ASNR Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Direction des réacteurs de puissance

Référence courrier : CODEP-REP-2026-065996

EDF/DPPI/DP EPR2
Madame la Directrice du palier EPR2
22 - 30 avenue de Wagram
75382 Paris Cedex

Montrouge, le 19 novembre 2026

Objet : Solution de renforcement du sol pour les réacteurs EPR2 en projet sur le site de Gravelines

Références : [1] Courrier de l'ASNR référencé CODEP-DCN-2025-057827 du 14 octobre 2025
[2] Recueil des règles de conception et réalisation pour le génie civil des centrales nucléaires à eau sous pression (RCC-CW) – Association française pour les règles de conception et de construction des matériels des chaudières électronucléaires (AFCEN) – édition 2018
[3] Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondations par inclusions rigides – Projet national ASIRI (Amélioration des Sols par Inclusions Rigides), 2012
[4] Norme n° NF P 94-262 de juillet 2012. Justification des ouvrages géotechniques – Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 – Fondations profondes

Madame la Directrice,

EDF a le projet d'implanter deux réacteurs EPR2 sur le site de Gravelines. Ce site est caractérisé par un sol meuble sur une forte épaisseur. Cette particularité géologique, combinée à la masse importante des réacteurs EPR2, nécessite de mettre en place une solution de renforcement du sol afin de limiter les tassements statiques et de se prémunir du risque de liquéfaction[1]. En 2024, EDF a présenté à l'Autorité de sûreté nucléaire une solution de renforcement consistant notamment à mettre en place une combinaison de casiers de soil-mixing[2] et d'inclusions rigides[3] sous les ouvrages les plus lourds. Par le courrier en référence [1], je vous avais fait part des éléments que, à l'issue de l'examen de cette solution, l'ASNR considérait comme nécessaires pour démontrer l'acceptabilité d'une solution de renforcement du sol.

Fin 2025, EDF a informé l'ASNR qu'elle envisageait une nouvelle solution de renforcement du sol pour les réacteurs EPR2 de Gravelines, dont elle lui a présenté les principes en mars 2026. Ces principes consistent en :

- l'excavation de la première couche du sol sous le bloc usine[4] des futurs réacteurs EPR2, puis sa substitution par des remblais ;
- la mise en place, pour la majorité des ouvrages du bloc usine, d'inclusions rigides sous ces remblais. Le remblai granulaire situé sous l'emprise des ouvrages lourds et légers constitue la plateforme de transfert de charge entre la sous-face des radiers et la tête des inclusions rigides.

L'ASNR a examiné les principes de cette nouvelle solution. Elle considère que la suppression des casiers de soil-mixing et le recours à un système associant substitution des terrains superficiels, inclusions rigides et plateforme de transfert de charge constituent une simplification notable. **Elle n'a pas identifié d'obstacle a priori à la**

[1] La liquéfaction du sol est un phénomène, généralement brutal et temporaire, par lequel, lors d'un séisme, un sol saturé en eau perd de sa portance, causant ainsi l'enfoncement, le basculement ou l'effondrement des constructions. Les formations susceptibles d'être affectées par le phénomène de liquéfaction sont les sables, les limons et les vases.
[2] Le soil-mixing regroupe un ensemble de techniques dont le point commun est de mélanger mécaniquement le sol avec un liant hydraulique tel qu'un coulis de ciment.
[3] Les inclusions rigides sont des colonnes verticales en béton armé réalisées dans un sol compressible ou médiocre permettant de transférer, en profondeur, les charges induites par les ouvrages vers des couches d'assise plus résistantes.
[4] 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 figurent pas dans le bloc usine.

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

poursuite de la définition de cette nouvelle solution, mais souligne que la démonstration de ses performances reste à apporter par des études détaillées.

Les conclusions de l'examen mené par l'ASNR sont précisées ci-après, au regard des trois attentes qu'elle avait exprimées dans son courrier en référence [1].

La première de ces attentes portait sur la définition d'exigences de performance pour la solution de renforcement du sol vis-à-vis des sollicitations statiques et dynamiques. En réponse à cette attente, EDF a identifié comme objectifs d'assurer la capacité portante en situations statique et sismique, d'exclure le risque de liquéfaction en cas de séisme et de réduire et maîtriser les tassements sous les ouvrages pendant toute la durée d'exploitation des réacteurs EPR2 et lors des phases de mise en œuvre de la solution de renforcement. **Ces objectifs sont satisfaisants.**

La deuxième attente exprimée par l'ASNR portait sur la démonstration du respect des exigences de performance. L'ASNR attend une démonstration robuste, intégrant des conservatismes suffisants et prenant en compte l'hétérogénéité des ouvrages et des renforcements, leurs singularités et les interactions entre renforcements voisins. À cet égard, EDF a présenté des éléments de principe et des méthodes, illustrés par des calculs préliminaires. La déclinaison de ces principes et méthodes devra conduire à une **démonstration qui devra être présentée dans un dossier d'études détaillées justifiant la conception de la solution de renforcement dans toutes les configurations et situations envisagées.** Les principaux résultats de l'instruction des premiers éléments de démonstration apportés par EDF et les demandes qui en découlent sont présentés au paragraphe *b* de l'annexe au présent courrier. **Les compléments attendus sont conséquents, les études actuelles n'étant que préliminaires.**

La troisième attente exprimée par l'ASNR portait sur les dispositions de conception et de construction de la solution de renforcement du sol et sur le suivi de son comportement tout au long de l'exploitation des réacteurs. À ce sujet, EDF a présenté à l'ASNR les techniques de construction envisagées et les contrôles prévus lors des travaux et pendant la phase d'exploitation, en précisant notamment l'instrumentation envisagée pour assurer le suivi du comportement de la solution de renforcement du sol. **Les principes de ces dispositions sont satisfaisants, mais doivent être complétés conformément aux engagements pris par EDF**, qui sont rappelés au paragraphe *c* de l'annexe au présent courrier.

Compte tenu des éléments ci-dessus, il est nécessaire qu'**EDF poursuive ses études de conception détaillées de la solution de renforcement du sol puis les transmette à l'ASNR dans un calendrier qui permette à cette dernière de mener à bien leur instruction avant l'enclenchement des étapes de construction qui rendraient difficile une modification de cette solution.**

Aussi, **je vous demande de me communiquer, avant fin janvier 2027, le programme consolidé des études de conception de cette solution intégrant les réponses aux demandes formulées en annexe au présent courrier et accompagné d'un calendrier détaillé.** Ce programme et ce calendrier devront comprendre, au minimum, la liste et les objectifs des études restant à réaliser, les méthodes utilisées, l'état d'avancement de ces études et les dates de transmission des documents associés.

Je vous prie d'agréer, Madame la Directrice, l'assurance de ma considération distinguée.

Le directeur général adjoint

Julien COLLET

a. Caractérisation géologique et géotechnique du sol existant

Les modèles géologique et géotechnique présentés par EDF comprennent, depuis la surface : des remblais, des sables et argiles du Quaternaire (formations N1, N2, couche de transition, formation N3), puis des formations plus anciennes (argiles des Flandres, sables d'Ostricourt, argile de Louvil). Ces modèles se fondent sur des données acquises récemment dans le périmètre du bloc usine des futurs réacteurs EPR2 et sur de précédentes campagnes menées sur le site de Gravelines. EDF a en outre prévu des reconnaissances complémentaires visant en particulier à mieux préciser les caractéristiques de la formation N3, qui peut présenter, dans sa partie supérieure, des niveaux discontinus de plus faible résistance que dans sa partie inférieure. L'ASNR considère que les reconnaissances réalisées et les compléments programmés sont satisfaisants.

L'ASNR note qu'après substitution des remblais et de la formation N1, le risque de liquéfaction est limité à la base de la couche de transition et à la partie supérieure de la formation N3. EDF s'est engagée à mettre à jour l'évaluation du risque de liquéfaction à l'issue des reconnaissances complémentaires, ce qui est satisfaisant.

b. Comportement de la solution de renforcement du sol

Référentiel de conception et validation des modèles

Le référentiel de conception utilisé par EDF pour la conception des renforcements de sol s'appuie sur le code RCC-CW [2], sur le guide ASIRI [3], sur les travaux en cours du programme ASIRI+[5], sur la norme française relative aux fondations profondes [4] et sur l'avis d'experts indépendants. Ce référentiel définit les méthodes et les critères de dimensionnement à respecter pour la conception de la solution de renforcement du sol.

EDF s'est engagée à procéder à l'analyse, dès leur publication, *« des recommandations ASIRI+ applicables au projet de renforcement de sol de Gravelines. Si celles-ci n'étaient pas déjà couvertes par le référentiel EDF, EDF vise à intégrer ces recommandations dans les études et les réalisations du projet chaque fois que leur échéance de publication et leur contenu le permettent, au regard de l'avancement des études et des travaux »*. L'ASNR observe que la date de publication des recommandations ASIRI+ n'est pas connue. Aussi, elle considère que le référentiel d'EDF doit être complété, notamment en ce qui concerne la prise en compte des singularités et des sollicitations sismiques (voir ci-après).

La démarche de dimensionnement de la solution de renforcement du sol mise en œuvre par EDF repose sur des modèles numériques progressivement affinés, alimentés et calibrés par les résultats des essais de chargement sur inclusions rigides réalisés en vraie grandeur sur le site de Gravelines, par les modèles géologique et géotechnique et par l'analyse des tassements du sol sur lequel sont implantés les six réacteurs de 900 MWe en fonctionnement du site de Gravelines. L'un des essais de chargement sur inclusions rigides réalisés en 2025 n'avait pas été concluant. EDF s'est engagée à le renouveler, lors de la campagne prévue début 2027, et à transmettre la synthèse de cette campagne à l'ASNR à l'échéance de septembre 2027. Cet engagement est satisfaisant.

L'ASNR note que la démarche d'EDF repose en grande partie sur des simulations numériques. Aussi, elle considère que la validité de ces simulations doit être confirmée. À cet égard, EDF s'est engagée à transmettre, en 2027, *« un livrable compilant les éléments qui étayent la validité des modélisations numériques servant aux dimensionnements du sol renforcé de l'EPR2 Gravelines »*.

Demande nº 1 : Je vous demande d'intégrer au livrable à venir sur la validité des modélisations numériques des justifications portant sur le caractère transposable des résultats expérimentaux disponibles, sur la calibration et la validation des modèles sous sollicitations sismiques et sur la prise en compte des incertitudes, en particulier celles associées aux méthodes de calcul retenues.

[5] Le programme de recherche du projet national ASIRI+ a été élaboré autour de trois axes principaux : l'étude des plateformes de transfert de charge, le comportement des ouvrages sous sollicitations quasi-statiques ou inclinées et le comportement des ouvrages sous sollicitations dynamiques et sismiques. EDF est partenaire de ce programme de recherche. Les recommandations du projet ASIRI+ n'ont pas encore été publiées.

Configurations singulières

EDF a uniquement étudié les zones courantes sous les ouvrages. Cependant, il existe des singularités sous les différents ouvrages, dont certaines peuvent réduire l'épaisseur de la plateforme de transfert de charge ou modifier la profondeur des têtes d'inclusions. EDF a indiqué que les renforcements au niveau des zones singulières seraient étudiés avec une attention particulière dans les études détaillées. **L'ASNR considère que l'étude des singularités est nécessaire à la justification de la solution de renforcement du sol.**

Comportement statique

Le dimensionnement des renforcements de sol et celui des ouvrages doit tenir compte d'une évaluation précise des tassements. L'ASNR considère que, dans les études détaillées à venir, une attention particulière devra être portée sur la cohérence entre les résultats issus des études de tassement qui valident la solution de renforcement et les hypothèses d'interaction sol/structure et de raideurs retenues 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.

Comportement dynamique sous sollicitations sismiques

La méthodologie de dimensionnement des renforcements de sol mise en œuvre par EDF comprend trois étapes :

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

Propagation de l'aléa sismique à travers le sol renforcé

L'étape de propagation de l'aléa sismique à travers le sol renforcé a pour objectif d'évaluer le mouvement sismique de référence ou de niveau extrême au niveau du radier des ouvrages, de calculer les efforts d'interaction cinématique[6] 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.

L'ASNR observe que les hypothèses retenues par EDF ne prennent pas en compte les effets aux limites des zones renforcées et les interactions entre systèmes de renforcement différents. EDF s'est engagée à réaliser deux études de sensibilités en 2027 : l'une *« permettant de caractériser l'influence de l'hypothèse retenue de renforcements à l'infini sur la propagation du signal sismique en surface »*, l'autre *« pour identifier d'éventuels effets de bord susceptibles de modifier les efforts cinématiques sur des inclusions rigides flottantes »*. L'ASNR considère que ces engagements sont satisfaisants.

Par ailleurs, l'ASNR remarque que la méthode linéaire équivalente qu'EDF prévoit d'utiliser pour étudier la propagation du mouvement sismique à travers le sol renforcé présente des limitations. Cette méthode peut notamment sous-estimer le contenu des spectres sismiques établis en surface, aux moyennes et hautes fréquences, par rapport à une méthode non-linéaire. En outre, cette méthode linéaire équivalente ne permet pas de simuler le comportement spécifique des sols lâches de la couche de transition N2-N3 et de 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[7].

Demande n° 2 : Je vous demande de consolider votre évaluation du mouvement sismique au niveau du radier des ouvrages et des efforts cinématiques dans les inclusions rigides par un calcul dynamique non-linéaire transitoire, en prenant notamment en considération le comportement spécifique de la couche de transition N2-N3 et de la partie supérieure de la couche N3.

Calculs des efforts transmis au sol par les ouvrages en cas de séisme

Les efforts transmis au sol sont calculés à l'aide d'une analyse de la réponse sismique des ouvrages intégrant l'interaction sol-structure. L'approche qu'EDF prévoit d'utiliser consiste à assimiler le comportement du sol renforcé à un milieu linéaire équivalent, moyennant la prise en compte des caractéristiques mécaniques dégradées du sol. EDF s'est engagée à s'assurer, en 2027, que *« les profils des modules de cisaillement des hypothèses de sol*

[6] Les efforts d'interaction cinématique sont ceux induits dans les inclusions rigides par le passage de l'onde sismique.
[7] 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.

retenues pour les calculs des ouvrages (moyenne, minorée et majorée) encadrent les profils issus des calculs de propagation considérant la variabilité des caractéristiques du sol », ce qui est satisfaisant.

L'ASNR note que les calculs d'interaction sol-structure ne prennent en compte que les renforcements situés sous l'emprise de l'ouvrage étudié. L'absence d'influence des renforcements voisins sur sa réponse sismique reste à justifier. EDF s'est engagée à réaliser en 2027, *« sur la base d'un cas test, […] une étude de sensibilité sur l'influence des inclusions rigides situées sous les ouvrages voisins sur les impédances et l'amortissement radiatif, aux fréquences propres des ouvrages, visant à conforter les hypothèses de modélisations et d'élargissement des modules de cisaillement présentés [lors de l'instruction] »*. Cet engagement est satisfaisant.

Vérification de la capacité portante du sol renforcé et du dimensionnement des inclusions rigides

Pour vérifier la capacité portante du sol renforcé et le dimensionnement des inclusions rigides, EDF prévoit d'utiliser une approche consistant à appliquer les efforts statiques et les efforts transmis au sol par les ouvrages en cas de séisme à un modèle aux éléments finis du sol renforcé dans lequel le sol, la plateforme de transfert de charge et les inclusions rigides sont supposés avoir un comportement élasto-plastique parfait. Les efforts induits calculés dans les inclusions, dits *« efforts d'interaction inertielle »*, sont cumulés aux efforts d'interaction cinématique pour dimensionner le ferraillage des inclusions rigides. En outre, EDF vérifie l'absence de mécanisme de ruine susceptible d'engendrer une instabilité du système sol-inclusion rigide. La robustesse de cette approche dépend de sa capacité à représenter fidèlement les comportements du sol et de la plateforme de transfert de charge sous séisme, leur interaction avec les inclusions rigides et les éventuels désordres associés. À ce sujet, EDF s'est engagée à prendre en compte, « *à l'issue de la campagne d'essais complémentaires, le cas échéant, la présence d'éventuelles passées lâches[8] dans l'évaluation de la capacité portante »*. En l'absence d'étude de sensibilité, cet engagement ne permet pas de répondre à toutes les interrogations de l'ASNR.

Demande n° 3 : Je vous demande de justifier le conservatisme de la méthode envisagée pour vérifier la capacité portante sismique du sol renforcé au 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 admissibles par le sol et par la plateforme de transfert de charge compte tenu de leur dégradation éventuelle sous sollicitation cyclique, avec ou sans accumulation de pressions interstitielles.**

Vous considérerez également les effets des pressions interstitielles accumulées dans les couches de sol lâches sur la descente de charge.

L'ASNR note qu'EDF s'est engagée à évaluer, à l'échéance du premier trimestre 2027, *« les tassements sismo-induits de la transition N2-N3 associés aux montées de pressions interstitielles, même si la transition n'est pas sensible au risque de liquéfaction »* et à réaliser, en 2027, *« un cas test […] visant à évaluer les déplacements sismo-induits, sous séisme majoré de sécurité[9], sur une configuration correspondant à un ouvrage de l'EPR2 de Gravelines sur inclusions rigides, via un calcul non linéaire transitoire »*. Cet engagement est satisfaisant.

Dimensionnement des ouvrages, des équipements et de la solution de renforcement du sol

Dans sa méthodologie visant à établir les mouvements sismiques au niveau des radiers des ouvrages, EDF prend en compte la variabilité de la stratigraphie ainsi que les incertitudes relatives aux propriétés mécaniques du sol et des inclusions rigides. EDF établit ainsi un faisceau de spectres, dont elle retient le spectre médian. Au regard de la dispersion des résultats, l'ASNR considère que ce choix n'est pas suffisamment prudent.

Par ailleurs, l'ASNR remarque que la loi de prédiction utilisée par EDF pour déterminer le mouvement sismique au substratum rocheux est définie à partir d'un nombre limité de données et ne prend pas en compte l'évolution des connaissances, notamment en termes de loi de prédiction du mouvement sismique. En l'absence d'étude de sensibilité, l'incidence de la prise en compte des connaissances actualisées sur le mouvement sismique ainsi défini ne peut être appréciée.

Demande n° 4 : Je vous demande de vérifier que le dimensionnement des ouvrages de génie civil, des équipements et de la solution de renforcement du sol couvre raisonnablement l'évolution des connaissances en matière de prédiction du mouvement sismique. De plus, le dimensionnement des

[8] Des « passées lâches » désignent en géologie des niveaux, des couches ou des intercalations de sols ou de roches tendres, meubles ou peu compactées situés au milieu de formations plus compactes, dures ou cohérentes.
[9] Le séisme majoré de sécurité (SMS) représente le niveau de référence de l'agression séisme.

ouvrages et des équipements devra couvrir raisonnablement la variabilité de la stratigraphie et les incertitudes sur les propriétés mécaniques du sol et des inclusions rigides.

c. Dispositions de conception et de construction et suivi du comportement de la solution de renforcement du sol

EDF s'est engagée 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 »*. L'ASNR considère que cet engagement est satisfaisant. Ces éléments devront permettre de vérifier que les conditions de réalisation de la solution de renforcement sont cohérentes avec les hypothèses utilisées pour justifier son comportement et permettent d'atteindre les performances attendues.

EDF s'est également engagée à transmettre, avant le début des travaux, *« le programme de surveillance global pour s'assurer du comportement des sols et du système de renforcement du sol »*. L'ASNR considère que cet engagement est satisfaisant. EDF a notamment précisé qu'elle prévoyait d'installer, dès le début des travaux de terrassement, des capteurs permettant de suivre les déformations du sol et la pression interstitielle dans les différentes couches de sol. EDF prévoit également de mettre en place un dispositif de suivi piézométrique pour surveiller le rabattement de la nappe phréatique.

L'ASNR note par ailleurs qu'EDF prévoit un suivi régulier des tassements mesurés *in situ*, dès le début des travaux, pendant les phases transitoires, puis en exploitation, afin de conforter leur évaluation par des approches numériques.