

Évaluation du procédé géotechnique Colonnes à Module Mixte CMM

Nom du procédé	Colonnes à module mixte CMM
Demandeur	Keller-Fondations Spéciales 2 rue Denis Papin CS 69224 DUTTLENHEIM 67129 MOLSHEIM CEDEX

L'évaluation du procédé géotechnique a été conduite par le Cerema et l'IFSTTAR et approuvée 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).

L'évaluation repose sur :

- la demande de l'entreprise Keller sollicitant l'IFSTTAR et le Cerema pour un renouvellement du cahier des charges « Colonnes à Module Mixte CMM » 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 « Colonnes à Module Mixte CMM » dans le cadre d'une mission réalisée par l'IFSTTAR 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 ;
- référentiel pour l'évaluation des procédés géotechniques (version 1 en date de Février 2019).

Sequedin, le 19/12/2019.

Fabien Szymkiewicz
IFSTTAR/GERS/SRO



Julien Habert
Cerema Hauts de France



1. Présentation du procédé

Le procédé « Colonnes à Module Mixte CMM » rentre dans le cadre des procédés de renforcement de sols par inclusions rigides. La particularité du procédé est d'associer une partie inférieure en inclusion rigide à une partie supérieure en matériau granulaire de type colonne ballastée réalisée par voie sèche.

2. Référentiel retenu pour l'évaluation du procédé géotechnique « Colonnes à Module Mixte CMM »

Le référentiel retenu pour l'évaluation du procédé géotechnique « Colonnes à Module Mixte CMM » comprend :

- les recommandations ASIRI (2012), traitant des inclusions rigides avec matelas ;
- les recommandations professionnelles du CFMS sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des colonnes ballastées sous bâtiments et sous ouvrages sensibles au tassement, version N°2 de mars 2011 ;
- 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 ;
- les recommandations de l'AFPS 2012 sur les améliorations et renforcement de sol sous sollicitations sismiques ;
- le Guide pour la réalisation des cahiers des charges soumis à une évaluation de Procédé Géotechnique ;
- les normes NF EN 12699 et NF 1536 relatives à l'exécution des pieux avec refoulement de sol et pieux forés ;
- la norme NF EN 14731 relative à l'exécution des colonnes ballastées.

3. Documents

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

- le cahier des charges du procédé géotechnique « Colonnes à Module Mixte CMM » version 5b du 21/10/2019 et ses annexes ;
- la note technique LCPC – plots d'essai de NIEDERBIPP 2005 - sur le comportement sous charges verticales d'une semelle ;
- le rapport LCPC – plot expérimental de Saint-Martin d'Hères (38) de septembre 2005 - sur le comportement sous charges verticales d'une semelle ;
- avis technique MB fondations : Validation des méthodes de dimensionnement du 09/06/06 ;
- Amsterdam validation des méthodes de calcul sous Kid et méthode numérique - Simulated load test report 22/03/19 ;
- note d'analyse de l'impact des CMM sur les semelles - Keller version A du 07/08/2019 ;
- note d'analyse de l'impact des CMM sur le dallage – Keller, version A du 08/07/2019 ;
- note d'analyse des contraintes intrinsèques dans la partie rigides des CMM sous sollicitations horizontales – Keller, version B du 18/07/2016 ;
- analyse du comportement sismique des sols renforcés par des inclusions rigides et par des colonnes à module mixte, *Alia Hatem et al août 2009* ;
- le cahier des charges renforcement de sol par inclusion rigide sans matelas version 7 en date du 22/12/17 ;
- la liste des références sur les années 2004 à 2018 ;

- une attestation d'absence de sinistralité relatif au procédé CMM des années 2004 à 2019 ;
- les divers éléments relatifs à l'instruction antérieure du cahier des charges :
 - CMM_Cahier des charges+avis Apave_septembre 2013
 - 380T161F - Rapport ETN procédé CMM KELLER de Alpes Contrôles du 24/10/2016.

4. Avis

L'IFSTTAR et le Cerema sur la base des différents documents examinés, du rapport d'analyse présenté en annexe et de la présentation du procédé géotechnique « Colonnes à Module Mixte CMM » devant la commission réunie à l'IFSTTAR le 03 Juin 2019, estiment que le procédé géotechnique décrit par le cahier des charges version 5b en date du 21/10/2019 est apte à satisfaire les exigences de fiabilité et de robustesse requis par le référentiel retenu.

5. Validité

La présente évaluation est valable jusqu'au 19/12/2022.

Keller Fondations Spéciales devra informer l'IFSTTAR ou le Cerema de tout incident ou désordre provoqué par la mise en œuvre du procédé géotechnique « Colonnes à Module Mixte CMM » et de toute modification apportée au procédé durant cette période de validité.

Extension : La période de validité de l'évaluation sera étendue aux ouvrages réalisés par Keller, entre le 24/10/19 et le 19/12/2019, sous réserve que les spécifications du cahier des charges visés aient été appliqués.

Annexe – Rapport d'analyse du procédé géotechnique « Colonnes à Module Mixte CMM »

1. 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.

En cas de présence de sols évolutifs, ou de terrains fortement compressibles¹ au niveau de la partie supérieure de la Colonne à Module Mixte CMM®, l'application du procédé n'est pas adaptée sans une purge de ces couches et substitution par du remblai d'apport. Au niveau de la partie inférieure rigide, le terme de tassement différé des sols évolutifs doit être pris en considération.

Une étude de la portance et des déformations de l'ouvrage doit systématiquement permettre de valider la compatibilité du procédé aux critères du projet.

2. Spécificités du procédé « Colonnes à Module Mixte CMM »

Le procédé « CMM », ou Colonnes à Module Mixte, est une méthode de renforcement des sols en place qui associe une partie inférieure en inclusion rigide à une partie supérieure souple de 50cm minimum (non compris zone de recouvrement) en matériau granulaire de type colonne ballastée réalisée par voie sèche.

A l'interface entre les parties supérieures et inférieures, on réalise une interface de transition de 30 à 50 cm, par recouvrement et mélange, du mortier de l'inclusion encore fluide et des graviers de la colonne ballastée.

Ce type de renforcement nécessite sous dallage et autres structures souples, la mise en place d'un matelas de répartition. Dans le cas des fondations superficielles filantes ou isolées, et dans le cas des radiers, ce matelas n'est généralement pas nécessaire, sous réserve que la fondation dispose du ferrailage minimal défini par les textes normatifs.

Des éléments spécifiques sont alors fournis dans le cahier des charges concernant :

- la mise en œuvre des colonnes à module mixte,
- les dimensions minimales de la partie supérieure en colonne ballastée,
- le dimensionnement des colonnes CMM par des méthodes analytiques,
- les paramètres utilisés pour le dimensionnement de l'inclusion,
- et les différents contrôles associés.

Du fait de la présence en partie supérieure d'une partie ballastée, les principes exposés dans les recommandations ASIRI pour les inclusions rigides ne sont pas directement transposables au procédé CMM, justifiant ainsi la nécessité d'un cahier des charges particulier. Les processus de dimensionnement (méthode, choix des paramètres k_3) et de contrôle retenus dans le document, s'inspirent très largement des exigences évoquées dans les recommandations ASIRI. Néanmoins, certaines de ces exigences ont été adaptées,

¹ Les critères définissant les caractères évolutifs et/ ou compressibles des sols, repris au §1.3 du cahier des charges sont conformes aux recommandations du CFMS du 16/03/2011.

notamment en termes de contrôle, du fait de la présence de la partie supérieure en colonne ballastée.

3. Principaux intérêts de la technique par rapport aux autres procédés de renforcement de sol traditionnels.

Ce type de renforcement de sols est particulièrement intéressant dans le cas :

- des projets pour lesquels les matelas de répartition présentent des difficultés de mise en œuvre : chantier phasé, plateformes profondes ou exigües ne permettant pas l'amenée d'engin de terrassement...
- des projets de renforcement de sols traditionnels nécessitant la réalisation d'arases basses importantes, souvent sources de complication : niveau des inclusions difficiles à maîtriser, détérioration des inclusions lors des terrassements, phasage particuliers pour la réalisation de la couche de répartition...
- des projets présentant des semelles superficielles subissant des efforts horizontaux importants, en limitant ainsi les efforts les efforts horizontaux transmis aux inclusions rigides.

Toutefois, ce procédé permet généralement une réduction des tassements plus faible que pour les renforcements de sols de type inclusions rigides.

4. Réalisation des Colonnes à Module Mixte

Le procédé de réalisation des colonnes à module mixte s'effectue en deux étapes :

- lors de la première étape, on réalise une inclusion de mortier ou béton, par refoulement et sans extraction notable de matériaux. En présence de couche indurée, une réalisation des inclusions par forage sans refoulement peut éventuellement être nécessaire. Ces techniques de mise en œuvre se rattachent des pieux de classe 6 et 7 décrites dans la norme NF P94-262,
- après le début de prise du mortier ou du béton, une colonne ballastée est alors réalisée en partie supérieure de l'inclusion. La partie supérieure de l'inclusion rigide est alors disloquée et refoulée lors de la pénétration de l'outil. Lors de cette étape, une interface se crée à la transition entre les matériaux, constituée de gravier mélangé au matériau de la partie rigide.

La durée entre ces deux étapes doit être appropriée pour :

- permettre la pénétration de l'outil dans l'inclusion rigide,
- avoir la garantie d'une partie supérieure en colonne ballastée d'à minima 50 cm (ou 1,0 m en cas d'effort horizontaux importants avec un ratio effort horizontal sur effort vertical concomitant supérieur ou égale à 30 %) constituée de matériau granulaire uniquement,
- avoir effectivement la zone de transition assurant le transfert des charges de la partie granulaire à la partie rigide.

5. Reprise des efforts verticaux par les Colonnes à Module Mixte

Une méthodologie de calcul analytique est fournie par Keller dans le cadre de ce cahier des charges.

Elle repose dans un premier temps, sur une vérification par rapport aux codes :

- des résistances STR et GEO des différents éléments du renforcement (partie souple et partie rigide), et
- de la résistance GEO du sol entre les colonnes.

Dans un second temps, les charges se concentrant sur les éléments les plus rigides, une analyse intégrant des lois de comportement contrainte/déformation du sol renforcé est effectuée afin de vérifier, entre autres :

- que les tassements à l'ELS quasi permanent sont inférieurs aux seuils admissibles de l'ouvrage, et
- aux ELS, que :
 - les seuils de résistance des matériaux des parties souples et rigides de l'inclusion sont respectés ;
 - une fraction acceptable de la résistance du sol n'est pas dépassée ;
 - les charges dans l'inclusion sous le point neutre ne dépassent pas la charge de fluage, pour les inclusions du domaine 1.

Cette analyse est effectuée généralement sous le logiciel interne KID qui a montré des résultats tout à fait satisfaisants par rapport à des essais de chargement en vraie grandeur menés sur des massifs de Colonnes à Module Mixte, justifiant ainsi la pertinence des prévisions des tassements et des efforts transitant dans les colonnes.

6. Reprise des efforts horizontaux par les Colonnes à Module Mixte

La présence d'un matériau granulaire en tête d'inclusion à l'avantage de réduire significativement les efforts transmis à la partie rigide. Les éléments indiqués dans le cahier des charges permettent de justifier les ouvrages de type Colonnes à Module Mixte soumise à des efforts horizontaux.

La limite fixée à $H/V = 0,3$ (ratio effort horizontal H sur effort vertical V concomitant) et la prise en compte d'une hauteur minimale de colonne ballastée de 100 cm apparaît être une limite acceptable pour s'affranchir des vérifications particulières à la flexion et au cisaillement de partie inclusion rigide. Cette hauteur limite peut éventuellement être abaissée à 50 cm sous réserve de vérification.

Pour $H/V > 0,3$, une hauteur de colonne souple de 1 m minimum et des vérifications sont nécessaires.

Les méthodes de vérification indiquées dans le cahier des charges correspondent à celles recommandées dans ASIRI.

A noter que pour des efforts horizontaux importants, la vérification au glissement de la semelle sur le sol renforcé devra faire l'objet d'un point de vigilance particulier. Cette vérification est généralement à la charge du bureau d'études de structure lors de son dimensionnement de fondations.

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 :

- 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 de renforcement par inclusion rigide, 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 Keller.

8. Contrôle et 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 celle 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 .

Pour ce procédé de renforcement, l'intégrité de la Colonne à Module Mixte est appréciée au regard d'essais de dégarnissage réalisés sur des colonnes. La fréquence de ces essais est indiquée. Ces essais permettent la vérification de la bonne exécution des colonnes : diamètres, niveau des différentes interfaces, etc. L'exécution de ce type de contrôle est néanmoins tributaire des conditions de chantier (niveau de la nappe, profondeur des arases supérieures de l'inclusion rigide, notamment, ce qui pourra nécessiter de limiter la valeur du paramètre k_3 .

9. Efforts dans la semelle

Les éléments fournis montrent que les semelles superficielles rigides, fondées sur des colonnes à module mixte, ne nécessitent généralement pas de dimensionnement STR spécifique par rapport à des semelles fondées directement sur les terrains.

Dans le cas de conditions particulières - espacement entre colonnes important supérieur à 2,5 m, et sol mou présentant des pressions limites inférieures à 200 kPa sous la semelle - le contraste de rigidité entre le sol et les CMM peut être fourni par Keller afin de vérifier son impact sur le ferrailage des semelles.

On rappelle, toutefois que la définition des dimensions des semelles (vérification GEO) et du renforcement nécessite généralement un travail itératif entre le bureau d'étude structure et l'entreprise Keller.

10. Cas d'utilisation du procédé en zone sismique.

En zone sismique, les calculs présentés dans le cahier des charges doivent être complétés par les recommandations spécifiées dans le Guide technique AFPS/CFMS *Procédé d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismique*.

11. Analyse des références

Aucun désordre n'a été constaté sur les chantiers réalisés avec ce procédé depuis 2004, date du premier cahier des charges CMM.

Dossier Instruit par :

Loïc LEURENT
Cerema Hauts de France

