

Inclusions rigides verticales en béton CMC pour la stabilisation des pentes et des remblais

S. Brûlé, Menard France, Agence Lyon
A. Ziane, Menard France, Agence Bordeaux

Octobre 2024, Colloque National sur la Géotechnique à Marrakech.

RÉSUMÉ : Les inclusions rigides verticales en béton de type CMC® Menard sont largement utilisées dans le renforcement des sols pour des structures avec des fondations superficielles depuis plus de 30 ans. Elles sont cependant moins souvent employées pour stabiliser les pentes de remblais ou les pentes naturelles instables, bien que l'un des avantages de cette technique soit la possibilité de produire une quantité significative d'inclusions par jour de travail sur site. Après un bref historique de la technique, cet article examine les avantages et les caractéristiques spécifiques des inclusions rigides verticales dans les applications de stabilisation de pentes.

1. Caractéristiques principales des inclusions rigides CMC de Menard

1.1 Brève histoire

Menard a développé les Colonnes à Module Contrôlé (CMC®) dans les années 1990 pour résoudre les problèmes de confinement latéral dans les sols très compressibles et organiques. Elles sont désormais utilisées dans tous types de sols (cohésifs ou granulaires) jusqu'à des profondeurs de 30 mètres ou plus.

Contrairement aux fondations profondes, les inclusions rigides ne sont pas connectées ou ancrées à la structure. Par conséquent, l'impact d'une charge horizontale provenant de la structure est limité ou négligeable. Pour les fondations profondes, 100 % des charges

passent par les pieux, alors

que pour les inclusions, une partie des charges est transmise au sol (Figure 1, a à c).

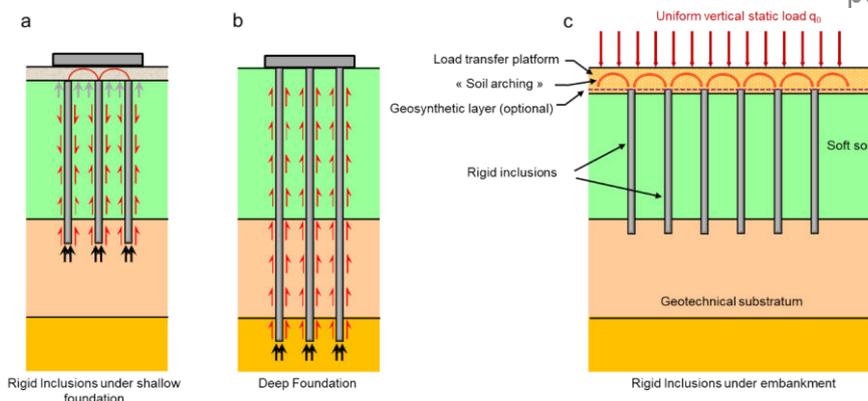


Figure 1. Inclusion rigide CMC® pour fondation superficielle (a). Pieux (b). CMC® pour remblais de faible épaisseur et charge statique uniforme.

1.2 Principales applications de la technique

Les Colonnes à Module Contrôlé (CMC®), un type d'inclusions rigides en béton, sont une technique de renforcement vertical du sol. Pour les applications de fondation, elles sont utilisées pour contrôler et réduire les tassements et augmenter la capacité portante dans des sols mous ou meubles. Elles sont réputées être une alternative économique aux solutions traditionnelles de fondations profondes et, dans la plupart des cas, elles s'avèrent bénéfiques pour la conception globale de la structure qui repose dessus. Les inclusions rigides sont réalisées à travers un processus simple et efficace, avec ou sans déplacement de sol, par injection à basse pression (généralement jusqu'à 0,2 MPa) d'un coulis ou de béton via le noyau creux de l'outil de forage. Ces colonnes ont généralement un diamètre compris entre 250 et 500 mm, voire plus.

1.3 Autres applications

Les CMC® peuvent être utilisées pour le renforcement sous des remblais de faible (quelques mètres) ou de grande hauteur (environ dix mètres ou plus) (Figure 2a). Depuis 2012, les textes ASIRI fournissent des recommandations utiles pour les applications de renforcement des fondations superficielles et des remblais (ASIRI, 2012). Historiquement, les pieux ont été utilisés pour renforcer la stabilité des pentes, mais on peut envisager ce renforcement avec des inclusions rigides (Briançon et al., 2020). Pour les pentes, la version actuelle des textes ASIRI ne donne pas de recommandations spécifiques. Cependant, des exemples d'utilisation avec des inclusions existent.

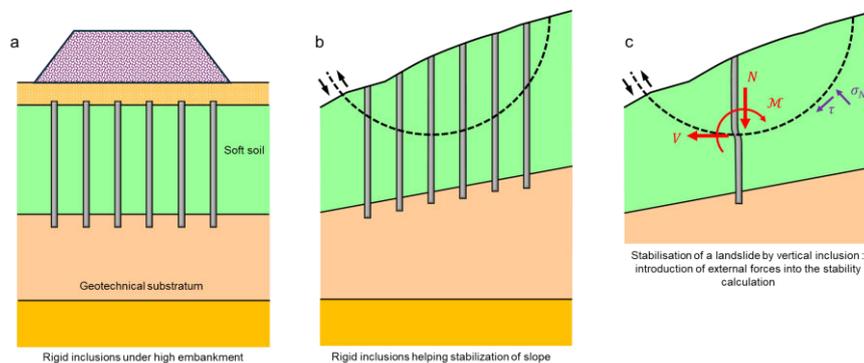


Figure 2. Inclusions rigides CMC qui aident à stabiliser un remblai ou une décharge construite en surface (a). Inclusions (avec ou sans barres d'armature) pour la stabilisation d'une pente naturelle ou artificielle (b). Stabilisation d'un glissement de terrain par inclusion verticale (pieu, mur, inclusion rigide) (c). N est la charge verticale appliquée sur l'inclusion, V la charge horizontale, M le moment de flexion. La contrainte perpendiculaire à la surface de glissement est notée σ_N et τ la contrainte de cisaillement.

2. Principes du renforcement rigide

2.1 Inclusions verticales résistantes et déplacements admissibles

Les pieux utilisés pour la stabilisation des pentes sont soumis à des forces latérales causées par le mouvement des sols environnants. Certains auteurs (Viggiani 1981 ; Poulos 1995) appellent ces pieux « pieux passifs ». L'un des principaux enjeux dans la conception de ces pieux est l'ampleur de la force appliquée sur le pieu. Comme le rappelle Şengör (Şengör et al., 2013), cela est lié au mouvement du sol, et le mouvement du sol est influencé par la présence des pieux, rendant l'interaction entre les pieux passifs et le sol assez complexe.

Si l'on passe en revue rapidement les travaux précédents, plusieurs méthodes empiriques, analytiques et numériques existent pour concevoir des pieux pour la stabilisation des pentes (Brinch Hansen 1961, De Beer 1977, Fukuoka 1977, Ito et Matsui 1977, Sommer 1977, Banerjee et al., 1978, Winter et al. 1983, Popescu 1991, Reese et al. 1992, Sève et al., 1996).

Les renforcements rigides augmentent la stabilité de deux manières : par l'introduction d'une force stabilisatrice externe et par une résistance au cisaillement supplémentaire sur la surface de rupture grâce à l'augmentation de la contrainte normale. Ces renforcements sont pris en compte dans le calcul du coefficient de sécurité. Pour évaluer la stabilité d'une pente sous des charges sismiques, la méthode pseudo-statique est utilisée, dans laquelle l'action sismique est représentée par une force constante appliquée à la masse instable.

Le concept consiste à installer des éléments résistants dans le sol. Ces techniques ne résolvent pas la cause des mouvements, mais visent à réduire ou à arrêter la déformation. Elles sont intéressantes dans les cas où des solutions curatives (terrains et drainage) ne peuvent pas être mises en œuvre techniquement ou économiquement (Reiffsteck, 2020). Des éléments résistants peuvent également être introduits comme mesure préventive pour éviter les déplacements, dont l'une des conséquences serait de réduire la résistance au cisaillement du sol. Cependant, la compatibilité des déplacements du sol et de la structure doit être considérée lors du choix de ce type de technique. Si les déplacements du sol entraînent l'échec des renforcements, il est préférable, dans ces cas, de construire des structures qui soutiennent le sol. Ensuite, il est préférable, dans ces cas, de construire des structures capables de mieux supporter les déformations.

2.2 Flexion/Cisaillement

Le renforcement par inclusion a été utilisé comme technique pour stabiliser des pentes instables en raison de sa facilité et de sa rapidité de mise en œuvre sans affecter la géométrie du site. Comme le mentionnent les auteurs (Reiffsteck, 2020 ; Schlosser et al., 1984, 1994), il existe généralement deux catégories d'inclusions, selon la rigidité en flexion

du renforcement utilisé. Premièrement, les clous et micropieux, constitués d'un renforcement de faible rigidité (barres métalliques par exemple) et d'un coulis, placés obliquement ou verticalement. Deuxièmement, les pieux et barres de fondation (barils en béton armé, coques en acier remplies de béton), qui sont des éléments très rigides, placés verticalement (Figure 3 a-d).

Étant donné leur inertie significative, les pieux ou inclusions rigides (CMC[®]) fonctionnent principalement en flexion/cisaillement, tandis que les clous de faible inertie fonctionnent en traction/flexion (Figure 3 a).

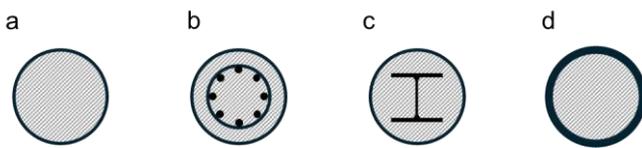


Figure 3. Inclusion rigide en béton (a). Pieu en béton armé ou inclusion (b). Pieu ou inclusion renforcé avec une section en acier structural interne (poutre en I). Enveloppe ou noyau pour la section en béton du pieu ou de l'inclusion (d).

2.3 Agencements géométriques

En général, deux ou trois rangées d'inclusions (inclusion en béton, tubes métalliques ou pieux en béton armé) sont placées dans le tiers central de la pente instable (Reiffsteck, 2020). La Figure 4 illustre le principe. Les inclusions sont espacées de quelques diamètres (au moins $3\varnothing$), dans les deux directions horizontales.

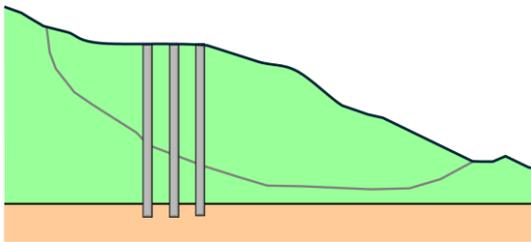


Figure 4. Principe du renforcement de pente utilisant trois rangées de pieux verticaux ou d'inclusions rigides. Coupe transversale d'une pente.

2.4 Risques d'échec

Les risques d'échec d'une inclusion sont :

- Dans l'inclusion par flexion/cisaillement.

- Au contact sol/inclusion, en raison du chargement latéral du sol par le fût de l'inclusion (plastification du sol).
- Dans le sol, si un glissement de terrain se produit en profondeur sous la structure (insertion insuffisante des pieux), en aval si le clouage du sol est placé trop haut sur la pente, en amont si le clouage du sol est placé trop bas sur la pente.
- Etc

2.5 Conception des inclusions

La résistance interne de l'inclusion est déterminée par le calcul de la contrainte maximale susceptible d'être mobilisée en flexion/cisaillement. Le déplacement du sol lors du glissement mobilise latéralement l'inclusion, provoquant une réaction entre le pieu et le sol. Cette réaction est évaluée à l'aide des courbes de réaction p-y définies dans la norme française NF EN 94-262, basées sur des relations avec le module de pression Menard EM. Comme dans le cas du clouage du sol, la sécurité en cas de glissement de terrain est évaluée à l'aide d'une méthode de calcul de la stabilité de pente, dans laquelle les forces générées par les pieux sont intégrées.

3. Les avantages de l'inclusion en béton CMC

L'inclusion est particulièrement adaptée aux sols sablonneux et argileux qui ne sont pas trop durs. La technique de vis de forage de Menard est utilisée pour limiter la quantité de sol qui remonte et est évacuée. La plupart du temps, le diamètre des inclusions est inférieur à 500 mm. En fonction du coefficient de sécurité à obtenir par rapport à la conception, les inclusions peuvent être renforcées ou non. La figure 5 montre les différents types de vis qui peuvent généralement être utilisés (d'après la norme NF P 94-262).

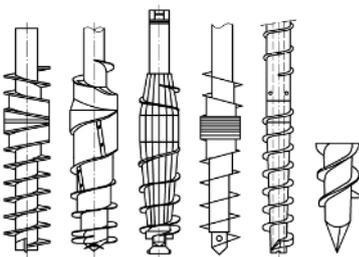


Figure 5. Exemple de vis pour le vissage dans le sol. (d'après la norme NF P 94-262).

L'avantage principal de l'inclusion réside sans doute dans le rendement de production : de 200 à 700 mètres par jour, voire plus pour les inclusions non renforcées. Le principal

inconvenient de la vis est qu'il n'est pas facile, voire impossible, de s'ancrer dans des roches massives sans une couche superficielle d'altération. Un autre point délicat est la nécessité de créer des plates-formes de travail horizontales suffisamment larges. Cependant, les équipements classiques de CMC connaissent un nouveau souffle avec des machines plus petites (Enteco 250) conçues pour des espaces plus confinés (figure 6).



Figure 6. Enteco E250 rig (2023). Une nouvelle génération de foreuses compactes et performantes de Menard.

Le produit $E \times I$ (E : module du béton (N/m^2), I : moment quadratique de surface (m^4)), souvent incorrectement appelé « rigidité » pour les structures de retenue et équivalent à $N.m^2$, est de l'ordre de 10 000 à 77 000 $kN.m^2$ pour des diamètres de colonnes compris entre 300 et 500 mm, et pour un matériau en béton. À titre indicatif, si nous cherchons la rigidité par mètre linéaire (rangée perpendiculaire à la pente), en considérant l'espacement des colonnes (rangée discontinue) fixé à 3 diamètres entre les centres, nous calculons entre 11 000 et 50 000 $kN.m^2$ par mètre. Nous pouvons constater la différence avec un mur de 0,5 m d'épaisseur, pour lequel il est possible d'atteindre 250 000 $kN.m^2$ par mètre. Le renforcement par inclusions rigides est plus susceptible d'être utilisé pour des glissements de terrain peu profonds ou des remblais, où un grand nombre d'éléments peuvent être produits rapidement. Les inclusions peuvent également être combinées avec des éléments de mur, ce qui peut réduire le nombre ou la taille des murs (§4).

4. ÉTUDE DE CAS : Autoroute A304

4.1 Problèmes géotechniques à résoudre

Près de la ville de Warcq (France), dans les Ardennes françaises, la construction d'une section de l'autoroute A304 a nécessité la création d'une zone de remblais sur des sols compressibles (Figure 7). Des inclusions rigides CMC® et des murs ont été installés pour stabiliser des glissements de terrain causés par le déplacement de la surface du sol jusqu'à une profondeur d'environ 7 m (Briançon et al., 2020).

4.2 Profil géologique

Le profil typique du sol se compose d'une couche initiale d'argile marneuse molle d'une épaisseur de 5 à 6 m ($p_l^* = 0,30$ MPa, EM = 2,8 MPa), suivie d'une succession de couches de marne très altérée et altérée jusqu'à 10 m d'épaisseur ($p_l^* = 0,30$ MPa à 0,62 MPa, EM = 2,8 à 4,4 MPa). Cela est suivi d'une couche de marne présentant de bonnes caractéristiques ($p_l^* = 3$ MPa, EM = 25 MPa). L'épaisseur de ces couches varie considérablement sur les 600 mètres linéaires du projet.

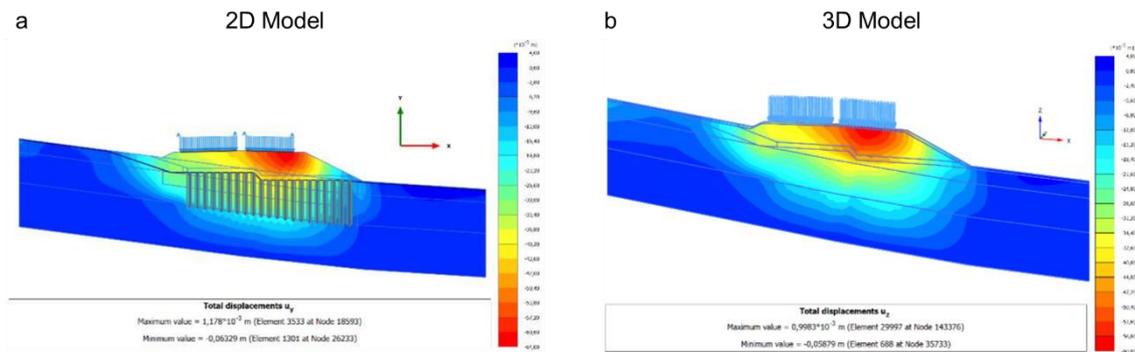


Figure 7. Comparaison des déplacements verticaux u_{y1} , u_{y2} obtenus avec des modèles 2D et 3D de Plaxis pour le projet de l'autoroute A304 dans le nord de la France (d'après Briançon et al., 2020).

4.3 Solution technique adoptée

La solution adoptée consiste à combiner deux techniques de renforcement des sols : les Colonnes à Module Contrôlé (CMC[®]) et le Trenchmix[®]. Les CMC[®] (diamètre de 280 à 420 mm, plus de 4 500 CMC[®], 50 000 mètres de forage) ont été ancrées dans le marne et disposées en treillis rectangulaire à travers les couches de sol compressible. Elles ont permis d'augmenter la rigidité verticale du sol. Les murs Trenchmix[®] (épaisseur d'environ 40 cm, 173 murs, 14 000 m³ de sol mélangé) ont été installés à intervalles réguliers entre les rangées de CMC[®] dans une direction perpendiculaire à l'axe de l'embankment, augmentant ainsi la rigidité horizontale du sol supérieur. Les murs interceptent ainsi les cercles de rupture potentiels en surface et aident à réduire les déplacements latéraux. Dans ce cas, les CMC[®] n'étaient pas soumises à des moments de flexion ou des forces de cisaillement élevés. Elles n'étaient donc pas renforcées.

4.4 Les étapes clés de la conception

La majeure partie du dimensionnement du projet a été réalisée à l'aide d'un calcul par éléments finis (logiciel Plaxis). La première étape du dimensionnement a consisté à justifier un modèle 2D équivalent à un modèle 3D pour faciliter la nature et la durée des calculs. Un modèle 3D a d'abord été développé, à partir duquel les caractéristiques équivalentes du modèle 2D ont pu être calculées. Cela a été suivi d'une comparaison du modèle 3D initial avec le modèle 2D équivalent afin de vérifier la validité du raisonnement. La Figure 7 montre un exemple de comparaison des résultats obtenus entre les modèles 2D et 3D pour l'une des sections du projet.

5. CONCLUSIONS

Pour des situations géotechniques bien identifiées, telles que les échecs de pentes superficielles ou les remblais routiers, les inclusions rigides CMC® ont prouvé leur efficacité. Cependant, cette technique nécessite une expertise en conception considérable.

Lorsqu'elles sont combinées avec d'autres techniques, les CMC® peuvent limiter le volume des travaux de stabilisation grâce à une utilisation judicieuse du treillis, de la profondeur et du béton constitutif des inclusions rigides. La pertinence des données géotechniques correctement identifiées lors des enquêtes, la nouvelle génération de foreuses et l'expérience en conception sont également des éléments clés pour limiter l'empreinte carbone des chantiers de construction.

6. REFERENCES

- ASIRI. (2012). *Recommandations pour le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides*. Presses des Ponts, Paris (In French).
- Banerjee, P.K., Davies, T.G. (1978). The behaviour of axially and laterally loaded single piles embedded in non-homogeneous soils. *Géotechnique*, 28(3): 309-326.
- Briançon, L., Maucotel, F., Plouvier F., Racinais J., Scache H., Benjamin th. (2020). Soil reinforcement by Trenchmix® and CMC® rigid inclusions under an embankment at the slope stability limit. *Proceedings of 10th JNGG at Lyon*.
- Brinch Hansen, J. (1961). The Ultimate Resistance of Rigid Piles against Transversal Forces. *Bulletin of the Danish Geotechnical Institute* (12).
- Combarieu, O. (1988). Amélioration des sols par des inclusions rigides verticales, application à l'édification de remblais sur sols médiocres. *Revue française de Géotechnique*, n°44, 57-79 (In French).
- De Beer, E. (1977). Piles Subjected to Static Lateral Loads. *Proceedings, 9th I.C.S.M.F.E., Specialty Session 10, Tokyo*.
- Ergun, M.U. (2000). Stabilization of Landslides using Piles, *Landslides in Research, Theory and Practice, Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides, Vol.1, pp:513-518, Cardiff, 2000*.
- Fukuoka, M. (1977). The Effects of Horizontal Loads on Piles due to Landslides, *Proceedings, 9th I.C.S.M.F.E., Specialty Session 10, Tokyo, 1977*.
- Ito, T. and Matsui, T. (1977). The Effects of Piles in a Row on the Slope Stability, *Proceedings, 9th I.C.S.M.F.E., Specialty Session 10, Tokyo, 1977*.
- NF P 94-262 (2012). Justification des ouvrages géotechniques. Normes d'application nationale de l'Eurocode 7. Fondations profondes. AFNOR.
- Popescu, M.E. (1991). *Landslide Control by Means of a Row of Piles*. Slope Stability Engineering, Thomas Telford, pp: 389-394, London, 1991.

- Poulos, H. G. (1995). Design of reinforcing piles to increase slope stability. *Can. Geotech. J.*, 32(5), 808–818.
- Reese, L., Wang, S., and Fouse, J. (1992). Use of Shafts in Stabilizing a Slope, *Slopes and Embankments-II A.S.C.E.*, Speciality Session, 1992.
- Reiffsteck, Ph. (2020). Stabilité des pentes, Glissements en terrain meuble. *Techniques de l'Ingénieur*. C245 V3 (In French).
- Schlosser, F., Unterreiner, P. (1994). Renforcement des sols par inclusions. *Techniques de l'Ingénieur*. C245 V1 (In French).
- Schlosser, F., Jacobsen, H.M., Juran I. (1984). Le renforcement des sols. *Revue Française de Géotechnique*. N°29: pp. 7-33 (In French).
- Şengör, M.Y., Ergun, M.U., Huvaj, N. (2013). Landslide stabilization by piles: A case history. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris 2013.
- Sève G., Frank R., Zervogiannis H., Berche J-C. (1996). Étude expérimentale de la stabilisation d'un glissement de terrain par des pieux de gros diamètre. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*. N° 204, juillet-août 1996. Réf. 4074, pp. 53-64.
- Sommer, H. (1977). Creeping Slope in a Stiff Clay, *Proceedings, 9th I.C.S.M.F.E.*, Specialty Session 10, Tokyo, 1977.
- Viggiani, C. (1981). Ultimate Lateral Load on Piles Used to Stabilize Landslides, *Proceedings, 10th I.C.S.M.F.E.*, Vol.3, pp: 555-560, Stockholm, 1981.
- Winter, H., Schwarz, W. and Gudehus, G. (1983). Stabilization of Clay Slopes by Piles, *Proceedings, 8th European Conference on S.M.F.E.*, pp: 545-550, Helsinki, 1983.