

## Évaluation du Procédé Géotechnique – EPG

<b>Nom du procédé</b>	<b>Colonnes Bi-modules CBM</b>
<b>Demandeur</b>	<b>MENARD</b> 22 Rue Jean Rostand, 91400 ORSAY

L'évaluation du procédé géotechnique « colonnes Bi-modules CBM » a été approuvée de manière consensuelle par les membres de la commission technique EPG dont la composition est précisée dans le référentiel relatif à l'évaluation des procédés géotechniques.

Les conclusions sont détaillées en page 2.

L'évaluation repose sur :

- l'engagement que la mise en œuvre du procédé « colonnes Bi-modules CBM » n'a pas été identifiée comme une source potentielle de désordres ;
- l'analyse des performances du procédé géotechnique « colonnes Bi-modules CBM » dans le cadre d'une mission réalisée par les deux instructeurs missionnés de la commission EPG. Les conclusions de cette mission sont consignées dans un rapport d'analyse qui est présenté en annexe ;
- la jurisprudence, au moment de l'évaluation, de la famille à laquelle le procédé géotechnique est rattaché ;
- l'approbation consensuelle par les membres de la commission CT-EPG en date du 25/03/2025, du cahier des charges et des conclusions du rapport.

### Avis de la commission technique EPG

Sous réserve d'appliquer les recommandations ci-dessous, la commission technique EPG :

- estime que : le procédé géotechnique « colonnes Bi-modules CBM » décrit par le cahier des charges du procédé géotechnique Edition 4.0 du 07/05/2025, mis en œuvre par la société MENARD, est apte à satisfaire les exigences de fiabilité et de robustesse requis par le référentiel retenu ;
- donne un avis favorable au renouvellement de l'évaluation du procédé.

La présente évaluation est établie jusqu'au **07/05/2028**.

Le 07/05/2025.

Le Président de la commission  
technique EPG



Loïc LEURENT - CEREMA

Le Vice - Président de la commission  
technique EPG



Fabien SZYMKEWICZ - UGE

## 1. Présentation du procédé

Le procédé « CBM », ou Colonnes Bi-modules, 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 de type Colonne à Module Contrôlé à une partie supérieure en matériau granulaire, de 50cm minimum, de type colonne ballastée réalisée par voie sèche.

## 2. Référentiel retenu pour l'évaluation du procédé géotechnique « Colonnes Bi-modules – CBM »

Le référentiel retenu pour l'évaluation du procédé géotechnique « Colonnes Bi-modules – CBM » 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 et renforcement de sol sous sollicitations recommandations de l'AFPS 2012 sur les améliorations sismiques ;
- [8]. les normes NF EN 12699 et NF 1536 relatives à l'exécution des pieux avec refoulement de sol et pieux forés ;
- [9]. la norme NF EN 14731 relative à l'exécution des colonnes ballastées.
- [10]. le CR de la réunion du 21 mars 2024 de la Commission Générale des EPG.
- [11]. Fascicule 1 : Organisation des commissions et de la procédure EPG version 19/09/24.
- [12]. Guide pour la réalisation des de cahiers des charges soumis à une EPG, version 1 de février 2019).

## 3. Documents

Les documents examinés dans le cadre de la mission sont les suivants :

- le cahier des charges du procédé géotechnique « Colonnes Bi-modules CBM » version 4.0 du 07/05/2025 et ses 6 annexes ;
- le rapport d'analyses du comportement sous charges verticales d'une semelle et d'un dallage renforcé par le procédé CBM, dans le cadre des plots d'essai de Mining Colmar, version 1,0, réalisé en 2010 ;
- Note de dimensionnement de CBM du 12/12/17 avec comparaison du comportement sous charges verticales d'un dallage renforcé par le procédé CBM, selon les méthodes analytiques et numériques ;
- Plot d'essai de Venette, analyse du comportement sous sollicitation horizontale, Note Men140808-FM-NDC-CH-B du 28/05/15 ;
- Note de justification des inclusions rigides non armées du 11/07/2023 ;
- le cahier des charges CMC sans matelas version 5 en date du 02/10/2023 ;
- les références sur les années 2014 à 2024 ;
- un relevé de sinistralité relatif au procédé CBM sur les années 2014 à 2024

#### **4. Domaine d'emploi**

Utilisation en France métropolitaine et DROM- COM (Départements et Régions d'Outre-Mer – Collectivités d'Outre-Mer).

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.

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, ...*).

##### Autres limites :

En cas de présence de sols évolutifs, ou de terrains fortement compressibles<sup>1</sup> 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 CBM, ou par un radier renforcé par un réseau de CBM. 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 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 §11.

#### **5. Recommandations spécifiques au procédé**

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

Le recours à un procédé de renforcement par « colonnes bi-modules » est généralement à considérer sur les projets comme une variante à la solution de fondation retenue par le marché. Il convient de s'assurer notamment que :

---

<sup>1</sup> 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.

# EPG : Commission d'Évaluations des Procédés Géotechniques

- la synthèse géotechnique prévue en phase conception est adaptée à ce procédé,
- les tassements de la fondations sont compatibles avec la structure portée,
- le dimensionnement et le ferrailage de la semelles superficielles soient adaptés à la présence des CBM.

**L'emploi de ce procédé est soumis à l'appréciation du maître d'ouvrage sur conseils de son maître d'œuvre et éventuellement du géotechnicien et du contrôle technique construction. Cet avis intervient idéalement lors de la phase Assistance pour la passation des Contrats de Travaux (ACT selon la loi MOP).**

## b. 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 colonnes CBM 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).

## 6. Instructeurs du dossier :

L'instruction de cette EPG a été suivie par :

- Loic LEURENT (Cerema – Membre de la CT- EPG) : Rapporteur /Instructeur
- Sébastien BURLON (Cerema – Membre de la CT- EPG) : Instructeur

Ces instructeurs ont été désignés par la commission EPG.

## 7. Conditions particulières

Menard devra informer la commission EPG de tout incident ou désordre provoqué par la mise en œuvre du procédé géotechnique « colonnes bi-modules CBM » et de toute modification apportée au procédé durant cette période de validité.

**Annexe – Rapport d'analyse du procédé géotechnique « Colonnes Bi-modules CBM »**

**1. Spécificités du procédé « Colonnes Bi-modules CBM »**

Le procédé « CBM », ou colonnes bi-modules, est une méthode de renforcement des sols en place qui associe une partie inférieure en inclusion rigide de type Colonnes à Module Contrôlé à une partie supérieure, de 50cm minimum, en matériaux granulaire de type colonnes ballastées 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 incorporation des graviers dans le béton ou mortier, encore fluide de l'inclusion.

Ce type de renforcement nécessite sous dallage et autres structures souple, 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 alors fournis dans le cahier des charges concernant :

- la mise en œuvre des colonnes Bi-modules,
- les dimensions minimales de la partie supérieure en colonne ballastée,
- le dimensionnement des colonnes CBM 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 CBM, 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 ballastée.

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

Ce type de renforcement de sol 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 de renforcement de sol traditionnel 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 sismiques ou avec semelles subissant des efforts horizontaux importants permettant ainsi d'éviter de transférer les efforts horizontaux (type inertiel) aux

inclusions rigides. Les efforts horizontaux sont alors transférés par la semelle superficielle au sol par frottement.

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

### **3. Réalisation des colonnes Bi-modules**

Le procédé de réalisation des colonnes Bi-modules 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 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 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 ou mortier, et du granulats.

Les normes d'exécution des travaux géotechniques spéciaux NF EN 1536+A1 (Pieux forés), NF EN 12699 (Pieux avec refoulement du sol) et NF EN 14731 (Amélioration des massifs de sol par vibration) n'évoquent pas spécifiquement la technique des CBM. Ces documents peuvent préciser des recommandations, des points informatifs ou de vigilance pour lesquels il pourrait convenir de veiller avant et pendant la phase d'exécution.

### **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 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 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 ses nombreuses expériences, l'entreprise Menard 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 la commande du béton.

L'exécution de la partie sèche est entreprise entre DPU+ 1h et DPU+6h

Si la DPU n'est pas précisée par le fournisseur, une valeur de DPU de 3h est généralement retenue pour les bétons employés par Menard.

### **5. Reprise des efforts verticaux par les Colonnes Bi-modules**

Il convient d'effectuer 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.

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

Elle repose dans un premier temps, par la justification des domaines 1 ou 2 sous la semelle non renforcée sur la base du torseur d'efforts ELU fond / ELU sismique par rapport aux codes (voir cdc §5) :

Dans un second temps, une analyse intégrant des lois de comportement contrainte/déformation du sol renforcé est effectuée, pour répartir les efforts entre le sol, les différents éléments du renforcement (Note).

Note : *Menard propose deux méthodologies : une méthode simplifiée avec des modèles analytiques, et une méthode à partir d'un modèle aux éléments finis.*

*La méthodologie avec calculs analytiques, fournie par Menard dans le cadre de ce cahier des charges, associant :*

- i) une méthode d'homogénéisation ou de Priebe pour le dimensionnement de la partie supérieure ballastée, et*

*ii) une méthode de Franck et Zhao pour le dimensionnement de la partie inférieure rigide,*

*a montré des résultats tout à fait satisfaisant par rapport à des calculs comparatifs aux éléments finis réalisés dans le cadre de cette analyse.*

*Des essais de chargement réalisés en vraie grandeur sur des massifs de Colonnes Bi-modules ont aussi permis de justifier la pertinence de la prévision des tassements et des efforts transissant dans les colonnes.*

In fine, on s'assure alors :

- que les tassements à l'ELS quasi permanent sont inférieurs aux seuils admissibles de l'ouvrage, et
- aux ELS, que :
  - le fluage du sol sous la semelle n'est pas atteint ;
  - pour les inclusions du domaine 1, les charges dans l'inclusion sous le point neutre ne dépassent pas la charge de fluage ;
  - pour les inclusions du domaine 2, en cas de dépassement de la charge de fluage de l'inclusion, que la méthode retenue est toujours apte à représenter correctement la mobilisation du frottement et de l'effet de pointe (Note).

*Note : La méthode de Franck et Zhao est considérée comme représentative uniquement pour des charges inférieures ou égales à la charge de fluage.*

## **6. Reprise des efforts horizontaux par les Colonnes Bi-modules**

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 bi-modules soumise à des efforts horizontaux.

La limite fixée à  $H/N = 0,2$  (ratio effort ELU horizontal H, sur effort ELU vertical V concomitant) et la prise en compte d'une hauteur minimale de colonne ballastée de 50 cm apparaît être une limite acceptable pour s'affranchir des vérifications particulières vis-à-vis des efforts horizontaux sous semelles superficielles. L'analyse est menée par semelles ou à des cas enveloppes.

Au-delà, de cette limite, une augmentation de la hauteur de la colonne à 1 m minimum et une vérification à la flexion et au cisaillement de partie inclusion rigide est nécessaire.

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.

## **7. Dimensions et ferrailage des semelles.**

Les éléments fournis montrent que les semelles superficielles rigides, fondées sur des colonnes bi-modules, 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 5 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 Menard. Lorsque c'est utile, la raideur du sol renforcé peut être fournie 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.

## **8. 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 CBM.

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 notamment :

- la faisabilité : capacité de fonçage ou forage des colonnes, diamètre obtenu de partie sèche, condition 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.

## **9. Contrôle de la partie ballastée post exécution.**

Le respect du diamètre et la compacité de la partie ballastée est une adéquation entre le matériel d'exécution (voir § 3.4 du cahier des charges) et de la compacité des couches de sols refoulés. Ce choix de matériel est fait par Menard 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 caractéristiques 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 § 6.2.2 et 6.2.3 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.

## **10. Le paramètre $k_3$ concernant le matériau constitutif des inclusions et essais de chargement statique**

Les valeurs du paramètre  $k_3$  nécessaires 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 :

- Des fréquences d'essais plus faibles que celles proposées pour les inclusions rigides avec matelas ont été retenues.
- Des configurations où aucun essai de chargement statique n'est réalisé, limité au chantier de faible ampleur.

Ces modifications sont assujetties aux deux conditions suivantes :

- La réalisation d'au moins 10 chantiers par an de renforcement de sol, sur les trois dernières années justifiant ainsi de l'expérience de l'entreprise Menard 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 Menard.

## **11 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*.

On rappelle qu'aucun cisaillement n'est admissible pour des inclusions non armées diamètres inférieurs à 300 mm dans le domaine 1.

## **12. Analyse des références**

Aucun désordre imputable au procédé, n'a été constaté sur les chantiers réalisés avec ce procédé depuis 2014, date des relevés de sinistralité en notre possession.