

Monsieur le Directeur de la Direction des centrales nucléaires

Fontenay-aux-Roses, le 23 juillet 2025

AVIS D'EXPERTISE N° 2025-00083 DU 23 JUILLET 2025

Objet : EDF – Projet EPR2 – Site de Gravelines – Solutions de renforcement du sol

Référence : Courrier ASNR CODEP-DCN-2025-022013 du 1^{er} avril 2025

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 unités de production EPR2 rendent nécessaire la mise en place d'un renforcement du sol avant toute construction.

Par la saisine citée en référence, la Direction des centrales nucléaires de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR) a demandé l'avis de la Direction de l'expertise en sûreté sur le dossier de solutions de renforcement de sol transmis par EDF dans le cadre du projet EPR2 sur le site de Gravelines, en anticipation d'une demande d'autorisation de création des INB¹ correspondantes.

Conformément à la saisine, les sujets examinés dans le cadre de la présente expertise sont les suivants :

- la démarche mise en œuvre par EDF pour le choix des solutions de renforcement ;
- le comportement statique des solutions de renforcement retenues par EDF ;
- les points de vigilance relatifs aux solutions de renforcement retenues par EDF, et plus particulièrement ceux concernant la justification du comportement de ces renforcements en cas de séisme.

De l'évaluation des documents transmis par EDF, tenant compte des informations apportées au cours de l'expertise, la Direction de l'expertise en sûreté retient les éléments suivants.

1. CONTEXTE

La stratigraphie du site de Gravelines, caractérisé par des terrains fortement compressibles, comprend des couches sableuses flandriennes, une formation épaisse d'argile des Flandres dont la partie supérieure est altérée, surmontant des sables d'Ostricourt, des argiles de Louvil et le substratum crayeux. EDF considère que certaines couches sableuses, la couche de limons de transition ainsi que la partie altérée de l'argile des Flandres possèdent des caractéristiques mécaniques médiocres, ce qui induit des risques de tassements et de déformations sous les charges des futures installations EPR2. En l'absence de traitement du sol, EDF anticipe des tassements importants sous les ouvrages, incompatibles avec l'exploitation des futurs réacteurs, ce qui l'a conduit à envisager un renforcement du sol de grande ampleur sous les ouvrages.

¹ Installation nucléaire de base.

Dans l'attente des résultats des reconnaissances géotechniques, EDF a retenu, pour les premières études du comportement du sol renforcé, l'hypothèse que la stratigraphie et les caractéristiques du sol au droit des futurs EPR2 sont identiques à celles du sol situé sous les ouvrages existants du CNPE² de Gravelines.

2. RENFORCEMENTS ENVISAGÉS

Selon EDF, trois éléments principaux ont conduit au choix des solutions de renforcement du sol retenues sur le site des futurs EPR2 : la faible qualité mécanique des sols sur une profondeur de plus de 150 m, les charges élevées des futurs ouvrages susceptibles d'entraîner un comportement plastique du sol et la nécessité de limiter les tassements à une valeur proche de celle observée sur le site existant.

EDF a consulté plusieurs bureaux d'études qui ont étudié différentes techniques de renforcement du sol. Sur la base de ces études et en s'appuyant sur les avis de plusieurs experts indépendants, EDF retient un système de renforcement de sol associant plusieurs techniques : casiers de Soil-Mixing³ (SM) avec plateforme de transfert des charges (PTC) pour les bâtiments légers, une solution combinée d'Inclusions Rigides⁴ (IR) flottantes disposées au centre de casiers de Soil-Mixing (IRSM) avec plateforme de transfert des charges pour les bâtiments lourds, enfin une solution de remblais traités pour les bâtiments légers dont la sous-face du radier est située au-dessus de la cote de terrassement généralisé.

3. CLASSEMENT EIP ET EXIGENCES DÉFINIES

La conception du système de renforcement de sol retenu à ce stade par EDF est associée à la démonstration de la maîtrise des tassements des ouvrages et de l'absence de risque de liquéfaction⁵ de leur sol d'assise.

Ce système de renforcement est d'une ampleur et d'une complexité qui sortent de la conception habituelle des renforcements de sol mis en œuvre sur le parc nucléaire français, du fait de la conjonction de caractéristiques de sol en place médiocres, des masses importantes apportées par les futures unités des EPR2 et de la présence d'une réhausse de la plateforme d'implantation des ouvrages devant assurer la protection à l'égard de l'inondation.

La défaillance de ce système pourrait induire une remise en cause de la démonstration de sûreté, notamment en cas de déformation non maîtrisée sous chargement statique ou sous séisme. Ainsi, au titre de l'article 2.5.1-1 de l'arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux INB (arrêté INB), **la Direction de l'expertise en sûreté recommande que le système de renforcement de sol du site de Gravelines envisagé pour l'accueil de deux réacteurs de type EPR2 fasse partie de la liste des équipements importants pour la protection et qu'EDF précise les exigences définies qui lui sont associées (cf. la recommandation n° 1 rappelée en annexe au présent avis d'expertise).**

À ce titre, le système de renforcement du sol devra faire l'objet d'une qualification, proportionnée aux enjeux, visant notamment à garantir sa capacité à assurer les fonctions qui lui sont assignées vis-à-vis des sollicitations et des conditions d'ambiance associées aux situations dans lesquelles il est nécessaire. Des dispositions en matière d'études, de construction, d'essais, de contrôle et de maintenance devront permettre d'assurer la pérennité de cette qualification. L'organisation mise en œuvre devra notamment prévoir un traitement adapté des éventuels écarts identifiés lors de la réalisation et du suivi en service. Enfin, il appartiendra à EDF de définir les activités importantes pour la protection (AIP) concernant notamment la conception, la réalisation et la maintenance du système de renforcement du sol tel que requis au titre de l'arrêté INB.

² Centre nucléaire de production d'électricité.

³ 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.

⁴ Dans ce projet, les inclusions rigides sont des barrettes de forme rectangulaire en béton armé.

⁵ La liquéfaction du sol est un phénomène sismique géologique, généralement brutal et temporaire, par lequel un sol saturé en eau perd une partie ou la totalité 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.

4. COMPORTEMENT STATIQUE DES RENFORCEMENTS

EDF fixe une limite de tassement admissible d'environ 30 cm, en s'appuyant sur le retour d'expérience relatif au CNPE de Gravelines. Les critères de dimensionnement des renforcements retenus en conditions statiques sont la limitation de l'impact de l'hétérogénéité des sables flamands, l'absence de poinçonnement de la couche de limons de transition entre les couches sableuses, la maîtrise des tassements différés et un comportement dans le domaine élastique des argiles des Flandres.

L'analyse de faisabilité des renforcements présentée par EDF est réalisée pour le bâtiment le plus sollicité pour chaque solution de renforcement. Le tassement maximal est évalué à 35 cm environ sous les bâtiments de la croix⁶.

La Direction de l'expertise en sûreté constate que le critère de tassement limite statique fixé par EDF à environ 30 cm n'est pas strictement respecté. Néanmoins, elle s'interroge sur la pertinence de la valeur retenue et sur les réels enjeux de sûreté liés à ce critère. Plus globalement, EDF n'a pas précisé les enjeux de sûreté liés au choix des solutions de renforcement, et aucune exigence de sûreté spécifique n'est actuellement attribuée au système de renforcement de sol. **Ceci n'est pas satisfaisant. En conséquence, la Direction de l'expertise en sûreté recommande qu'EDF précise les enjeux de sûreté relatifs au renforcement de sol du site de Gravelines et la participation des renforcements aux fonctions de sûreté assurées par les ouvrages de génie civil, et définisse les exigences de comportement attribuées à ces renforcements du sol ainsi que les critères de justification associés (cf. la recommandation n° 2 rappelée en annexe au présent avis d'expertise).**

À l'issue de la définition des exigences et des critères associés, il conviendra qu'EDF se réinterroge sur la solution de renforcement à retenir.

Concernant la modélisation retenue à ce stade par EDF, les renforcements y sont représentés par un sol homogène équivalent. La Direction de l'expertise en sûreté souligne que cette modélisation ne permet pas d'intégrer l'hétérogénéité des renforcements, les spécificités des jonctions entre bâtiments, ou bien encore les effets de bord. À ce jour, EDF n'a donc pas démontré le caractère conservatif des résultats.

La Direction de l'expertise en sûreté souligne également que l'hypothèse d'une plateforme de répartition des charges homogène en épaisseur ne reflète pas la réalité, puisque le niveau inférieur des fondations des bâtiments de la croix varie selon les ouvrages, entraînant un décalage du niveau supérieur de la plateforme. De plus, la présence des galeries de précontrainte sous les bâtiments de la croix n'est pas prise en compte.

En conclusion, la Direction de l'expertise en sûreté considère que, sans démonstration de l'absence d'impact de ces spécificités sur les résultats obtenus, l'approche retenue par EDF n'est pas suffisamment robuste. **Ceci n'est pas satisfaisant.**

En conséquence, la Direction de l'expertise en sûreté recommande que, pour les prochaines étapes de justification de la solution de renforcement de sol du site de Gravelines, EDF prenne en compte les singularités identifiées ainsi que la complexité du système de fondation, en particulier l'hétérogénéité des renforcements, les effets de bord, les jonctions entre bâtiments et l'influence mutuelle des renforcements des ouvrages voisins (cf. la recommandation n° 3 rappelée en annexe au présent avis d'expertise).

5. POINTS DE VIGILANCE

5.1. ÉTAT DE L'ART ET RETOUR D'EXPÉRIENCE À L'INTERNATIONAL

EDF a mis en avant plusieurs exemples de réalisation de renforcement de sol par inclusions rigides ou par Soil-Mixing.

⁶ Ensemble composé du bâtiment combustible, des 3 bâtiments des auxiliaires de sauvegarde et du bâtiment du réacteur sur un radier commun en forme de croix.

La Direction de l'expertise en sûreté note que les exemples fournis, notamment pour les des réservoirs méthaniers au Koweït ou le pont Rion-Antirion en Grèce, correspondent à des configurations de renforcement différentes de celle envisagée pour les futurs EPR2 du site de Gravelines ne présentant en outre pas les mêmes enjeux de sûreté que le projet EPR2. Aucune de ces réalisations ne met en œuvre simultanément les techniques de SM et d'IR. La plupart des renforcements sont disposés de manière symétrique et ancrés dans le substratum. Les IR ont généralement une forme circulaire et les renforcements sont organisés en grille sous des fondations elles-mêmes circulaires ou symétriques. À l'inverse, le projet EPR2 fait appel à une combinaison de plusieurs techniques : des casiers de SM ancrés dans le sable sont couplés à des IR rectangulaires disposées dans les deux directions horizontales, flottantes dans les argiles et non ancrées en pied.

Les référentiels de conception de renforcements de sol retenus par EDF, à savoir le guide ASIRI⁷, le projet ASIRI+⁸ et le RCC-CW⁹, se limitent au cas des inclusions rigides circulaires uniformément réparties. En outre, à ce stade de l'avancement des travaux du projet ASIRI+, de nombreuses questions soulevées n'ont pas encore trouvé de réponse.

La Direction de l'expertise en sûreté rappelle que le niveau de sûreté exigé pour une INB impose une robustesse éprouvée des méthodes de dimensionnement et de construction, une identification aussi exhaustive que possible des paramètres clés, notamment ceux dont les valeurs ne sont pas accessibles par essais, et une prise en compte de manière étayée des incertitudes. En conséquence, **compte tenu du retour d'expérience limité et des incertitudes liées au caractère innovant de la solution proposée, la Direction de l'expertise en sûreté recommande qu'EDF démontre la robustesse de sa solution de renforcement de sol du site de Gravelines au regard des exigences de sûreté attribuées à cette solution de renforcement (cf. la recommandation n° 4 rappelée en annexe au présent avis d'expertise).**

5.2. CARACTÉRISTIQUES DU SOL CONSIDÉRÉES DANS LES ÉTUDES

EDF considère que le sol situé entre les IR participe au bon fonctionnement du système de renforcement et que ses caractéristiques sont identiques à celles du sol naturel. Eu égard aux travaux de remaniement du sol prévus, la Direction de l'expertise en sûreté considère qu'il est nécessaire d'évaluer les caractéristiques réelles du sol remanié et de les intégrer dans l'analyse du comportement des renforcements. En effet, une mauvaise appréciation de ces paramètres pourrait compromettre la performance et la durabilité du système de renforcement.

En complément des reconnaissances de sol en cours, EDF s'est engagé à réaliser des plots d'essais, pour mieux caractériser le sol renforcé. Les résultats de ces essais seront transmis en octobre 2025. En fonction de ces résultats, EDF évaluera la nécessité de réaliser des investigations géotechniques complémentaires à proximité des renforcements, après leur réalisation. Ceci est satisfaisant.

Toutefois, la Direction de l'expertise en sûreté considère que le sol en place et la réalisation des plots d'essais dans la zone dédiée située à l'ouest du CNPE peuvent différer des sols et des conditions de réalisation qui seront rencontrés sur l'emprise des ouvrages du projet EPR2 située plus à l'est du CNPE. **Ceci conduit la Direction de l'expertise en sûreté à recommander qu'EDF réalise des investigations géotechniques complémentaires pendant et après les travaux de renforcement de sol du site de Gravelines, afin de caractériser précisément les propriétés du sol remanié entre les inclusions et le Soil-Mixing (cf. la recommandation n° 5 rappelée en annexe au présent avis d'expertise).**

Les résultats de ces investigations permettront d'ajuster les hypothèses de calcul aux conditions réelles du site, d'améliorer la fiabilité du dimensionnement des renforcements du sol et de réduire les incertitudes liées aux

⁷ Amélioration des Sols par Inclusions Rigides ; le Projet National ASIRI est né en 2003, à l'initiative du Pôle de Compétence Sols de l'Institut pour la Recherche appliquée et l'Expérimentation en génie civil, avec comme objectifs principaux : améliorer la connaissance des mécanismes complexes d'interaction mis en jeu dans cette technique de renforcement, évaluer les méthodes de dimensionnement existantes à la lumière des acquis expérimentaux, mettre au point et qualifier des méthodes de dimensionnement sous chargements statiques à divers niveaux de complexité.

⁸ Programme de recherche national sur le renforcement des sols par inclusions rigides autour de trois principaux axes : l'étude des plateformes de transfert des charges, le comportement des ouvrages sous sollicitations quasi-statiques et/ou inclinées, le comportement des ouvrages sous sollicitations dynamiques et sismiques.

⁹ Règles de conception et de réalisation pour le génie civil des centrales nucléaires REP, version 2018.

performances du système de renforcement. **Une attention particulière devra être portée à la représentativité des mesures effectuées in-situ.**

La campagne de reconnaissance géotechnique in-situ est menée dans les conditions hydrauliques actuelles du site, en présence de la nappe phréatique. En revanche, les travaux de renforcement seront réalisés dans l'emprise d'une enceinte géotechnique entourant la surface sur laquelle seront érigés les ouvrages et permettant le rabattement de la nappe phréatique durant les travaux. Le relâchement de la nappe n'interviendrait que huit ans plus tard. Cette longue durée a conduit la Direction de l'expertise en sûreté à interroger EDF sur les éventuelles évolutions des caractéristiques mécaniques et hydrogéologiques du sol du fait de ce rabattement prolongé. En réponse, EDF a précisé que les effets dus au rabattement de la nappe sont globalement bénéfiques au regard des tassements et que ces effets ne sont pas valorisés dans les études actuelles. EDF précise également qu'il n'y a pas de REX négatif de la phase de rabattement sur les sols du CNPE existant.

Toutefois, **EDF s'est engagé à estimer et à prendre en compte les efforts engendrés par les variations volumiques des terrains au cours du rabattement et du relâchement de la nappe lors des études de détails, ce qui est satisfaisant.** Il conviendra en outre qu'EDF confirme par des mesures in-situ que le rabattement prolongé de la nappe phréatique suivi d'un relâchement n'induit pas de modification significative des caractéristiques mécaniques du sol.

5.3. PRISE EN COMPTE DES INCERTITUDES DE RÉALISATION

Comme mentionné supra, les référentiels de conception disponibles à ce jour ne couvrent pas toute la complexité de la solution de renforcement IRSM retenue par EDF. La Direction de l'expertise en sûreté considère que, en l'absence de référentiel et de règles de dimensionnement consolidées, il est nécessaire de procéder à une validation de la solution de renforcement retenue sur la base de résultats d'essais réalisés in situ en conditions réelles.

Ainsi, **afin de garantir le respect des critères de conception du projet de renforcement de sol du site de Gravelines, la Direction de l'expertise en sûreté recommande qu'EDF mette en place des dispositions de suivi couvrant l'ensemble des étapes de conception et de construction, depuis les essais préliminaires en laboratoire jusqu'aux contrôles in situ post-réalisation, permettant de s'assurer de l'atteinte des performances requises par le système de renforcement de sol (cf. la recommandation n° 6 rappelée en annexe au présent avis d'expertise).**

5.4. ALÉA SISMIQUE CONSIDÉRÉ POUR LE DIMENSIONNEMENT DES RENFORCEMENTS

EDF précise que le dimensionnement des ouvrages et des équipements soumis aux exigences sismiques s'appuiera sur les spectres de dimensionnement de site (SDD¹⁰). Les renforcements de sol seront quant à eux dimensionnés à partir des effets d'interaction cinématique correspondant au spectre de niveau SMS, défini au substratum puis propagé dans le sol en tenant compte des caractéristiques géotechniques et des effets des renforcements, et en intégrant les efforts exercés par les ouvrages évalués au SDD.

La Direction de l'expertise en sûreté souligne que cette approche, qui n'est pas usuelle, ne retient pas le même niveau de séisme pour la conception des ouvrages (niveau SDD) et pour celle des renforcements de sol (niveau SMS).

Par ailleurs, le séisme extrême, s'il est supérieur au SDD, sera pris en compte pour la justification des ouvrages et des renforcements de sol.

Les aléas sismiques retenus au substratum et en champ libre ainsi que l'évaluation du comportement des renforcements de sol en situation sismique feront l'objet d'expertises dédiées.

¹⁰ Le spectre de dimensionnement (SDD) est le niveau sismique pour lequel EDF dimensionne les bâtiments et équipements de l'îlot nucléaire. Le SDD est l'enveloppe du spectre du séisme majoré de sécurité (SMS). Le SMS est défini en ajoutant conventionnellement 0,5 à la magnitude du séisme maximal historiquement vraisemblable (SMHV). Ce dernier correspond au séisme le plus pénalisant susceptible de se produire sur une durée d'environ 1000 ans, évalué sur la base des séismes historiquement connus.

5.5. COMPORTEMENT DU SOL ET DES RENFORCEMENTS EN SITUATION SISMIQUE

Le site de Gravelines présente des couches de sol potentiellement liquéfiables, ce qui constitue une des problématiques complexes à traiter pour ce projet. Des recherches et essais récents montrent que, malgré la mise en place des casiers de Soil-Mixing qui renforcent et améliorent la résistance globale du sol, le risque de liquéfaction n'est pas totalement écarté. En effet, ils mettent en évidence le fait que le confinement induit par les casiers de SM limite la dissipation des pressions interstitielles, pouvant induire une liquéfaction localisée du sol à l'intérieur des casiers. Aussi, **la Direction de l'expertise en sûreté recommande qu'EDF vérifie, pour son projet de renforcement de sol du site de Gravelines, le comportement du sol à l'intérieur des casiers de Soil-Mixing sous l'effet d'un séisme vis-à-vis de la liquéfaction et analyse son impact sur le comportement des inclusions rigides placées dans ces casiers (cf. la recommandation n° 7 rappelée en annexe au présent avis d'expertise).**

À ce jour, il n'existe pas d'état de l'art sur le comportement dynamique des ouvrages fondés sur des sols renforcés par un système aussi complexe que celui retenu pour le site de Gravelines envisagé pour l'accueil des EPR2. Cette complexité réside notamment dans les multiples interactions entre le sol, les IR, le SM, la PTC et les fondations des ouvrages.

Des études expérimentales récentes ont montré que la présence de renforcements, tels que les IR et le SM, modifie significativement la rigidité du sol, influe directement sur la réponse du sol en cas de séisme et peut modifier les accélérations à la surface, ce qui complexifie l'évaluation de la réponse globale de l'ouvrage en cas de séisme. Par ailleurs, des essais dynamiques ont mis en évidence que les inclusions périphériques sont plus sollicitées que celles du centre et que les mouvements de basculement peuvent être amplifiés sous sollicitations sismiques multidirectionnelles.

L'hétérogénéité des fondations selon les bâtiments, dans un contexte de proximité entre les ouvrages, introduit une complexité supplémentaire dans la réponse dynamique du sol et soulève la question de l'influence potentielle des différents systèmes de renforcement sur le comportement sismique des ouvrages voisins et sur la capacité des moyens de simulation à fournir une évaluation réaliste et fiable des effets associés à ces hétérogénéités.

Le comportement sismique d'un sol renforcé par un système aussi dense et complexe que celui prévu reste aujourd'hui largement inconnu et relève encore de la recherche. Bien que des renforcements de sol aient déjà été réalisés dans le domaine nucléaire, aucun retour d'expérience documenté n'existe pour un dispositif de renforcement tel que celui envisagé pour le site de Gravelines. Cette absence de référentiel opérationnel soulève des interrogations quant à la maîtrise et à la fiabilité des calculs prédictifs du comportement sismique des ouvrages pour les réacteurs EPR2 de Gravelines.

Dans ce contexte, l'évaluation des caractéristiques dynamiques du sol ainsi renforcé et le choix d'un modèle pertinent pour l'interaction sol-structure restent des défis majeurs.

5.6. PLATEFORME DE TRANSFERT DES CHARGES

La plateforme de transfert des charges sur laquelle reposent les ouvrages présente l'inconvénient d'introduire une flexibilité importante, susceptible de favoriser des mouvements de glissement relatifs et d'éventuelles amplifications sous sollicitations sismiques. Ce phénomène résulte de la liberté de mouvement du radier, qui favorise un glissement accru, amplifiant les déplacements latéraux et le risque d'instabilité sous sollicitations sismiques. Par ailleurs, la Direction de l'expertise en sûreté considère que les études de conception de la PTC doivent tenir compte de la variabilité de son épaisseur, de la présence des galeries dans la PTC, et des différents types de renforcement de sol. **Il est important de souligner que les mécanismes de rupture envisagés dans le programme ASIRI ne couvrent pas ces spécificités. La pertinence et la qualification des outils utilisés pour réaliser les études de conception apparaissent ainsi comme un point d'attention important, voire une difficulté.**

De plus, la Direction de l'expertise en sûreté estime nécessaire de s'assurer de l'acceptabilité des déplacements induits auxquels les ouvrages de l'îlot nucléaire pourraient être soumis du fait du comportement de la PTC sous séisme, au regard des exigences définies pour ces ouvrages et pour les équipements qui y sont implantés. Ainsi, **la Direction de l'expertise en sûreté recommande qu'EDF apporte la justification de la maîtrise du**

comportement, notamment en cas de séisme, de la plateforme de transfert des charges et évalue l'impact de son endommagement et des déplacements induits sur le respect des exigences attribuées aux bâtiments et aux équipements, en intégrant les particularités de son projet de renforcement de sol du site de Gravelines, telles que la diversité des renforcements, l'hétérogénéité des épaisseurs de la plateforme de transfert des charges et la présence de galeries dans celle-ci (cf. la recommandation n° 8 rappelée en annexe au présent avis d'expertise).

5.7. DURABILITÉ DES RENFORCEMENTS DU SOL

Il est nécessaire de s'assurer que les renforcements du sol conservent leurs propriétés mécaniques et fonctionnelles tout au long de la vie des réacteurs EPR2, d'autant plus qu'ils seront inaccessibles, rendant leur surveillance et leur maintenance particulièrement difficiles. La durabilité des structures enterrées est donc un enjeu majeur au regard de la durée de fonctionnement retenue à la conception des futurs EPR2.

La Direction de l'expertise en sûreté considère que les principes de conception retenus par EDF intégrant des dispositions relatives à la durabilité des matériaux, des bétons et des armatures, adaptées aux conditions d'agressivité des sols et de la nappe, ainsi que le suivi régulier en opération des tassements des ouvrages sont pertinents. Il appartiendra à EDF de présenter avant le démarrage des travaux de réalisation des renforcements les dispositions spécifiques retenues relatives à la durabilité des matériaux, en particulier la formulation des bétons, la maîtrise de leur fissuration ainsi que la mise en œuvre des armatures.

La durabilité dépend également de la réalisation de l'ouvrage. Or EDF ne présente aucune disposition concernant la qualité et le contrôle de la réalisation des renforcements de sol, ce qui n'est pas satisfaisant. Ceci fait l'objet de la recommandation n° 6 présentée supra.

Concernant les dispositions de suivi en service des sols renforcés, indispensables pour détecter toute dégradation progressive et permettre d'anticiper d'éventuelles pertes de performance du système de renforcement de sol, EDF prévoit le suivi régulier des tassements des ouvrages, ainsi que le suivi du comportement de quelques mailles de renforcement (IR et SM) et de la PTC avec des capteurs de déplacement, de contrainte et de pression interstitielle à différentes profondeurs.

La Direction de l'expertise en sûreté souligne qu'une dégradation de la résistance au cisaillement des IR ne serait pas nécessairement visible sur les tassements alors qu'elle pourrait obérer leur bon comportement en cas de séisme.

Pour ce qui concerne l'instrumentation avec des capteurs, la Direction de l'expertise en sûreté souligne que l'absence de garantie sur le fonctionnement d'une telle instrumentation sur le long terme ne permet pas de la considérer à ce jour comme un moyen de suivi fiable et robuste de la durabilité des renforcements de sols compte tenu de la durée de vie projetée des futurs réacteurs EPR2.

Il appartiendra à EDF de poursuivre ses réflexions sur la mise en place de dispositions de suivi en service permettant de détecter, tout au long de la durée d'exploitation des réacteurs, d'éventuelles pertes de performance du système de renforcement.

6. CONCLUSION

La conjonction de caractéristiques de sol en place médiocres au regard des charges apportées par le projet EPR2 et sa plateforme, largement supérieures à celles rencontrées sur le CNPE voisin, ont conduit EDF à proposer, pour le site de Gravelines, un système de renforcement du sol de fondation des ouvrages vis-à-vis des tassements et des risques de liquéfaction d'une ampleur sans précédent, d'une grande complexité et sans retour d'expérience représentatif en France et à l'international.

Dans ce contexte, la Direction de l'expertise en sûreté considère que ce système de renforcement de sol spécifique doit être intégré à la liste des équipements importants pour la protection. En outre, elle estime qu'EDF devra démontrer la robustesse de la solution retenue au regard des exigences qui lui seront attribuées, la pérennité de sa qualification ainsi que la suffisance des dispositions de suivi en service. Dans cet objectif, EDF devra

apporter les éléments nécessaires à la maîtrise des incertitudes inhérentes aux singularités, à l'hétérogénéité et à la complexité de la solution, en tenant compte du retour d'expérience acquis en statique et sous séisme. Ces points font l'objet de recommandations.

Au regard des conclusions de son expertise, la Direction de l'expertise en sûreté estime que le renforcement envisagé du sol du site de Gravelines constitue un défi technique majeur et considère qu'EDF pourrait examiner la pertinence d'autres solutions d'amélioration du sol en cohérence avec les exigences de sûreté qui auront été définies.

Pour le Directeur de l'expertise en sûreté

Frédérique PICHEREAU

Adjoint au Directeur de l'expertise en sûreté

ANNEXE

Recommandations de la Direction de l'expertise en sûreté

Recommandation n° 1

La Direction de l'expertise en sûreté recommande que le système de renforcement de sol du site de Gravelines envisagé pour l'accueil de deux réacteurs de type EPR2 fasse partie de la liste des équipements importants pour la protection et qu'EDF précise les exigences définies qui lui sont associées.

Recommandation n° 2

La Direction de l'expertise en sûreté recommande qu'EDF précise les enjeux de sûreté relatifs au renforcement de sol du site de Gravelines et la participation des renforcements aux fonctions de sûreté assurées par les ouvrages de génie civil, et définisse les exigences de comportement attribuées à ces renforcements du sol ainsi que les critères de justification associés.

Recommandation n° 3

La Direction de l'expertise en sûreté recommande que, pour les prochaines étapes de justification de la solution de renforcement de sol du site de Gravelines, EDF prenne en compte les singularités identifiées ainsi que la complexité du système de fondation, en particulier l'hétérogénéité des renforcements, les effets de bord, les jonctions entre bâtiments et l'influence mutuelle des renforcements des ouvrages voisins.

Recommandation n° 4

Compte tenu du retour d'expérience limité et des incertitudes liées au caractère innovant de la solution proposée, la Direction de l'expertise en sûreté recommande qu'EDF démontre la robustesse de sa solution de renforcement de sol du site de Gravelines au regard des exigences de sûreté attribuées à cette solution de renforcement.

Recommandation n° 5

La Direction de l'expertise en sûreté recommande qu'EDF réalise des investigations géotechniques complémentaires pendant et après les travaux de renforcement de sol du site de Gravelines, afin de caractériser précisément les propriétés du sol remanié entre les inclusions et le Soil-Mixing.

Recommandation n° 6

Afin de garantir le respect des critères de conception du projet de renforcement de sol du site de Gravelines, la Direction de l'expertise en sûreté recommande qu'EDF mette en place des dispositions de suivi couvrant l'ensemble des étapes de conception et de construction, depuis les essais préliminaires en laboratoire jusqu'aux contrôles in situ post-réalisation, permettant de s'assurer de l'atteinte des performances requises par le système de renforcement de sol.

Recommandation n° 7

La Direction de l'expertise en sûreté recommande qu'EDF vérifie, pour son projet de renforcement de sol du site de Gravelines, le comportement du sol à l'intérieur des casiers de Soil-Mixing sous l'effet d'un séisme vis-à-vis de la liquéfaction et analyse son impact sur le comportement des inclusions rigides placées dans ces casiers.

Recommandation n° 8

La Direction de l'expertise en sûreté recommande qu'EDF apporte la justification de la maîtrise du comportement, notamment en cas de séisme, de la plateforme de transfert des charges et évalue l'impact de son endommagement et des déplacements induits sur le respect des exigences attribuées aux bâtiments et aux équipements, en intégrant les particularités de son projet de renforcement de sol du site de Gravelines, telles que la diversité des renforcements, l'hétérogénéité des épaisseurs de la plateforme de transfert des charges et la présence de galeries dans celle-ci.