



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité

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

Fontenay-aux-Roses, le 12 décembre 2023

Monsieur le Président de l'Autorité de Sûreté Nucléaire

## AVIS IRSN N° 2023-00182

**Objet :** Réacteurs électronucléaires – EDF – Réacteurs du Blayais, de Gravelines, de Golfech et de Belleville – Évaluation des effets de site au titre des fortes épaisseurs de sédiments en application de la RFS 2001-01

**Réf. :** Saisine ASN - CODEP-DCN-2022-028387 du 22 juin 2022.

Par la saisine citée en référence, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a demandé l'avis de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) sur les études réalisées par Électricité de France (EDF) afin de définir les mouvements sismiques tenant compte des effets de site particuliers unidimensionnels (1D) liés à des fortes épaisseurs de sédiments, dans le cadre des futurs réexamens périodiques de sûreté. Les sites concernés sont ceux du Blayais et de Gravelines pour le palier 900 MWe, ainsi que de Golfech et de Belleville pour le palier 1300 MWe.

En particulier, l'ASN souhaite recueillir l'analyse de l'IRSN sur :

- la pertinence des choix, des hypothèses et de la méthode retenus par EDF pour ce qui concerne les colonnes de sol<sup>1</sup> en profondeur et le calcul de la réponse de ces colonnes de sol au séisme majoré de sécurité (SMS), pour les quatre sites concernés ;
- le caractère réaliste et prudent des spectres définis par EDF pour tenir compte des effets de site particuliers pour les sites de Belleville et de Gravelines ;
- le bien-fondé des justifications apportées par EDF sur l'exclusion d'effet de site particulier pour les sites du Blayais et de Golfech.

Pour rappel, la RFS 2001-01 précise la démarche à suivre pour élaborer les SMS à prendre en compte pour les installations nucléaires, à partir d'un zonage sismotectonique<sup>2</sup> et de la connaissance de la sismicité historique et instrumentale de la France métropolitaine. Les spectres de réponse de ces séismes sont calculés, à partir de leur magnitude et de leur distance au site, avec une loi de prédiction du mouvement sismique préconisée par la RFS 2001-01. Pour ce calcul et afin de tenir en compte des propriétés physiques des sols, deux classes de « site » sont définies en fonction de la valeur de la vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans les 30

<sup>1</sup> Une colonne de sol est caractérisée par la position des couches géologiques, leurs propriétés mécaniques (notamment la vitesse des ondes de cisaillement) et leurs caractéristiques géotechniques.

<sup>2</sup> Un zonage sismotectonique délimite des volumes de la croûte terrestre dans lesquels le potentiel sismogénique est considéré homogène. Une zone sismotectonique peut être constituée par une zone géographique, une faille ou une famille de failles.

MEMBRE DE  
**ETSON**

premiers mètres à l'aplomb de l'installation, appelée Vs30. Si la valeur de Vs30 est supérieure à 800 m/s, le site est classé comme « rocher ». Si la valeur de Vs30 est située entre 300 et 800 m/s, le site est classé comme « alluvions ». Ainsi, la RFS 2001-01 définit deux lois de prédiction du mouvement sismique qualifiées respectivement de conditions au « rocher » et « alluvions ».

La RFS 2001-01 identifie également des contextes géologiques particuliers tels que des cuvettes sédimentaires, de fortes épaisseurs de sédiments, des topographies non planes et des sites pour lesquels la valeur de Vs30 est inférieure à 300 m/s, pouvant mener à une amplification et/ou à un allongement de la durée du mouvement sismique. Dans ces cas, la RFS 2001-01 préconise de réaliser une étude spécifique afin de déterminer les effets de site particuliers et d'en tenir compte dans la détermination des spectres de réponse. Toutefois, elle n'explique pas de démarche pour évaluer ces effets de site particuliers.

En réponse aux demandes de l'ASN, l'IRSN a expertisé :

- la méthode proposée par EDF pour caractériser les effets de site particuliers 1D, au titre des fortes épaisseurs de sédiments ;
- les spectres sismiques associés au niveau SMS pour les sites de Belleville, de Gravelines, du Blayais et de Golfech à l'issue de l'application de cette méthode.

## 1. PERTINENCE DES CHOIX, DES HYPOTHÈSES ET DE LA MÉTHODE RETENUS PAR EDF

La méthode mise en œuvre par EDF s'articule en quatre étapes :

- 1) la caractérisation des propriétés des sols à l'aplomb des sites ;
- 2) la définition de colonnes de sol représentant ces propriétés ;
- 3) le calcul de la propagation des ondes sismiques dans ces colonnes de sol pour déterminer les spectres de réponse spécifiques aux sites ;
- 4) la définition d'un critère pour statuer, au cas par cas, sur le caractère significatif ou non des effets de site particuliers. Sur la base de ce critère, EDF prend en compte ou non les effets de site particuliers dans la définition du spectre sismique pour un site considéré.

### 1.1. CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS DU SOL

EDF dispose de mesures de vitesse des ondes de cisaillement dans des forages (mesures « *cross hole* »). Ces forages profonds d'une centaine de mètres n'atteignent le substratum rocheux que pour le site de Belleville. Ainsi, ces données ne sont pas toujours suffisantes pour caractériser toute l'épaisseur des sédiments. EDF complète les mesures en forage par des mesures géophysiques réalisées depuis la surface. Pour les quatre sites, EDF met en œuvre la méthode dite de « H/V »<sup>3</sup> qui permet de cartographier les fréquences de résonance du sol. Pour les sites du Blayais, de Golfech et de Gravelines, pour lesquels les forages n'atteignent pas le substratum rocheux, EDF met également en œuvre la méthode « SWDA »<sup>4</sup>. Cette méthode permet de déterminer la vitesse des ondes de cisaillement en fonction de la profondeur jusqu'au substratum rocheux.

**L'IRSN estime que les campagnes de mesures géophysiques réalisées par EDF sur les sites de Belleville, du Blayais, de Golfech et de Gravelines représentent une avancée notable.** Les données collectées et les méthodes mises en œuvre permettent de caractériser la géométrie des couches sédimentaires et les propriétés du sol en

<sup>3</sup> Rapport entre les composantes horizontales (H) et verticale (V) des vibrations ambiantes.

<sup>4</sup> Acronyme issu de l'anglais *Surface Wave Dispersion Analysis* – Analyse de la dispersion des ondes de surface.

profondeur, incluant le substratum rocheux. En ce sens, elles apportent des informations complémentaires aux mesures réalisées en forage ainsi qu'aux données sur la géologie des sites.

## 1.2. CHOIX ET HYPOTHÈSES POUR LA DÉFINITION DES COLONNES DE SOL

Pour les calculs de propagation des ondes sismiques, EDF définit, pour chaque site, une colonne de sol dite « *best-estimate* » et un ensemble de colonnes de sol obtenues en faisant varier certains paramètres décrivant la colonne « *best-estimate* ». Pour ce faire, **EDF mène un travail conséquent pour utiliser et combiner différentes sources de données géophysiques et géotechniques. L'IRSN estime que ce point est positif.** Toutefois, des aspects relatifs à la définition des colonnes de sol suscitent des réserves de la part de l'IRSN et sont détaillés par la suite.

**Ces réserves portent tout d'abord sur la définition des vitesses des ondes de cisaillement dans la colonne de sol dite « *best-estimate* » et l'investigation de la variabilité associée.** En effet, ces vitesses sont issues de l'adaptation des résultats des mesures « *cross-hole* » et de l'interprétation des mesures « H/V ». Cette approche conduit à des vitesses qui sont parfois éloignées des résultats des mesures « *cross-hole* », alors que ces mesures effectuées au droit des sites permettent une caractérisation directe des vitesses. En outre, EDF ne tient pas compte des mesures « SWDA » ; or ces mesures apportent des informations à des profondeurs qui ne sont pas investiguées par les mesures « *cross-hole* » et notamment sur le substratum rocheux. Les réserves exprimées par l'IRSN sur la détermination des vitesses dans les colonnes de sol se reportent sur l'investigation de la variabilité. De plus, cette investigation s'appuie sur des variations statistiques de paramètres de la colonne de sol, dont le lien avec les mesures et l'incertitude associée n'est pas suffisamment établi.

Ainsi, l'IRSN estime que les vitesses des ondes de cisaillement dans les colonnes de sol doivent être définies en se fondant sur l'ensemble des mesures géophysiques disponibles. L'investigation de la variabilité de ces colonnes de sol doit s'appuyer sur l'incertitude associée aux mesures. **Ce point fait l'objet de la recommandation n° 1 présentée en annexe.**

**L'IRSN exprime également des réserves sur la méthode retenue par EDF pour prendre en compte le phénomène de diffusion des ondes sismiques dans les colonnes de sol.** Ce phénomène est pris en compte au travers de deux paramétrages des colonnes de sol :

- en introduisant des faibles variations aléatoires de la vitesse des ondes de cisaillement dans les colonnes de sol, dites fluctuations à petite échelle ;
- en appliquant une correction à la courbe d'amortissement en fonction de la distorsion du sol. Cette correction consiste en l'ajout d'un amortissement complémentaire à faible distorsion.

Or il apparaît que l'utilisation de ces deux paramétrages pourrait conduire à une surreprésentation du phénomène de diffusion. Au cours de l'expertise, EDF a apporté des éléments montrant de manière probante que, pour le site de Golfech, ces paramétrages n'ont pas d'effet sur le spectre spécifique. Néanmoins, ce résultat n'est pas généralisable et la méthode utilisée par EDF peut conduire à une surestimation de l'atténuation du mouvement sismique à haute fréquence. **Ce point fait l'objet de la recommandation n° 2 présentée en annexe.**

## 1.3. CHOIX ET HYPOTHÈSES POUR LE CALCUL DE LA PROPAGATION DES ONDES SISMOLOGIQUES

Pour déterminer le spectre de réponse spécifique à chaque site, EDF définit un mouvement sismique dans le substratum rocheux dont il modélise la propagation dans les colonnes de sol.

À cet égard, EDF retient un modèle de comportement du sol « linéaire-équivalent » pour les sites de Belleville, du Blayais et de Golfech, et un modèle non-linéaire pour le site de Gravelines. **Ce point n'appelle pas de commentaire de la part de l'IRSN.**

Le mouvement sismique dans le substratum rocheux est issu d'une loi de prédiction du mouvement sismique pour des conditions au « rocher » définie par EDF dans le cadre de cette étude. Pour ce faire, EDF utilise un

nombre restreint de données de la sismothèque<sup>5</sup> de la RFS 2001-01, enregistrées aux sites classés « rocher » qui ont fait l'objet d'études récentes visant à améliorer la caractérisation des propriétés du sol. Il est à noter que la définition du mouvement sismique dans le substratum rocheux pour des études d'effets de site fait l'objet de nombreux travaux dans la communauté scientifique. Par rapport à l'état de l'art, la loi de prédiction du mouvement sismique définie par EDF dans le cadre de ce dossier s'appuie sur des bases très limitées.

Si l'IRSN estime que, compte tenu du caractère spécifique de l'étude, la loi de prédiction proposée par EDF peut être utilisée pour définir un mouvement sismique dans le substratum rocheux, il n'en demeure pas moins qu'EDF devrait compléter sa méthode en évaluant l'impact sur le spectre spécifique d'autres mouvements sismiques, en se fondant sur les connaissances les plus à jour en la matière. À ce sujet, pour les sites dont le sol présente un comportement « linéaire-équivalent », un lien direct peut être établi entre le mouvement dans le substratum rocheux et le spectre spécifique, ce qui n'est pas le cas pour les sites soumis à un comportement non-linéaire du sol. Ainsi, **l'IRSN estime que l'impact des mouvements sismiques dans le substratum rocheux sur le spectre spécifique, notamment pour le site de Gravelines soumis à un comportement non-linéaire du sol, devra être évalué par EDF. Ce point fait l'objet de la recommandation n° 3 présentée en annexe.**

#### **1.4. CONSTRUCTION D'UN CRITÈRE POUR STATUER SUR LE CARACTÈRE SIGNIFICATIF DES EFFETS DE SITE**

EDF définit un critère pour évaluer si le spectre de réponse spécifique au site dépasse significativement le spectre générique issu de la loi de prédiction du mouvement sismique de la RFS 2001-01 pour des conditions « alluvions ». Si ce critère est atteint, EDF retient uniquement le spectre spécifique pour la définition de l'aléa sismique. Dans le cas contraire, le spectre issu de la loi de prédiction du mouvement sismique de la RFS 2001-01 pour des conditions « alluvions » est maintenu.

L'élaboration de ce critère se fonde sur une analyse statistique des données de la sismothèque enregistrées aux sites « alluvions » dont la caractérisation des propriétés du sol a fait l'objet d'études récentes. Sur ce point, la pertinence de l'analyse d'EDF peut être questionnée, notamment au regard du nombre restreint de données de la sismothèque. De plus, l'application du critère retenu par EDF conduit à conclure qu'il n'y a pas d'effets de site significatifs pour des cas où le spectre spécifique peut dépasser, pour certaines plages de fréquences, le spectre générique de 20 à 30 %. L'IRSN estime qu'une telle conclusion fait porter des éléments de la démonstration de sûreté de la tenue des structures systèmes et composantes (SSC) à la définition de l'aléa, ce qui n'est pas acceptable sur le principe. Sur la base de ces éléments, l'IRSN estime que le critère introduit par EDF n'est pas acceptable.

#### **1.5. CONCLUSION SUR LA MÉTHODE D'EDF**

En conclusion de son analyse, l'IRSN relève plusieurs points positifs de la méthode d'EDF. Les études présentées constituent ainsi une base de connaissances qui devra être améliorée et consolidée lors de la prochaine mise en œuvre de la démarche.

Néanmoins, des aspects relatifs à la mise en œuvre de cette démarche soulèvent des réserves de la part de l'IRSN.

**Ainsi, compte tenu des incertitudes et des réserves sur certains des choix et des hypothèses d'EDF, l'IRSN estime qu'il n'est pas prudent de s'appuyer uniquement sur le spectre spécifique pour la définition de l'aléa sismique. De plus, l'IRSN estime qu'il n'est pas pertinent d'exclure la présence d'effets de site sur la base du critère défini par EDF et que le spectre spécifique doit être retenu pour la définition de l'aléa sismique du site, dès lors qu'il dépasse le spectre issu de la loi de prédiction du mouvement sismique de la RFS 2001-01 pour des conditions « alluvions ».**

---

<sup>5</sup> La base de données de séisme qui a été utilisée pour la définition de la loi de prédiction du mouvement sismique de la RFS 2001-01.

L'ensemble de ces éléments amène l'IRSN à formuler la recommandation n° 4 présentée en annexe.

## 2. CARACTÈRE RÉALISTE ET PRUDENT DES SPECTRES POUR LES SITES DE BELLEVILLE ET DE GRAVELINES

EDF conclut à la présence d'effets de site particuliers pour les sites de Belleville et de Gravelines, et propose, en application de sa démarche, pour ces deux sites, de retenir uniquement des spectres spécifiques pour le niveau SMS. Il est à noter que, pour ces deux sites et en regard de la recommandation n° 4, **EDF a déjà justifié la tenue des structures systèmes et composants en retenant le spectre générique issu de la loi de prédiction de la RFS 2001-01 pour des conditions « alluvions »**, dans le cadre des quatrièmes réexamens périodiques<sup>6</sup>.

À l'issue de son analyse, l'IRSN relève que l'évaluation du spectre spécifique du site de Belleville n'est pas impactée par les choix et les hypothèses d'EDF faisant l'objet des recommandations n° 1, n° 2 et n° 3 mentionnées supra. **L'IRSN estime que le spectre spécifique retenu par EDF pour le site de Belleville présente un caractère réaliste et prudent.** En outre, EDF a établi un programme de travail pour prendre en compte les effets de site particuliers pour ce site, ce qui est satisfaisant.

Pour ce qui concerne le site de Gravelines, l'IRSN relève que l'évaluation des spectres spécifiques<sup>7</sup> du site se fonde sur des hypothèses et des choix d'EDF qui font l'objet des recommandations n° 1, n° 2 et n° 3 mentionnées supra, notamment pour ce qui concerne la définition des colonnes de sol et le mouvement dans le substratum rocheux. Ces aspects s'inscrivent dans l'amélioration des méthodes et des connaissances et peuvent être traités dans le cadre d'une prochaine application de la méthode pour ce site.

Pour des fréquences inférieures à 0,7 Hz, les spectres spécifiques du site de Gravelines dépassent les spectres génériques issus de la loi de prédiction du mouvement sismique de la RFS 2001-01 pour des conditions « alluvions ». Dans le cadre de la présente expertise, **EDF n'a pas apporté les éléments permettant de justifier l'absence d'impact des spectres spécifiques du site de Gravelines sur le comportement des ouvrages de génie civil, des systèmes et des composants. Ce point fait l'objet de la recommandation n° 5 présentée en annexe.**

## 3. BIEN-FONDÉ DES JUSTIFICATIONS APPORTÉES PAR EDF SUR L'EXCLUSION D'EFFETS DE SITE PARTICULIERS POUR LES SITES DU BLAYAIS ET DE GOLFECH

EDF conclut à l'exclusion d'effets de site particuliers pour les sites de Golfech et du Blayais. Il retient pour ces sites le spectre SMS générique issu de la loi de prédiction du mouvement sismique de la RFS 2001-01 pour des conditions « alluvions » et a justifié la tenue des structures systèmes et composants sur cette base dans le cadre des quatrièmes réexamens périodiques.

**S'agissant du site du Blayais, l'IRSN estime que les justifications apportées par EDF pour exclure la présence d'effets de site particuliers ne sont pas suffisantes.** En particulier, il apparaît que le spectre spécifique calculé par EDF dépasse le spectre SMS générique de 20 % à 30 %, dans la plage de fréquences allant de 3 à 5 Hz. Ainsi, en cohérence avec la recommandation n° 4, **l'IRSN estime qu'EDF devra justifier l'absence d'impact du spectre spécifique du site du Blayais sur le comportement des ouvrages de génie civil, des systèmes et des composants. Ce point fait l'objet de la recommandation n° 6 présentée en annexe.**

<sup>6</sup> S'agissant du SMS du site de Belleville et des vérifications effectuées par EDF avec ce niveau d'aléa, l'IRSN rappelle que l'ASN a demandé à EDF de reprendre pour le RP4 1300 l'aléa retenu précédemment au titre de son RP3 1300. C'est également le cas pour le SMS du site de Golfech.

<sup>7</sup> L'aléa du site de Gravelines est défini par deux spectres SMS.

Pour ce qui concerne le site de Golfech, l'IRSN relève que l'évaluation du spectre spécifique n'est impactée que par les choix et les hypothèses d'EDF faisant l'objet de la recommandation n° 1 mentionnée supra. En outre, l'IRSN relève que le spectre SMS spécifique est couvert sur toute la plage de fréquences par le spectre générique ou le spectre minimal forfaitaire<sup>8</sup>. **En conséquence, l'IRSN estime que les justifications apportées par EDF pour exclure la présence d'effets de site particuliers pour le site de Golfech sont suffisantes.**

**IRSN**

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

---

<sup>8</sup> La RFS 2001-01 préconise que le spectre retenu pour définir l'aléa ne pourra pas être inférieur à un spectre minimal forfaitaire (SMF) calé en accélération à 0,1 g à la fréquence infinie.

# ANNEXE À L'AVIS IRSN N° 2023-00182 DU 12 DÉCEMBRE 2023

## Recommandations de l'IRSN

### Recommandation N° 1

L'IRSN recommande que, dans le cadre des prochaines applications de la méthode d'évaluation des effets de site particuliers, pour les calculs de propagation des ondes sismiques, EDF définisse des vitesses des ondes de cisaillement dans les colonnes de sol cohérentes avec les données disponibles. En particulier, ces vitesses doivent être représentatives des mesures « *cross-hole* » en forage, et s'appuyer, pour la partie profonde, sur l'ensemble des mesures de bruit sismique (« SWDA » et « H/V »). La prise en compte de leur variabilité devra s'appuyer sur l'incertitude associée aux mesures.

### Recommandation N° 2

L'IRSN recommande que, dans le cadre des prochaines applications de la méthode d'évaluation des effets de site particuliers, pour la définition des colonnes de sol, EDF ne prenne pas en compte à la fois les fluctuations à petite échelle des vitesses des ondes de cisaillement et l'amortissement complémentaire à faible distorsion.

### Recommandation N° 3

L'IRSN recommande que, dans le cadre des prochaines applications de la méthode d'évaluation des effets de site particuliers, pour les sites dont le sol présente un comportement non-linéaire et notamment celui de Gravelines, EDF conduise une étude de l'impact sur le spectre spécifique de la définition du mouvement sismique dans le substratum rocheux. EDF devra intégrer les connaissances récentes en matière de définition du mouvement dans le substratum rocheux et de lois de prédiction du mouvement sismique.

### Recommandation N° 4

L'IRSN recommande que, lorsqu'un site a fait l'objet d'une étude spécifique des effets de site particuliers, EDF retienne un aléa pour le niveau SMS défini, d'une part par le spectre spécifique, d'autre part par le spectre issu de la loi de prédiction de la RFS 2001-01 pour des conditions de site « alluvions ».

### Recommandation N° 5

L'IRSN recommande que, pour le site de Gravelines, EDF :

- considère, pour les prochains réexamens de sûreté, à la fois les spectres issus de la loi de prédiction de la RFS 2001-01 pour des conditions de site « alluvions » et les spectres spécifiques du site ;
- démontre l'absence d'impact des spectres spécifiques sur le comportement des ouvrages de génie civil dont les fréquences d'intérêt sont inférieures à 0,7 Hz et sur le comportement des systèmes et composants sur la base des spectres transférés associés aux spectres spécifiques.

### Recommandation N° 6

L'IRSN recommande que, pour le site du Blayais, EDF :

- considère, pour les prochains réexamens de sûreté, à la fois le spectre issu de la loi de prédiction de la RFS 2001-01 pour des conditions de site « alluvions » et le spectre spécifique du site ;
- démontre l'absence d'impact du spectre spécifique sur le comportement des ouvrages de génie civil et sur celui des systèmes et composants sur la base des spectres transférés associés au spectre spécifique.