

## Evaluation du procédé géotechnique Colonnes à Module Contrôlé CMC

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

L'évaluation du procédé géotechnique Colonne à Module Contrôlé - cas d'application sans matelas de répartition, établie le 31 janvier 2018 a été conduite par l'IFSTTAR (actuellement Université Gustave Eiffel) et le Cerema et approuvée de manière consensuelle par une commission dont la composition est précisée dans le référentiel relatif à l'évaluation des procédés géotechniques. Cette évaluation est jointe ci-après, d'une durée de validité jusqu'au 31/12/2021.

La durée de validité de cette évaluation est prolongée jusqu'au **31 décembre 2022**.  
Les conclusions sont détaillées en page 2

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 ;
- l'instruction en cours de cette demande ;
- 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 du 27/02/2019) ;

Fontenay-sous-Bois, le 30 Décembre 2021.

Fabien Szymkiewicz

Université Eiffel /GERS/SRO



Cécile Maurel

Cerema Ile-de-France  
Département Infrastructures  
Risques Matériaux



## 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 4 du 30/06/2021 et ses sept annexes,
- les analyses 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.
- 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
- les divers éléments relatifs à l'instruction antérieure du cahier des charges :
  - 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 2020 ;
- une attestation d'absence de sinistralité relatif au procédé CMC des années 2017 à 2020.

#### **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 » décrit par le cahier des charges du procédé géotechnique Edition 4 du 30/06/2021 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 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 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 §11.

#### **6. Validité**

La précédente évaluation est valable jusqu'au 31/12/2021.

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,
- 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. 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 se raccroche généralement aux pieux vissés moulées - catégorie 3 et de classe 7 décrites dans la norme NF P 94-262.

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 prenne 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,
- soit fourni dans les DOE a minima 1/20 des autocontrôles.

### **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.

#### **4. Matériau cimentaire constitutif des inclusions**

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

Un dosage complémentaire en liant équivalent est prévu dans le cas des mortiers.

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 permet de déplaçonner la contrainte moyenne limite à l'ELU de 7 MPa recommandée dans ASIRI chapitre 5 §3.1.1.2.

#### **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 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 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. 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 100 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.

## **8. 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  $k_3$ .

## **9. 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, contraintes moyennes dans les inclusions à l'ELU...définies dans le cahier des charges.

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.

## **10. 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.

## **11. 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 minimales du chapitre 10, définies dans le CT38 s'appliquent intégralement.

Nota 1 : Dans les situations sismiques, les inclusions sans matelas du domaine 1 sous radier, ne sont pas autorisées.

Nota 2 : Les modes d'exécution des inclusions n°5 décrit dans le tableau n°3 du cahier des charges 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 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.

Conformément au guide § 5.8.4.2, les inclusions du domaine 1 doivent rester 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).

## 12. 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

