

# FONDATEMENTS DES EPR2 DE GRAVELINES

## Préambule

Le site de Gravelines figure parmi les trois sites retenus pour l'implantation de réacteurs de type EPR2, entendus comme l'ensemble des installations et systèmes nécessaires à la production d'électricité nucléaire. Proposé par EDF à l'issue d'une large concertation publique, ce choix a été confirmé par le Conseil de politique nucléaire le 12 mars 2026<sup>1</sup>.

Dans le cadre des études préparatoires engagées en 2023 pour la conception des fondations de ces ouvrages, plusieurs options techniques ont été soumises par EDF à un groupe d'experts indépendants. Sur la base de leurs analyses, un choix de solution a été présenté à l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR), qui a émis un avis critique<sup>2</sup>, soulignant notamment le caractère innovant de la solution proposée, l'absence de retour d'expérience significatif dans le domaine nucléaire, et la nécessité de privilégier des approches reposant sur des techniques éprouvées.

À la suite de cet avis, EDF a constitué, en 2025–2026, un nouveau groupe d'experts, incluant des compétences internationales, afin de réexaminer les options initiales. Ces travaux ont conduit à orienter les choix vers une solution de fondations plus conventionnelle, visant à renforcer la robustesse des études, la maîtrise de la réalisation et la durabilité des ouvrages. Le projet d'EPR2 à Gravelines incluant ces nouvelles fondations fait l'objet courant 2026 d'une nouvelle revue de projet par un comité de revue indépendant qui doit rendre ses conclusions à l'automne 2026 en amont de la décision finale d'investissement prévue en fin d'année.

C'est dans ce contexte que l'Académie des Technologies, fidèle à sa mission d'éclairage des décisions publiques sur les grands enjeux technologiques, s'est saisie en tant que tiers de confiance indépendant de ce sujet. Face aux défis majeurs que constituent la transition énergétique, le changement climatique, ainsi que les exigences croissantes en matière de sécurité, de qualité de vie et de résilience des infrastructures, l'Académie considère que les choix relatifs aux grands ouvrages énergétiques relèvent de l'intérêt général. Ils engagent en effet, sur le long terme, la sûreté des installations, la sécurité de l'approvisionnement énergétique et la confiance de la société dans les solutions technologiques mises en œuvre.

Les solutions proposées pour les nouvelles tranches de Gravelines présentent certaines caractéristiques génériques et donc susceptibles de s'appliquer à d'autres sites et d'autres ouvrages. C'est en particulier le cas de l'aléa sismique à retenir pour les fondations, ou du recours à des inclusions rigides, comme il est détaillé dans cette note. Il est donc d'intérêt général de pouvoir apporter un éclairage indépendant sur la pertinence et la fiabilité des approches et solutions proposées en se basant notamment sur le retour d'expérience international.

C'est pourquoi le pôle Énergie de l'Académie a constitué un groupe de travail chargé d'examiner les solutions de fondations proposées pour l'îlot nucléaire du site de Gravelines, au regard des principes de conception, de sûreté et de pérennité des ouvrages. Pour conduire cette analyse, le groupe de travail s'est appuyé sur les informations techniques disponibles, notamment celles communiquées par Alain

<sup>1</sup> <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2026/03/12/cinquieme-conseil-de-politique-nucleaire>.

<sup>2</sup> ASNR- Avis d'expertise N° 2025-00083 du 23 Juillet 2025 : <https://www.asnr.fr/sites/asnr/files/2025-10/Avis-dexpertise-ASNR-2025-00083-du-23-07-2025.pdf>

Pecker, membre des deux groupes d'experts précédemment mobilisés, ainsi que sur des éléments factuels demandés à EDF, sans échange direct avec l'entreprise. Le présent document a été établi à dire d'experts. Il n'a pas vocation à se substituer aux missions de contrôle technique ou d'examen détaillé des études d'ingénierie, qui relèvent de la maîtrise d'œuvre, des instances d'expertise ou des autorités compétentes. Il vise à éclairer les choix retenus, en formulant analyses, recommandations et points de vigilance, dans une perspective d'intérêt général et d'applicabilité possible à d'autres projets similaires.

## 1. Contexte environnemental

### 1.1 Environnement géotechnique

Les deux futurs EPR2 de Gravelines sont localisés à proximité du CNPE de Gravelines, situé à 20km à l'ouest de Dunkerque, qui comprend six tranches de 900 MW. Ces dernières ayant été construites entre 1975 et 1979, leur suivi en exploitation fournit des éléments de première importance permettant de mieux appréhender le comportement du génie civil des futurs EPR2.

D'un point de vue géotechnique, le site de Gravelines est un polder avec des sols meubles sur environ 175m de profondeur ; la nappe est située à 3.0m de profondeur sous le terrain naturel situé à la cote +5.5NGF. Pour l'implantation des tranches le site est remblayé par une plateforme jusqu'à la cote +11NGF. On y distingue depuis le niveau du terrain naturel actuel, des couches de sables sur environ 32m d'épaisseur, surmontant une couche d'argile connue sous le nom d'Argile des Flandres dont l'épaisseur est de l'ordre de la centaine de mètres ; cette couche présente en tête une frange altérée de plusieurs mètres. Sous cette couche se trouvent des formations tertiaires (sable d'Ostricourt et Argiles de Louvil) jusqu'au substratum crayeux du Crétacé atteint vers 185m de profondeur. Seuls les sables et l'argile des Flandres affectent le comportement des ouvrages, la compressibilité des autres formations étant négligeable devant ces derniers. Les 32m de sables superficiels sont subdivisés en 3 couches : N1 (14m d'épaisseur), N2 (sable très dense sur 12m d'épaisseur) et N3 (sable très dense sur 5m d'épaisseur) ; entre la base de la couche N2 et le toit de N3 s'intercale une couche limoneuse de l'ordre de 2m d'épaisseur, dénommée N2-N3, de forte compressibilité. Les couches N2 et N3 présentent de bonnes caractéristiques mécaniques alors que la couche N1 est plus compressible et potentiellement sujette à liquéfaction sous sollicitation sismique. La consolidation de l'argile des Flandres sous les charges appliquées est source de tassements totaux et différentiels significatifs, différés dans le temps.

### 1.2 Aléa sismique

EDF a fait le choix de standardiser les ouvrages des différents sites EPR2 en retenant, pour la définition des sollicitations sismiques, un mouvement de référence (SDD : spectre sismique de dimensionnement), établi au niveau de la plateforme finale à la cote +11 NGF et enveloppant les mouvements attendus sur une large gamme de sites potentiels. Le SDD ainsi défini est caractérisé, pour le site de Gravelines par une accélération maximale en surface de 0,30g. Pour les études de liquéfaction, EDF utilise des aléas sismiques, les SMS (Séismes Majorés de Sécurité), définis en majorant les événements sismiques historiques ; la magnitude maximale associée est 6,4.

En complément, un séisme extrême de type DEH (Design Extension Hazard) est défini au même niveau de plateforme.

L'Académie souligne que, si le recours à un mouvement sismique enveloppe se justifie pour le dimensionnement standardisé des superstructures, **cette approche n'est pas adaptée pour les éléments en interaction directe avec le sol**, tels que les fondations. Pour ces derniers, il convient d'utiliser un **mouvement sismique compatible avec les caractéristiques mécaniques des terrains**, en définissant le SMS (ou le DEH) au niveau du substratum sismique puis en le propageant à travers le profil de sol, modélisé avec ses caractéristiques propres et ses éléments de fondation, afin d'obtenir les sollicitations

réelles auxquelles les fondations sont soumises. Cette démarche est conforme aux pratiques internationalement admises, y compris pour les installations nucléaires<sup>3,4,5,6</sup>.

## 2. Les ouvrages

Les installations de l'EPR2 présentent une masse et une emprise plus importantes que celles des installations nucléaires existantes. L'incrément de contrainte sous l'îlot nucléaire (appelé bâtiment de la croix) de l'EPR2 est deux fois supérieur à celui généré par un double îlot nucléaire des tranches 900 MWe, soit environ **550kPa** sur une surface de 113m x 130m. La figure ci-dessous présente une vue en plan d'une unité de l'EPR2 sur laquelle le bâtiment de la croix correspond aux bâtiments HRA, HKA, HLA, HLC, HLB (voir cercle pointillé de la Figure 1) tous fondés sur un radier unique. Les bâtiments HQA, HDB/M/HDD et HDA/HDC/HWE apportent également des charges très importantes au sol (440 à 590kPa). Les autres bâtiments sont plus légers avec des charges au sol inférieures à **250kPa**. Les bâtiments lourds ( $q > 250\text{kPa}$ ) sont fondés à une cote moyenne de -2.50NGF, soit environ 5m sous le niveau de la nappe.

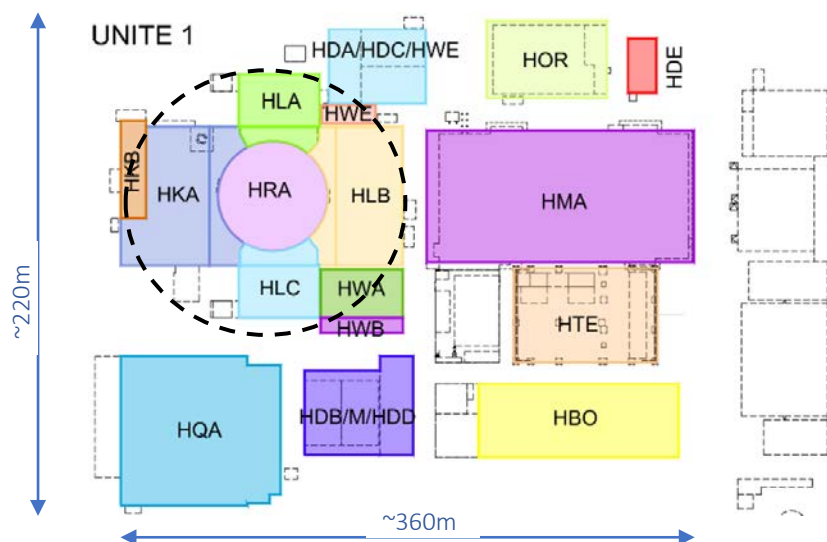


Figure 1 : Vue en plan des ouvrages

Les premières estimations de tassements sous l'îlot nucléaire ont donné, en l'absence de tout traitement de sol, des valeurs de l'ordre de 50 à 80 cm alors que ceux observés au droit des tranches 900 MWe du CNPE actuel, fondée dans un contexte géotechnique quasi identique, sont de 25 à 30 cm. On notera que les évaluations précédentes correspondent à des tassements totaux ; dans la pratique ce sont les tassements différentiels qui sont importants pour les ouvrages et les liaisons entre ouvrages. Cependant, des valeurs de tassements aussi élevées, alliées à des ouvrages apportant au sol des contraintes très variables et fondés à des niveaux différents, généreraient sans aucun doute des tassements différentiels de plusieurs dizaines de centimètres, inacceptables aussi bien pour les structures que pour les liaisons entre elles (galeries/conduites).

<sup>3</sup> A. Pecker, E. Faccioli, A. Gürpınar, C. Martin, P. Renault (2017). An Overview of the SIGMA Research Project: A European Approach to Seismic Hazard Analysis, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, Volume 42, Springer (chapter 5 on Site response characterization).

<sup>4</sup> NAGRA (2004). "Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites (PEGASOS Project)", prepared for the Unterausschuss Kernenergie der Überlandwerke, Volume 16.

<sup>5</sup> Swissnuclear (2013). "Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites- PEGASOS Refinement Project", Volume 1-6.

<sup>6</sup> P. Renault (2009). PEGASOS / PRP Overview. Joint ICTP/IAEA Advanced Workshop on Earthquake Engineering for Nuclear Facilities. Abdus Salam International Center for Theoretical Physics, Trieste, Italy.

Outre la problématique liée aux tassements, il a été relevé que les sables de la couche N1, dont après excavation il restera environ 6m sous le niveau du radier du bâtiment de la croix, pouvaient présenter un risque de liquéfaction.

Pour toutes ces raisons, il est indispensable de prévoir un système de fondation approprié permettant la prise en compte de ces aléas.

### 3. Solutions de fondation retenues par EDF

À la suite des conclusions du premier groupe d'experts fin 2023, EDF a retenu pour les ouvrages « lourds » une solution de fondations basée sur un renforcement des sols combinant des Inclusions rigides (barrettes en béton armé non connectées au radier de fondation) et du Soil Mixing (Figure 2). La combinaison de barrettes de grande longueur avec des caissons de Soil Mixing descendus à la base de la couche N2-N3 permet de s'affranchir du risque de liquéfaction et de limiter les tassements, totaux et différentiels, dans des limites acceptables (environ 30cm de tassement total et flèche de 3cm sous le radier du bâtiment de la croix). On note par ailleurs que le choix de placer les bâtiments sensibles sur un radier unique (la croix) constitue une disposition favorable vis-à-vis des tassements différentiels entre ces ouvrages.

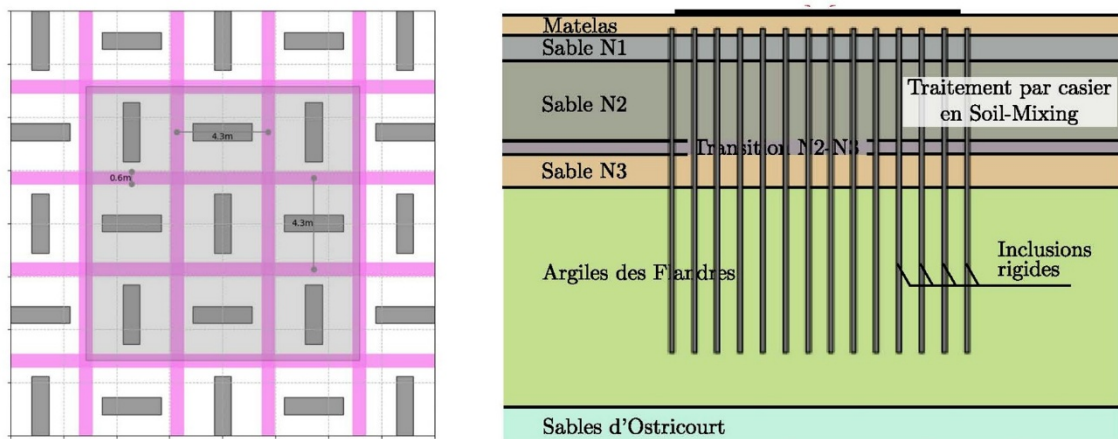


Figure 2 : Solution de traitement sous les ouvrages lourds

Sous les bâtiments « légers » la solution consiste en un traitement par Soil Mixing uniquement et pour les bâtiments peu profonds une simple substitution par remblais sous les ouvrages.

La solution a été présentée à l'ASNR et a fait l'objet d'un avis émettant de nombreuses réserves sur le concept retenu jugé « d'une ampleur sans précédent, d'une grande complexité et sans retour d'expérience représentatif en France et à l'international ». En outre, l'ASNR « 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 ». 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 ».

Faisant suite à cet avis, un deuxième groupe d'experts a été réuni par EDF entre novembre 2025 et fin janvier 2026 afin de réexaminer les solutions proposées et de les faire évoluer pour répondre aux préoccupations soulevées par l'ASNR.

La solution finalement retenue par EDF à la suite de cette consultation est présentée sur la Figure 3 pour la fondation des ouvrages dits « lourds ».

Elle résulte d'une adaptation de la solution initiale consistant à conserver les inclusions rigides pour limiter les tassements et reporter une partie des charges en profondeur sous les mètres d'argile altérée ; le traitement vis-à-vis du risque de liquéfaction est assuré par l'excavation jusqu'à la base de la couche N1 des sols potentiellement liquéfiables et le remplacement des 6m subsistant sous le radier par un remblai soigneusement choisi et compacté.

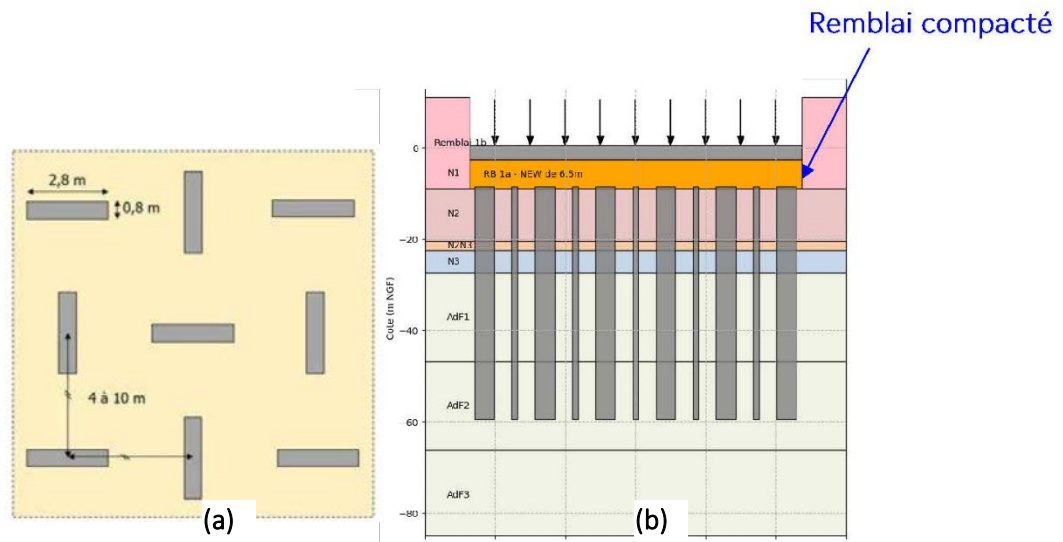


Figure 3 : Schéma de principe de la solution retenue :

(a) vue en plan – (b) vue en élévation

On notera que pour maintenir les tassements totaux à une valeur voisine de celle de la solution initiale la longueur des inclusions rigides doit être augmentée de quelques mètres et que celles-ci conservent la disposition en quinconce illustrée sur la Figure 2. C'est cette solution qui fait l'objet de l'avis de l'Académie.

## 4. Examen de la solution EDF

La solution de fondation proposée par EDF et les aléas qui lui sont attachés sont examinés en fonction de différents critères essentiels pour garantir son adéquation et sa robustesse :

- Conception et justifications techniques dans le contexte nucléaire,
- Constructibilité,
- Pérennité de la solution pour une durée d'exploitation de 100 ans,
- Contrôle lors de la construction et suivi de l'ouvrage pendant la durée d'exploitation.

### 4.1 Conception et justifications techniques

Les deux points qui sont examinés concernent le comportement statique des fondations, en particulier sous l'angle des tassements, et le comportement sismique vis-à-vis de la réponse du sol renforcé à la sollicitation et du traitement de la susceptibilité à la liquéfaction.

#### 4.1.1. Comportement statique

En raison de la forte compressibilité des sols du site de Gravelines, combinée aux charges importantes transmises par les ouvrages à la fondation et à la vaste emprise de ces ouvrages, les tassements induits seraient incompatibles avec le bon fonctionnement de l'installation.

Le retour d'expérience acquis depuis plus de 30 ans sur l'exploitation des tranches de 900 MWe a conduit EDF à concevoir un dispositif de renforcement des sols visant à maintenir le comportement des fondations dans un domaine maîtrisé :

- en limitant les tassements à des valeurs comparables à celles mesurées sur les tranches de 900 MWe ;
- en réduisant les contraintes transmises aux couches sensibles aux tassements (couche N2-N3 et toit des argiles altérées), dont le comportement sous fortes sollicitations reste mal connu, à des niveaux voisins ou légèrement supérieurs à ceux engendrés par ces tranches.

Ces choix de conception s'appuient sur des principes solides, confirmés par les premières interprétations des plots d'essais de barrettes soumises à des chargements verticaux et horizontaux. L'interprétation de ces essais, réalisée par EDF, va être valorisée dans les études de détail. Un nouveau plot d'essai permettra d'affiner/confirmer les lois d'interactions sol-inclusions.

L'Académie rappelle que les critères mentionnés ne couvrent pas l'ensemble des exigences de conception. En particulier, les tassements différentiels entre ouvrages revêtent une importance majeure pour la pérennité des liaisons inter-ouvrages (galeries, tuyauteries, etc.) et pour la distribution des efforts dans les structures.

Globalement, **le principe retenu est robuste et permet de gérer les incertitudes inhérentes à la caractérisation géotechnique du site**. Contrairement à des fondations sur pieux, qui reprennent directement la totalité des charges, les charges ici se répartissent entre les inclusions — via l'épaisse couche de remblai — et le sol sous-jacent. La défaillance d'une ou plusieurs inclusions entraîne une redistribution locale des efforts sans compromettre la stabilité globale de la fondation : on peut ainsi dire que le système choisi est « autoéquilibrant ».

Ce mode de fondation sur inclusions rigides, de technique relativement récente avec les premières références datant d'une vingtaine d'années, bénéficie d'un large retour d'expérience à l'international pour des ouvrages de génie civil majeurs, ponts en zones sismiques<sup>7,8,9,10</sup>, réservoirs de GNL (gaz naturel liquéfié). Le projet EPR2 s'en distingue néanmoins par une couche de remblai particulièrement épaisse entre le radier et la tête des inclusions. Cet agencement favorise une meilleure diffusion des contraintes, réduit les interactions radier–remblai–inclusions et assure un découplage fonctionnel : les inclusions participent principalement à la réduction des tassements, tandis que le remblai agit comme assise portante du radier, simplifiant ainsi les justifications de stabilité. En outre, l'existence de ce remblai de forte épaisseur facilite la mise en œuvre des canalisations et galeries noyées dans celui-ci.

*Nota* : les fondations sur inclusions rigides mentionnées pour d'autres grands ouvrages comportent des inclusions circulaires en acier (tubes métalliques) ou en béton armé. Les inclusions métalliques offrent une excellente maîtrise du volume de matériau mis en place mais sont inadaptées au contexte de Gravelines, compte tenu des longueurs à manutentionner. Les inclusions en béton armé, circulaires, présentent l'avantage de ne privilégier aucune direction horizontale mais, à ces profondeurs, présentent des aléas de réalisation plus importants que les barrettes (contrôle de la verticalité, risque d'éboulement des parois du forage). Dans la configuration retenue (voir Figure 3), la disposition des barrettes conduit à un comportement proche de l'isotropie (orthotropie carrée). Par ailleurs, leur densité à l'échelle du site et la forte épaisseur de remblai assurent un comportement global sous sollicitation sismique analogue à celui des autres ouvrages mentionnés.

---

<sup>7</sup> Pecker, A. (2004). Design and construction of the Rion Antirion bridge, Geotechnical Engineering for Transportation Projects, ASCE, Geotechnical Special Publication 126: 216-240.

<sup>8</sup> Papanikolas, P., Stathopoulos-Vlami, A., Panagis, A., Pecker, A., Infanti, S. (2010). The behavior of Rion – Antirion bridge during the earthquake of “Achaia-Illia” on June 8, 2008, Proceedings of 3rd International FIB Conference, Washington D.D.

<sup>9</sup> Steinfeld, J.S., Foged, B., Augustesen, A.H. (2015) Izmit Bay Bridge: geotechnical challenges and innovative solutions. Int J Bridge Eng 3(3): 53–68.

<sup>10</sup> Phil, J. (2022). The design of the 1915 Çanakkale bridge. In: Proceedings of the international congress of the association of structural engineers of Serbia, Arandjelova; paper U1: 71–75.

#### 4.1.2. Comportement sismique

Un des aléas créés par l'occurrence d'un séisme est la liquéfaction potentielle d'une partie de la couche de sable N1. La solution retenue substitue l'intégralité du matériau N1 subsistant sous l'assise des ouvrages, dont la partie potentiellement liquéfiable ; un choix approprié du matériau de remblai, allié à des spécifications et contrôles de mise en œuvre stricts, permet de créer une couche d'assise des fondations exempt de risque de liquéfaction.

Face aux sollicitations sismiques, le concept d'une fondation sur inclusions présente, par rapport à une fondation classique sur pieux — qui vise également à réduire les tassements —, l'avantage de limiter la transmission des efforts de la structure vers les éléments de fondation profonde. Cette configuration renforce la résilience de l'ouvrage : les observations post-sismiques montrent en effet que la zone de liaison entre les pieux et le massif de fondation constitue généralement la partie la plus vulnérable de la fondation, en raison du transfert direct des efforts (efforts tranchants et moments). Avec la solution combinant inclusions et remblai, une part importante des efforts, notamment horizontaux, est reprise par le remblai de forte épaisseur ; en outre, la couche de remblai agit comme un isolateur sismique protégeant la superstructure par effet fusible (glissement très limité à l'interface remblai-radier contribuant à une bonne dissipation d'énergie) en cas de dépassement des sollicitations de calcul<sup>11</sup>. Le rôle du remblai est ici renforcé par rapport à celui d'une fondation classique sur inclusions avec remblai de plus faible épaisseur. La conception s'en trouve ainsi plus robuste et plus fiable face aux actions sismiques que celle d'une fondation classique sur pieux.

La justification du système de fondation, peu conventionnel dans le domaine nucléaire, n'est pas codifiée ; cette situation est courante pour les grands ouvrages de génie civil et requiert le développement préalable d'un référentiel de conception qui doit être validé par des autorités compétentes ; le référentiel établi par EDF répond à cet objectif. La justification passe nécessairement par des calculs numériques élaborés modélisant les inclusions et le comportement non linéaire du sol avec les incertitudes associées. La modélisation des inclusions ne pose pas de difficulté majeure et peut être faite, suivant les capacités de calcul disponibles, soit par homogénéisation du milieu renforcé avec un modèle de comportement orthotrope, soit individuellement. C'est dans ce milieu renforcé que doit être propagée la sollicitation sismique depuis le substratum (voir §2.2) pour la détermination des efforts sismiques induits. Un traitement exhaustif des incertitudes permet de choisir des marges significatives dans le dimensionnement des inclusions.

Outre le choix dans le dimensionnement de retenir des marges significatives, il est recommandé de maintenir les inclusions dans un domaine de comportement élastique, même sous sollicitation sismique, de façon à assurer la poursuite de la capacité de la fondation à assurer la reprise des charges lors de répliques sismiques éventuelles, dont l'amplitude est, par essence, inférieure à celle du séisme de dimensionnement.

## 4.2 Constructibilité

Les aspects constructibilité sont liés à l'exécution des terrassements sous nappe, la réalisation des inclusions rigides et la mise en place du remblai de substitution.

### 4.2.1. Exécution des terrassements

L'atteinte de la base de la couche N1 nécessite une excavation de 14 m sous le terrain naturel, dont 6 m sous le niveau de la nappe. Malgré la mise en place d'une enceinte étanche et d'un pompage dans les sables N1, N2 et N3, la présence de la couche N2-N3, peu perméable, crée une barrière hydraulique qui empêche la dissipation totale des pressions interstitielles régnant dans N3 en raison du rayon d'action limité des puits de pompage et de la superficie de la fouille. Cette situation engendre **un aléa de soulèvement du fond de fouille** lorsque le terrassement atteindra une profondeur critique, estimée à la base de N1.

---

<sup>11</sup> Pecker, A. (1998). Capacity design principles for shallow foundation in seismic areas, keynote lecture, Proceedings 11<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Balkema Edt.

La maîtrise de cet aléa conduit à **recommander la mise en œuvre combinée de puits de pompage et de forages de décompression**, lesquels devront être recépés au fur et à mesure de la progression du terrassement. Par ailleurs, les travaux s'effectueront dans des sables saturés, rendant le terrassement très délicat malgré ces dispositifs.

L'expérience de la centrale de Koeberg (Afrique du Sud) illustre la difficulté de ce type de contexte : des terrassements similaires, réalisés dans les sables sous nappe, ont nécessité un changement de méthode en raison de la mise en bouillonnance<sup>12</sup> du fond de fouille et l'adjonction de moyens de contrôle supplémentaires de la nappe.

Un approfondissement supplémentaire du terrassement — jusqu'au toit de N3 ou jusqu'à la base de la frange altérée d'argile des Flandres — **aggraverait significativement les risques dus aux solutions techniques et les aléas d'exécution**. Des fouilles profondes (jusqu'à -47 NGF) sont jugées quasi irréalisables dans ces terrains compte tenu des contraintes d'emprise en cas de talutage ou des impossibilités de dimensionnement de soutènements de si grande hauteur sous nappe.

Par ailleurs, une telle profondeur d'excavation réduirait la contrainte verticale sur les argiles des Flandres à des valeurs très faibles, domaine dans lequel le comportement du matériau est mal connu, avec des risques potentiels de fissuration et de tassements différés difficiles à prévoir.

Ainsi, les difficultés opérationnelles (pompages, faible portance des sables, gestion des déblais et remblais) et les risques de désordres géotechniques (remaniement des argiles altérées, renards hydrauliques) écartent la faisabilité d'un approfondissement du terrassement à des profondeurs significativement plus grandes que la base de N1. De plus, l'excavation des couches N2 et N3 très denses et leur remplacement par un remblai, peut-être de moins bonne qualité, ne contribuerait pas à une amélioration des performances.

#### 4.2.2. Exécution des inclusions rigides

La réalisation de près de 2 000 barrettes de cinquante mètres de profondeur représente un véritable défi, en particulier pour garantir la qualité d'exécution au niveau de la pointe de chaque barrette. Néanmoins, l'expérience acquise à l'échelle internationale démontre clairement la faisabilité de barrettes en béton armé de grande hauteur. Cette compétence est d'ailleurs confirmée par les résultats des plots d'essais réalisés sur le site, qui ont validé le savoir-faire et les méthodes mises en œuvre.

Les principaux aléas susceptibles d'intervenir lors du forage et du bétonnage — tels que l'effondrement ponctuel des parois du forage pouvant entraîner un manque de continuité du béton, ou un mauvais centrage de la cage d'armatures induisant un enrobage insuffisant — sont parfaitement maîtrisés par les entreprises spécialisées. Des procédures adaptées existent pour prévenir ces incidents ou en limiter les effets le cas échéant.

En complément, plusieurs méthodes d'auscultation codifiées permettent aujourd'hui de vérifier la qualité du béton et de détecter d'éventuels défauts d'exécution (voir paragraphe 5.4.1). Ces techniques offrent des moyens fiables de diagnostic et, le cas échéant, de correction. Si la réparation d'une barrette n'est jamais une intervention anodine, elle fait désormais partie des opérations maîtrisées et couramment mises en œuvre dans le cadre de grands chantiers d'infrastructure.

#### 4.2.3. Exécution des remblais

La réalisation du remblai d'assise entre la base de la couche N1 et la sous-face des radiers ne présente pas de difficulté technique majeure et n'est pas de nature à générer des aléas significatifs. La mise en œuvre de remblais compactés constitue une technique courante, largement éprouvée notamment dans le domaine des barrages en terre. Le choix du matériau et les modalités d'exécution devront toutefois être validés au moyen de planches d'essais préalables et soigneusement contrôlés durant l'exécution par des essais de réception en nombre et appropriés (essais à la plaque, gamma densitométrie).

Il est recommandé de retenir un remblai naturel compacté dont la granulométrie permettra une mise en œuvre aisée. L'adjonction de ciment pour accroître la rigidité et la résistance du remblai est à éviter : un matériau naturel, plus déformable, s'adapte mieux aux tassements différentiels et limite les

---

<sup>12</sup> Instabilité géotechnique liée à l'écoulement ascendant engendrant une annulation des contraintes (effectives) dans le sol.

risques de fissuration liés au comportement fragile d'un remblai traité. Le remblai peut ainsi jouer pleinement son rôle de couche de répartition des charges.

### 4.3 Pérennité

L'EPR2 est implanté en bord de mer, dans un environnement soumis à la présence d'une nappe phréatique située à faible profondeur. Le système de renforcement de sol restera ainsi durablement immergé dans une eau saumâtre pendant une durée d'exploitation estimée à cent ans. Un choix approprié d'un matériau de remblai granulaire, soigneusement compacté, permet d'écarter l'aspect durabilité pour cet élément de la fondation ; en revanche les inclusions rigides pourraient être affectées. Il est donc essentiel de garantir que les inclusions conservent leurs propriétés mécaniques et fonctionnelles pendant toute la durée d'exploitation de l'installation. Leur inaccessibilité rendra en effet toute maintenance complexe, voire impossible. Les principaux aléas susceptibles d'affecter la durabilité des inclusions rigides concernent la corrosion des armatures, la dégradation chimique des bétons liée à l'agressivité du milieu, ainsi que l'endommagement potentiel sous sollicitation sismique.

L'impact éventuel de ces éléments agresseurs peut être minimisé en s'appuyant sur des principes de conception intégrant pleinement les exigences de durabilité des matériaux, des bétons et des armatures : quantité et enrobage adaptés, ferrailage approprié et choix de compositions résistantes aux environnements marins et aux attaques chimiques.

La prise en compte de la durabilité s'articule ainsi autour de trois axes :

- **Conception** : un dimensionnement garantissant des marges suffisantes pour les renforcements, y compris sous séisme ; ceci est assuré puisque les inclusions sont dimensionnées dans leur domaine de comportement élastique ce qui limite l'ouverture des fissures et la circulation d'eau de la nappe vers les armatures. L'utilisation des essais de chargement des plots d'essais devrait permettre de conforter les hypothèses de calcul et de valider les performances sous différents types de sollicitations.
- **Choix de matériaux** : l'utilisation de ciments et bétons spécifiquement formulés pour résister à l'agressivité chimique des eaux saumâtres et des sols, conformément aux référentiels existants. Une modélisation de la pénétration des chlorures pour évaluer la cinétique de corrosion permettrait de conforter les choix retenus.
- **Dispositions constructives** : l'adoption de prescriptions adaptées aux contraintes marines, en particulier choix de bétons de forte compacité et à faible porosité, et mise en œuvre d'un enrobage minimal majoré.

Les aspects complémentaires suivants renforcent la robustesse et la pérennité du système :

- **Redondance** du dispositif, assurée par un grand nombre d'éléments faiblement sollicités grâce à des coefficients de sécurité conservateurs.
- **Comportement bien documenté du comportement** d'ouvrages en milieu agressif, appuyé sur un retour d'expérience international important : ouvrages offshore tels les plateformes gravitaires ou les fondations d'éoliennes sur monopieu.
- **Surveillance en service** (§5.4.2), permettant de suivre l'évolution du comportement des inclusions et de vérifier la pérennité à long terme avec une instrumentation adaptée.

### 4.4 Contrôle en exécution et suivi en exploitation

Les contrôles lors de l'exécution permettent de s'assurer de la bonne exécution des fondations et de leur conformité aux données de conception. Les contrôles en exploitation ont pour objet de s'assurer que les fondations continuent à remplir leur fonction lors de la durée de vie de l'ouvrage et doivent permettre de détecter des évolutions néfastes. Les instruments pour le suivi pendant et après la construction

seront installés avant et pendant la construction. Les deux types de contrôle sont essentiels pour assurer que les fondations remplissent leur fonction en conformité avec les principes de conception.

#### 4.4.1. Contrôle en exécution

Les mesures de contrôle des fondations lors de l'exécution sont classiques pour des chantiers de fondations profondes et essentielles pour assurer une exécution conforme à la conception. Il convient de prévoir avant l'ouverture du chantier les mesures correctives à mettre en œuvre en cas de non-conformité aux spécifications.

Lors de l'exécution des inclusions, plusieurs types de non-conformités peuvent apparaître :

- Défaut de verticalité de la barrette. Les entreprises savent gérer ce problème par le choix d'outils appropriés comme l'expérience l'a montré sur des soutènements de grandes hauteurs.
- Défaut sous la pointe de l'inclusion : un curage inefficace du fond de pieu peut engendrer un mauvais contact béton/sol.
- Défaut de géométrie : le bétonnage étant réalisé au tube plongeur, le pied de colonne étant toujours immergé de plusieurs mètres dans le béton frais, un désamorçage de la colonne de bétonnage peut entraîner une coupure au niveau du fût du pieu.

Les contrôles d'intégrité de barrettes forées permettent de détecter ces anomalies ; les techniques appropriées existent (inclinométrie, auscultation sonore, carottage, méthode sismique parallèle, méthode vibratoire par impédance) et sont bien codifiées.

En cas d'anomalie rencontrée dans l'exécution d'une barrette, des traitements sont possibles permettant de la corriger : injection de coulis de ciment à la pointe de la barrette au travers de tubes d'auscultation, jet grouting dans le corps de la barrette ou à sa périphérie pour augmenter et conforter le contact sol-barrette.

Par ailleurs, de manière classique les contrôles suivants doivent être effectués : mesures de l'ouvrabilité du béton et de la résistance (tests sur éprouvettes), courbes de bétonnage par barrette, prélèvement d'échantillons en cours de forage.

Les contrôles d'exécution du remblai sont également classiques et codifiés : épaisseur des couches mises en place, densité du matériau compacté, essais à la plaque pour mesure de sa déformabilité. La reprise en cas de non-conformité aux spécifications est immédiate.

**L'application rigoureuse de ces procédures contribue à limiter les aléas d'exécution et à sécuriser la performance structurelle de l'ensemble.**

#### 4.4.2. Contrôle structural et géotechnique durant l'exploitation

L'instrumentation de fondations profondes en exploitation n'est pas usuelle car elles sont physiquement inaccessibles. Généralement, le bon comportement des fondations profondes en exploitation est jugé uniquement à l'aune des **mesures de tassements des fondations**, qui sont considérées comme **suffisantes**.

Les dispositifs usuels classiquement mis en œuvre sur les sites nucléaires comprennent des **piézomètres** permettant de suivre le niveau d'évolution de la nappe et de connaître les pressions interstitielles autour et en sous face de l'installation, des **tassomètres** (magnétiques ou extensomètres en forage) pour le suivi des tassements à long terme.

Cependant compte tenu des enjeux et afin de renforcer la robustesse de la solution, l'Académie recommande, malgré les difficultés de suivi liées à la présence des ouvrages, d'envisager des méthodes complémentaires d'auscultation des fondations.

De manière générale, plusieurs dispositifs d'instrumentation apparaissent pertinents pour assurer la surveillance structurelle et géotechnique de l'ouvrage durant sa phase d'exploitation. Une part importante de ces instruments doit être installée avant ou pendant la construction des fondations, pour des raisons d'accessibilité, et afin de disposer d'un historique de mesures couvrant les phases initiales de mise en charge et d'évolution du comportement de l'ensemble sol-structure.

Parmi les dispositifs possibles, il est recommandé de mettre en place pour les mesures de température et de déformation des **câbles de mesure de déformation DFOS (Détection par Fibre Optique Distribuée)**

le long des sections critiques des inclusions. Ces câbles sont fixés aux armatures avant le coulage du béton. Une résolution spatiale de 0,1 m peut être obtenue avec ces interrogateurs pour les mesures de déformation. Ces mesures fournissent une information continue sur la réponse mécanique et thermique de la structure et permettent de repérer d'éventuelles concentrations de déformation susceptibles de traduire une évolution non conforme du comportement de l'ouvrage.

La surveillance de la **durabilité à long terme des inclusions** en béton constitue un autre volet important de l'instrumentation. Elle concerne notamment les processus de dégradation liés à la pénétration des chlorures, aux variations de pH et à la carbonatation, paramètres directement associés au risque de corrosion des armatures. Pour les éléments structuraux inaccessibles, les taux de corrosion peuvent être mesurés à distance par des capteurs intégrés au béton, tels que des **sondes de résistivité électrique** ou **des sondes chimiques** mesurant le pH et la teneur en chlorures.

Pour tous les instruments inaccessibles après réalisation des ouvrages, il convient de prévoir une redondance permettant de couvrir des défaillances éventuelles. En outre, il peut être pertinent de prévoir en dehors de l'emprise des ouvrages quelques barrettes témoins qui pourront être inspectées en cas de détection d'un comportement anormal ; une telle procédure est classique pour le suivi d'appareils d'appui parasismique.

Toutes ces techniques de surveillance qui ont fait leurs preuves et sont régulièrement utilisées pour la surveillance des grands ouvrages de génie civil et des fondations ne sauraient, néanmoins, être retenues qu'à la condition d'avoir fait la preuve de leur fiabilité. La conception du dispositif d'ensemble de suivi en service doit, à cet égard, faire l'objet d'une optimisation rigoureuse, fondée sur une étude approfondie de l'ouvrage et de ses spécifications détaillées. Il convient en particulier de s'assurer que les techniques et instruments employés demeurent strictement dans leurs domaines d'utilisation qualifiés, ainsi que dans leurs conditions d'application et d'interprétation des résultats éprouvées. La conduite du suivi et les actions à engager doivent enfin être définies et mises en œuvre conformément aux règles de l'art et aux pratiques professionnelles, en fonction des résultats effectivement observés.

Il est recommandé de ne pas limiter l'approche à la seule acquisition de mesures, mais de développer une démarche intégrée fondée sur le couplage entre **modèle numérique et mesures in situ**. Dans cette perspective, il est souhaitable de constituer un **jumeau numérique évolutif** de l'installation, selon une logique de modèle accompagnateur de projet. Ce modèle doit représenter l'ouvrage dans son environnement réel, en intégrant les matériaux en place, les inclusions rigides, le remblai supérieur et le radier. Il doit être établi à partir des paramètres initiaux retenus lors des études de conception. Au cours du chargement, les observations permettent d'améliorer progressivement le pouvoir prédictif du modèle, en ajustant les paramètres et les lois de comportement, notamment celles qui prennent en compte les effets différés dans le temps, tels que la consolidation et la non-linéarité. L'ensemble du dispositif permet ainsi de suivre les évolutions du système de fondation, la dynamique de ces évolutions, d'évaluer les risques associés à ces évolutions sur le bâtiment, et d'envisager des actions correctives potentielles sur les structures. En outre, le suivi sur plusieurs dizaines d'années du comportement de l'installation à l'aide d'un jumeau numérique permet de pallier la défaillance éventuelle de quelques instruments de mesure. Il est donc souhaitable que la réflexion sur le modèle soit engagée en amont de la conception définitive du système de mesures.

## Conclusions et recommandations

Il ressort de l'examen ci-dessus de l'Académie des Technologies que la solution de fondation proposée pour l'EPR2 de Gravelines présente une bonne robustesse, adaptée aux contraintes géotechniques du site. En combinant inclusions rigides (barrettes en béton armé) et remblai compacté, elle introduit un système intrinsèquement auto-équilibrant : la répartition des charges entre inclusions, remblai et sol sous-jacent permet une redistribution locale en cas de défaillance isolée, sans compromettre la stabilité globale. Sous sollicitation sismique, cette conception permet de limiter les efforts transmis dans les éléments de fondations profondes et préserve intrinsèquement la superstructure. Ce système bénéficie d'un large retour d'expérience international sur des ouvrages majeurs de génie civil en zones sismiques ; dans le cas présent sa mise en œuvre a été validée par la réalisation de plots d'essais.

Un suivi rigoureux, automatisé et avec système d'alerte en cas de déplacements inattendus, tant en exécution qu'en exploitation, permet de garantir la sûreté et la pérennité de l'installation nucléaire sur un siècle d'exploitation.

Les principales recommandations formulées par l'Académie portent sur les points suivants :

- Valoriser l'interprétation des plots d'essais et réaliser un nouveau plot d'essai pour affiner les lois d'interactions sol-inclusions.
- Approfondir l'interprétation des essais de chargement pour consolider les paramètres géotechniques et lois d'interaction sol-inclusions.
- Prêter une grande attention à la phase de terrassement sous nappe pour maîtriser les risques de soulèvement du fond de fouille et la mise en bouillasse des sables lors de l'excavation.
- Mettre en œuvre des contrôles renforcés lors de l'exécution des remblais et barrettes.
- Porter une attention toute particulière à la durabilité des inclusions par le choix de bétons résistants aux eaux saumâtres et la spécification d'enrobages majorés.
- Évaluer le comportement sismique des fondations sous action sismique à partir de mouvements sismiques physiquement réalistes, définis au substratum et propagés dans le profil de sol de façon à être compatibles avec les caractéristiques mécaniques des terrains de fondation.
- Établir un programme de suivi avec méthodes d'auscultation des sols et des barrettes pour un suivi renforcé en exécution et en exploitation. Accompagner les mesures d'auscultation d'une modélisation avec un jumeau numérique, permettant de suivre, anticiper et comparer aux prédictions l'évolution de l'installation.

## Annexe 1

### Participants au groupe de travail et liens d'intérêt

- Yves Caristan, Académie des technologies, pas de lien d'intérêts
- Michèle Cyna, Académie des technologies, pas de lien d'intérêts
- Suzanne Lacasse, Académie des technologies, pas de lien d'intérêts
- Patrick Ledermann, Académie des technologies, pas de lien d'intérêts
- Alain Pecker, Académie des technologies, membre des 2 groupes d'experts d'EDF
- Philippe Pradel, Académie des technologies, pas de lien d'intérêts
- Jean Salençon, Académie des Sciences, pas de liens d'intérêts
- Pierre Sollogoub, Expert invité, pas de liens d'intérêts
- Bernard Tardieu, Académie des technologies, pas de lien d'intérêts mais membre du comité de revue de projet
- Dominique Vignon, Académie des technologies, pas de lien d'intérêts

Un lien d'intérêt est un lien actuel ou passé susceptible d'influencer les argumentations et les positions du contributeur à un rapport ou avis. C'est l'auteur, sous sa seule responsabilité, qui déclare l'absence de lien d'intérêt ou au contraire qui révèle son existence ; un contributeur peut avoir plusieurs liens d'intérêt.