

Évaluation du procédé géotechnique Colonnes double module – C2M

Nom du procédé	Colonne double module – C2M
Demandeur	NGE Fondations 29 RUE DES TACHES CS 36006 69804 SAINT-PIREST 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 NGE Fondations sollicitant l'Université Gustave Eiffel et le Cerema pour la création d'un cahier des charges C2M avec l'engagement que la mise en œuvre du procédé C2M n'a pas été identifiée comme une source potentielle de désordres ;
- l'analyse des performances du procédé géotechnique C2M 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 fluid, overlapping strokes.

1. Présentation du procédé

Le procédé C2M ou « Colonnes double module » 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 double module – C2M »

Le référentiel retenu pour l'évaluation du procédé géotechnique « Colonnes double module – C2M » 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 EN 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 double module – C2M » version 1.C du 02/05/2024 et ses 6 annexes,
- le rapport d'essai QIL346 ind B du 14/11/2023 - *Campagne_d'essais_C2M - Rouen* - analyse du comportement d'une semelle renforcée par C2M sous charge verticale ;
- le rapport EPG C2M ind A du 06/11/23 et ses annexes - récapitulatif des chantiers de références (10 sites) et essais ayant permis d'évaluer les capacités des C2M ;
- Le rapport EPG C2M ind A du 05/07/23 - *retour d'expérience sur les temps d'attente entre inclusion rigide et colonne sèche*,
- la liste des références de chantiers de renforcement sur les années 2019 à 2022 ;
- une attestation d'absence de sinistralité imputable au procédé C2M des années 2021 à 2023.

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

4. Historique

D'un point de vue historique :

- NGE (ex GTS) possède une longue expérience (supérieure à 20 ans) dans les procédés de renforcement de sol par inclusion rigide et colonnes ballastées,
- 32 chantiers de colonne double module ont été entrepris depuis 2016 pour mettre au point le procédé et analyser ses performances,
- NGE a entrepris une démarche d'instruction EPG depuis août 2021.

A ce jour, le procédé « colonne double module – C2M » 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 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 C2M, ou par un radier renforcé par un réseau de C2M. 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. Ces effets ne sont pas couverts par les méthodes traditionnelles de dimensionnement présentées dans le cahier des charges.

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

² Les critères définissant les caractères évolutifs et/ ou compressibles des sols, repris au §3 du cahier des charges sont conformes aux recommandations du CFMS du 16/03/2011.

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

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

Le recours à un procédé de type « colonnes double module » 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 20/09/22, estiment que le procédé géotechnique « Colonnes double module – C2M » mis en œuvre par la société NGE et décrit par le cahier des charges du procédé géotechnique Edition 1.C du 02/05/2024 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**.

NGE devra informer l'Université Gustave Eiffel ou le Cerema de tout incident ou désordre provoqué par la mise en œuvre du procédé géotechnique « Colonnes double module- C2M » et de toute modification apportée au procédé durant cette période de validité.

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

1. Spécificités du procédé « Colonnes double module »

Le procédé « C2M », ou « Colonnes double module », est une méthode de renforcement des sols en place qui associe une partie inférieure en inclusion rigide à une partie supérieure souple de 1.0 m minimum (hors zone de recouvrement) en matériau granulaire.

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 double module,
- les dimensions minimales de la partie supérieure de colonne sèche,
- le dimensionnement des colonnes C2M 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 C2M, 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. Réalisation des Colonnes double Module

Le procédé de réalisation des Colonnes Double Module s'effectue en deux étapes :

- lors de la première étape, on réalise une inclusion de 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 sèche 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 sèche d'au minimum 1,0 m sous la semelle, constituée de matériau granulaire uniquement,
- avoir une zone de transition constituée d'un mélange de béton et du granulat.

3. Béton constitutif de la partie rigide

Les exigences relatives à la composition et aux propriétés des bétons 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 NGE.

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 au § 5.1 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

Dans le cadre de l'instruction du cahier des charges, des essais de pénétration complétés de dégarnissage ont été entrepris. Ils ont permis de définir 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 la commande du béton.

L'exécution de la partie sèche est entreprise entre DPU+ 0h et DPU+4h

4. Reprise des efforts axiaux de compression

Pour l'élaboration de ce cahier des charges, un certain nombre d'essais de chargement a été entrepris et analysé par NGE pour confirmer le comportement sous charge verticale des C2M. Ce dossier d'essais de chargement comprend notamment :

- 11 essais de contrôles sur C2M isolés sur 6 sites différents ;

- 3 essais sur C2M isolés menés à la rupture sur 3 sites différents ;
- 1 plot d'essai expérimental instrumenté avec :
 - le chargement à la rupture d'une semelle superficielle non renforcée,
 - le chargement à la rupture d'une C2M, et
 - le chargement d'une semelle mixte renforcée par quatre C2M.

Les différents essais sur C2M isolée, ou semelle renforcée par C2M ont permis de montrer :

- des charges de rupture de la partie sèche cohérentes et systématiquement légèrement supérieures aux charges prévisionnelles calculées,
- des comportements des C2M isolées en accord avec les prévisions de calculs,
- un tassement de la semelle renforcée inférieur aux prévisions de calculs (*Note*),
- une résistance à la rupture de la semelle renforcée supérieure aux attentes (*Note*).

Note : L'analyse des essais montre que les écarts sont liés pour partie à la densification du sol sous la semelle lors de la réalisation de la partie supérieure par refoulement. En l'absence d'éléments plus précis et de contrôles possibles sur chantier, cet effet n'est pas considéré dans les méthodes de dimensionnements.

Dans ces conditions, le modèle analytique MV3 proposé dans ASIRI chapitre 3 §3.1.3.2, et retenu dans le cahier des charges apparaît être une approche prudente pour définir :

- la répartition des efforts verticaux entre le sol et les inclusions C2M ;
- le tassement de la fondation renforcée.

De même, ces essais ont confirmé la pertinence des méthodes de dimensionnement exposées dans les recommandations colonnes ballastées du CFMS [2] pour justifier de la résistance de la partie sèche.

5. Reprise des efforts horizontaux par les Colonne Double Module

La présence d'un matériau granulaire en tête d'inclusion à l'avantage de réduire significativement les efforts horizontaux transmis à la partie rigide. Une hauteur minimale de 1 m de colonne sèche sous la semelle a été retenue. Cette hauteur peut être augmentée pour limiter les efforts transversaux dans la partie rigide non armée.

Les méthodes indiquées dans le cahier des charges, de diffusions des efforts et de vérifications structurales de la partie rigide correspondent à celles recommandées dans ASIRI.

À noter que pour des efforts horizontaux importants, la vérification du glissement à la base de la semelle devra faire l'objet d'un point de vigilance particulier. Cette vérification est généralement effectuée par le BE de structure lors de son dimensionnement de fondations.

6. Essai d'information

Conformément aux recommandations d'ASIRI chapitre 8 §3, toute zone homogène du point de vue géotechnique doit faire l'objet d'un essai d'information. Cette phase d'essai est réalisée au plus tard au démarrage des travaux de C2M.

Sauf demande particulière du marché, ces colonnes sont généralement intégrées à l'ouvrage définitif et doivent être réalisées à proximité d'un sondage de reconnaissance.

Ces essais sont destinés à vérifier entre autres :

- la faisabilité : capacité de fonçage ou forage des colonnes, diamètre obtenu de partie sèche, qualité de bétonnage, gestion de l'altimétrie des interfaces...
- la conception : conformité des sols aux attentes, conditions d'arrêt des colonnes...
- le cas échéant d'ajuster les procédures de contrôle et d'exécution.

Les colonnes de convenance font l'objet d'un document de suivi.

7. Contrôle de la partie sèche post exécution.

Le respect du diamètre et la compacité de la partie sèche est une adéquation entre le matériel d'exécution (voir § 4.1.3 du cahier des charges) et de la compacité des couches de sols refoulés. Ce choix de matériel est fait par NGE sur la base de ces expériences.

À noter que l'expansion horizontale au-delà du diamètre de l'outil de fonçage est généralement limitée pour des engins à vibreur externe.

Les propriétés de la partie sèche font l'objet d'un certain nombre de contrôles après exécution. Ces essais, leur fréquence, et les critères de réception sont définis au § 8.2 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.

8. 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 NGE 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 NGE.

9. Dimensions et ferrailage des semelles.

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 NGE.

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 double module sont sujets aux mêmes risques de retrait-gonflement que les fondations superficielles traditionnelles. Il est également rappelé que le renforcement de sol par colonne C2M 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 imputable au procédé, n'a été constaté sur les 32 chantiers réalisés avec ce procédé depuis 2016.

Dossier Instruit par :

Loïc LEURENT
Cerema Hauts-de-France