

Fontenay-aux-Roses, le 7 mai 2021

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2021-00075

---

**Objet :** Réacteurs de 1300 MWe du palier P'4 et de 1450 MWe - Comportement du dôme des enceintes de confinement en situation d'accident grave.

---

**Réf. :** [1] Lettre ASN - CODEP-DCN-2018-018786 du 22 novembre 2018.  
[2] Lettre ASN - CODEP-DCN-2020-029428 du 3 juin 2020.

---

### 1. INTRODUCTION

#### 1.1. CONTEXTE

Pour les réacteurs des paliers 1300 MWe (trains P4 et P'4) et 1450 MWe (N4), la fonction de confinement est notamment assurée par une enceinte à double paroi, constituée de :

- l'enceinte interne, en béton précontraint, qui assure l'étanchéité statique et la résistance mécanique, notamment en cas de pressurisation lors d'un accident ;
- l'enceinte externe, en béton armé, dont l'intrados délimite, avec l'extrados de l'enceinte interne, un volume appelé « espace entre enceintes », au sein duquel les fuites de l'enceinte interne sont collectées puis filtrées par un système de ventilation (EDE) qui maintient cet espace en dépression. Le système EDE complète ainsi le confinement statique assuré par l'étanchéité de l'enceinte interne.

Le dôme des enceintes des réacteurs du train P'4 du palier 1300 MWe et du palier N4 présente la particularité de reposer sur des poutres en béton partant de la partie verticale de l'ouvrage (fût) et reliées entre elles en sous-face du sommet du dôme par une poutre circulaire (clavage central). Lors de la réalisation des enceintes, ces poutres ont servi de coffrage pour le béton du dôme coulé en place.

En situation d'accident avec fusion du cœur (appelée aussi situation d'accident grave (AG)), situation non prise en compte dans la conception initiale de ces réacteurs, la pression et la température dans l'enceinte interne s'élèvent du fait de l'énergie dégagée sous forme de vapeur pendant la dégradation du cœur en cuve ou du fait de la production de gaz incondensables due à la décomposition du béton par le cœur fondu après la rupture de la cuve. En cas d'élévation rapide de la température dans l'enceinte interne, des comportements thermomécaniques différentiels du dôme et des poutres qui le supportent peuvent conduire à l'ouverture de fissures sur le dôme. En effet, les poutres, qui montent alors en température plus rapidement que le dôme, se dilatent et exercent des efforts sur ce dernier. L'extrados du dôme présente alors des zones qui ne sont plus

comprimées par le dispositif de précontrainte<sup>1</sup> et au sein desquelles des fissures peuvent s'ouvrir. Des études menées par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) ont montré que, pour un scénario d'accident grave conduisant à une augmentation rapide de la température dans l'enceinte interne, une fissuration partielle de l'extrados du dôme pourrait apparaître au bout de quelques heures sur une part importante de l'épaisseur de la paroi. Les études présentées par EDF dans le cadre de la préparation de la réunion du groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires (GPR) dédiée aux études probabilistes de sûreté en vue du deuxième réexamen de sûreté des réacteurs du palier N4 qui s'est tenue le 1<sup>er</sup> février 2018 ont confirmé les phénomènes mis en jeu. L'analyse de l'IRSN a toutefois souligné que la modélisation utilisée par EDF dans ses études comportait des simplifications et que les résultats devaient par conséquent être utilisés avec prudence. Suite à cette analyse et à l'avis du GPR, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé, par la lettre citée en première référence, qu'EDF évalue, par le calcul, le risque de dégradation du confinement au niveau du dôme des réacteurs du palier N4 et des réacteurs du train P'4 du palier 1300 MWe en situation d'accident grave, présente la sensibilité aux différents paramètres du modèle numérique utilisé et, le cas échéant, présente les modifications matérielles ou d'exploitation permettant de limiter ce risque.

Le présent avis présente l'analyse par l'IRSN des éléments apportés par EDF en réponse à cette demande.

## 1.2. ENJEUX DE SURETE

En cas d'accident grave avec chargement thermique important, le phénomène décrit ci-dessus est susceptible de conduire à une augmentation du débit de fuite du dôme des enceintes des douze réacteurs du train P'4 du palier 1300 MWe et des quatre réacteurs du palier N4. Une augmentation importante du débit de fuite par le dôme pourrait mettre en défaut le fonctionnement du confinement assuré par la double enceinte et l'EDE. Ce mode de défaillance du confinement interviendrait à court terme dans des délais incompatibles avec les délais de mise en œuvre des mesures nécessaires de protection des populations.

## 1.3. DOSSIER D'EDF

L'évaluation du risque de dégradation du confinement au niveau du dôme des réacteurs du train P'4 du palier 1300 MWe et des réacteurs du palier N4 en situation d'accident grave menée par EDF s'appuie sur une étude thermomécanique du comportement du dôme visant à évaluer les conséquences pour la structure d'un chargement rapide et prolongé en température. Elle est accompagnée d'une étude de sensibilité vis-à-vis des principaux paramètres du calcul. L'impact sur le confinement est apprécié au moyen d'une estimation de l'augmentation du taux de fuite du dôme et d'une évaluation des conséquences radiologiques qui en résulteraient. Le dossier d'EDF comporte également une étude de potentielles solutions d'amélioration.

## 1.4. SAISINE DE L'ASN

Par la lettre citée en seconde référence, l'ASN a demandé l'avis de l'IRSN sur l'acceptabilité sur le plan de la sûreté des éléments transmis par EDF et en particulier sur :

- la pertinence des scénarios d'accident grave retenus par EDF ;
- le modèle mis en œuvre pour déterminer les efforts qui s'appliquent sur l'enceinte et qui conduisent EDF à déterminer, d'une part, l'impact sur le comportement structurel du dôme, et d'autre part, l'impact sur les performances fonctionnelles de l'enceinte interne en termes de taux de fuite ;
- les hypothèses prises en compte par EDF sur le plan des performances du circuit de ventilation de l'espace entre enceintes ;
- les conclusions établies par EDF quant à l'impact sur les conséquences radiologiques dans l'environnement ;

---

<sup>1</sup> Le rôle du dispositif de précontrainte est de contrer les forces de pression du gaz contenu dans l'enceinte interne pour que le béton reste comprimé à la suite de l'accident de référence considéré au dimensionnement des ouvrages (rupture d'une tuyauterie primaire).

- la nécessité de renforcer l'enceinte interne et/ou les dispositions de ventilation et de filtration de l'espace entre enceintes si leur performance en termes de confinement est insuffisante dans les conditions d'accident grave et ne permettent pas de garantir *a minima* le respect du taux de fuite prévu par le dossier d'autorisation de création (DAC) ;
- l'extrapolation des conclusions établies par EDF pour le dôme des enceintes des réacteurs du train P'4 du palier 1300 MWe au dôme des enceintes des réacteurs de 1450 MWe.

L'IRSN a de plus examiné l'impact de la fissuration du dôme en accident grave sur le risque de combustion d'hydrogène dans l'espace entre enceintes.

L'IRSN présente ci-après les conclusions de son expertise.

## 2. ANALYSE DE L'IRSN

### 2.1. PERTINENCE DES SCENARIOS D'ACCIDENT GRAVE RETENUS PAR EDF

Pour l'étude thermomécanique du comportement du dôme en AG, EDF considère un profil d'évolution de la température et de la pression dans l'enceinte interne présentant une augmentation rapide de ces grandeurs en début d'accident, suivie d'un pic, atteint à 24 heures, et d'une diminution progressive.

**L'IRSN considère que cette approche découplée, c'est-à-dire indépendante de la diversité des scénarios d'accident grave, est adaptée, et que le chargement retenu présente un caractère enveloppe vis-à-vis des conditions dans l'enceinte interne à retenir pour les études des accidents graves pour les réacteurs du palier 1300 MWe intégrant les modifications liées à leur troisième visite décennale (VD3) et pour les réacteurs du palier N4 intégrant les modifications liées à leur deuxième visite décennale (VD2).**

### 2.2. ÉTUDE THERMOMECHANIQUE

#### 2.2.1. Représentativité de l'enceinte étudiée

Les caractéristiques géométriques des dômes des enceintes internes des réacteurs du train P'4 du palier 1300 MWe et des réacteurs du palier N4 sont identiques. Seule la hauteur du fût diffère.

Bien qu'il existe des différences de conception du dispositif de précontrainte, les différences entre les forces de précontrainte des dômes sont faibles, et les compressions résiduelles prévues à la conception après 40 ans d'exploitation sont similaires. En revanche, la variabilité de la composition et de la mise en œuvre des bétons conduit à des déformations différées et à des débits de fuite en épreuve propres à chaque enceinte. Les déformations différées se traduisent par une décompression progressive de la paroi de l'enceinte et une diminution des forces de précontrainte qui doivent équilibrer les forces de pression en cas d'épreuve ou d'accident.

En considérant les principaux aspects de la conception et de la réalisation des enceintes, l'IRSN estime que l'étude présentée par EDF du comportement mécanique d'un dôme en accident grave est représentative d'une enceinte des réacteurs du train P'4 du palier 1300 MWe et des réacteurs du palier N4, à l'exclusion des enceintes des réacteurs n° 1 et n° 2 de la centrale nucléaire de Belleville, et du réacteur n° 1 de la centrale nucléaire de Civaux. Ces trois enceintes, considérées comme sensibles du fait de débits de fuite plus importants, sont le siège de déformations différées et de diminutions de la précontrainte de la paroi particulièrement élevées.

#### 2.2.2. Modèle mis en œuvre

L'étude d'EDF s'appuie sur un modèle aux éléments finis d'une enceinte interne d'un réacteur du train P'4 du palier 1300 MWe. Ce modèle constitue une amélioration par rapport à celui utilisé dans la précédente étude d'EDF : d'une part les poutres du dôme sont représentées par une modélisation volumique, ce qui conduit à

l'obtention de champs de température réalistes dans ces éléments, d'autre part la poutre circulaire centrale est représentée, également en éléments volumiques. La modélisation du béton du dôme ainsi que celle des aciers passifs permettent de prendre en compte des comportements mécaniques non linéaires. Les déformations différées de l'ouvrage sont ajustées sur la base des mesures de déformations réalisées sur les enceintes des réacteurs du train P'4 du palier 1300 MWe, puis extrapolées à 60 ans. **L'IRSN estime que les hypothèses et méthodes mises en œuvre par EDF sont conformes à l'état de l'art.**

### **2.2.3. Comportement structurel du dôme**

Les résultats des calculs d'EDF indiquent que, dans la zone du dôme, le comportement du béton est d'abord élastique, puis non linéaire. Des fissures se propagent à partir de l'extrados sur une partie de l'épaisseur de la paroi. Selon l'étude d'EDF, la hauteur de béton restant comprimé représente au moins 30 % de l'épaisseur du dôme dans la zone la plus critique et, en moyenne sur l'ensemble du dôme, 66 % de l'épaisseur. L'état de fissuration du dôme le plus défavorable est atteint au bout de 24 heures après le début de l'accident grave, avec cependant une faible variation entre 12 et 24 heures. Des études de sensibilité ont été réalisées par EDF, mais pour un nombre limité de paramètres. Pour l'IRSN, elles ne permettent pas d'apprécier l'ensemble des incertitudes, notamment celles dues aux variabilités naturelles et épistémiques des paramètres suivants : déformations différées des différentes enceintes et valeur de la résistance limite en traction du béton. Une illustration du poids de ces incertitudes peut être apportée par les résultats d'une étude réalisée par l'IRSN, avec des hypothèses et méthodes similaires à celles d'EDF, qui aboutit, pour ce qui concerne la hauteur de béton comprimé, à une valeur moitié moindre de celle obtenue par EDF dans la zone la plus critique, et au tiers de la valeur obtenue par EDF en moyenne sur l'ensemble du dôme.

**Sur la base de l'étude d'EDF et de sa propre étude, l'IRSN considère que la tenue structurelle du dôme n'est pas remise en cause, mais qu'il existe une incertitude importante sur la hauteur de béton comprimé.**

## **2.3. IMPACT SUR LES PERFORMANCES FONCTIONNELLES DE L'ENCEINTE INTERNE EN TERMES DE TAUX DE FUITES**

En situation d'accident grave, la présence de fissures à l'extrados de la paroi de l'enceinte interne crée des zones de passage préférentiel induisant une forte augmentation de la perméabilité du béton. La fonction d'étanchéité du dôme repose alors essentiellement sur la couche de béton comprimé, située à l'intrados de la paroi. La méthode d'estimation du débit de fuite retenue par EDF consiste à extrapoler le débit de fuite constaté lors des épreuves des enceintes en considérant que, en situation d'accident grave, le débit de fuite augmente, par rapport au débit en épreuve, proportionnellement à la diminution de l'épaisseur de béton comprimé de la paroi. EDF estime que l'augmentation du débit de fuite par le dôme en AG serait au maximum comprise entre 15 % et 30 % du taux de fuite maximal admissible prescrit dans les décrets d'autorisation de création (DAC) des réacteurs du train P'4 du palier 1300 MWe et des réacteurs du palier N4. Pour sa part, en considérant les incertitudes sur l'épaisseur et sur la perméabilité du béton restant comprimé en AG, l'IRSN estime que l'ordre de grandeur de l'accroissement du débit de fuite par le dôme en accident grave pourrait se situer entre 30 % et 80 % du taux de fuite maximal admissible prescrit dans les DAC dès 10 heures après le début du scénario.

**L'IRSN considère ainsi que les estimations de débit de fuite par le dôme en accident grave proposées par EDF sont insuffisamment prudentes et qu'elles doivent être accompagnées de provisions pour incertitudes adaptées.**

## **2.4. HYPOTHESES SUR LES PERFORMANCES DU SYSTEME DE VENTILATION DE L'ESPACE ENTRE ENCEINTES**

Le système de ventilation de l'espace entre enceintes a pour rôle d'établir et de maintenir une dépression suffisante dans l'espace entre enceintes afin d'éviter le transfert direct d'air contaminé à l'extérieur du bâtiment réacteur en cas d'accident et d'assurer la purification des fuites d'air contaminé de l'enceinte interne avant rejet

dans l'environnement. Dans le cadre du réexamen VD3 des réacteurs de 1300 MWe, EDF a élaboré une modification conséquente du système EDE visant notamment à prendre en compte les situations d'accident grave, non considérées à la conception initiale du système. La nouvelle conception, qui est similaire pour les réacteurs du palier N4, comporte un circuit de filtration et de piégeage des iodes dimensionné en considérant une augmentation du débit de fuite de l'enceinte interne du fait de la dégradation des revêtements d'étanchéité posés à l'intrados des enceintes internes. En effet, ces revêtements, qui ont été posés afin d'améliorer l'étanchéité des enceintes internes, peuvent être dégradés sous l'effet des conditions de température et d'irradiation rencontrées lors d'un accident grave. Sur la base des résultats des études et des essais dont ils font actuellement l'objet, EDF considère que ces revêtements pourraient rester intègres pendant une durée de quatre jours. Pour l'IRSN, il est nécessaire d'utiliser ces résultats avec prudence et de poursuivre l'analyse sur ce sujet.

L'analyse par l'IRSN des performances du système EDE montre que, tant que les revêtements situés à l'intrados des enceintes internes ne sont pas dégradés, le débit de dimensionnement permet d'assurer une dépression suffisante dans l'espace entre enceintes en situation d'accident grave avec fissuration du dôme. Après dégradation des revêtements d'étanchéité, le débit de dimensionnement de l'EDE des réacteurs du palier N4 ne permettrait pas d'assurer la dépression requise dans l'espace entre enceintes en situation d'accident grave avec fissuration du dôme. Pour les réacteurs du train P'4 du palier 1300 MWe, la dépression serait maintenue moyennant le fonctionnement du système EDE en limite de son dimensionnement. **En l'absence de disposition pour limiter le débit de fuite en accident grave avec fissuration du dôme, le risque de rejet direct d'activité dans l'environnement ne peut par conséquent pas être écarté avec un haut niveau de confiance.**

## **2.5. IMPACT SUR LE RISQUE DE COMBUSTION D'HYDROGENE DANS L'ESPACE ENTRE ENCEINTES**

Lors de la phase tardive d'un accident grave, l'interaction entre le cœur fondu et le béton peut conduire à la production de grandes quantités de vapeur d'eau, de dioxyde de carbone et de gaz combustibles (hydrogène et monoxyde de carbone). Les fuites à travers la paroi de l'enceinte interne entraînent le transfert des gaz combustibles vers l'espace entre enceintes, lequel est favorisé par la montée en pression dans l'enceinte interne. Des études réalisées par EDF et par l'IRSN montrent que le risque de combustion d'hydrogène dans l'espace entre enceintes n'est pas exclu et que le débit de fuite de l'enceinte interne a un impact significatif sur le délai d'atteinte des conditions d'inflammabilité dans l'espace entre enceintes. Une évaluation réalisée par l'IRSN montre de plus que la dégradation du dôme conduit à un dépassement des conditions d'inflammabilité dans l'espace entre enceintes pour des scénarios pour lesquels l'atmosphère reste non inflammable sans fissuration du dôme, le dépassement des conditions d'inflammabilité pouvant, de manière générale, intervenir précocement.

**L'IRSN considère donc que, en l'absence de disposition pour limiter le débit de fuite en accident grave, la fissuration du dôme peut accentuer de manière significative le risque de formation d'une atmosphère explosive dans l'espace entre enceintes pour les réacteurs du train P'4 du palier 1300 MWe et les réacteurs du palier N4.**

## **2.6. IMPACT SUR LES CONSEQUENCES RADIOLOGIQUES DANS L'ENVIRONNEMENT**

Les évaluations de conséquences radiologiques 24 heures après le début des rejets réalisées par EDF montrent que, lorsque le système EDE est en service, l'augmentation causée par la fissuration du dôme est modérée. Inversement, l'expertise a montré que, lorsque le système EDE est inopérant, l'impact de la fissuration du dôme sur les conséquences radiologiques à 24 heures est important (avec une augmentation d'un facteur deux environ par rapport au cas sans fissuration). Pour les conséquences radiologiques à 7 jours, en postulant une ouverture

du dispositif U5<sup>2</sup> d'éventage et de filtration de l'atmosphère de l'enceinte 24 heures après l'entrée en accident grave, qui correspond aux hypothèses du rapport de sûreté pour les réacteurs du train P'4 du palier 1300 MWe à l'état VD3 et les réacteurs du palier N4 à l'état VD2, l'impact de la fissuration du dôme est faible en relatif lorsque le système EDE est en service, car la majeure partie des conséquences radiologiques est due à l'ouverture du dispositif U5. Lorsque l'EDE est inopérant, l'impact reste modéré.

## 2.7. NECESSITE DE DISPOSITIONS DE LIMITATION DE LA FUITE

La fissuration du dôme de l'enceinte interne en cas d'accident grave conduisant à un chargement thermique important, obtenu dans plus de 40 % des situations de fusion du cœur à l'état VD3 1300, constitue une dégradation de l'étanchéité statique de l'enceinte interne, composante essentielle de la fonction de confinement.

Considérant en outre les impacts de la fissuration du dôme sur le risque de combustion d'hydrogène dans l'espace entre enceintes, sur le risque de rejets directs dans l'environnement et sur les conséquences radiologiques, analysés dans les paragraphes précédents, l'IRSN estime nécessaire qu'EDF mette en œuvre des dispositions matérielles sur le dôme des enceintes des réacteurs du train P'4 du palier 1300 MWe et des réacteurs du palier N4 pour limiter l'augmentation du débit de fuite en situation d'accident grave.

Dans le dossier initial d'EDF, deux solutions éventuelles d'amélioration du comportement du dôme en accident grave ont été analysées puis écartées par EDF : le sciage des poutres situées sous le dôme, et la mise en place de butons métalliques sous le clavage central du dôme. EDF estime en effet qu'aucune d'entre elles ne permettrait de réduire le débit de fuite de manière significative, ce dont l'IRSN convient.

Dans ce même dossier, EDF indique que la pose d'un revêtement d'étanchéité sur l'extrados du dôme permet d'en limiter la fuite, mais représente des travaux de grande ampleur. Un tel revêtement a déjà été posé sur l'extrados complet du dôme du réacteur n° 2 de la centrale nucléaire de Belleville et EDF prévoit une opération similaire sur les dômes du réacteur n° 1 des centrales nucléaires de Belleville, de Golfech et de Civaux, ainsi que du réacteur n° 3 de la centrale nucléaire de Cattenom.

**Néanmoins, à la fin de l'expertise, EDF s'est engagé à poser un revêtement d'étanchéité sur la partie centrale des dômes des onze autres enceintes des réacteurs du train P'4 du palier 1300 MWe et des réacteurs du palier N4, sur une surface minimale de 500 m<sup>2</sup>. Cet engagement figure en annexe.**

L'IRSN considère que la solution proposée par EDF, dont la faisabilité et l'efficacité ont été démontrées, contribuera à l'étanchéité statique en situation d'accident grave et limitera l'augmentation du débit de fuite en cas de fissuration du dôme. Elle permettra de limiter le risque de rejet direct d'activité dans l'environnement ainsi que le risque de dépassement des conditions d'inflammabilité dans l'espace entre enceintes. Elle contribuera aussi à limiter les conséquences radiologiques en accident grave. **L'IRSN estime par conséquent que la solution proposée par EDF est satisfaisante. Il conviendra toutefois de préciser, dans un cadre à définir, les exigences qui seront associées à ces revêtements ainsi le délai pendant lequel leurs performances peuvent être assurées en conditions d'accident grave.**

---

<sup>2</sup> Dispositif prévu pour se prémunir du risque de dégradation du confinement suite à une augmentation de la pression au-delà de la pression de dimensionnement de l'enceinte interne en situation d'accident grave. Un délai minimum de 24 heures après le début d'un accident grave est requis avant son ouverture.

### **3. CONCLUSION**

La fissuration du dôme de l'enceinte interne, en cas d'accident grave conduisant à un chargement thermique important, constitue une dégradation de l'étanchéité statique de l'enceinte interne. Cette dégradation est susceptible de conduire à une augmentation importante du débit de fuite de l'enceinte interne dès les premières heures d'un accident grave entraînant une augmentation significative du risque de formation d'une atmosphère explosive dans l'espace entre enceintes, un risque de rejet direct d'activité dans l'environnement ainsi qu'une augmentation des conséquences radiologiques.

Au terme de son analyse, l'IRSN a estimé nécessaire qu'EDF mette en œuvre des dispositions matérielles pour limiter l'augmentation du débit de fuite du dôme des enceintes des réacteurs du train P'4 du palier 1300 MWe et des réacteurs du palier N4 en situation d'accident grave. L'IRSN estime que l'engagement d'EDF de poser un revêtement d'étanchéité à l'extrados du dôme de ces enceintes est satisfaisant du point de vue de la sûreté.

**IRSN**

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

## **ANNEXE A L'AVIS IRSN N° 2021-00075 DU 07 MAI 2021**

### **Engagement principal de l'exploitant**

EDF s'engage, au titre de l'amélioration de la sûreté vis-à-vis de l'accident grave, à poser un revêtement d'étanchéité sur la partie centrale des dômes des enceintes P'4 et N4, pour celles qui n'auraient pas déjà été traitées en VD3 1300 et VD2 N4. Le revêtement sera celui actuellement mis en œuvre à l'extrados des enceintes dans le cadre de l'affaire PNPPi910. Il s'étalera sur une surface concentrique minimale de 500 m<sup>2</sup> associée à un rayon de près de 14 m depuis le centre du dôme, surface intégrant les éventuelles contraintes de réalisation ou liées à l'environnement (par exemple renoncement au droit des dispositifs d'auscultations EAU). Ces travaux seront soldés au plus tard d'ici fin 2030 compte tenu des contraintes industrielles de mise en œuvre.