



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité

**IRSN**  
INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Fontenay-aux-Roses, le 9 mai 2022

Monsieur le Président de l'Autorité de sûreté nucléaire

## AVIS IRSN N° 2022-00099

**Objet :** EDF – REP – Quatrième réexamen de sûreté des réacteurs de 900 MWe (RP4 900) - Agression des ouvrages EIP par des ouvrages non-EIP

**Réf. :** Lettre ASN - CODEP-DCN-2020-043774 du 14 septembre 2020.

Afin de justifier, dans le cadre du quatrième réexamen périodique des réacteurs de 900 MWe (RP4 900), l'absence d'agression des ouvrages identifiés en tant qu'éléments importants pour la protection<sup>1</sup> (EIP) par des ouvrages non-EIP, EDF a étudié le comportement des ouvrages non-EIP sous séisme de niveau SMS<sup>2</sup> VD4 900 au regard des exigences de non-effondrement et de non-interaction avec les ouvrages EIP mitoyens. L'étude du comportement au séisme de structures de génie civil non-EIP susceptibles d'agresser des bâtiments EIP s'inscrit dans le cadre de la démarche dite « séisme-événement ».

Par la lettre citée en référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé, dans le cadre du RP4 900, l'avis et les observations de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur la suffisance des éléments apportés par EDF pour justifier l'absence d'agression des ouvrages de génie-civil EIP par des ouvrages non-EIP dans le cadre de la démarche séisme-événement.

EDF a tout d'abord sélectionné un nombre réduit de sites qu'il estime couvrir l'ensemble des configurations rencontrées sur les réacteurs de 900 MWe. EDF a ensuite présenté une méthode d'étude du comportement au séisme de structures de génie civil non-EIP susceptibles d'agresser des bâtiments EIP qui consiste, dans un premier temps, à écarter de l'analyse des couples agresseur-cible sur la base de critères de dédouanement. Dans un second temps, les couples non-dédouanés sont justifiés sur la base d'études spécifiques.

De l'évaluation des documents initialement transmis par EDF, complétés par les nombreux éléments apportés au cours de l'expertise, l'IRSN retient les éléments suivants.

<sup>1</sup> Au sens de l'arrêté du 7 février 2012 modifié fixant les règles générales relatives aux installations nucléaires de base (INB), un EIP est un élément important pour la protection des intérêts mentionnés à l'article L.593-1 du code de l'environnement. Cet élément contribue à la prévention des risques et des inconvénients pour la sécurité, la santé et la salubrité publiques ou la protection de la nature et de l'environnement.

<sup>2</sup> Le séisme majoré de sécurité est le niveau sismique retenu pour le dimensionnement au séisme des installations nucléaires. Il est défini en ajoutant conventionnellement 0,5 à la magnitude du séisme maximal historiquement vraisemblable (SMHV). Ce dernier correspond au séisme le plus pénalisant susceptible de se produire sur une durée d'environ 1000 ans, évalué sur la base des séismes historiquement connus.

MEMBRE DE  
**ETSON**

# 1. REPRÉSENTATIVITÉ DES TROIS SITES NUCLÉAIRES RETENUS

Les réacteurs du palier 900 MWe, hormis ceux de Fessenheim, sont au nombre de 32 répartis sur huit sites : le site du Bugey pour le palier CP0, les sites du Tricastin, de Gravelines, de Dampierre et du Blayais pour le palier CP1, et les sites de Saint-Laurent B, de Chinon et de Cruas pour le palier CP2.

Sur ces huit sites, EDF a limité son analyse aux sites du Bugey (CP0), du Tricastin et de Gravelines (CP1) considérés, sur la base de leur niveau sismique et de leurs spécificités, comme couvrant l'ensemble des situations rencontrées sur les réacteurs de 900 MWe.

L'IRSN souligne que le caractère enveloppe des spectres sismiques de sol n'est pas suffisant pour se prononcer sur le caractère enveloppe des sites sélectionnés et qu'il convient de considérer également les caractéristiques mécaniques du sol.

EDF a indiqué à cet égard que l'influence de l'interaction sol/structure est peu prononcée pour les salles des machines constituant les agresseurs principaux non-dédouanés, du fait de leur masse relativement faible par rapport à leur surface au sol et des fréquences propres principales basses de ces ouvrages. Par ailleurs, l'analyse complémentaire effectuée pour deux sites du palier CP2, à savoir Chinon et Saint-Laurent B, a confirmé la représentativité des trois sites retenus.

**Ceci n'appelle pas de commentaire de l'IRSN.**

## 2. MÉTHODE D'ANALYSE PAR DÉDOUANEMENT DES COUPLES AGRESSEUR-CIBLE

### 2.1 EXIGENCES DE COMPORTEMENT

Pour démontrer l'absence d'agression des ouvrages EIP par des ouvrages non-EIP, EDF attribue à ces derniers les exigences de comportement suivantes : non-effondrement et absence d'interaction avec les ouvrages EIP mitoyens.

**Ceci n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

### 2.2 CRITÈRES DE DÉDOUANEMENT

Afin de limiter le volume d'études du comportement des ouvrages non EIP, EDF a défini dans sa démarche séisme-événement des critères de dédouanement, qui lui permettent de ne pas retenir certains couples agresseur-cible.

Le respect de ces critères de dédouanement garantit l'absence de risque d'agression des ouvrages cibles EIP due à l'effondrement de l'ouvrage non EIP, et/ou à l'insuffisance de l'espace disponible entre ouvrages compte tenu de leurs déplacements relatifs sous séisme.

Pour chacun de ces deux risques, EDF a transmis une liste détaillée des situations envisagées et les critères de dédouanement associés, sur la base de paramètres clairement définis et reposant sur des seuils quantifiés permettant d'écarter tout risque. **L'IRSN considère que les explications apportées par EDF sont globalement satisfaisantes, hormis pour certains critères relatifs aux risques d'entrechoquement détaillés ci-après.**

L'IRSN considère que le critère d'espacement minimal de 6 cm entre ouvrages retenu par EDF, issu des règles anciennes PS92<sup>3</sup>, n'est pas suffisamment conservatif pour écarter tout risque d'entrechoquement entre ouvrages. En effet, pour pouvoir dédouaner certains couples agresseur-cible sur la base de leur espacement minimal, l'IRSN estime qu'EDF devrait effectuer une analyse qualitative de la géométrie et du mode de contreventement des ouvrages agresseurs ainsi qu'un contrôle in-situ de l'espace disponible entre ouvrages (avec une vérification de l'absence de matériaux de remplissage). Au cours de l'expertise, EDF a proposé d'effectuer cette analyse pour les couples agresseur-cible concernés et d'intégrer le principe de l'analyse dans une mise à jour de la doctrine séisme-événement, **ce qui est satisfaisant.**

En ce qui concerne le critère de masse minimale entre l'ouvrage agresseur et l'ouvrage cible, EDF retient un critère de 5 % en s'appuyant sur de nombreuses études internationales qui montrent que le comportement dynamique de la structure agressée n'est pratiquement pas influencé par un tel choc. L'IRSN estime que ce critère est acceptable au regard de l'effet global de l'entrechoquement sur la structure cible, mais pas de l'effet local au niveau de la zone d'impact. L'IRSN estime en effet que l'endommagement local du voile périphérique agressé peut avoir une incidence sur le maintien de la fonction de supportage d'un équipement EIP qui serait ancré sur la face intérieure de ce voile, ou sur l'endommagement d'un équipement non-EIP susceptible à son tour d'agresser un équipement EIP par effet domino. Ces effets n'ont pas été considérés par EDF. À la fin de l'expertise, EDF a précisé que pour, les réacteurs du palier 900 MWe, le périmètre de dédouanement des couples agresseur-cible sur la base d'un critère de masse se limite à quelques agresseurs. Pour ces agresseurs, l'absence de risque d'endommagement de l'ouvrage cible a été démontrée et l'effet d'un éventuel entrechoquement sur les équipements EIP situés en face interne des voiles périphériques au droit des zones d'impact est jugé négligeable. **L'IRSN estime que les justifications apportées par EDF sont acceptables.**

Cependant, la doctrine séisme-événement est applicable à l'ensemble des réacteurs en exploitation et mériterait d'être amendée dans le cadre d'une future application. **Ceci amène l'IRSN à formuler l'observation présentée en annexe.**

En ce qui concerne le critère d'enfouissement des ouvrages enterrés, EDF a précisé à la fin de l'expertise la méthodologie de détermination de la profondeur minimale à partir de laquelle un ouvrage enterré ne subit pas d'agression du fait de l'effondrement d'un ouvrage non EIP situé en surface et à l'aplomb. **Les éléments complémentaires apportés par EDF sont acceptables.**

## 2.3 EXHAUSTIVITÉ DES COUPLES AGRESSEUR-CIBLE RETENUS

À l'issue de l'étape d'application des critères mentionnés supra, les couples agresseur-cible non dédouanés par EDF et dont le comportement a été étudié sont, pour le site du Bugey, les salles des machines et l'ensemble bâtiments électriques et diesels ainsi que les aéroréfrigérants et leurs murets de protection anti-inondation, et, pour les sites du Tricastin et de Gravelines, les salles des machines et les bâtiments électriques.

L'IRSN a estimé au cours de l'expertise que le caractère exhaustif des couples retenus dans les études de comportement au séisme n'était pas complètement démontré et qu'il était nécessaire qu'EDF justifie de manière détaillée les motifs qui lui ont permis d'écarter de l'analyse certains des couples agresseur-cible. À cet égard, les justifications complémentaires présentées par EDF au cours de l'expertise sont satisfaisantes et le choix des couples agresseur-cible retenus par EDF est donc globalement étayé.

Néanmoins, certains risques d'agression sont écartés du fait que les cibles EIP sont dimensionnées à l'égard de la chute d'un avion de l'aviation civile et que l'effort lié à l'entrechoquement ou l'effondrement de l'ouvrage agresseur est inférieur à l'effort d'impact lié à la chute d'un avion. L'IRSN estime que cet argument est satisfaisant pour justifier l'absence d'effet préjudiciable sur le comportement d'ensemble de l'ouvrage EIP impacté, mais ne

---

<sup>3</sup> Règles de construction parasismique PS 92 applicables aux bâtiments (NF P06-13).

permet pas de garantir que l'endommagement local des voiles périphériques impactés reste compatible avec une exigence de supportage d'équipements EIP en face intérieure de ces voiles.

À la fin de l'expertise, pour les couples agresseur-cible dédouanés par comparaison à l'effet de la chute d'avion, EDF s'est engagé à s'assurer que le risque d'endommagement d'équipements EIP supportés en face intérieure des voiles périphériques des ouvrages cibles au droit des chocs potentiels est écarté, **ce qui est satisfaisant dans le principe**. EDF a précisé que cette évaluation sera réalisée dans le cadre du cinquième réexamen périodique du palier 900 MWe. L'IRSN prend note de cette échéance.

## 3. ÉTUDES DES COUPLES NON DÉDOUANÉS

### 3.1 MÉTHODE D'ANALYSE PAR LE CALCUL

Pour l'étude du comportement sismique des ouvrages non-EIP agresseurs de bâtiments EIP non dédouanés, EDF privilégie une méthode dite industrielle linéaire équivalente considérant un comportement linéaire des ouvrages et des matériaux.

Pour évaluer le comportement sismique des ouvrages non-EIP pour un séisme de niveau SMS VD4, EDF n'a pas réalisé de nouvelles études, mais s'est appuyé sur les résultats des analyses linéaires spectrales réalisées pour un séisme de niveau SMS VD3, avec un taux d'amortissement de 10 % pour le béton armé, et un recours, si nécessaire, aux coefficients de ductilité locaux du guide de l'AIEA n° 28 de 2003<sup>4</sup>.

#### 3.1.1 Absence d'effondrement des ouvrages agresseurs non-EIP

S'agissant du taux d'amortissement, l'IRSN considère que la stabilité sous séisme d'intensité SMS des ouvrages non-EIP doit être étudiée en tenant compte du taux d'amortissement conventionnel de 7 % défini par le guide ASN 2/01.

Pour vérifier le non-effondrement des ouvrages non-EIP sous séisme de niveau SMS VD4 avec des taux d'amortissement conventionnels, EDF a déterminé, d'une part la « marge sismique » issue du calcul de résistance d'éléments structurels réalisé avec le séisme SMS VD3, d'autre part le « ratio enveloppe » des accélérations spectrales entre les spectres de sol VD4 et VD3 pour des amortissements réduits de respectivement 7 % et 10 %. La vérification du respect de l'exigence de non-effondrement revient alors à vérifier que la « marge sismique » est supérieure au « ratio enveloppe », après application des coefficients de ductilité dans la limite des valeurs fixées par le guide AIEA n° 28. Le principe de cette méthode d'analyse **n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN**.

Cependant, en ce qui concerne l'utilisation des facteurs de ductilité, l'IRSN estime qu'il existe des marges dans les études de non-effondrement au séisme d'un ouvrage pour autant que celui-ci ait eu une conception parasismique, un dimensionnement conforme aux règlements, guides et recommandations ainsi qu'aux règles de l'art, un suivi soigné de la construction et une maintenance appropriée.

À la demande de l'IRSN, EDF a fourni au cours de l'expertise des compléments concernant la vérification de l'analyse des dispositions constructives et de leur mise en œuvre ainsi que du programme de suivi et de maintenance des ouvrages non-EIP potentiellement agresseurs retenus. **L'IRSN considère que les éléments apportés par EDF sont acceptables.**

---

<sup>4</sup> La ductilité désigne la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement avant sa rupture. Les coefficients de ductilité locaux limités définis dans le guide de l'AIEA n°28 « Seismic Evaluation of Existing Nuclear Power Plant » s'appliquent sous réserve de la présence de dispositions constructives autorisant une incursion modérée dans le domaine plastique et du caractère ductile des assemblages.

### 3.1.2 Absence d'interaction entre les ouvrages non-EIP et les ouvrages EIP

Pour le calcul des déplacements différentiels sismiques entre les ouvrages non-EIP et les ouvrages EIP et la vérification de la suffisance des espaces entre ces ouvrages sous séisme de niveau VD4, EDF majore les valeurs issues des études VD3 par :

- le rapport des déplacements entre les spectres VD3 et VD4 respectivement établis pour des facteurs d'amortissement de 10 % et de 7 % ;
- un coefficient tenant compte de l'influence de la fissuration du béton et de l'utilisation éventuelle de coefficients de ductilité locaux.

Le principe de cette méthode **n'appelle pas de remarque de la part de l'IRSN.**

## 3.2 RÉSULTATS DES ÉTUDES

### 3.2.1 Absence d'effondrement des ouvrages agresseurs non-EIP

Concernant les salles des machines, les études réalisées par EDF montrent que seuls quelques éléments structuraux sont susceptibles de nécessiter un appel à la ductilité au-delà des limites fixées dans le guide de l'AIEA n° 28. Les dépassements des coefficients de ductilité admissibles sont ponctuels et limités, ce qui est jugé acceptable compte tenu notamment du caractère hyperstatique des structures en béton armé et du caractère conservatif des calculs menés. **Ces éléments de justifications n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.**

En ce qui concerne le couple aéroréfrigérant-muret de protection anti-inondation retenu comme couple agresseur-cible pour le site du Bugey, le non-effondrement de la tour de l'aéroréfrigérant est démontré sous SMS VD4 avec un taux d'amortissement conforme au guide ASN 2/01.

Toutefois, l'analyse des déplacements différentiels sous séisme entre les structures internes de l'aéroréfrigérant et la coque en béton constituant la tour de refroidissement montre que l'interaction entre ces structures ne peut pas être exclue. EDF a de ce fait vérifié la résistance du muret de protection à la chute de la tour afin de garantir l'étanchéité du muret et de prévenir le risque d'inondation externe en cas de séisme. Les études transmises par EDF concluent que le risque d'agression du muret de protection anti-inondation par la chute à la verticale d'une partie du couronnement de l'aéroréfrigérant est dédouané, les dégradations étant localisées au niveau du choc et ne se généralisant pas à toute la hauteur du muret.

Pour l'IRSN, le caractère conservatif du scénario de chute retenu n'est pas démontré. En effet, les efforts horizontaux, induits par la chute complète de l'aéroréfrigérant par basculement latéral ou par éboulement à la suite de l'effondrement sur lui-même, non considérés par EDF, sont potentiellement préjudiciables, particulièrement au droit des joints entre tronçons constitutifs du muret.

À la fin de l'expertise, EDF a transmis des éléments complémentaires sur la conception du muret (élancement réduit, profondeur d'ancrage élevée, forme en chicane des joints, talutage) qui montrent sa stabilité au glissement et au renversement.

**L'IRSN estime que les analyses complémentaires transmises par EDF sont recevables et que la démonstration de non-effondrement du muret de protection anti-inondation du site du Bugey est acceptable.**

### 3.2.2 Non-interaction entre les salles des machines et des ouvrages cibles EIP

Les salles des machines ne sont pas des ouvrages EIP et n'ont pas fait l'objet d'un dimensionnement sismique. En conséquence, les salles des machines peuvent constituer un agresseur à l'égard des bâtiments électriques et

des bâtiments diesel contigus, classés EIP. Les risques d'interaction entre les salles des machines et les ouvrages EIP se situent aux interfaces suivantes :

- entre le voile anti-missile des salles des machines et les bâtiments électriques ;
- entre les salles des machines et les bâtiments diesels ;
- au droit des joints existants entre les différents blocs en béton de la salle des machines ;
- entre les blocs de la salle des machines et les tables de groupe GTA<sup>5</sup>.

Concernant la démonstration de la non-interaction des salles des machines avec les bâtiments EIP mitoyens, les vérifications présentées par EDF **sont acceptables et n'appellent pas de remarque de la part de l'IRSN.**

S'agissant de l'interaction entre blocs de la salle des machines et entre blocs de la salle des machines et tables de groupe, les études réalisées montrent que ce risque peut être écarté pour le site du Tricastin. **Ceci est satisfaisant.**

Pour ce qui concerne les sites du Bugey et de Gravelines, EDF considère que les effets des entrechoquements sont négligeables car ils n'engendreraient que des désordres locaux et limités et ne concerneraient que des éléments de structures secondaires (débords de dalles et planchers métalliques).

**Ceci est jugé acceptable par l'IRSN pour le site du Bugey du fait que les déplacements différentiels sont comparables aux largeurs des espaces libres.**

En revanche, compte tenu des valeurs des déplacements différentiels présentées pour le site de Gravelines, largement supérieures à la largeur des jeux entre blocs ou entre blocs et tables de groupe, l'IRSN considère qu'un effondrement localisé pourrait générer d'autres effondrements localisés en cascade et potentiellement conduire à l'agression d'un ouvrage EIP, **ce qui n'est pas satisfaisant.** En outre, les zones de contact concernent non seulement des débords de dalles, mais aussi des éléments structurels en vis-à-vis comme les jonctions entre poutres et poteaux, **ce qui n'est pas acceptable.**

À la fin de l'expertise, EDF a complété son dossier initial en mettant en évidence la robustesse des structures en béton multi-portiques des salles des machines et en s'appuyant sur les résultats d'une étude exploratoire des effets d'entrechoquement, réalisée pour un niveau de séisme supérieur à celui du référentiel VD4 900 et menée sur la base de calculs linéaires et non-linéaires transitoires. Les déplacements différentiels à l'interface entre les blocs sont majoritairement inférieurs à la largeur de joint (absence d'interaction) et faiblement supérieurs au droit des zones restreintes d'impact, conduisant à des effets non préjudiciables sur les structures.

L'IRSN convient que la méthode « industrielle » retenue par EDF pour étudier les risques d'interaction entre ouvrages présente des conservatismes et que le recours à des modèles non linéaires de simulation du comportement des structures en cas de séisme peut participer à une analyse complémentaire « plus réaliste » des phénomènes liés aux éventuels contacts entre les éléments structuraux au droit des espaces libres.

**Pour l'IRSN, les compléments apportés par EDF sont acceptables.**

## 4. CONCLUSION

Afin de justifier l'absence d'agression des ouvrages de génie civil EIP par des ouvrages non-EIP, EDF a étudié, dans le cadre du quatrième réexamen des réacteurs du palier 900 MWe, le comportement des ouvrages non-EIP

---

<sup>5</sup> Les salles des machines sont constituées d'infrastructures en béton armé et de superstructures en charpentes métalliques de couverture des halls. Les infrastructures comportent plusieurs blocs en béton armé séparés par des joints et abritent des groupes turbo-alternateurs GTA. Les GTA reposent sur des tables de groupe en béton armé indépendantes structurellement des blocs des salles des machines.

sous séisme de niveau SMS VD4 au regard des exigences de non-effondrement et de non-interaction avec les ouvrages EIP mitoyens.

L'approche retenue par EDF de généralisation aux réacteurs de 900 MWe des conclusions des études de vérification menées pour les sites du Bugey, de Gravelines et du Tricastin est acceptable.

L'expertise conduite par l'IRSN conclut à l'exhaustivité des couples agresseur-cible étudiés et à la pertinence des critères appliqués pour dédouaner la plupart des couples. Pour les couples non-dédouanés, la méthode d'analyse par le calcul mise en œuvre par EDF permet in fine de prendre en compte un amortissement de 7 % pour les ouvrages comme préconisé par le guide ASN 2/01. Lorsque nécessaire, le recours à des coefficients de ductilité est justifié en fonction des dispositions constructives des ouvrages.

**Ainsi, sur la base des résultats des études réalisées par EDF, l'IRSN considère que les risques d'agression des ouvrages EIP des réacteurs du palier 900 MWe par des ouvrages non-EIP peuvent être écartés.**

**IRSN**

Le Directeur général

Par délégation

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise de sûreté

## **ANNEXE À L'AVIS IRSN N° 2022-00099 DU 9 MAI 2022**

### **Observation de l'IRSN**

L'IRSN estime qu'EDF devrait mettre à jour la doctrine séisme-événement applicable à l'ensemble des réacteurs en exploitation en ce qui concerne le critère de masse retenu pour le dédouanement des agresseurs non-EIP afin de s'assurer, dans le cadre d'une future application de cette doctrine, de l'absence de risque d'endommagement d'équipements EIP supportés en face intérieure des voiles périphériques des ouvrage cibles ou à proximité.