

Evaluation du procédé géotechnique

Colonnes à Module Contrôlé CMC

Nom du procédé	Colonnes à Module Contrôlé CMC Cas d'application sans matelas de répartition
Demandeur	Ménard 2 rue Gutenberg 91620 NOZAY

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 validité jusqu'au **19/10/2026**.

La prolongation de cette évaluation repose sur :

- la demande de l'entreprise Menard sollicitant l'Université Gustave Eiffel et le Cerema pour un renouvellement du cahier des charges CMC avec l'engagement que la mise en œuvre du procédé CMC n'a pas été identifiée comme une source potentielle de désordres ;
- la liste des chantiers réalisés par CMC sur ces trois dernières années mettant en œuvre le procédé CMC ;
- l'analyse des performances du procédé géotechnique CMC 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 19/10/2023.

Fabien Szymkiewicz

Université Eiffel /GERS/SRO



Cécile Maurel

Cerema Ile-de-France
Département Géosciences Risques



1. Présentation du procédé

Le procédé « Colonnes à Module Contrôlé/CMC sans matelas de répartition » 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 « Colonnes à Module Contrôlé sans matelas de répartition »

Le référentiel retenu pour l'évaluation du procédé géotechnique « Colonnes à Module Contrôlé/CMC sans matelas de répartition » 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 ;
- 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 - le cahier technique n°38 (2017) Guide pour la conception et le dimensionnement des fondations profondes sous actions sismiques des bâtiments à risque normal ;
- AFPS – Guide technique (Juillet 2012) – « Procédé d'amélioration et de renforcement des sols sous actions sismiques ».

3. Documents

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

- le cahier des charges du procédé géotechnique « Colonnes à module Contrôlé/CMC sans matelas de répartition » version 5 du 02/10/2023 et ses annexes,
- les analyse du comportement sous charges verticales et horizontales, dans le cadre du plot d'essai de Venette, indice B, datant du 28/05/2015,
- l'analyse de l'impact des CMC sur la répartition des efforts dans les semelles du 15/05/2015,
- note d'analyse ferrailage des fondations superficielles INGEROP/MENARD du 30/03/2021,
- fondation mixte soumise à efforts horizontaux et verticaux - effet de l'excentricité des charges verticales sur les efforts internes inclusions, présentation Comparaison Plaxis 3D / CMC-footing MH2 du 09/03/21,
- note de justification des inclusions rigides non armées du 11/07/23,
- la synthèse annuelle des essais de chargement sur CMC et leur comparaison à la théorie
 - 2019 – 24 essais type essais de contrôle ;
 - 2020 – 22 essais type essais de contrôle ;
 - 2021 – 10 essais type essais de contrôle ;
- les divers éléments relatifs à l'instruction antérieure du cahier des charges :
 - cahier des charges version 4 du 30/06/2021,
 - cahier des charges version 3 du 10/01/2018,
 - cahier des charges version 2 et avis de Bureau Véritas du 01/07/2015 ;

- la liste des références sur les années 2014 à 2022 ;
- une attestation d'absence de sinistralité imputable au procédé CMC des années 2017 à 2022.

4. Avis

L'Université Gustave Eiffel et le Cerema, sur la base des différents documents examinés et du rapport d'analyse présenté en annexe, estiment que le procédé géotechnique « Colonnes à module Contrôlé/CMC sans matelas de répartition » mis en œuvre par la société Menard et décrit par le cahier des charges du procédé géotechnique Edition 5 du 02/10/2023 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 type d'ouvrages, aussi bien public que privé. Dans le cas d'ouvrage lourds, par exemple bâtiment en béton armé de hauteur importante supérieure à R+4 ou R+5, il convient d'être particulièrement attentifs aux effets des tassements sur l'ouvrage et à la répartition des efforts inclusions/sol.

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 §12.

6. Validité

La précédente évaluation est prolongée **jusqu'au 19/10/2026**.

Menard devra informer l'Université Gustave Eiffel ou le Cerema de tout incident ou désordre provoqué par la mise en œuvre du procédé géotechnique « Colonnes à module Contrôlé/CMC sans matelas de répartition » et de toute modification apportée au procédé durant cette période de validité.

Annexe – Rapport d'analyse du procédé géotechnique « Colonnes à module Contrôlé/CMC sans matelas de répartition »

1. Spécificités du procédé « Colonnes à module Contrôlé/CMC sans matelas de répartition »

Le procédé « Colonnes à module Contrôlé/CMC sans matelas de répartition » consiste en une amélioration des sols par inclusions rigides réalisées selon le procédé « colonnes à module contrôlé » 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,
- les justifications structurales des inclusions dans le domaine 1 et 2,
- les dosages minimaux en ciment,
- 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.

2. Description du procédé

Le procédé « colonnes à module contrôlé » consiste à réaliser une inclusion de mortier ou béton par refoulement et sans extraction notable de matériaux, foncée par l'application simultanée d'une force d'appui et d'un couple de rotation. Cette technique de mise en œuvre est appelée pieux vissés moulées - catégorie 3 et de classe 7 dans l'annexe A de la norme NF P94-262.

En cas de couches indurées, le recours ponctuel à une mise en œuvre par forage sans refoulement peut éventuellement être nécessaire.

Des méthodologies de fonçage ou forage pendulaire ne permettant pas l'obtention des enregistrements définis en annexe 3, peuvent être autorisées sous réserve que :

- le dimensionnement prennent en compte les spécificités liées à ces méthodes d'exécution et contrôles,
- l'impossibilité de réaliser des enregistrements des paramètres soit palliée par des contrôles sur site équivalents, pour chaque inclusion.

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

Le recours à un procédé de type « Colonnes à module Contrôlé/CMC 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. Ils sont mis à jour en phase de préparation de travaux.

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 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).

4. Matériau cimentaire constitutif des inclusions

Les exigences relatives à la composition et aux propriétés des bétons suivent les recommandations de la norme NF EN 206/CN.

Exigences de durabilité :

Les obligations minimales définies pour une classe d'exposition X0 dans le tableau NAF1 de la NF EN 206/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 permis 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 liant équivalent, couramment utilisés par Menard.

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.

Cas des mortiers

Des essais sur mortiers à faible teneur en liant équivalent et carottage d'inclusion, sont à ce jour en cours de réalisation par Menard. Dont l'objectif est de confirmer la stabilité de béton, maintien de l'homogénéité, essorage, ressuage limité et résistance adaptée des bétons. Dans l'attente de ces résultats des valeurs de dosage en liant total correspondantes aux pratiques historiques de Menard ont été retenues.

5. Reprise des efforts verticaux de compression

Des essais de chargement réalisés en vraie grandeur sur des semelles de fondations mixtes ont été réalisés. Ils ont permis de justifier la pertinence de l'approche MV2 (ASIRI chapitre 3 §3.1.3.2) utilisée dans le cadre de ce cahier des charges, pour la définition :

- de la répartition des efforts verticaux entre le sol et les inclusions ;
- du tassement de la fondation.

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

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

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

7. 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 recépage 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.

L'utilisation de mortier sur un chantier ne permet pas de déplafonner cette valeur.

8. 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, permettant la comparaison du comportement charge/enfoncement avec la prévision des modèles de calculs utilisés par l'entreprise Ménard.

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

9. 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 .

10. 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 Menard.

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.

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 §5.6.5 du cahier des charges.

12. 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 Ménard)
- 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.

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 §5.6.5 du cahier des charges).

13. 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).

14. Analyse des références

Aucun désordre imputable au procédé, n'a été constaté sur les chantiers réalisés avec ce procédé depuis 2015.

Dossier Instruit par :

Loïc LEURENT
Cerema Hauts-de-France

