

Évaluation du procédé géotechnique Renforcement de sol par inclusions rigides

Nom du procédé	Renforcement de sol par inclusions rigides, cas particuliers des semelles et radiers mixtes
Demandeur	Keller-Fondations Spéciales 2 rue Denis Papin CS 69224 DUTTLENHEIM 67129 MOLSHHEIM CEDEX

L'évaluation du procédé géotechnique a été conduite par le Cerema et l'Université Gustave Eiffel et approuvé de manière consensuelle par une commission dédiée (dont le rôle, la composition, etc. sont précisés dans le référentiel relatif à l'évaluation des procédés géotechniques). Cette évaluation est jointe ci-après, d'une durée de validé jusqu'au 28/02/2026.

L'évaluation repose sur :

- la demande de l'entreprise Keller sollicitant l'Université Gustave Eiffel et le Cerema pour un renouvellement du cahier des charges « Renforcement de sol par inclusions rigides, cas particuliers des semelles mixtes et radiers mixtes » avec l'engagement que la mise en œuvre de ce procédé n'a pas été identifiée comme une source potentielle de désordres ;
- l'analyse des performances du procédé géotechnique « Renforcement de sol par inclusions rigides, cas particuliers des semelles mixtes et radiers mixtes » dans le cadre d'une mission réalisée par l'Université Gustave Eiffel et le Cerema avec l'appui d'un expert. Les conclusions de cette mission sont consignées dans un rapport d'analyse qui est présenté en annexe ;
- le référentiel pour l'évaluation des procédés géotechniques (version 1 en date de Février 2019), complété des dispositions spécifiques relatives aux inclusions validées par la commission EPG à la date de la présente évaluation.

Fontenay-sous-Bois, le 15 Février 2023.

Fabien Szymkiewicz

Université Eiffel /GERS/SRO

Cécile Maurel

Cerema Ile-de-France
Département Géosciences Risques

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'C. Maurel'.

1. Présentation du procédé

Le procédé « Renforcement de sol par inclusions rigides, cas particuliers des semelles mixtes et radiers mixtes » rentre dans le cadre des méthodes de dimensionnement et d'exécution des inclusions rigides, avec la particularité de considérer les inclusions sans matelas (particularité par rapport aux recommandations ASIRI, qui considèrent systématiquement la mise en œuvre d'un matelas en tête d'inclusions).

2. Référentiel retenu pour l'évaluation du procédé géotechnique « Renforcement de sol par inclusions rigides, cas particuliers des semelles mixtes et radiers mixtes »

Le référentiel retenu pour l'évaluation du procédé géotechnique « Renforcement de sol par inclusions rigides, cas particuliers des semelles mixtes et radiers mixtes » comprend :

- les recommandations ASIRI (2012), traitant des inclusions rigides avec matelas ;
- l'Eurocode 7 partie 1 avec son annexe nationale française ;
- l'Eurocode 7 partie 2 ;
- la norme NF P94-261 et son amendement pour l'application nationale de l'Eurocode 7 à la justification des fondations superficielles ;
- la norme NF P94-262 et son amendement pour l'application nationale de l'Eurocode 7 à la justification des fondations profondes ;
- le guide pour la réalisation des cahiers des charges soumis à une évaluation de Procédé Géotechnique V1 de février 2019 ;
- la norme NF EN 12699 relative à l'exécution des pieux avec refoulement de sol ;
- la norme NF EN 1536/A1 relative à l'exécution des pieux forés ;
- AFPS-CFMS – guide technique (2012) « procédés d'amélioration et de renforcement de sol sous actions sismiques » ;
- AFPS – le cahier technique n°38 (2017) Guide pour la conception et le dimensionnement des fondations profondes sous actions sismiques des bâtiments à risque normal.

3. Documents

Les documents examinés dans le cadre de la mission confiée à l'UGE et au Cerema sont les suivants :

- **le cahier des charges du procédé géotechnique « Renforcement de sol par inclusions rigides, cas particuliers des semelles mixtes et radiers mixtes » version 6.2 du 15/02/2022 et ses 6 annexes ;**
- rapport n° 2017-CC IR-001 ind. C « Analyse des contraintes intrinsèques dans les inclusions rigides sans matelas sous sollicitations horizontales » ;
- rapport n° NTE 350 IR 17002 A ind. A « Analyse de la résistance structurelle des inclusions sans matelas » ;
- la note de calcul Keller du 25/03/2021 faisant l'analyse de l'impact de l'absence de matelas granulaire intercalé sur le coffrage/ferraillage des semelles ;
- Etude paramétrique INSA KELLER du 02/12/2021 : « Dimensionnement des semelles mixtes - semelles isolées » ;
- Présentation Keller 06/12/2021 : « Béton des inclusions rigides » ;
- plot expérimental de Saint-Martin-d'Hères, rapport LCPC de Michel Bustamante (octobre 2005) ;
- la synthèse annuelle des essais de chargement sur inclusions rigides et leur comparaison à la théorie ;
 - 2018 – Rapport d'essais de chargement statique d'inclusions rigides validation des modèles de calcul.

- 2019 – Rapport d’essais de chargement statique d’inclusions rigides validation des modèles de calcul.
- 2020 – Rapport d’essais de chargement statique d’inclusions rigides validation des modèles de calcul.
- la liste des références sur les années 2018 à 2022 ;
- les attestations de sinistralité relatives au procédé inclusions rigides des années 2018 à 2023.

4. Avis

L'Université Gustave Eiffel et le Cerema, sur la base des différents documents examinés et du rapport d'analyse présenté en annexe 1, estiment que le procédé géotechnique « Renforcement de sol par inclusions rigides, cas particuliers des semelles mixtes et radiers mixtes » mis en œuvre par l’entreprise Keller et décrit par le cahier des charges du procédé géotechnique Edition 6.2 du 15/02/2023 est apte à satisfaire les exigences de fiabilité et de robustesse requis par le référentiel retenu.

5. Domaine d’emploi

Le domaine d'application concerne tous types d’ouvrages, aussi bien publics que privés. Dans le cas de bâtiment en béton armé de hauteur importante, supérieure à R+4 ou R+5 pour lesquels ce type de procédé est associé généralement à une fondation de type radier, il convient d’être particulièrement attentifs aux effets des tassements sur l'ouvrage, à la répartition des efforts des inclusions/sol et des résistances mobilisées, interdépendant de la rigidité des éléments.

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, ...*).

Sous situation sismique, des dispositions particulières sont prévues, elles sont rappelées pour l’essentiel, en annexe du présent avis §10.

6. Validité

La présente évaluation est valable jusqu'au 28/02/2026.

Keller Fondations Spéciales devra informer l'Université Gustave Eiffel ou le Cerema de tout incident ou désordre provoqués par la mise en œuvre du procédé géotechnique « Renforcement de sol par inclusions rigides, cas particuliers des semelles mixtes et radiers mixtes » et de toute modification apportée au procédé durant cette période de validité.

Annexe – Rapport d'analyse du procédé géotechnique « Renforcement de sol par inclusions rigides, cas particuliers des semelles mixtes et radiers mixtes »

1. Spécificités du procédé « Renforcement de sol par inclusions rigides, cas particuliers des semelles mixtes et radiers mixtes »

Le procédé « Renforcement de sol par inclusions rigides, cas particuliers des semelles mixtes et radiers mixtes » consiste en une amélioration des sols par inclusions rigides **sans recours à un matelas de répartition**.

Des éléments spécifiques sont alors fournis concernant :

- les méthodes de dimensionnements sous efforts verticaux et horizontaux ;
- le paramètre k_3 utilisé, dans les configurations où aucun essai de chargement n'est réalisé ;
- le nombre d'essais de chargement statique.

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 §7 du présent rapport (ci-dessous).

2. Note à l'intention du maître d'œuvre, du géotechnicien et du bureau de contrôle

Le recours à un procédé de type « Renforcement de sol par inclusions rigides, cas particuliers des semelles mixtes et radiers mixtes », sans matelas de répartition, 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.

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.

Ces dispositions peuvent avoir un impact sur la conception ou les méthodes d'exécution des ouvrages associés (lots gros œuvre, terrassement...).

Elles sont mises à jour en phase de préparation de travaux.

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).

3. Matériau cimentaire constitutif des inclusions

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 $D_{max} < 20$ 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 Keller.

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 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 ressuage limité du béton.

Des recommandations sont rappelées à l'annexe 5 du cahier des charges. Elles portent :

- sur le dosage en liant total et fines des bétons spécifiés à la commande, et
- des contrôles sur béton frais.

4. Transmission des efforts horizontaux aux inclusions rigides sans matelas intercalaire

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

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 $H/V = 0,2$ semble être une limite acceptable pour s'affranchir des vérifications particulières vis-à-vis des efforts horizontaux sous semelles superficielles.

Une vérification complète de l'intégrité de l'inclusion rigide sera effectuée systématiquement dans le cas suivant : $H/V > 20 \%$.

Les dispositions prévues au § 12.2.1(8) de la norme NFP 94-262 relative aux inclusions non armées s'appliquent aux inclusions du domaine 1. Conformément au § 3.1.3 chapitre 5-ASIRI, le diamètre minimal des inclusions non armées est ramené à 300 mm.

Lorsque les calculs montrent la nécessité d'armer les inclusions rigides, des exigences en termes de section minimale et longueur de cages d'armatures ont été retenues conformément à la norme NF P 94-262.

5. Déplafonnement de la contrainte admissible STR à ELU dans les inclusions

La résistance de calcul STR sous efforts ELU (F_{cd}) de 7 MPa recommandée dans ASIRI chapitre 5 §3.1.1.2. peut être déplafonnée sous réserve :

- de l'utilisation d'un matériau conforme à la norme EN 206/CN et présentant une résistance à 28 jours f_{c28} supérieure à 25 MPa,
- 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),
- d'un repérage minimal des inclusions de 10 cm permettant un contrôle minimal de la qualité de la tête des inclusions,
- d'un dimensionnement spécifique du ferrailage des semelles en tenant compte des réactions différenciées des colonnes et du sol.

6. Le paramètre k_3 concernant le matériau constitutif des inclusions

Des valeurs du paramètre k_3 ont été proposées dans les configurations où aucun essai de chargement statique n'est réalisé, en tenant compte des précisions suivantes :

- les configurations permettant de ne pas réaliser des essais de chargement sont identiques à celles décrites pour les inclusions rigides avec matelas (*cf.* recommandations ASIRI) ;

- des valeurs légèrement plus fortes que celles proposées pour les inclusions rigides avec matelas ont été retenues.

Cette modification est par ailleurs assujettie aux deux conditions suivantes :

- La réalisation d'au moins 10 chantiers par an sur les trois dernières années ;
- 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 Keller fondations spéciales.

Ces conditions sont remplies par Keller pour les 3 dernières années.

7. Nombre d'essais de chargement statique

Un nombre d'essais de chargement statique « de qualité ou de portance » a été proposé, conduisant à des fréquences plus faibles que celles retenues pour les inclusions rigides avec matelas.

Les conditions que l'entreprise doit remplir sont identiques à celles précisées ci-dessus pour le coefficient k_3 .

8. Efforts dans la semelle

Les éléments fournis montrent que les semelles fondées sur des inclusions rigides sans matelas ne nécessitent pas de dimensionnement spécifique par rapport à des semelles fondées directement sur les terrains sous réserve de prise en compte des recommandations en termes de positionnement, d'espacement des inclusions et de vérifications de poinçonnement de la semelle.

Au-delà des conditions définies dans le cahier des charges, une vérification du ferrailage des semelles est nécessaire à charge du bureau d'étude structure, avec prise en compte des raideurs différenciées des inclusions et du sol, fournies par Keller.

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 entre le sol et les inclusions.

9. Cas des ouvrages élancés et grues

Le cas des ouvrages élancés (tours, 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 relevant du domaine 1, les inclusions rigides sont systématiquement armées et a minima selon le ferrailage minimal défini au §4.5 du cahier des charges.

10. Cas d'utilisation du procédé en situation 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 Keller fondations spéciales) ;

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, selon chapitre 1.5 du CT38 (charge entreprise) ;

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, les inclusions sans matelas du domaine 1 sous radier, ne sont pas autorisées.

Nota 2 : Les inclusions rigides de type jet-grouting (procédé Soilcrete®), de sol malaxé aux liants (Deep Soil Mixing) ou d'injection solide (procédé Compactage Horizontal Statique® ou CHS®) sortent du domaine de validation du procédé sous situation sismique.

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 termes de dimensions, caractéristiques et contrôles du matelas, indiquées 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 termes de liquéfaction des sols.

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

Conformément au guide § 5.8.4.2, 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 §4.5 du cahier des charges).

11. Cas des sols soumis à retrait/gonflement

Les cas des ouvrages sur semelles et radier mixtes sur inclusions sont sujets aux mêmes risques de retrait-gonflement que les fondations superficielles traditionnelles. Il est également rappelé que le renforcement de sol par inclusions rigides 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 hydrique du sol de fondations, et
- sur la structure de l'ouvrage (chainage, profondeur des fondations...).

Nota : Lorsque la solution inclusion sans matelas 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).

12. Analyse des références

Depuis 2008, date du premier cahier des charges, trois sinistres ont été constatés sur les ouvrages fondés sur ce procédé et réalisés par Keller.

Ces trois désordres sont liés à des problématiques de prise en compte des effets du retrait/gonflement sur le dimensionnement des fondations.

Dossier Instruit par :

Loïc LEURENT
Cerema

