

Évaluation du Procédé Géotechnique

Nom du procédé	INCLUSIONS SANS MATELAS (ISM) SOUS FONDATIONS
Demandeur	NGE FONDATIONS 29, rue des tâches 69800 Saint Priest

L'Evaluation du Procédé Géotechnique « **Inclusions Sans Matelas (ISM) sous fondations** » a été **approuvée** de manière consensuelle par les membres de la Commission Technique EPG dont le rôle et la composition sont précisés dans le référentiel relatif à l'évaluation des procédés géotechniques. Les conclusions sont détaillées en page 2.

L'évaluation repose sur :

- l'engagement que la mise en œuvre du procédé ISM n'a pas été identifiée comme une source potentielle de désordres ;
- l'analyse des performances du procédé géotechnique ISM dans le cadre d'une mission réalisée par les deux instructeurs missionnés de la commission EPG. Les conclusions de cette mission sont consignées dans un rapport d'analyse qui est présenté en annexe ;
- la jurisprudence, au moment de l'évaluation, de la famille à laquelle le procédé géotechnique est rattaché ;
- l'approbation consensuelle par les membres de la commission CT-EPG en date du 02/12/2025, du cahier des charges et des conclusions du rapport.

Avis de la commission technique EPG

Sous réserve d'appliquer les recommandations ci-dessous, la commission technique EPG :

- estime que : le procédé géotechnique « Inclusions Sans Matelas (ISM) sous fondations » mis en œuvre par la société **de NGE FONDATIONS** et décrit par le cahier des charges du procédé géotechnique Indice B.8 du 19/12/2025 est apte à satisfaire les exigences de fiabilité et de robustesse requis par le référentiel retenu ;
- évalue favorablement le procédé géotechnique avec des conditions particulières évoquées au §7 ci-après

La présente évaluation est établie **jusqu'au 30/01/2027**.

Le 30/01/2026

Le Président de la
Commission Technique EPG



Loïc LEURENT - CEREMA

Le Vice-Président de la
Commission Technique EPG



Fabien SZYMKEIWICZ - UGE

Évaluation du Procédé Géotechnique

1. Présentation du procédé

Le procédé « Inclusions Sans Matelas sous fondations » dit ISM est un **renforcement de sol constitué d'inclusions rigides réalisé sans matelas**.

La particularité du procédé est qu'il n'y a **pas de matelas de répartition ni de liaisonnement à la structure** (particularité par rapport aux recommandations ASIRI, qui considèrent systématiquement la mise en œuvre d'un matelas en tête d'inclusions).

Le procédé ISM est utilisé **sous fondations d'élément de structure pour la réduction des tassements et l'amélioration de la portance si nécessaire**.

Les inclusions sont réalisées à partir de techniques reconnues par les normes d'exécution de fondation profonde : **Vissé Moulé, Tarière Creuse ou Moulé Battu** (tube vibro foncé).

Le taux de travail homogénéisé sous semelles atteint couramment 3 bars à l'ELS caractéristique.

L'inclusion est réalisée en béton respectant les recommandations de la norme NF EN 206/CN dont la résistance est généralement supérieure à **12 MPa à 28 jours**.

Les inclusions ont un **diamètre de 250 à 820 mm, la longueur maximale est en fonction des capacités des foreuses** dans le contexte de sol du chantier.

2. Référentiel retenu pour l'évaluation

2.1. Normes et recommandations

- Recommandations ASIRI (2012),
- Eurocode 7 partie 1 avec son annexe nationale française
- Eurocode 7 partie 2
- Norme NF P94-261 et son amendement pour l'application nationale de l'Eurocode 7 à la justification des fondations superficielles
- Norme NF P94-262 et son amendement pour l'application nationale de l'Eurocode 7 à la justification des fondations profondes
- Recommandations de l'AFPS 2012 sur les améliorations et renforcement de sol sous sollicitations sismiques
- Normes NF EN 12699 et NF 1536 relatives à l'exécution des pieux avec refoulement de sol et pieux forés
- Cahier technique n°38 de l'AFPS mars 2017

2.2. EPG

Les référentiels pour l'évaluation des procédés géotechniques¹ :

- Fascicule 1 : Organisation des commissions et de la procédure EPG version 13/03/25.
- Fascicule 2 : Contenu détaillé d'une EPG et base de données associées du 23/09/25
- Guide pour la réalisation d'un cahier des charges soumis à une Évaluation de Procédé Géotechnique (EPG) – (version février 2019).
- Les jurisprudences, au moment de l'évaluation, de la famille à laquelle le procédé géotechnique est rattaché.

3. Documents

Les documents examinés dans le cadre de la mission sont les suivants :

- Cahier des Charges – document public – Inclusions Sans Matelas sous fondations - Indice B.1 du 19/12/2025 et ses 7 annexes,
- Etude paramétrique – Vérification des semelles -Indice A0 du 10/06/2025,
- Etude paramétrique Plaxis – Efforts H – 10/06/2025
- Résultats des essais HAROPA – Semelles sur inclusions rigides – 30/08/2023
- Présentation et analyses du plot d'essais de Sevron-sur-Vilaine - NGE Fondations – Semelles sur inclusions rigides – 24/09/2025
- Le dossier et récapitulatif des essais du 11_2023 présentant les résultats des essais de stabilité sur les bétons frais.
- La liste des références sur les années 2019 à 2025
- une attestation d'absence de sinistralité imputable au procédé ISM des années 2021 à 2024 .

4. Domaine d'emploi

Les ouvrages concernés peuvent être aussi bien des bâtiments industriels et commerciaux, des bâtiments de logements, des ouvrages de génie civil ou des ouvrages en terre (remblais d'accès à des ouvrages d'art, remblais routiers et ferroviaires, voiries et parkings) et des soutènements (mur poids, mur en L, ...) ; publics ou privés.

Seuls les ouvrages classés en **Catégorie Géotechnique 1 et 2** relèvent du périmètre de l'évaluation EPG.

Le procédé couvre également les projets soumis à des **exigences parasismiques**.

Pour les ouvrages de type éoliennes, il convient de se référer aux recommandations en vigueur (*Recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des fondations d'éoliennes, ...*).

Le procédé ISM s'applique aux **bâtiments courants jusqu'à R+3**. Dans le cas d'ouvrage présentant des concentrations de charges ELS caractéristiques importantes, la reprise des efforts peut imposer le recours à une conception par des massifs isolés renforcés par plus de cinq ISM, ou par un radier renforcé par un réseau de ISM. Le maillage de renforcement généralement dense et les concentrations de charges élevées imposent notamment de vérifier spécifiquement les effets des reports de charge en profondeur et le tassement du sol sous les groupes d'inclusions. Ces effets ne sont pas couverts par les méthodes traditionnelles de dimensionnement présentées dans le cahier des charges.

¹ <https://piles.cerema.fr/demande-pour-une-evaluation-membres-de-la-a2047.html>

Pour ces raisons, le domaine d'emploi est généralement limité aux immeubles de moins 4 ou 5 niveaux. Au-delà, des études spécifiques doivent vérifier que les critères de tassements absolus et différentiels sont respectés.

Les déformations verticales obtenues dans les modélisations sont comparées aux objectifs du projet.

5. Note à l'intention du maître d'œuvre et des contrôleurs

Le recours à un procédé ISM est généralement à considérer sur les projets comme une variante à la solution de fondation retenue par le marché.

Il convient alors de s'assurer que la synthèse géotechnique prévue en phase conception est adaptée à ce procédé et que la technique d'exécution.

Par ailleurs, on attire l'attention sur la nécessité d'éléments suffisamment précis au stade DCE/ACT pour le dimensionnement de ce type de procédé. Ces éléments sont précisés dans le cahier des charges.

L'emploi de ce procédé est soumis à l'appréciation du maître d'ouvrage sur conseils de son maître d'œuvre et éventuellement du géotechnicien et du bureau de contrôle. Cet avis intervient idéalement lors de la phase Assistance pour la passation des Contrats de Travaux (ACT selon la loi MOP).

6. Instructeurs du dossier

L'instruction de cette EPG a été suivie par :

- Gaël GOURRIN (SOCOTEC – Membre de la CT- EPG) : Rapporteur /Instructeur
- Loïc LEURENT (CEREMA – Membre de la CT- EPG) : Instructeur

Ces instructeurs ont été désignés par la commission EPG.

7. Avis et conditions particulières

La Commission Technique EPG, sur la base des différents documents examinés, du rapport d'analyse présenté en annexe, et de la présentation du procédé géotechnique devant la commission dédiée réunie le 02/12/2025, estiment que le procédé géotechnique « Inclusions Sans Matelas (ISM) sous fondations » mis en œuvre par la société NGE Fondations et décrit par le cahier des charges Indice B.1 du 19/12/2025 est **apte à satisfaire les exigences de fiabilité et de robustesse requis par le référentiel retenu.**

Cet avis favorable est donné, pour une période de 1 an à compter de la signature de la présente évaluation, compte tenu :

- de l'expérience pluri-annuelle de NGE Fondation matière de renforcement de sol (antérieure à 2019) ;
- de l'utilisation des méthodes de dimensionnement reconnues présentées dans ASIRI ; le temps pour NGE Fondations de finaliser l'ensemble des conclusions et analyses du plot d'essais de Sevron-sur-Vilaine.

Conditions spécifiques pour le prochain renouvellement et suivi de l'utilisation du cahier des charges par la commission Technique:

D'ici le prochain renouvellement, NGE Fondations sollicitera la CT-EPG pour effectuer à minima 5 avis spécifiques de chantier visant à vérifier le respect des demandes prévues dans le cahier de charges (dimensionnement, procédure d'exécution, réalisation...)

8. Validité et conditions particulières

La présente évaluation est établie **jusqu'au 30/01/2027**.

NGE Fondations devra informer la Commission Technique EPG de tout incident ou désordre provoqué par la mise en œuvre du procédé géotechnique ISM et de toute modification apportée au procédé durant cette période de validité.

En cas de modification du référentiel d'évaluation postérieur à la date d'émission de l'avis, l'EPG n'est plus valide.

Annexe

Rapport d'analyse du procédé géotechnique « ISM » de NGE Fondations

1. Spécificités du procédé

Le procédé « Inclusions Sans Matelas sous fondations », désigné par l'acronyme ISM, constitue une technique de **renforcement de sols développée par NGE FONDATIONS**.

La particularité de ce procédé réside dans la **suppression du matelas de répartition tout en maintenant l'absence de liaisonnement mécanique entre les inclusions et les fondations**. Cette caractéristique technique place les ISM en **dehors du champ d'application des recommandations ASIRI, tout en ne constituant pas non plus des fondations mixtes** au sens traditionnel du terme. Le procédé ISM s'inscrit ainsi dans une approche de fondation mixte, combinant les caractéristiques mécaniques du sol en place et celles des inclusions de renforcement.

L'utilisation du procédé ISM vise la **réduction des tassements, et si nécessaire l'amélioration de la portance de semelles ponctuelles, filante, de dalle champignon ou radier**.

En amélioration de la portance, le taux de travail homogénéisé sous semelles atteint couramment 3 bars à l'ELS caractéristique.

Le cahier des charges précise notamment les éléments suivants :

- Réalisation des inclusions
- Les éléments de justification sous effort vertical et horizontal pour la partie géotechnique et structurelle
- Les particularités en parasismique
- Les dispositions constructives particulières
- Les contrôles et essais en exécution
- le nombre d'essais de chargement statique*.
- Réalisation des arases et recépages

*La proposition de valeurs différentes de celles proposées dans les recommandations ASIRI est justifiée du fait que ces recommandations ne couvrent pas les inclusions sans matelas. Elle s'appuie par ailleurs sur des exigences décrites dans le §2.8 du présent rapport (ci-dessous).

2. Analyse du Cahier des Charges

2.1. Réalisation des inclusions

Les inclusions rigides ISM sont réalisées selon **trois techniques**, toutes reconnues par la norme NF P 94-262 relative à la justification des fondations profondes :

1. Réalisation par refoulement de sol (NF EN 12699) :
 - o Technique du **Vissé Moulé**
 - o Technique du **Battu Moulé** (tube vibro-foncé)

2. Réalisation par forage avec extraction de sol (NF EN 1536) :

o Technique de la **Tarière Creuse**

L'exécution est **réalisée selon les normes d'exécution** (NF EN 12699 et NF EN 1536) modulo des adaptations inhérentes à la conception et l'exécution des inclusions telles que définies dans le cahier des charges.

Les **diamètres de réalisation** sont entre 250 et 820 mm la longueur dépend de matériel de l'entreprise et du contexte.

Les inclusions sont bétonnées jusqu'au **niveau de la plateforme** de forage.

2.2. Recépage

Le recépage peut être réalisé selon deux méthodes. La première consiste en un **repiquage mécanique sur béton durci**. La seconde, applicable pour les **arases basses**, utilise un **recébois**.

Un **pré-recépage**, également appelé "arase", peut être effectué sur béton frais et réalisé à la louche. Cette méthode ne peut être mise en œuvre que si l'arase se situe à **une profondeur maximale d'un mètre** sous le niveau de la plateforme de forage et **se positionne obligatoirement au-dessus du niveau de la nappe phréatique**.

Le **repiquage sur béton durci** est systématiquement réalisé sur une profondeur minimale de 10 cm dans deux configurations spécifiques. La première concerne **les inclusions du domaine 1**, où cette opération garantit une surface de contact horizontale et de qualité avec la semelle. La seconde s'applique lors d'un **déplafonnement de la contrainte à l'ELU**, c'est-à-dire lorsque la contrainte de compression du béton dépasse 7 MPa. Cette opération vise à obtenir **une surface plane et à assurer un béton de qualité**.

Les **tolérances de recépage** sont définies à 0/10 cm par rapport à l'arase inférieure du massif de fondation.

L'annexe 11.7 du cahier des charges décrit ces méthodes de recepage et les points de contrôle nécessaires au procédé.

2.3. Matériaux

Les exigences relatives à la composition et aux propriétés des bétons suivent les recommandations de l'EN206-1 CN.

Exigences de durabilité :

Les obligations minimales définies pour une classe d'exposition X0 dans le tableau NAF1 de l'EN206/CN s'appliquent pour le béton prêt à l'emploi. Ces exigences sont adaptées selon ce même tableau, en fonction de la classe d'exposition et de la présence d'armatures dans les inclusions rigides.

Un dosage complémentaire en liant équivalent est prévu dans le cas des bétons et mortiers avec Dmax < 20 mm.

Exigence de stabilité à la mise en œuvre :

Dans le cadre de l'instruction du cahier des charges et conformément au protocole défini par la commission EPG, un certain nombre d'essais sur bétons et de suivis d'inclusions a été mené pour des bétons à faible teneur en ciment couramment utilisés par NGE fondations.

Ces essais ont montré un comportement adapté du béton lors de sa mise en œuvre sans modification sensible *in fine* du béton dans la structure.

Sur la base de ces éléments, des dispositions ont été retenues (annexe 11.2 du cahier des charges) permettant de répondre aux objectifs fixés par l'annexe D de NF EN 206/CN en termes de : stabilité de béton, maintien de l'homogénéité, essorage et ressoufrage limité du béton.

Exigences de résistance :

Les inclusions sont constituées de béton dont la résistance caractéristique à **28 jours est généralement supérieure à 12 MPa** (C12/15).

L'entreprise **peut avoir recours à des bétons spécifiques** présentant une résistance caractéristique comprise entre 8 et **de 12 MPa uniquement dans le cas de sollicitations des inclusions en compression simple**. Dans ce cas, et notamment lorsque la composition ne respecte pas les exigences de l'annexe D de la norme EN 206/CN, **le référent béton de NGE Fondations doit obligatoirement formaliser** son analyse technique justifiant l'utilisation du béton proposé.

2.4. Vérifications

Le domaine 1 ou 2 du renforcement est déterminé pour les différents ELU en référence à ASIRI.

Pour le **domaine 2**, les vérifications suivantes sont requises :

- Vérifications géotechniques
 - o La limitation de fluage sous ELS qp
 - o Tassements prévisibles et comparaison aux objectifs du projet
 - o Vérification de cohérence aux ELS de mobilisation du frottement latéral et de l'effort de pointe
- Vérifications structurales de l'inclusion,
 - o En compression
 - o En flexion composée
 - o Au cisaillement

En complément, pour les inclusions **du domaine 1**, les vérifications suivantes sont requises :

- Vérifications géotechniques :
 - o Portance de la semelle pour la charge transmise sur le sol (NF P94-261)
 - o Portance des inclusions pour la charge qu'elles reprennent (NF P94-262)
 - o Tassements prévisibles et comparaison aux objectifs du projet

2.4.1. En verticale

Sollicitation :

Pour les **fondations superficielles** de dimensions limitées (semelles isolées ou filantes), la répartition des contraintes appliquées au sol et à l'inclusion rigide est déterminée par un modèle analytique utilisant **la méthode MV3** telle que décrite dans ASIRI (validé par essai de chargement).

Pour les **fondations de surfaces importantes** (radiers, dalles champignon), une modélisation par **cellule élémentaire** est mise en œuvre.

Les **méthodes numériques par éléments finis** peuvent également être appliquées dans tous les cas de figure. Leur mise en œuvre nécessite toutefois une **étape préalable de vérification ou de calage du modèle numérique** avec un modèle simplifié et robuste.

Résistances :

Les **paramètres de résistances géotechniques et structuraux sont ceux des normes de fondation superficielle ou profonde.**

Les **paramètres k_1 et k_3 sont ceux d'ASIRI.**

Il est à noter que dans le cas de **chantier de faible importance**, des essais de chargement peuvent être omis mais la **résistance structurelle est minorée** par le coefficient k_3 adéquat et la **résistance géotechnique est minorée** par un facteur 1,5 supplémentaire.

La contrainte **résistante moyenne du béton à l'ELU est normalement plafonnée à 7MPa** (ASIRI). Il est **permis de déplafonner cette contrainte en respectant les exigences indiquées dans le cahier des charges :**

- Béton de classe minimale C25/30 conforme à la EN 206/CN et son annexe D
- d'une implantation des inclusions sous la semelle conservant un principe propre au renforcement de sol (maillage des inclusions et dimension des semelles superficielles adaptés),
- Recépage sur béton durci sur au moins 10 cm, permettant un contrôle minimal de la qualité de la tête des inclusions,
- Vérification des structures de semelles en tenant compte des réactions différencierées des colonnes et du sol.

2.4.2. En moment et horizontale

Le béton doit être de résistance > 12 MPa et conforme EN 206/CN.

Dans le domaine 1, aucun cisaillement n'est admissible si le diamètre minimal des inclusions est inférieur à 300 mm.

Sollicitation :

Les éléments fournis permettent de justifier les ouvrages de type inclusions rigides sans matelas lorsqu'ils sont soumis à des efforts horizontaux.

Dans le cas de **charges non-centrées appliquées sur les fondations**, la méthode de **Meyerhoff est utilisée pour évaluer la surface A'** sur laquelle la charge est appliquée.

Lorsque des **efforts horizontaux sont concomitants avec le moment**, ces derniers sont **appliqués sur l'aire effective A'** de la semelle.

Lorsque le rapport H/V (efforts concomitants à la base de la semelle) **dépasse 15%, la vérification des inclusions sous effort horizontal devient nécessaire**. Les méthodes MH1, MH2 ou MH3 de ASIRI sont appliquées. En dessous l'entreprise a démontré avec des calculs paramétriques l'absence de fibre tendu dans l'inclusion.

Résistance :

La vérification à la flexion et au cisaillement de l'inclusion rigide montre que dans ces différentes situations, les efforts restent encore en-dessous des valeurs admissibles par le béton.

Dans le cas de charges non-centrées appliquées sur les fondations, la méthode de **Meyerhoff** est utilisée pour dénombrer les inclusions et évaluer la surface de sol résistante.

Pour le béton, la résistance en **flexion est évaluée en domaine 1 et 2** pour les **inclusions non armées**. La vérification est conforme à la jurisprudence EPG. Pour les **inclusions armées** on utilise l'**Eurocode 2**.

La résistance au **cisaillement est conforme à ASIRI**.

La vérification à la flexion et au cisaillement de l'inclusion rigide montre que dans ces différentes situations, les efforts restent encore en-dessous des valeurs admissibles par le béton.

Le rapport de $H/V = 0,15$ semble être une limite acceptable pour s'affranchir des vérifications particulières vis-à-vis des efforts horizontaux. Une vérification complète de l'intégrité de l'inclusion rigide sera effectuée systématiquement dans le cas suivant : $H/V > 15\%$.

La vérification de **résistance horizontale sous la semelle n'est pas faite par NGE**, les dimensions de semelles fournies par le gros œuvre sont réputées prendre en compte cette vérification.

2.5. Vérification de la structure de la semelle

En accord avec le BE structure, **le ferraillage des semelles est vérifié systématiquement** en distinguant les raideurs de sol des raideurs des inclusions. Ces vérifications nécessitent une collaboration étroite entre les BET structure et de NGE.

Nota : Pour les radiers souples de dimensions pluri-métriques, seule une approche ISS est en mesure de rendre compte de manière pertinente de la répartition des efforts dans la fondation et les inclusions.

2.6. Cas de la situation sismique

Les vérifications sous efforts sismiques sont faites en domaine 1 ou en domaine 2 s'il y a une nécessité de continuité d'exploitation post-sismique.

Sans matelas, il convient d'appliquer les recommandations du cahier technique 38 (AFPS). On rappelle les étapes et principaux points suivants pour les vérifications au séisme des semelles sous inclusions rigides.

- 1- Interaction sol-structure : les fondations peuvent être considérées comme des appuis bloqués ou tenant compte d'une raideur adaptée de la fondation renforcée, (charge BET en collaboration avec NGE Fondations)
- 2- Une fois obtenue le torseur d'efforts à la base de la fondation superficielle, ce dernier est réparti en considérant une méthode MH1 (répartition des efforts horizontaux au prorata de l'inertie verticale du sol et des inclusions). Ceci permet de caractériser les effets inertiels dans les inclusions (effort tranchant et moment fléchissant), après avoir appliqué les coefficients de sur-résistances pour les ouvrages DCM/DCH (charge BET structure), selon chapitre 1.5 du CT38.
- 3- Les effets cinématiques s'appliquent conformément au chapitre 7 du CT38 ;
- 4- Le cumul des effets inertiels et cinématiques sera conforme au chapitre 8 du CT38.
- 5- Les dispositions constructives du chapitre 10, définies dans le CT38 s'appliquent.

Nota 1 : Dans les situations sismiques, le cas des inclusions sans matelas du domaine 1 sous radier, n'est pas couvert par les EPG.

Avec matelas, ce cas de figure sort du domaine de validation du cahier des charges, on rappelle toutefois la nécessité d'appliquer les recommandations du « Guide technique AFPS/CFMS Procédé d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismique », et notamment

- Les vérifications des fondations et inclusions, sous efforts inertIELS et le cas échéant cinématiques,
- Les recommandations en terme de dimensions, caractéristiques et contrôles du matelas, indiqués au §5.8.5.2 du guide ;
- Les vérifications STR des inclusions conformément au §5.8.4.2 et 5.8.4.3 du guide ;
- Les vérifications en terme de liquéfaction des sols.

Conformément au §4.4.2.6 de la norme EN 1998-1, les effets des sur-résistances sont à considérer.

Avec ou sans matelas, les inclusions du domaine 1 doivent restées entièrement comprimées sur la hauteur non armée. A défaut, il convient *a minima* de mettre en œuvre les armatures minimales prévues dans la NF P 94-262 (rappelées §7.1 du cahier des charges).

2.7. Dispositions liées à l'implantation

Les inclusions rigides doivent être **réparties de manière homogène sous les fondations (voir annexe 11.1 du cahier des charges)**. La **distance maximale** entre deux inclusions est de **2.5 m sous fondations isolées**. Sous fondations de surface importante, la surface de la maille élémentaire est de **9m²**.

Une **inclusion unique sous une semelle isolée** a une capacité portance limitée à **15 T ELS** et **20 T ELU**.

2.8. Contrôles

Des **essais d'information** sont réalisés au démarrage de chaque chantier. Sur chaque zone géotechnique homogène, il est effectué un **essai pour 300 inclusions rigides** mises en œuvre, avec un **minimum de 2 et un maximum de 5** essais par zone géotechnique homogène du projet.

Ces essais ont pour objectifs notamment de :

- **Vérifier que les caractéristiques géométriques** des ISM (profondeur, diamètre) peuvent être obtenues avec le matériel utilisé,
- **Identifier les paramètres de forage caractéristiques de l'horizon d'ancrage,**

Ces informations sont complétées et comparées au fur et à mesure de l'avancement du chantier. Les essais d'information font l'objet d'un document de suivi consignant l'ensemble des éléments relevés.

Il est prévu **1 essais d'impédance toutes les 150 inclusions avec un minimum de 3 essais** (nombre d'essai conforme à la jurisprudence).

La fréquence des essais de portance indiqué au § 9.2.2 du cahier des charges est conforme à la jurisprudence EPG.

Cette modification par rapport à ASIRI est par ailleurs assujettie à L'analyse de 10 essais de chargement statique « de portance » par an, reposant sur la comparaison du comportement

charge/enfoncement avec la prévision des modèles de calculs utilisés par l'entreprise NGE Fondations.

La charge maximale de l'essai est de **1,5 fois la charge à l'ELS**.

11. Cas des ouvrages élancés et grues

Le cas des ouvrages élancés (tour, grues...) nécessite une attention particulière du fait de l'absence de possibilités de reprise d'efforts de traction par les inclusions.

Pour les ouvrages de type grue notamment, les sollicitations cycliques ne peuvent être ignorées. Il convient alors, dans le cas d'inclusion du domaine 1, et en complément des vérifications sous efforts transversaux, de prévoir *a minima* les armatures précisées au §7.1 du cahier des charges.

3. Vérification de l'utilisation des jurisprudences

- Jurisprudence n°03 - Conformité Béton EN206 /CN Annexe D - EC2 (provisoire)
 - o Rapport en cours de production par l'entreprise
- Jurisprudence n°04 - Utilisation de béton ou mortier de faible résistance caractéristique
 - o Pas d'élément de preuve nécessaire, l'entreprise a intégré la jurisprudence dans son cahier des charges
- Jurisprudence n°05 - Contrainte admissible en flexion composée pour inclusion non armée
 - o La méthode de calcul de l'entreprise est reconnue
- Jurisprudence n°07 – Dispositions sismiques et double domaine
 - o Pas d'élément de preuve nécessaire, l'entreprise a intégré la jurisprudence dans son cahier des charges
- Jurisprudence n°09 – Cas des sols soumis à retrait gonflement
 - o Pas d'élément de preuve nécessaire, l'entreprise a intégré la jurisprudence dans son cahier des charges
- Jurisprudence n°11 – Inclusions sous grue
 - o Pas d'élément de preuve nécessaire, l'entreprise a intégré la jurisprudence dans son cahier des charges
- Jurisprudence n°12 – Modification du k3 pour les entreprises justifiant d'une expérience importante
 - o Les essais de chargements permettent de valider cette jurisprudence
- Jurisprudence n°13 - Cas des IR armées : section minimale d'armatures
 - o Pas d'élément de preuve nécessaire, l'entreprise a intégré la jurisprudence dans son cahier des charges

4. Résultats des essais de chargement expérimentaux

4.1. Rouen

En 2023, une campagne d'essais de chargement verticaux a été menée sur le site de HAROPA à Rouen. Les configurations testées comprenaient :

- Une inclusion rigide isolée,
- Une semelle sans renforcement,
- Une semelle renforcée par inclusions.

Les résultats obtenus ont confirmé la validité des méthodes de calcul établies par les recommandations ASIRI appliquée aux cas sans matelas sans répartition.

4.2. Rennes

En 2025, des plots d'essais de chargement verticaux et inclinés sur massif de 4 inclusions, ont été réalisés à Sevron-sur-Vilaine. Le programme expérimental a porté sur :

- Des essais verticaux effectués sur des inclusions seules, une semelle non renforcée et une semelle sur inclusions,
- Des essais avec charge inclinée menés sur deux types de semelles renforcées : l'une avec des inclusions classiques, l'autre avec des inclusions à têtes élargies.

L'analyse des résultats est actuellement en cours. Les conclusions préliminaires tendent à confirmer la pertinence des principes établis dans les recommandations ASIRI appliquée aux cas sans matelas de répartition.

5. Analyses paramétriques

5.1. Effet d'un effort horizontal en tête

Une analyse paramétrique a été conduite à l'aide du logiciel Plaxis sous différentes configurations d'inclusions et conditions de sol afin d'identifier le ratio H/V seuil à partir duquel une fibre extrême de l'inclusion commence à être tendue.

Les études paramétriques effectuées, sur un sol mous de module EM = 2 MPa, ont démontré que lorsque le rapport H/V (efforts concomitants à la base de la semelle) reste inférieur à 15%, les inclusions demeurent entièrement comprimées. Au-delà de ce seuil de 15%, une sollicitation en traction peut apparaître dans la fibre extrême de l'inclusion pour la situation enveloppe considérée, nécessitant alors des vérifications complémentaires selon les méthodes analytiques MH1, MH2 ou MH3 décrites dans ASIRI, ou par des méthodes numériques par éléments finis ou différences finies (avec calage selon une méthode p-y).

5.2. Règle de dimension de semelle

Une analyse paramétrique portant sur les effets des inclusions sur les massifs de fondation en béton a été réalisée. Cette étude a examiné différentes configurations d'inclusions, de chargements et de conditions de sol dans le but d'établir une règle simple de dimensionnement des semelles qui n'impactera pas leur ferraillage.

Une règle sur les hauteurs de semelle en fonction des situations est en cours d'élaboration mais n'est pas finalisé.

En l'absence, la vérification du ferraillage des semelles est faite systématiquement. La règle de dimension de semelles sera ajoutée lors du prochain renouvellement.

6. Cas des sols soumis à retrait/gonflement

Les cas des ouvrages sur semelles et radiers sur inclusions rigides sujets aux mêmes risques de retrait-gonflement que les fondations superficielles traditionnelles. Il est également rappelé que le renforcement de sol par colonne ISM ne permet pas de traiter l'aléa de retrait gonflement des argiles.

Lorsqu'un site est exposé à l'aléa retrait-gonflement du sol ; les pièces du marché comportent :

- des essais en laboratoire adaptés confirmant et caractérisant la sensibilité des sols,
- une étude de sol confirmant la sensibilité de l'ouvrage au phénomène.

Dans ces conditions, l'ouvrage dans son ensemble doit être alors conçu pour réduire et s'adapter à l'impact du retrait gonflement. Des dispositions spécifiques adaptées à la configuration du site et à l'ouvrage sont alors nécessaires. Elles portent à la fois :

- sur la limitation des variations hydriques du sol de fondations, et
- sur la structure de l'ouvrage (chaînage, profondeur des fondations...).

Nota : Lorsque la solution de renforcement constitue une solution variante au marché, il est possible que les dispositions prévues au marché de base soient étoffées (cas par exemple d'un projet prévu sur fondations profondes en solution de base avec des dispositions constructives vis-à-vis du retrait gonflement des argiles limitées).

7. Analyse des références

Aucun désordre imputable au procédé, n'a été constaté sur les chantiers réalisés avec ce procédé depuis 2019.

Gaël Gourrin
Spécialiste Sols et Fondations – SOCOTEC
Rapporteur du dossier