes mettant en communication l'eau présente dans les puisards de l'enceinte avec la zone d'étalement du corium) ;
- les systèmes EAS-ND³ et SFu⁴ permettant le refroidissement du corium et l'évacuation de la puissance résiduelle hors de l'enceinte de confinement sans ouverture de son dispositif d'éventage-filtration (U5) ;
- la pompe mobile permettant d'injecter de l'eau brute dans les puisards de l'enceinte afin de maintenir le corium sous eau après l'ouverture du dispositif U5, en cas de défaillance à long terme du système EAS-ND.

L'IRSN souligne que les limites qu'il a identifiées [6] concernant le profil de fonctionnement⁵ et le périmètre (événements redoutés, initiateurs et états du réacteur considérés) de l'EPS1 1300 s'appliquent également à l'EPS2 (notamment l'absence de traitement des surpressions à froid [7] ou des situations de dilution inhérente).

3. RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

EDF présente les résultats de son étude selon sa catégorisation habituelle des risques de rejet :

- les rejets importants R1 correspondent à une situation de perte précoce du confinement (avant 24 heures) ;
- les rejets importants R2 correspondent à une situation de perte plus tardive du confinement (après 24 heures), principalement due à l'échec de la mise en œuvre du dispositif U5 d'éventage-filtration de l'enceinte de confinement (l'ouverture du dispositif U5 étant nécessaire en cas de défaillance des

¹ RIC : Instrumentation interne du cœur.

² Amas de combustible et d'éléments de structure du cœur d'un réacteur nucléaire fondus et mélangés, pouvant se former en cas d'accident avec fusion du cœur.

³ EAS-ND : système appartenant au noyau dur mis en œuvre dans le cadre post-Fukushima, permettant une injection d'eau borée dans le circuit primaire ou dans l'enceinte de confinement, ainsi que le refroidissement de cette eau pour évacuer la puissance résiduelle hors de l'enceinte de confinement.

⁴ SFu : système mobile, amené sur site par la FARN (force d'action rapide nucléaire), qui aspire l'eau brute de la source froide du site (fleuve, mer...) et l'injecte dans l'échangeur de chaleur de l'EAS-ND afin de refroidir l'eau des puisards du bâtiment réacteur et évacuer la puissance résiduelle.

⁵ Durées moyennes passées par un réacteur dans chaque état de fonctionnement.

systèmes EAS⁶ et EAS-ND) ;

- les rejets R3 sont associés à la mise en œuvre du dispositif U5 après 24 heures ;
- les rejets R4 correspondent à une situation de fusion du cœur avec des rejets limités ;
- les rejets RP correspondent à la percée du radier de l'enceinte de confinement ; cette catégorie inclut les catégories R1 et R2, l'ambiance radiologique régnant alors sur le site étant supposée empêcher la réalisation des actions nécessaires pour éviter le percement du radier.

Les fréquences des catégories de rejets R1, R2, R3 et RP sont très sensiblement réduites par rapport à celles qui avaient été calculées dans le cadre du RP3 1300.

De manière générale, les résultats obtenus confortent pour EDF l'atteinte des objectifs associés à l'étude des accidents graves pour le RP4 1300, à savoir rendre les risques de rejets précoces importants extrêmement improbables et éviter les effets durables dans l'environnement.

EDF souligne en outre que les modifications suivantes, prévues en RP4 1300, ne sont pas prises en compte dans l'EPS2 :

- la mise en place de contacteurs à accrochage au niveau des départs électriques de l'alimentation de certains ventilateurs, afin d'éviter l'ouverture de ces contacteurs en cas de perte de tension ;
- l'installation d'un dispositif permettant, en cas de perte électrique de la voie A, d'alimenter les vannes du système EAS-ND depuis la voie B et donc de les manœuvrer.

Leur prise en compte devrait permettre de reporter des accidents de la catégorie de rejets R3 dans la catégorie de rejets R4.

Les scénarios de découverture du combustible entreposé dans la piscine de désactivation du combustible ne sont pas intégrés à l'étude. Ces scénarios entraîneraient des rejets importants sans parade valorisable dans l'EPS2 compte tenu de l'absence de confinement de la piscine de désactivation.

4. HYPOTHÈSES RETENUES DANS L'EPS2

Les hypothèses retenues par EDF sont globalement cohérentes avec l'état technique RP4 1300 visé, ce qui est satisfaisant. L'IRSN relève toutefois quelques points appelant à considérer les résultats et enseignements de l'étude avec une certaine prudence.

États dégradés issus de l'EPS1 et calculs physiques représentant la progression de l'accident

Les scénarios d'accident avec fusion du cœur issus de l'EPS1 sont regroupés dans 27 « états dégradés de l'installation » (EDI) constituant l'entrée de l'EPS2. Ce processus de regroupement est bien documenté. **Le nombre réduit d'EDI conduit toutefois à regrouper des scénarios pour lesquels le déroulement de l'accident et la conduite sont différents.**

La modélisation des phénomènes physiques dans l'EPS2 s'appuie ensuite principalement sur un ensemble de 31 simulations de séquences accidentelles, permettant de caractériser la progression d'un accident avec fusion du cœur. EDF évalue ainsi notamment les risques d'apparition d'une brèche induite⁷ sur le circuit primaire (en cas de fusion en pression), de combustion dans l'enceinte interne de confinement ou l'espace entre-

⁶ Système d'aspersion dans l'enceinte : système de sauvegarde ayant pour but de diminuer la pression et la température dans l'enceinte de confinement du réacteur en situation accidentelle.

⁷ Lors de la dégradation du combustible, la vapeur chaude, sortant du cœur du réacteur et circulant par convection naturelle dans le circuit primaire s'il est en pression, provoque un échauffement important des tuyauteries de ce circuit, susceptible d'entraîner leur rupture par fluage. Cette rupture est dite « induite » (par la fusion préalable du cœur).

enceintes, ou d'échauffement direct de l'enceinte interne⁸ (en cas de rupture de la cuve en pression) et les délais disponibles pour la réalisation des actions humaines.

Le nombre de simulations effectuées par EDF apparaît faible au regard de la diversité des séquences accidentelles à considérer. Toutefois, la conduite accidentelle et certaines modifications de l'installation étant encore en cours de conception lors du développement de l'EPS2 RP4 1300, le nombre de calculs réalisés est acceptable en première approche.

Conduite et évaluation probabiliste de la fiabilité humaine (EPFH)

Dans le cadre du RP4 1300, EDF a développé une nouvelle méthode EPFH, présentée comme une « industrialisation » de la méthode utilisée précédemment. Cette méthode est utilisée par EDF pour évaluer, dans l'EPS2, la probabilité d'échec des actions à réaliser par les équipes de conduite et de crise (locale et nationale).

Les règles et consignes de conduites accidentelles ainsi que le guide d'intervention en accident grave (GIAG) à l'état technique RP4 1300 n'étant pas disponibles lors de la mise au point de l'EPS2 RP4 1300, EDF s'est appuyé sur des documents correspondant à l'état technique RP3 des réacteurs ainsi que sur le GIAG à l'état RP4 du palier 900 MWe, compte tenu des similitudes de gestion d'un accident avec fusion du cœur pour les réacteurs de 900 MWe et de 1300 MWe. **La pertinence de l'étude devra être confirmée une fois la documentation de conduite finalisée.**

Une des hypothèses fortes de l'étude est l'application effective du GIAG par les opérateurs de conduite 30 minutes après l'atteinte d'un critère physique d'entrée dans le GIAG. Cela concerne les actions dites « immédiates » du GIAG (dépressurisation du circuit primaire, isolement de l'enceinte de confinement...) dont le but est de prévenir les risques de rejets précoces. **L'IRSN estime que la pertinence de cette hypothèse pourrait être vérifiée, pour les accidents à cinétique rapide, par des exercices d'entrée dans le GIAG, aussi réalistes que possible et mobilisant tous les acteurs concernés.**

Par ailleurs, EDF valorise dans l'EPS2 RP4 1300 la possibilité que les opérateurs de conduite utilisent, avant l'entrée en accident grave, un moyen mobile de sûreté (MMS) permettant d'ouvrir les lignes de décharge du pressuriseur (LDP) en cas de perte de leur contrôle-commande normal. **Cette évolution des procédures de conduite permet de réduire le risque de fusion du cœur en pression, ce qui est très satisfaisant.** Toutefois, l'IRSN relève que les inspections réalisées sur site par l'ASN mettent en évidence de façon récurrente la difficulté parfois très importante, pour les agents de terrain, à simuler l'ouverture des LDP à l'aide du MMS. **Ainsi, il appartient à EDF de s'assurer de l'applicabilité sur site des fiches d'actions locales relatives à la mise en œuvre du MMS permettant d'ouvrir les LDP et, de manière plus générale, de toutes les fiches d'actions locales relatives aux accidents graves.**

Phénomènes physiques

De manière générale, la modélisation des phénomènes physiques dans l'EPS2 est satisfaisante. **Toutefois, l'IRSN considère que l'étude ne caractérise pas suffisamment les incertitudes concernant :**

- **le risque de combustion d'hydrogène dans l'enceinte interne pendant la dégradation du cœur en cuve** et notamment sa sensibilité à la cinétique d'oxydation du zirconium en cuve, à la température de fusion de l'eutectique $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$ et à la géométrie du cœur ;
- **le risque de combustion d'hydrogène ou de monoxyde de carbone dans l'espace entre-enceintes**, en distinguant le fonctionnement ou non de la ventilation de cet espace ;
- **le risque de rupture induite en branche chaude du circuit primaire** en cas de fusion en pression ;

⁸ Pressurisation rapide de l'enceinte de confinement due à l'éjection de particules de corium depuis la cuve lors de sa défaillance.

- **le risque d'explosion de vapeur dans le puits de cuve**, en cas de présence d'eau à l'instant de rupture de la cuve ou lors d'une coulée plus tardive de corium ;
- **le risque de percement du radier en cas de coulées tardives de corium depuis la cuve, en présence d'eau perturbant le bon étalement du corium dans la zone du puits de cuve.**

En outre, les situations accidentelles pouvant conduire à une arrivée d'eau dans le puits de cuve avant une rupture de la cuve ne sont pas toutes modélisées.

L'IRSN considère que la prise en compte d'incertitudes adaptées concernant la modélisation des phénomènes physiques en situation d'accident grave est un point essentiel permettant d'asseoir la pertinence des enseignements de l'EPS2.

Fonction confinement

EDF modélise le comportement mécanique des enceintes internes de confinement des réacteurs du palier 1300 MWe et l'évolution de leur taux de fuite en cas d'accident par une courbe de fragilité fournissant la probabilité conditionnelle de dégradation du confinement en fonction de la seule pression dans l'enceinte. Pour l'IRSN, les forts gradients thermiques générés dans les parois de l'enceinte en situations accidentelles sont susceptibles d'induire des dommages mécaniques pouvant dégrader le taux de fuite de l'enceinte. L'IRSN considère ainsi que la courbe de fragilité actuellement retenue par EDF conduit à sous-estimer le risque d'un accroissement du taux de fuite de l'enceinte interne pour certains scénarios accidentels. Plus généralement, l'IRSN estime que les incertitudes associées au comportement des enceintes internes de confinement en situation accidentelle nécessitent d'être mieux évaluées.

À ce titre, l'IRSN considère qu'EDF doit définir et mettre en œuvre un programme de travail pour caractériser de façon réaliste (par des moyens expérimentaux et numériques) le comportement des enceintes internes des réacteurs du palier 1300 MWe sous un chargement thermomécanique d'accident grave et les incertitudes associées.

Enfin, la caractérisation du comportement des revêtements d'étanchéité posés à l'intrados des enceintes internes en conditions d'accident grave n'est pas achevée à ce jour et EDF poursuit des actions en ce sens.

5. ENSEIGNEMENTS

Dans le cadre du RP4 1300, EDF a quantifié les rejets radioactifs dans l'environnement pour certains scénarios de l'EPS2, ce qui est satisfaisant. Toutefois, EDF ne souhaite pas renouveler ce type de calculs pour les prochaines EPS2, considérant que la seule évaluation de la fréquence des catégories de rejet est suffisante au regard des enseignements qui peuvent être tirés de ces études.

L'IRSN considère au contraire que l'évaluation des rejets, voire de leurs conséquences, est une bonne pratique qui permet de présenter et hiérarchiser les risques avec des métriques « fréquence x gravité des conséquences », favorisant une meilleure compréhension des enjeux et des gains pour la sûreté que peuvent apporter certaines améliorations de l'installation.

En particulier, l'analyse réalisée par l'IRSN avec une telle métrique montre l'enjeu des situations avec fusion du cœur survenant alors que le tampon d'accès des matériels (TAM⁹) de l'enceinte de confinement est ouvert. À cet égard, EDF s'est engagé à caractériser la réduction des rejets pouvant être obtenue par la fermeture de la porte biologique du TAM, ce qui est satisfaisant. **Le cas échéant, la capacité des opérateurs à refermer la porte**

⁹ Chaque bâtiment réacteur comporte un accès de grande dimension, appelé « tampon d'accès matériel » (TAM) qui permet l'entrée et la sortie du matériel lors des phases d'arrêt du réacteur pour maintenance. Un système de fermeture (côté intérieur de l'enceinte) assure l'étanchéité de cet accès lorsque le réacteur est en fonctionnement. Une porte coulissante en béton (porte biologique) ferme l'accès côté extérieur de l'enceinte.

biologique en situation accidentelle devra également être appréciée et modélisée dans l'EPS2. En outre, EDF s'est engagé, comme pour les réacteurs de 900 MWe, à **valoriser dans ces situations le système EAS pour rabattre les produits de fission dans l'enceinte de confinement, ce qui est également satisfaisant.**

L'analyse par une métrique « fréquence x gravité » met également en évidence l'importance de la fiabilité des actions humaines permettant d'éviter une rupture de la cuve en pression. Ces actions et leurs effets doivent être modélisées avec précision dans l'EPS2¹⁰.

Par ailleurs, au vu des résultats de l'étude, les sujets suivants, non évoqués précédemment, nécessitent l'attention d'EDF dans le cadre du RP4 1300 pour les situations d'accident avec fusion du cœur :

- la conduite du débit d'extraction et de filtration de l'air de l'espace entre-enceintes au regard des incertitudes actuelles sur l'évolution du taux de fuite des enceintes internes ;
- la fermeture des vannes isolant les tuyauteries des systèmes RIS¹¹ et EAS de celles du système EAS-ND, ce qui a fait l'objet d'un engagement d'EDF.

Enfin, l'IRSN considère que la confirmation de l'isolement de certaines traversées de l'enceinte de confinement, initialement ouvertes dans les états d'arrêt, nécessite d'être mentionnée dans le GIAG RP4 1300, **ce qui fait l'objet d'une recommandation présentée en annexe.**

6. CONCLUSION

L'IRSN considère que les résultats de l'EPS2 RP4 1300 d'EDF confortent l'atteinte des objectifs du réexamen pour les accidents avec fusion du cœur, compte tenu des nouvelles dispositions prévues et des engagements d'EDF.

Il appartiendra à EDF de confirmer ces résultats une fois prise en compte la conception finalisée des modifications associées au RP4 1300 et de la conduite associée.

Lors de son expertise, l'IRSN a relevé plusieurs limites relatives à la représentativité de l'EPS2, liées à la modélisation des phénomènes physiques lors d'un accident avec fusion du cœur, au comportement de l'enceinte de confinement ou à la fiabilité des actions des opérateurs de conduite. Ces limites devront faire l'objet d'une attention particulière d'EDF et être considérées lors des utilisations de l'EPS2.

IRSN

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

¹⁰ Par exemple, l'isolement des générateurs de vapeur (GV), prévu dans le GIAG, reste à étudier dans l'EPS2, pour ses aspects positifs (limitation du risque de rejets *via* les tubes de GV) et négatifs (absence de refroidissement du circuit primaire par les GV et donc transfert de la totalité de la puissance résiduelle du cœur dans l'enceinte de confinement).

¹¹ Système d'injection de sécurité : système de sauvegarde permettant d'injecter de l'eau borée dans le circuit primaire pour refroidir le cœur du réacteur.

ANNEXE À L'AVIS IRSN N° 2024-00087 DU 12 JUIN 2024

Recommandation de l'IRSN

L'IRSN recommande qu'EDF intègre dans le GIAG du palier 1300 MWe à l'état RP4 la vérification de la fermeture, dans les états d'arrêt, des traversées SAT¹² 082, PTR¹³ 115 et PTR 116.

¹² Distribution d'air comprimé de travail.

¹³ Traitement et réfrigération d'eau des piscines.