

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'Université Gustave Eiffel 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).

Cette évaluation est jointe ci-après, d'une durée de validité jusqu'au **07/05/2027**.

La prolongation de cette évaluation repose sur :

- la demande de l'entreprise Keller sollicitant l'Université Gustave Eiffel et le Cerema pour la création d'un cahier des charges CMM avec l'engagement que la mise en œuvre du procédé CMM n'a pas été identifiée comme une source potentielle de désordres ;
- l'analyse des performances du procédé géotechnique CMM 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

Sequedin, le 07/05/2024.

Fabien Szymkiewicz

Université Eiffel /GERS/SRO



Loïc LEURENT

Cerema Hauts-de-France
Département INFRA/OAG-E

A handwritten signature in blue ink, consisting of several sweeping strokes.

1. Présentation du procédé

Le procédé CMM ou « Colonnes à module mixte » 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 :

- [1]. les recommandations ASIRI (2012), traitant des inclusions rigides avec matelas ;
- [2]. 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 ;
- [3]. l'Eurocode 7 partie 1 avec son annexe nationale française ;
- [4]. l'Eurocode 7 partie 2 ;
- [5]. la norme NF P94-261 et son amendement pour l'application nationale de l'Eurocode 7 à la justification des fondations superficielles ;
- [6]. la norme NF P94-262 et son amendement pour l'application nationale de l'Eurocode 7 à la justification des fondations profondes ;
- [7]. les recommandations de l'AFPS 2012 sur les améliorations et renforcement de sol sous sollicitations sismiques ;
- [8]. le Guide pour la réalisation des cahiers des charges soumis à une évaluation de Procédé Géotechnique¹ ;
- [9]. les normes NF EN 12699 et NF 1536 relatives à l'exécution des pieux avec refoulement de sol et pieux forés ;
- [10]. 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'Université Gustave Eiffel et au Cerema sont les suivants :

- le cahier des charges du procédé géotechnique « Colonnes à module mixte– CMM » version 7 du 01/04/2024 et ses 5 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 ;

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

- 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* ;
- Présentation Keller - EPG du 06/12/2021 – Béton inclusions rigides ;
- la liste des références sur les années 2004 à 2019 ;
- la liste des références sur les années 2022 à 2023 ;
- une attestation d'absence de sinistralité relatif au procédé CMM des années 2004 à 2019 et 2021 à 2023.
- les divers éléments relatifs à l'instruction antérieure du cahier des charges :
 - o CMM_Cahier des charges+avis Apave_septembre 2013
 - o 380T161F - Rapport ETN procédé CMM KELLER de Alpes Contrôles du 24/10/2016.
- 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 15/02/2023 et ses 6 annexes.

4. Historique

D'un point de vue historique :

- Keller possède une longue expérience (supérieure à 20 ans) dans les procédés de renforcement de sol par inclusion rigide, colonnes ballastées et colonnes à modules mixtes ;
- Environ 300 chantiers de Colonne à module mixte ont été entrepris depuis 2004.

A ce jour, le procédé « Colonne à module mixte– CMM » ne présente aucun retour de sinistralité.

5. 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.

Les ouvrages élancés (tour, grue...) ne font pas partie du domaine d'emploi du procédé.

Autres limites :

En cas de présence de sols évolutifs, ou de terrains fortement compressibles² au niveau de la partie supérieure de la colonne, l'application du procédé n'est pas adaptée sans une purge de ces couches et substitution par du matériau d'apport. Si des sols évolutifs sont présents sous

² 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.

la partie ballastée, le tassement différé de ces sols doit être pris en considération pour estimer les déformations de l'ouvrage.

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 CMM, ou par un radier renforcé par un réseau de CMM. 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.

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

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

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

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

Le recours à un procédé de type « colonnes à module mixte » 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, mission G2 au sens de la NF P94-500 (ou similaire) 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 éléments peuvent avoir un impact sur la conception ou les méthodes d'exécution des ouvrages associés (lots gros œuvre, terrassement...). Ils sont mis 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 généralement, du géotechnicien qui ne dépend pas du maître d'œuvre et du bureau de contrôle. Ce conseil intervient idéalement lors de la phase Assistance pour la passation des Contrats de Travaux (ACT selon la loi MOP).

7. Avis

L'Université Gustave Eiffel et le Cerema, 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 03/06/19, estiment que le procédé géotechnique « Colonnes à module mixte – CMM » mis en œuvre par la société Keller et décrit par le cahier des charges du procédé géotechnique Edition 7 du 01/04/2024 est apte à satisfaire les exigences de fiabilité et de robustesse requis par le référentiel retenu.

8. Validité et conditions particulières

La présente évaluation est établie **jusqu'au 07/05/2027**.

Keller 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 mixte - CMM » et de toute modification apportée au procédé durant cette période de validité.

Annexe – Rapport d'analyse du procédé géotechnique « Colonnes à module mixte »

1. Spécificités du procédé « Colonnes à module mixte »

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

À l'interface entre les parties supérieure et inférieure, on réalise une zone de transition de 30 à 50 cm, par recouvrement et mélange, du béton de l'inclusion encore fluide et des graviers de la colonne sèche.

Sous dallage et autres structures souples, ce type de renforcement nécessite la mise en place d'un matelas de répartition de 40 cm minimum. Dans le cas des fondations superficielles filantes ou isolées, et dans le cas des radiers, ce matelas n'est généralement pas nécessaire ; pour ces cas, le ferrailage minimal défini par les textes normatifs est généralement suffisant.

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

- la mise en œuvre des colonnes à module mixte,
- les dimensions minimales de la partie supérieure de colonne sèche,
- 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 sèche, 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, notamment en termes de contrôle, du fait de la présence de la partie supérieure en colonne sèche.

2. Principaux intérêts de la technique par rapport aux autres procédés d'amélioration de sol traditionnels.

Ce type d'amélioration de sols est particulièrement intéressant dans le cas :

- des projets pour lesquels les couches de répartition présentent des difficultés de mise en œuvre : chantier phasé, plateformes profondes ou exiguës ne permettant pas l'amenée d'engin de terrassement...
- des projets d'amélioration 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 horizontaux transmis aux inclusions rigides.

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

3. 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 du raidissement du béton, une colonne de gravier est alors réalisée en partie supérieure de l'inclusion. La partie supérieure de l'inclusion rigide est alors refoulée lors de la pénétration de l'outil. Lors de cette étape, une interface se crée à la transition entre les matériaux, constituée de graviers poussés et mélangés 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) constituée de matériau granulaire uniquement,
- avoir une zone de transition constituée d'un mélange de béton et du granulat.

4. Matériau cimentaire de la partie rigide

Les exigences relatives à la composition et aux propriétés des bétons et mortiers sont décrites dans le cahier des charges. Elles suivent les recommandations de la norme NF EN 206/CN pour les cas d'application du domaine 1.

Exigences de durabilité :

Les obligations minimales définies pour une classe d'exposition X0 dans le tableau NAF1 de la norme 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.

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 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 énoncées en annexe 4 du cahier des charges. Elles portent :

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

Exigence de maintien rhéologique et début de raidissement du béton

Suite à ces nombreuses expériences, l'entreprise Keller a défini une plage de temps entre le bétonnage de l'inclusion et l'étape de réalisation de la partie sèche, garantissant une pénétration de l'outil et une qualité de la zone de transition adaptées.

Ce délai a été défini à partir de la durée de maniabilité du béton (DPU), *durée pendant laquelle les propriétés du béton frais seront conservées*. Cette exigence sur le comportement du béton fait partie des propriétés spécifiées lors de la commande du béton.

L'exécution de la partie sèche est entreprise entre DPU+ 1h et DPU+5h

Une valeur de DPU de 3h est généralement retenue pour les bétons employés par Keller.

4. Reprise des efforts axiaux de compression

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 ;
 - le fluage du sol sous la semelle n'est pas atteint ;
 - 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.

En présence de sols compressibles sous la base des inclusions, ou dans le cas d'une semelle fondée sur un nombre conséquent de CMM (supérieure à 5 unités), ou pour les ouvrages fondés sur un radier, il convient de considérer également le tassement des couches de sol situées sous la base des inclusions. Les méthodes traditionnelles de dimensionnement présentées dans le cahier des charges (sous logiciel Kids), ne tiennent généralement pas compte de cet effet. Des études spécifiques sont alors nécessaires pour ces cas de figures.

5. 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 soumises 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 de 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.

Au-delà, de $H/V > 0.3$, 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.

6. Contrôle de la partie ballastée post exécution.

Le respect du diamètre et la compacité de la partie supérieure est une adéquation entre le matériel d'exécution et de la compacité des couches de sols refoulés. Ce choix de matériel est fait par Keller sur la base de ses expériences.

À noter que l'expansion horizontale au-delà du diamètre de l'outil de fonçage est généralement limitée pour les vibreurs autres que « torpille » (voir §3.1 vibreur léger).

Les propriétés de la partie ballastée font l'objet d'un certain nombre de contrôles après exécution. Ces essais, leur fréquence, et les critères de réception sont définis au § 6.2.4. et 6.2.5 du cahier des charges. La fréquence des essais est conforme aux recommandations du CFMS [2] pour les colonnes ballastées.

Les essais de dégarnissages sont effectués sur des colonnes perdues.

Le nombre d'essais de contrôle de continuité par sondage pénétrométrique est augmenté en l'absence d'enregistrement de paramètre de fonçage.

7. Le paramètre k_3 concernant le matériau constitutif de la partie rigide des inclusions

Les valeurs du paramètre k_3 nécessaire aux vérifications structurales de l'inclusion sont conformes aux recommandations ASIRI. Ces valeurs sont établies en fonction du programme d'essai de chargement et de contrôle de l'intégrité de la partie rigide.

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.

Cette modification est assujettie aux deux conditions suivantes :

- La réalisation d'au moins 100 chantiers par an de renforcement de sol, sur les trois dernières années justifiant ainsi de l'expérience de l'entreprise Keller dans ce domaine,
- 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.

Ces conditions sont respectées pour les trois dernières années.

8. Contrôles 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

9. Dimensions et ferrailage des semelles.

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

Sous réserve d'une semelle isolée ou filante d'inertie suffisante et de respects des principes d'implantations des colonnes présentés en annexe 10.1 du cahier des charges, le ferrailage minimal des textes normatifs est généralement suffisant.

On rappelle 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.

Lorsque c'est utile, la raideur du sol renforcé peut être fournie 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 dans la fondation et les inclusions.

10. Cas d'utilisation du procédé en situation 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. Cas des sols soumis à retrait/gonflement

Les cas des ouvrages sur semelles et radiers mixtes sur Colonne à module mixte sont sujets aux mêmes risques de retrait-gonflement que les fondations superficielles traditionnelles. Il est également rappelé que le renforcement de sol par colonne CMM 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).

12. 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