ASNR Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Monsieur le Directeur de la Direction des Réacteurs de Puissance

Fontenay-aux-Roses, le 30 octobre 2026

AVIS D'EXPERTISE N° 2026-00113 DU 30 OCTOBRE 2026

Objet : **EDF – Projet EPR2 – Site de Gravelines – Caractérisation de l'aléa sismique, caractérisation géotechnique du site et comportement des renforcements de sol en statique et en dynamique**

Références : [1] Avis d'expertise de l'ASNR n° 2025-00083 du 23 juillet 2025.
[2] Saisine – CODEP-DCN-2025-071218 du 26 février 2026.
[3] Saisine – CODEP-DCN-2026-032451 du 29 mai 2026.
[4] Saisine – CODEP-DCN-2026-032460 du 2 juin 2026.
[5] Avis IRSN n° 2023-00182 du 12 décembre 2023.

EDF prévoit l'implantation de deux nouveaux réacteurs de type EPR2 sur le site de Gravelines. Or, les particularités de ce site, caractérisé par un sol meuble sur une forte épaisseur, et la masse importante des réacteurs EPR2 rendent nécessaire la mise en place d'un renforcement du sol avant toute construction pour limiter les tassements et se prémunir contre le risque de liquéfaction[1] des sols sous séisme.

EDF a présenté en 2024 à l'Autorité de sûreté nucléaire une première solution de renforcement. Celle-ci a fait l'objet d'un premier avis [1] qui a notamment souligné le caractère innovant de la solution proposée, l'absence de retour d'expérience significatif dans le domaine nucléaire, l'absence de démonstration de la robustesse de la solution retenue et les difficultés liées à la garantie du maintien dans le temps du suivi en service du système de renforcement. Il avait en particulier été mis en avant l'intérêt d'examiner la pertinence d'autres solutions d'amélioration du sol.

En conséquence, EDF a proposé en mars 2026 une nouvelle solution de renforcement de sol au droit des futurs réacteurs EPR2 du site de Gravelines, plus conventionnelle, qui consiste notamment à substituer les sols en place sur plus d'une dizaine de mètres pour écarter le risque de liquéfaction.

Par ailleurs, l'avis [1] ne traitait ni de la caractérisation du comportement sismique de la première solution de renforcement du sol ni de la détermination des caractéristiques de l'aléa au niveau des fondations des ouvrages de génie civil de ces réacteurs, qui sont des éléments essentiels pour le dimensionnement de la solution de renforcement de sol et des ouvrages en cas de séisme.

À cet égard, EDF a défini, pour le site de Gravelines, le mouvement sismique au substratum rocheux qu'il a ensuite propagé, par simulation numérique, jusqu'à la fondation des ouvrages, en considérant les sols existants, ce qui a nécessité leur caractérisation géotechnique, afin d'évaluer le comportement sismique du système de renforcement de sol sous les réacteurs EPR2 et de caractériser le niveau d'aléa à prendre en compte pour le dimensionnement des ouvrages fondés sur le sol renforcé.

[1] La liquéfaction d'un sol sous séisme résulte de l'augmentation de la pression d'eau dans un sol à la suite d'un séisme, ce qui conduit à une perte de résistance du sol, voire à son écoulement.

Adresse du siège social : 15 rue Louis Lejeune - 92120 Montrouge
Adresse postale : BP 17 - 92262 Fontenay-aux-Roses cedex
Tél. : +33 (0)1 58 35 88 88 - Courriel : asnr-courrier@asnr.fr

Par les saisines [2], [3] et [4], la Direction des centrales nucléaires de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR) a sollicité une expertise portant respectivement sur les sujets suivants :

- les méthodologies mises en œuvre pour la caractérisation de l'aléa sismique au droit de ces futurs réacteurs ;
- la suffisance des reconnaissances de sol réalisées au droit de ces futurs réacteurs, les modèles géologique et géotechnique retenus, le contexte hydrogéologique et le risque de liquéfaction des sols naturels au droit de ces futurs réacteurs ;
- la pertinence et la suffisance des principes de conception de la solution de renforcement du sol pour atteindre les performances attendues, du référentiel de conception associé, et du suivi du comportement du renforcement du sol.

Elle a en outre demandé que soient identifiés les éléments nécessaires afin de disposer d'une démonstration suffisante de l'atteinte des performances attendues.

La Direction technique[2] présente ci-après les principales conclusions de son examen, tenant compte des informations apportées au cours de l'expertise et des engagements pris par EDF.

1. CARACTÉRISTATION DE L'ALÉA SISMIQUE

En réponse à la saisine [2], les sujets examinés dans le cadre de la présente expertise sont les suivants :

- l'étude des failles aux alentours du site de Gravelines ;
- la démarche mise en œuvre par EDF pour l'évaluation de l'aléa sismique à partir du mouvement sismique défini au substratum rocheux – pour les niveaux du séisme majoré de sécurité (SMS) et du séisme extrême[3] - avec la prise en compte des effets de site particuliers.

1.1. DÉMARCHE D'ÉVALUATION DE L'ALÉA SISMIQUE

Pour l'évaluation de l'aléa sismique sur le site de Gravelines accueillant les réacteurs EPR2, EDF applique la démarche préconisée par la RFS[4] 2001-01. La RFS 2001-01 précise les différentes étapes de la démarche à suivre pour élaborer les séismes majorés de sécurité.

Ainsi, un zonage sismotectonique[5] est tout d'abord défini pour identifier et sélectionner les séismes de référence à partir de la base de données de sismicité historique de la France hexagonale. Les séismes de référence retenus dans chaque zone sont ensuite translatés au plus près du site. Le séisme de référence ayant l'impact le plus fort au site est alors retenu comme étant le séisme maximal historiquement vraisemblable (SMHV). Dans certaines configurations, plusieurs séismes peuvent être retenus. L'intensité macrosismique et la magnitude de ce séisme sont ensuite majorées pour définir le SMS.

Les spectres de réponse (SMHV et SMS) de ces séismes sont calculés avec la loi de prédiction du mouvement sismique définie par la RFS 2001-01. Dans le cas où une faille active aurait produit une rupture de surface (faille capable), un spectre de paléoséisme est défini pour compléter le spectre SMS. La RFS 2001-01 indique que le paléoséisme reflète le potentiel sismogène de la faille pour une période de retour[6] de quelques dizaines de milliers d'années. Enfin, elle préconise que le spectre retenu pour définir le SMS ne soit pas inférieur à un spectre minimal forfaitaire (SMF) calé en accélération à 0,1 g à la fréquence infinie.

La RFS 2001-01 identifie également des contextes géologiques particuliers tels que les fortes épaisseurs de sédiments, pouvant mener à une amplification et à un allongement de la durée du mouvement sismique. Dans

[2] À compter du 1er octobre 2026, les avis d'expertise de l'ASNR sont émis sous la responsabilité du Directeur technique qui assume la fonction d'Autorité technique de l'ASNR.

[3] À la suite de l'accident de Fukushima Daiichi, un séisme extrême de niveau supérieur au SMS est retenu dans la démonstration de sûreté.

[4] RFS : Règle Fondamentale de Sûreté.

[5] 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.

[6] Intervalle de temps moyen estimé entre deux événements sismiques de magnitude comparable.

ces cas, la réalisation d'une étude spécifique est préconisée afin de déterminer les effets de site particuliers et d'en tenir compte dans la détermination des spectres de réponse. Toutefois, la RFS 2001-01 ne précise pas de démarche pour évaluer ces effets de site particuliers.

En appliquant la RFS, EDF retient deux SMS associés respectivement au séisme de la Manche de 1580 et au séisme de l'Essex de 1884 et conduit une étude des effets de site particuliers.

1.2. CARACTÉRISATION DES FAILLES

EDF avait présenté en 2016, pour les installations existantes du parc nucléaire, un bilan des connaissances relatives à la caractérisation des failles dans un rayon de 25 km autour des installations et proposé une méthode graduée d'investigations qui a conduit à identifier six sites pilotes, parmi lesquels figure le site de Gravelines.

L'occurrence du séisme du Teil en 2019 a conduit EDF à réviser sa méthode. Il est ainsi apparu d'une part que l'étude des failles fondée uniquement sur des données issues de la bibliographie est insuffisante, d'autre part que des investigations géologiques et morphotectoniques[7] systématiques sont nécessaires, et ce indépendamment de la réputation d'activité des failles présentes dans un rayon de 25 km autour des sites nucléaires. Cela est cohérent avec les recommandations des guides internationaux en matière d'investigation des failles.

Pour le site de Gravelines, la structure géologique majeure à proximité est la Zone de Cisaillement Nord Artois (ZCNA), composée de plusieurs segments de failles à terre et en mer, dont l'activité récente demeure mal connue. Afin d'en caractériser la structure en profondeur, EDF a conduit des analyses s'appuyant sur des données géologiques et géophysiques acquises dans la région à la fin des années 1970 et au début des années 1980. Une analyse des connaissances des failles autour du site de Gravelines sera intégrée à la version préliminaire du rapport de sûreté jointe à la demande d'autorisation de création des réacteurs EPR2.

Par ailleurs, EDF estime que l'occurrence d'un paléoséisme sur l'une des failles de la ZCNA répertoriées dans la base de données des failles potentiellement actives ne conduirait pas à un niveau d'aléa remettant en cause le dimensionnement des réacteurs EPR2 de Gravelines, compte tenu des caractéristiques du SMS associé au séisme de la Manche de 1580 correspondant à un séisme de magnitude élevée et localisé à environ 20 km du site. Or, des indices d'activité ont été répertoriés sur les failles de la ZCNA et des données sismiques en mer de très haute résolution ont permis d'identifier des failles dans des dépôts récents. Ainsi, il conviendrait qu'EDF consolide sa position sur le caractère enveloppe du spectre du SMS associé au séisme de la Manche au regard d'un éventuel paléoséisme en considérant les données sismiques en mer disponibles et, le cas échéant, en menant à terme des observations géologiques et morphotectoniques.

1.3. ÉVALUATION DE L'ALÉA SISMIQUE À LA SURFACE À PARTIR DU MOUVEMENT SISMIQUE DÉFINI AU SUBSTRATUM ROCHEUX

Pour les réacteurs EPR2 prévus sur le site de Gravelines, EDF reconduit la méthode appliquée pour l'évaluation des effets de site particuliers pour les réacteurs en exploitation de ce site. Cette méthode consiste à propager numériquement dans le sol en place le mouvement sismique défini au substratum rocheux, situé selon EDF à une profondeur de l'ordre de 180 m, jusqu'à la surface.

Ce mouvement sismique est défini à partir des caractéristiques des deux SMS du site retenus par EDF. Pour le niveau de séisme extrême, EDF indique que les spectres de réponse sont obtenus par une majoration de 50 % des spectres SMS définis au substratum. Ce point n'appelle pas de remarque.

La méthode définie par EDF comporte trois étapes principales :

- la définition des colonnes de sol : une colonne de sol est décrite par l'épaisseur des différentes couches géologiques qui la constituent, leurs propriétés géophysiques et leurs caractéristiques géotechniques. Ces paramètres sont issus d'investigations de terrain ; la propagation des incertitudes associées conduit à considérer plusieurs colonnes de sol de paramètres variables ;

[7] Investigation des déformations d'origine tectonique sur la base de la topographie (morphologie).

- la détermination du mouvement sismique dans le substratum rocheux : il s'agit de définir l'aléa sismique pour les conditions de sol relatives au rocher situé à la base des colonnes de sol ;
- le calcul de la réponse des colonnes de sol : il s'agit d'évaluer numériquement la propagation des ondes sismiques du substratum rocheux à la surface.

La mise en œuvre de cette méthode a fait l'objet d'une expertise de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire [5] qui a conduit à formuler des recommandations sur la définition des colonnes de sol et sur la détermination du mouvement sismique dans le substratum rocheux. En revanche, le calcul de la réponse des colonnes de sol n'a pas appelé de remarque.

En ce qui concerne la définition des colonnes de sol, EDF a indiqué que les études seront mises à jour à l'issue des campagnes de reconnaissance de sol réalisées au droit des réacteurs EPR2. Une synthèse des informations collectées lors de ces campagnes permettra de construire des colonnes de sol représentatives des conditions réelles du sol sous ces réacteurs. Les incertitudes inhérentes à la caractérisation du sol seront également prises en compte. Ce point n'appelle pas de remarque à ce stade.

S'agissant de la détermination du mouvement sismique dans le substratum rocheux au droit des réacteurs EPR2, celui-ci est issu d'une loi de prédiction du mouvement sismique définie par EDF en utilisant un nombre restreint de données de la sismothèque de la RFS 2001-01. Par rapport aux nombreuses lois de prédiction du mouvement sismique actuellement disponibles, la loi retenue par EDF s'appuie sur une base de données très limitée et ne reflète pas l'évolution des connaissances, ce qui avait déjà été émis en exergue dans l'avis en référence [5].

En l'absence d'étude d'impact prenant en compte l'évolution des connaissances acquises depuis la parution de la RFS 2001-01 sur la définition du mouvement sismique au substratum rocheux, la Direction technique considère que le caractère suffisant des niveaux d'aléas sismiques utilisés pour le dimensionnement du système de renforcement du sol et des ouvrages de génie civil n'est pas acquis à ce stade.

Il conviendra qu'EDF vérifie que le mouvement sismique défini au substratum rocheux couvre raisonnablement les mouvements sismiques qui pourraient être évalués en tenant compte des connaissances actualisées, en particulier en termes de lois de prédiction du mouvement sismique. In fine, EDF devra s'assurer que le spectre de dimensionnement utilisé pour le dimensionnement des ouvrages de génie civil et des équipements couvre raisonnablement le spectre de réponse retenu à l'issue des études de propagation des mouvements sismiques dans le sol naturel ou renforcé (*cf.* 3.3.3).

2. CARACTÉRISATION GÉOTECHNIQUE DU SITE

En réponse à la saisine [3], les sujets examinés dans le cadre de la présente expertise sont les suivants :

- le contexte géologique et hydrogéologique du site ;
- la suffisance des reconnaissances réalisées au droit des futurs ouvrages du bloc usine[8] ;
- les modèles géologique et géotechnique retenus par EDF au droit du bloc usine, avant les travaux de terrassement ;
- le risque de liquéfaction des sols naturels au droit des futurs ouvrages du bloc usine.

Les éléments présentés par EDF relatifs aux contextes géologique et hydrogéologique n'appellent pas de commentaires.

Pour caractériser les terrains en place, les techniques mises en œuvre à grande échelle, de natures variées et combinées entre elles, ont permis à EDF de présenter un état détaillé de connaissance des terrains verticalement et spatialement à l'échelle du bloc usine des réacteurs EPR2. Des reconnaissances complémentaires sont prévues pour mieux caractériser localement certains intervalles de profondeur. Ainsi, les reconnaissances de

[8] La zone du bloc usine comprend le regroupement des ouvrages de l'îlot nucléaire et ceux de l'îlot conventionnel des réacteurs EPR2. Les ouvrages associés à la source froide, dit ouvrages bords de canal, ne sont pas considérés dans le bloc usine.

terrain menées et prévues par EDF apparaissent suffisantes à ce stade du projet pour caractériser les terrains au droit des futurs réacteurs EPR2.

Le modèle géologique présenté par EDF comprend depuis la surface : des remblais, des sables et argiles du Quaternaire en distinguant les formations N1, N2, la couche de transition, la formation N3, puis les formations plus anciennes : les argiles des Flandres, les sables d'Ostricourt et l'argile de Louvil. Ce modèle se fonde sur de nombreuses données, acquises récemment dans le périmètre du bloc usine des réacteurs EPR2, ou issues de précédentes campagnes menées plus largement sur le site de Gravelines, ce qui est satisfaisant. Le modèle géologique sera consolidé à l'issue des reconnaissances complémentaires, ce qui est également satisfaisant.

Le modèle géotechnique présenté par EDF comprend, pour chaque formation du sol, les paramètres utiles aux études de portance et à l'évaluation des tassements, sous chargements statique et sismique. La plage de variation retenue pour les paramètres issus des reconnaissances de sol est globalement satisfaisante, hormis pour ceux concernant la formation N3. En effet, cette formation sableuse peut présenter dans sa partie supérieure des niveaux discontinus, de plus faible résistance que dans sa partie inférieure. En outre, l'acquisition de certaines mesures géotechniques dans cette formation s'est avérée difficile. **Ainsi, des reconnaissances complémentaires visant en particulier à mieux préciser les caractéristiques de la formation N3 sont prévues par EDF et permettront de consolider le modèle géotechnique, ce qui est satisfaisant.**

Pour ce qui concerne le risque de liquéfaction, la démarche et les hypothèses retenues par EDF sont satisfaisantes. Après substitution des remblais et de la formation N1, il demeure un risque de liquéfaction limité à la base de la couche de transition et dans la partie supérieure de la formation N3. **L'évaluation du risque de liquéfaction sera mise à jour à l'issue des reconnaissances complémentaires, ce qui est satisfaisant.**

Enfin, durant la phase des travaux, un dispositif renforcé de suivi des niveaux de la nappe phréatique sera spécifiquement mis en place, ce qui est satisfaisant.

3. COMPORTEMENT DES RENFORCEMENTS DE SOL SOUS SOLLICITATIONS STATIQUES ET SISMIQUES

En réponse à la saisine [4], les sujets examinés dans le cadre de la présente expertise sont les suivants :

- le référentiel de conception des renforcements de sol au regard des objectifs de performance retenus ainsi que les premiers éléments de démonstration apportés par EDF ;
- les principes de conception décrits par EDF pour atteindre les performances attendues vis-à-vis des sollicitations statiques et dynamiques ;
- le suivi du comportement du système de renforcement du sol retenu par EDF pour toute la vie de l'installation.

3.1. OBJECTIFS DE PERFORMANCE DU RENFORCEMENT DES SOLS ET NOUVELLE SOLUTION DE RENFORCEMENT

EDF retient trois objectifs de performance associés au système de renforcement de sol du site de Gravelines :

- assurer la capacité portante des sols supports en toutes situations (statique et sismique) ;
- exclure le risque de liquéfaction en cas de séisme ;
- réduire et maîtriser les tassements sous les ouvrages lors des phases de construction et sur toute la durée d'exploitation des réacteurs.

Pour répondre au premier et au dernier objectifs de performance associés au système de renforcement, EDF a retenu une nouvelle solution de renforcement consistant à mettre en œuvre, sous l'emprise des ouvrages du bloc usine, lourds ou fondés profondément, des inclusions rigides en béton armé rectangulaires (dites barrettes) longues, ou circulaires courtes. Ces différentes inclusions sont surmontées d'un remblai granulaire de bonne qualité, appelé plateforme de transfert de charge (PTC), situé entre la sous-face des radiers et l'extrémité supérieure des inclusions (appelée tête).

Pour exclure le risque de liquéfaction des sols en cas de séisme (deuxième objectif de performance), EDF retient de substituer toutes les couches de sol liquéfiables sur l'ensemble du site accueillant les futurs réacteurs EPR2 de Gravelines. Ceci conduit à l'excavation d'un peu moins d'une dizaine de mètres[9] de sol, puis à une phase de remblaiement par un ou plusieurs types de remblai non liquéfiable respectant les exigences de qualité requises.

Ainsi, la nouvelle solution de renforcement[10] retenue par EDF (substitution des sols liquéfiables associée à la mise en place d'inclusions rigides) va dans le sens d'une simplification, tant en termes de dimensionnement, même si certains points techniques restent encore ouverts, comme discuté par la suite, que de réalisation. En effet, les techniques de renforcement par inclusions rigides bénéficient d'un retour d'expérience important depuis plusieurs décennies, ce qui rend la solution de renforcement plus maîtrisable par les industriels. Néanmoins, ce projet de renforcement, à l'échelle d'un site nucléaire, revêt un caractère exceptionnel du fait de son ampleur et de sa complexité, le sol n'étant pas renforcé de manière homogène sur tout le site mais seulement sous certains ouvrages.

EDF ne souhaite pas attribuer de classement de sûreté au système de renforcement de sol. Cependant, compte tenu du caractère exceptionnel lié à sa réalisation et d'un REX négatif du parc en exploitation lié à un compactage insuffisant des remblais pouvant avoir des conséquences sur le respect des exigences attribuées aux SSCs[11], il apparaît nécessaire d'assurer la qualité de réalisation des remblaiements et des inclusions rigides, lesquels ne seront ni visitables, ni remplaçables, pour garantir le respect, dans la durée, des exigences de sûreté attribuées aux ouvrages et aux équipements. En fin d'expertise, EDF a retenu de considérer en tant qu'AIP (Activité Importante pour la Protection des intérêts) les études de conception ainsi que les travaux de mise en œuvre des renforcements de sol. Pour EDF, ces activités, soumises à des exigences renforcées de contrôle et de surveillance cohérentes avec celles appliquées aux ouvrages EIPS[12] qu'ils supportent, permettront de garantir la qualité de la conception et de la réalisation des renforcements de sol. **La Direction technique considère la position d'EDF comme satisfaisante dans son principe. Il conviendra qu'EDF apporte, à l'issue des études de détails, la démonstration du respect des objectifs de performance attribués aux renforcements. Cette démonstration devra s'accompagner de dispositions cohérentes de contrôles et de surveillance de la réalisation du système de renforcements. Ce point est discuté au § 3.4.**

3.2. LE RÉFÉRENTIEL DE CONCEPTION

Pour la solution de renforcement de sol du site de Gravelines, EDF a défini un référentiel qui s'appuie sur le code RCC-CW, le guide ASIRI[13], les travaux en cours du programme ASIRI+[14], la norme française sur les fondations profondes et l'avis d'experts indépendants. Ce référentiel décrit les méthodes et les critères de dimensionnement à respecter pour la conception du système de renforcement selon une approche progressive. Cette approche consiste à réaliser des modèles numériques de plus en plus sophistiqués pour prendre en compte, de manière plus réaliste, les zones spécifiques des renforcements, le phasage des chargements et la vérification pour chaque inclusion rigide de sa résistance et de celle du sol en interaction. Ces modèles sont alimentés et calibrés par le modèle géologique et géotechnique issu de la campagne géotechnique (*cf.* § 2), les résultats d'essais de chargement sur inclusions rigides réalisés en vrai grandeur sur le site de Gravelines et l'analyse des tassements du sol sur lequel sont implantés les six réacteurs existants de 900 MWe situés à proximité. Pour EDF,

---

[9] La profondeur d'excavation est plus importante sous les ouvrages situés en bord de canal compte tenu de la cote inférieure des radiers de ces ouvrages qui se situe soit dans la couche N2, soit dans la couche N3.

[10] La nouvelle solution de renforcement diffère de la solution initiale du fait de la substitution totale de la couche de sol liquéfiable sous l'emprise du bloc usine des deux réacteurs EPR2 et, de ce fait, de la suppression de l'association de deux types de renforcement : les inclusions rigides et le traitement par « soil-mixing » (le soil-mixing regroupe un ensemble de techniques dont le point commun est de mélanger mécaniquement le sol avec un liant hydraulique comme un coulis de ciment).

[11] SSC : Structures, Systèmes et Composants (contribuant à la sûreté).

[12] Élément important pour la protection lié à la sûreté.

[13] Ce guide a été produit par le projet national ASIRI (Amélioration des Sols par Inclusions Rigides), piloté par l'IREX (Institut pour la Recherche appliquée et l'EXpérimentation en génie civil) et publié en 2012.

[14] Le programme de recherche du projet national ASIRI+ a été élaboré autour de trois axes principaux : l'étude des PTC, le comportement des ouvrages sous sollicitations quasi-statiques et/ ou inclinées et le comportement des ouvrages sous sollicitations dynamiques et sismiques. Le programme de recherche est organisé en 10 tâches.

les moyens de vérification exigés par ce référentiel sont très supérieurs aux pratiques d'ingénierie courantes et vont au-delà des préconisations des guides et normes existantes.

Lors de la campagne réalisée en 2025, un essai a été conduit à son terme alors que le chargement en tête d'inclusion était inférieur à celui prévu en raison d'un remaniement des terrains à proximité de la barrette. EDF s'est ainsi engagé à réaliser un nouvel essai lors de la campagne prévue début 2027 au cours de laquelle de nouvelles configurations doivent être testées. La synthèse des résultats de cette nouvelle campagne sera transmise en septembre 2027, **ce qui est satisfaisant.**

La Direction technique relève que l'application du guide ASIRI est une base nécessaire en tant que référentiel. Toutefois, les recommandations du projet ASIRI+ n'ayant pas encore été éditées, elle considère que le référentiel actuel doit être complété sur plusieurs points, notamment pour ce qui concerne la prise en compte des singularités (*cf.* § 3.3.1) et des situations dynamiques (sollicitations sismiques). L'approche d'EDF reposant largement sur les résultats de simulations numériques, la Direction technique estime qu'il conviendrait, notamment pour les sollicitations sismiques, de les confronter à des résultats expérimentaux, d'examiner la représentativité de ces derniers au regard du cas des réacteurs EPR2 de Gravelines et, le cas échéant, d'investiguer le besoin de réaliser de nouveaux essais expérimentaux pour valider les modèles numériques utilisés pour la prédiction du comportement du système de renforcement de sol en statique et en dynamique.

En fin d'expertise, EDF s'est engagé à transmettre en 2027 un livrable rassemblant les éléments qui étayent la validité des modélisations numériques servant au dimensionnement du renforcement de sol. **La Direction technique considère l'engagement d'EDF comme satisfaisant sur le principe. EDF devra porter une attention particulière à la transposabilité des résultats expérimentaux disponibles, à la calibration et la validation des modèles sous sollicitations sismiques et à la prise en compte des incertitudes, en particulier celles relatives aux méthodes de calcul simplifiées retenues.**

Par ailleurs, EDF s'est engagé à analyser, dès la publication des recommandations ASIRI+, celles applicables au projet de renforcement de sol du site de Gravelines et, si ces dernières ne sont pas couvertes par son référentiel actuel, à les intégrer dans les études et les réalisations du projet si leur échéance de publication et leur contenu le permettent. **Cet engagement est satisfaisant dans son principe.**

3.3. LES PRINCIPES DE CONCEPTION SOUS SOLLICITATIONS STATIQUES ET DYNAMIQUES

3.3.1. Principes généraux

À ce stade d'avancement des études, EDF envisage de ne renforcer que les zones situées sous l'emprise des ouvrages le nécessitant et ce de manière distincte en fonction des caractéristiques des ouvrages. La solution de renforcement retenue par EDF est donc hétérogène à l'échelle globale du site. Par ailleurs, EDF ne prévoit ni de débord de la zone renforcée par rapport à l'emprise de l'ouvrage à fonder, ni de zone de raccordement progressif entre les zones renforcées et non renforcées. Pour la Direction technique, ces dispositions, qui s'écartent des préconisations du guide ASIRI, doivent être justifiées.

Par ailleurs, seules les zones courantes ont été étudiées par EDF ; la présence des singularités des installations n'a pas été considérée. Ces singularités réduisent parfois significativement l'épaisseur disponible de la PTC sous les radiers ou ne permettent plus de respecter les principes de conception retenus à ce stade par EDF, notamment une même profondeur des têtes d'inclusions à l'échelle du bloc usine. En outre, ces zones singulières modifient localement les caractéristiques du système de renforcement, dont la prise en compte nécessite une attention particulière pour ne pas remettre en cause le dimensionnement de ces parties d'ouvrages, et plus généralement des infrastructures d'ouvrages. EDF s'est engagé à étudier ces configurations singulières avec une attention particulière dans les études de détails à venir. **Ce point reste un point d'attention important pour la suite du projet car la justification des zones singulières pourrait se révéler complexe et mettre en cause certaines dispositions retenues à ce stade.**

S'agissant des principes de conception vis-à-vis des tassements, la stratégie d'EDF repose sur l'adaptabilité des ouvrages et des équipements aux tassements pendant toute la durée d'exploitation des futurs réacteurs EPR2. Pour la Direction technique, ceci est adapté pour les tassements dus aux chargements statiques, après

construction, dont la cinétique est *a priori* assez lente pour pouvoir juger de la nécessité d'intervenir. En fin d'expertise, EDF confirme prévoir la mise en place d'un suivi régulier des tassements mesurés in situ, dès le début des travaux, pendant les phases transitoires, puis en exploitation, pour les comparer avec les évaluations numériques faites en amont, **ce qui est satisfaisant**. En effet, la Direction technique considère que ce suivi permettra de s'assurer que les tassements calculés en statique sont cohérents avec ceux réellement observés et d'anticiper si nécessaire l'adaptation des SSCs les plus sensibles aux tassements. **S'agissant des tassements induits par les sollicitations sismiques, il appartiendra à EDF de transmettre des éléments de validation des modèles utilisés en 2027.**

3.3.2. En statique

Les renforcements de sol ont pour objectif de limiter les tassements des ouvrages qu'ils supportent. Leur dimensionnement et celui des ouvrages doivent tenir compte d'une évaluation précise des tassements à l'échelle du site. Cette évaluation a été menée par EDF sur la base d'un modèle numérique tridimensionnel de l'ensemble du bloc usine en adoptant des simplifications dans la représentation des charges sous poids propre et des rigidités au droit des radiers. Pour le dimensionnement des inclusions rigides, une attention particulière doit être portée à la finesse de la répartition des transferts de charges des ouvrages vers les renforcements de sol et à la définition des raideurs de sol[15] homogénéisées[16], ces dernières devant être adaptées pour tenir compte des effets locaux en limite d'ouvrage. Pour le dimensionnement des ouvrages qui sera fait par la suite, sur la base de modèle représentant chaque ouvrage de manière isolé, une attention particulière devra également être portée sur la pertinence de la matrice des raideurs retenue évaluées à partir du modèle tridimensionnel global.

Dans les études de détails à venir, il est attendu une justification de la cohérence entre, d'une part les résultats issus des études de tassement qui valident la solution de renforcement, d'autre part la finesse du maillage retenue pour prendre en compte l'interaction sol/structure et les raideurs représentant le sol renforcé à introduire dans les études des ouvrages, ceci afin de s'assurer que les efforts et déformations des éléments de structure des ouvrages ne seront pas sous-estimés.

En fin d'expertise, afin de conforter le conservatisme de sa démarche, EDF s'est engagé à réaliser à cet égard des études de sensibilité, lorsque jugé pertinent. **Si cet engagement est satisfaisant dans son principe, la Direction technique relève que le bien-fondé de l'approche retenue par EDF ne pourra être apprécié qu'une fois la démarche appliquée dans son ensemble et à l'issue des études de détails.**

3.3.3. En dynamique, sous sollicitations sismiques

La méthodologie de dimensionnement des renforcements de sol comprend trois étapes :

1) la propagation de l'aléa sismique depuis le substratum rocheux jusqu'au niveau des radiers des ouvrages à travers le sol renforcé ;
2) le calcul des efforts maximaux transmis au sol par les ouvrages en cas de séisme ;
3) la vérification de la capacité portante du sol renforcé et du dimensionnement des inclusions rigides.

<u>Étape 1 : propagation de l'aléa à travers le sol renforcé</u>

Le calcul de la propagation du mouvement sismique à travers le sol renforcé a pour objectif d'évaluer, au niveau des radiers des ouvrages et en surface du sol, le mouvement sismique de référence ou de niveau extrême, de calculer les efforts d'interaction cinématique[17], et d'évaluer le niveau de distorsion maximal des couches de sol traversées pour en déduire des propriétés linéaires équivalentes susceptibles d'alimenter un modèle numérique de l'interaction sol-structure fondé sur une hypothèse de linéarité.

[15] Les raideurs de sol désignent la résistance qu'oppose un sol au tassement sous l'effet d'une charge ou d'une fondation.

[16] Dans le modèle numérique tridimensionnel d'EDF, les renforcements de sols et le sol sous chaque ouvrage ne sont pas modélisés de manière explicite, mais sont pris en compte par le biais de blocs monolithiques présentant des propriétés mécaniques équivalentes à celles du sol renforcé.

[17] Les efforts d'interaction cinématique sont ceux induits dans les inclusions rigides par le passage de l'onde sismique.

La Direction technique constate que les hypothèses simplificatrices retenues par EDF ne permettent de tenir compte ni des effets locaux aux limites des zones de sols renforcés, ni des interactions entre systèmes de renforcement différents, au risque d'une sous-estimation des efforts dans les inclusions rigides, notamment celles en périphérie des zones de sols renforcés, et d'une mauvaise évaluation du mouvement sismique au niveau des radiers des ouvrages. En fin d'expertise, EDF s'est engagé à réaliser en 2027 deux études de sensibilité, l'une permettant de caractériser l'influence de l'hypothèse consistant à considérer la zone de sol renforcée comme infinie sur la propagation du signal sismique en surface, l'autre pour identifier d'éventuels effets en limite de zone renforcée susceptibles de modifier les efforts cinématiques dans les inclusions rigides. **La Direction technique considère ces engagements comme satisfaisants.**

S'agissant des méthodes de calcul retenues à cette étape, la Direction technique estime que, dans le cas de Gravelines, l'étude de la propagation du mouvement sismique vers la surface nécessite que les résultats d'un calcul par la méthode dite « linéaire équivalente » soient appréciés avec prudence compte tenu des limitations de cette méthode et de la présence des renforcements, et soient corroborés par des calculs non linéaires. En effet, par ses propres études, la Direction technique a mis en évidence que la méthode de calcul adoptée par EDF pouvait sous-estimer le contenu moyenne et haute fréquences des spectres sismiques établis en surface, par rapport à une méthode non-linéaire. Par ailleurs, le comportement très spécifique de la couche de transition N2-N3 (et dans une moindre mesure la partie supérieure de la couche N3), dont les propriétés pourraient se dégrader rapidement pendant la durée du séisme du fait de l'accumulation de pression interstitielle[18], ne peut être simulé correctement que par un calcul en contrainte effective avec prise en compte de ces effets pendant le séisme, ou par une approche équivalente.

En conséquence, la Direction technique estime qu'il appartient à EDF de consolider son évaluation du mouvement sismique au niveau du radier des ouvrages par un calcul dynamique non-linéaire transitoire. Il conviendrait également qu'EDF évalue l'effet de l'accumulation de pression interstitielle dans les sols lâches contractants sur la propagation du mouvement sismique et sur les efforts cinématiques dans les inclusions rigides.

Pour ce qui concerne la prise en compte de la variabilité de la stratigraphie du sol ainsi que des incertitudes sur les caractéristiques mécaniques du sol et des inclusions rigides, EDF adopte une approche de propagation d'incertitudes qui conduit à calculer, au niveau des radiers, un faisceau de spectres d'amplitude variable dont EDF retient le spectre médian. Eu égard à la dispersion des résultats de ces calculs, **la Direction technique estime que le choix d'EDF de retenir une valeur médiane ne constitue pas une approche assez prudente.**

***In fine*, à l'issue des études de propagation des mouvements sismiques dans le sol naturel ou renforcé, EDF devra s'assurer que le spectre de dimensionnement utilisé pour le dimensionnement des ouvrages de génie civil et des équipements couvre raisonnablement le spectre de réponse qui sera retenu pour intégrer les effets de la variabilité du sol et des incertitudes liées aux caractéristiques des inclusions. En outre, il conviendra qu'EDF s'assure que le dimensionnement du système de renforcement (sol et inclusions) présente des marges pour couvrir ces mêmes effets.**

Étape 2 : calculs des efforts transmis au sol par les ouvrages en cas de séisme

Cette étape consiste à calculer les efforts transmis au sol par les ouvrages en cas de séisme, par le biais d'un calcul de leur réponse sismique incluant la prise en compte de l'interaction entre le sol renforcé et les ouvrages.

Pour cette étape, EDF envisage de mettre en œuvre une approche qui repose sur l'hypothèse que le comportement du sol renforcé peut être assimilé à celui d'un milieu linéaire équivalent, moyennant la prise en compte des caractéristiques mécaniques dégradées du sol. Si son approche est satisfaisante dans son principe, une appréciation définitive ne pourra toutefois être portée qu'une fois les calculs disponibles, et les fréquences des modes propres associés à l'interaction entre le sol et l'ouvrage connues et positionnées sur le spectre de

[18] La pression interstitielle désigne la pression exercée par l'eau contenue dans les pores ou les interstices d'un matériau poreux comme un sol, une roche ou du béton.

réponse. En fin d'expertise, EDF s'est engagé à s'assurer que les caractéristiques mécaniques de sol retenues pour le calcul des ouvrages encadrent les profils issus des calculs de propagation du mouvement sismique. **La Direction technique considère cet engagement comme satisfaisant.**

Par ailleurs, la Direction technique relève que seuls les renforcements de sol situés au droit d'un ouvrage sont pris en compte dans les calculs d'interaction sol-structure, ce qui suppose que la présence de renforcements de sol en dehors de son emprise n'a pas d'influence sur son comportement sismique. Pour la Direction technique, la validité de cette hypothèse reste à apporter. À cet égard, EDF s'est engagé à réaliser en 2027, sur la base d'un cas test, une étude de sensibilité visant à apprécier l'influence des inclusions rigides situées sous les ouvrages voisins. **La Direction technique considère cet engagement comme satisfaisant.**

Enfin, la Direction technique relève qu'à cette étape EDF adopte une hypothèse prudente consistant à négliger l'enfoncement des bâtiments, **ce qui est satisfaisant**.

Étape 3 : vérification de la capacité portante du sol renforcé

Cette étape consiste à vérifier la capacité portante du sol renforcé et du dimensionnement des inclusions rigides. Il s'agit d'une approche consistant à appliquer, en sus des efforts statiques, les efforts calculés à l'étape 2 sur un modèle aux éléments finis du sol renforcé incluant les inclusions rigides, dans lequel le sol, la PTC et les inclusions sont supposés avoir un comportement élasto-plastique parfait. EDF calcule ainsi les efforts induits dans les inclusions rigides qu'il est convenu d'appeler les efforts d'interaction inertielle. Ceux-ci sont ensuite cumulés aux efforts d'interaction cinématiques pour dimensionner le ferraillage nécessaire pour assurer la résistance des inclusions rigides. Par ailleurs, EDF vérifie qu'aucun mécanisme de ruine pouvant induire une instabilité du système sol/inclusion rigide n'est susceptible de se produire dans le sol.

La robustesse de l'approche, purement numérique, retenue par EDF repose sur la capacité du modèle à reproduire le comportement du sol et de la PTC sous séisme, leur interaction avec les inclusions rigides, et les éventuels désordres associés. Au regard de cet objectif, la Direction technique a estimé que le caractère réaliste ou conservatif des hypothèses très simplifiées retenues par EDF, notamment pour modéliser le comportement du sol et de la PTC, n'était pas acquis.

À cet égard, EDF s'est engagé en fin d'expertise à prendre en compte, à l'issue de la campagne de reconnaissances de sol complémentaires, la présence d'éventuelles couches de sol de faibles caractéristiques mécaniques dans l'évaluation de la capacité portante. Toutefois, l'engagement d'EDF n'est pas suffisant pour répondre à l'ensemble des interrogations de la Direction technique. Ainsi**, il appartiendra à EDF de s'assurer du conservatisme de sa méthode pour vérifier la capacité portante sismique du sol renforcé en regard des incertitudes relatives :**

- **à la calibration du modèle linéaire équivalent utilisé pour calculer la descente de charge à travers le sol renforcé ;**
- **aux contraintes maximales qui peuvent être supportées par le sol et la PTC compte tenu de leur dégradation éventuelle sous sollicitation cyclique, qu'elle soit associée ou non à une accumulation de pressions interstitielles.**

Il conviendra également de prendre en considération les effets des pressions interstitielles accumulées dans les couches de sol lâches sur la descente de charge.

En outre, la Direction technique a noté qu'EDF ne prévoyait pas à ce stade d'évaluer les déformations du sol renforcé en cas de séisme. La Direction technique estime que, si le niveau de sollicitation le justifie, une évaluation des tassements, notamment les tassements différentiels affectant la PTC, est nécessaire pour s'assurer qu'ils restent compatibles avec le comportement attendu de celle-ci. De plus, ces tassements doivent être pris en compte dans le dimensionnement des ouvrages. À cet égard, EDF s'est engagé à réaliser en 2027 un cas test visant à évaluer les déplacements sismo-induits, sous SMS, sur une configuration correspondant à un ouvrage des EPR2 du site de Gravelines sur inclusions rigides, via un calcul non linéaire transitoire. **Cet engagement est satisfaisant dans son principe. Les tassements sismo-induits ainsi évalués devront être pris en compte, si nécessaire, pour le dimensionnement des ouvrages.**

3.4. LE SUIVI DU COMPORTEMENT DU SYSTÈME DE RENFORCEMENT

La durabilité des structures enterrées est un enjeu majeur au regard de la durée de fonctionnement retenue à la conception des futurs réacteurs EPR2 ; il est donc nécessaire de s'assurer que les renforcements du sol conservent leurs propriétés mécaniques et fonctionnelles tout au long de l'exploitation de ces réacteurs, d'autant plus qu'ils seront inaccessibles, rendant leur surveillance difficile et leur réparabilité inexistante.

Pour justifier du bon comportement du système de renforcement du sol pendant toute la durée d'exploitation des réacteurs, afin de garantir le respect des exigences de sûreté des SSCs classés de sûreté qu'il supporte, EDF indique s'appuyer sur une conception robuste, des techniques de construction éprouvées au regard du retour d'expérience disponible, des dispositions particulières visant à assurer une maîtrise de la durabilité des matériaux et une auscultation lors des phases de chantier et d'exploitation.

La Direction technique considère que le projet de renforcement de sol du site des futurs réacteurs EPR2 de Gravelines est le premier de ce genre, eu égard au volume de sol renforcé, au nombre de renforcements, aux exigences de comportement que doivent satisfaire les ouvrages supportés et à l'absence d'état de l'art disponible vis-à-vis du risque sismique. Dans ce contexte, la réalisation et le contrôle des renforcements méritent une attention particulière. En fin d'expertise, EDF s'est engagé à présenter, avant le démarrage des travaux, le processus détaillé de réalisation et de contrôle des renforcements, ainsi que l'adéquation des hypothèses de calcul avec les méthodes d'exécution et le phasage des travaux du système de renforcement de sol. **La Direction technique considère cet engagement comme satisfaisant.**

S'agissant des dispositions de suivi du comportement du système de renforcement de sol, EDF a apporté pendant l'expertise des éléments complémentaires sur les techniques de construction et les contrôles qui seront réalisés lors des travaux et en exploitation. Néanmoins, à ce stade, eu égard à la maturité du projet, ces éléments ne permettent pas de garantir le maintien des propriétés mécaniques et fonctionnelles du système de renforcement de sol tout au long de la durée d'exploitation des réacteurs EPR2.

En fin d'expertise, EDF s'est engagé à transmettre, avant le début des travaux, le programme de surveillance global pour s'assurer du comportement des sols et du renforcement du sol depuis la conception et la construction des renforcements et des ouvrages, et ce pendant toute la durée d'exploitation des réacteurs. EDF a d'ores et déjà mentionné certains éléments, notamment l'installation de capteurs permettant de suivre les déformations du sol et la pression interstitielle dans les différentes couches de sol dès le début des travaux de terrassement. Par ailleurs, durant la phase de rabattement de la nappe phréatique, un dispositif de suivi piézométrique sera spécifiquement mis en place pour surveiller son rabattement, en particulier dans la formation N3. Enfin pour EDF, l'instrumentation envisagée permettra de mesurer les déplacements et déformations des éléments constitutifs des renforcements de sol et du sol environnant. **La Direction technique considère que les éléments fournis par EDF sont satisfaisants dans leur principe. Il est attendu qu'à chaque paramètre mesuré soient associés des critères techniques à ne pas dépasser pendant chaque phase de construction et d'exploitation des réacteurs EPR2 du site de Gravelines.**

4. CONCLUSION

La conjonction de caractéristiques de sol en place médiocres et du poids des ouvrages prévus par le projet EPR2 et sa plateforme a conduit EDF à concevoir un renforcement spécifique du sol de fondation des ouvrages vis-à-vis des tassements et des risques de liquéfaction. La solution initiale de renforcement proposée par EDF était d'une grande complexité et sans retour d'expérience représentatif en France et à l'international. Une nouvelle solution de renforcement, plus simple, a été proposée par EDF. Elle reste toutefois inédite du fait de son ampleur et de ses exigences particulières. Parmi les exigences à considérer, outre celles liées aux tassements sous poids propre, celles liées au risque sismique nécessitent des analyses complexes pour établir la justification de la solution de renforcement retenue. Ces analyses, compte tenu des effets de site particuliers attendus pour le site de Gravelines et les caractéristiques géotechniques du sol existant, imposent en particulier de caractériser le mouvement sismique au substratum.

Pour déterminer le mouvement sismique au substratum, EDF a défini l'aléa sismique conformément aux préconisations de la RFS 2001-01. Il conviendra néanmoins, pour évaluer l'effet de site sur Gravelines, qu'EDF vérifie que ses hypothèses couvrent raisonnablement l'impact associé à l'évolution des connaissances acquises depuis la parution de cette RFS.

EDF a engagé un programme de reconnaissance de sol de grande ampleur sur le site accueillant les futurs réacteurs EPR2. Les reconnaissances menées et prévues par EDF apparaissent suffisantes à ce stade du projet pour caractériser les terrains au droit des futurs réacteurs EPR2. Elles ont en particulier déjà permis de présenter un état détaillé de la connaissance des terrains, synthétisé dans des modèles géologique et géotechnique, ce qui est satisfaisant. De plus, la substitution des formations du sol dont les caractéristiques sont médiocres permet d'écarter le risque de liquéfaction.

La nouvelle solution de renforcement proposée est plus conventionnelle que celle expertisée en 2025, mais elle reste exceptionnelle en termes de réalisation et de justifications nécessaires à la démonstration de sûreté. Cette nouvelle solution est, dans son principe, plus « maîtrisable » que la précédente. **Sur la base des éléments transmis par EDF, il n'est pas identifié à ce stade des études de point rédhibitoire s'opposant à la poursuite de la définition du système de renforcement.**

Cependant, la Direction technique souligne que les éléments de justification apportés à ce stade d'avancement du projet du système de renforcement de sol ne présentent pas la maturité suffisante pour permettre à la Direction technique de se prononcer de façon définitive sur la robustesse de sa conception et de son dimensionnement. En effet, l'expertise réalisée fait apparaître le besoin d'importants compléments à apporter dans le cadre des études de détails pour justifier le caractère suffisant de la solution de renforcement de sol. Le présent avis identifie les principaux sujets nécessitant des approfondissements ou des études de sensibilité pour parvenir à cet objectif. À cet égard, la Direction technique souligne le nombre important d'engagements pris par EDF pour consolider son projet. Il reste cependant de nombreux points ouverts dont notamment la démonstration du respect des objectifs de performance attribué aux renforcements, qui ne pourra être appréciée qu'à la lumière des résultats des études de détails. En premier lieu, **à l'issue des études de propagation des mouvements sismiques dans le sol naturel ou renforcé, EDF devra s'assurer que le spectre de dimensionnement utilisé pour le dimensionnement des ouvrages de génie civil et des équipements couvre raisonnablement le spectre de réponse qui sera retenu pour intégrer les effets de la variabilité du sol et des incertitudes liées aux caractéristiques des inclusions.**

À ce stade d'avancement du projet, il apparaît nécessaire qu'EDF précise à court terme le contenu de ses études de détails et leur méthodologie, ainsi que leur planning de production en regard de celui des études de détails des ouvrages. Les études de détails pour la solution de renforcement de sol intégrant notamment les points d'attention identifiés au cours de l'expertise devront être apportées dans des délais permettant leur instruction et compatibles avec les jalons d'irréversibilité du projet EPR2 Gravelines.

Le Directeur technique

Signature
numérique de
Sylvain LAVARENNE
Date : 2026.10.30
17:56:58 +01'00'

Sylvain LAVARENNE