

CLOUAGE DES SOLS : CONDITIONS DE LONG TERME ET AMÉLIORATION DU DIMENSIONNEMENT CONVENTIONNEL

SOIL NAILING : SHORT / LONG TERM TRANSITION AND PROPOSAL FOR IMPROVING CONVENTIONAL DESIGN METHODS

Jean de SAUVAGE¹, Jean-Pierre RAJOT¹

¹ *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), département Géotechnique, Bron, France*

RÉSUMÉ – Une coopération entre l'INSA Lyon, GTS et l'IFSTTAR a permis l'instrumentation d'un mur cloué dans des graves propres hors nappe. Les efforts observés au parement ont été comparés aux prévisions par méthode conventionnelle et à une modélisation en éléments finis. Une forte variation de la cohésion apparente est mise en évidence et une amélioration du logiciel PROSPER (LCPC) est proposée.

ABSTRACT – Cooperation between INSA Lyon, GTS and IFSTTAR allowed monitoring a nailed soil wall in a clean gravel layer, above the ground water table. The loads observed at the facing have been compared to the conventional design predictions and to the results of a finite element model. An important variation of the apparent cohesion is highlighted and a proposal for improving PROSPER software (LCPC) is made.

1. Dimensionnement de murs cloués et études précédentes

Le clouage des sols est encore en 2017 l'objet de questionnements quant à la répartition des efforts entre les différents clous d'un soutènement d'excavation et son évolution lors du passage de court terme à long terme. Traditionnellement, ces questions sont occultées dans les méthodes de dimensionnement basées sur les calculs de stabilité de pente, où les efforts mobilisables dans les clous proviennent de l'analyse multicritère de la rupture de chaque clou, en tenant compte ou non des déplacements le long de la courbe de rupture potentielle considérée.

Ceci conduit par exemple à trouver systématiquement les efforts les plus importants dans le clou du bas de la paroi dont la faible sollicitation est pourtant notoire en pratique. Les limitations de ces méthodes conduisent également à s'interroger sur la valeur des efforts au parement et ont mené à l'actuelle révision de la norme NF P 94-270 portant sur le dimensionnement des massifs en sol renforcé.

Le premier ouvrage de sol cloué expérimental a été réalisé pour le Projet National allemand *Bodenvernagelung* (Gassler, 1987). Son instrumentation a servi de point de comparaison dans les études ultérieures (Tei, 1993). Trois ouvrages ont ensuite été construits par le CEBTP¹ dans le cadre du Projet National français *Clouterre* (Schlosser et al, 1993). Les murs instrumentés par la FHWA² (Byrne, 1996) complètent le panorama des mesures expérimentales sur le sujet. Il en ressort un profil caractéristique des efforts au parement dont la résultante est significativement inférieure à la poussée active.

Des campagnes plus récentes (Menkiti, 2008 ; Jacobsz, 2011) ont été menées mais les contextes géotechniques particuliers (présence de moraines glaciaires, ancrage au rocher) rendent difficile toute généralisation des observations.

1 CEBTP : Centre d'expertise du bâtiment et des travaux publics

2 FHWA : Federal Highway Administration

2. Ouvrage expérimental de Bévenais

2.1. Présentation de l'ouvrage

Dans ce contexte, une coopération entre le laboratoire LGCIE de l'INSA Lyon, le service Recherche et Développement de GTS et l'IFSTTAR a permis l'instrumentation durant 600 jours d'un mur cloué expérimental, haut de 7.50 m et long de 30 m, dans une carrière située à Bévenais (France).

GTS a développé un procédé de parement drainant pour les soutènements en sol cloué ergonomique et économique reposant sur des écailles préfabriquées en lieu et place du béton projeté (Robit et al, 2014). Ce procédé, appelé paroi AD/OC³, ne modifie pas le phasage de l'excavation. Le confinement et le drainage sont assurés par une gravette cimentée injectée à chaque passe entre les éléments de paroi et le sol en place.

Afin de comparer les performances de la paroi AD/OC à celles d'une paroi classique, le mur expérimental de Bévenais a été divisé en deux comme le montre la photo en figure 1. L'ouvrage a été construit puis sollicité par une tranchée profonde de 3 m creusée en pied d'ouvrage, puis par un remblai en tête.



Figure 1. Ouvrage expérimental de Bévenais après creusement de la tranchée en pied

Les caractéristiques géométriques et géotechniques de l'ouvrage sont résumées dans la figure 2. Le sol est homogène et constitué d'une grave propre (8 % de fines) bien graduée et non saturée. La nappe, située à 30 m sous le terrain naturel, n'impacte pas l'étude.

L'ouvrage a été dimensionné à l'aide de la méthode multicritère (Schlosser et Guilloux, 1981). La valeur indiquée pour le coefficient de frottement latéral des inclusions est une estimation par défaut, les essais d'arrachement ayant été limités par la résistance en traction de l'acier.

2.2. Instrumentation

Les déformées du parement et de la surface du sol étaient suivies par une centaine de mires topographiques. L'exploitation de ces dernières a permis de comparer le comportement de la paroi AD/OC à celui de la paroi classique, par béton projeté, et de mettre en avant leur forte similarité (Robit et al, 2014).

3 Paroi AD/OC : paroi Auto-Drainante et Optimisée en Carbone

Les efforts dans les clous étaient également suivis à l'aide de jauges de déformations, mais l'acquisition ayant été partiellement défectueuse, ces données n'avaient été que peu exploitées jusque-là.

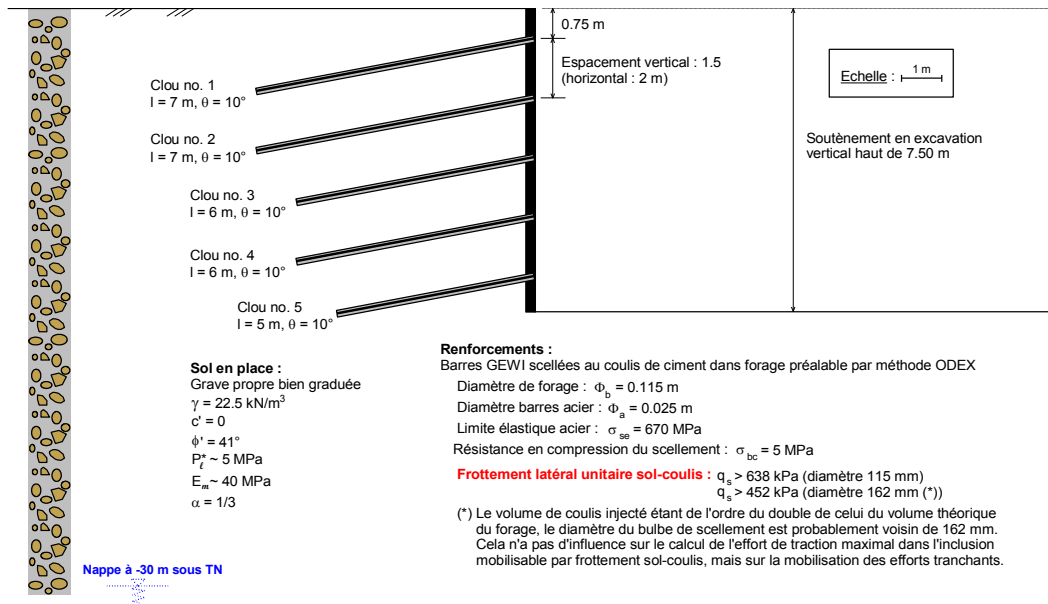


Figure 2. Caractéristiques de l'ouvrage expérimental

Les jauges étaient collées de manière symétrique sur les inclusions afin de distinguer les composantes de traction et de flexion. 26 clous ont été équipés à 20 cm du parement et 4 clous (situés sur les lits n° 2 et 4) ont été instrumentés sur toute leur longueur. Seule une partie de ces mesures est exploitable et elles ne permettent pas de comparer les deux types de paroi. Les données présentées ici proviennent indifféremment de la paroi AD/OC ou de la paroi classique.

2.3. Résultats des mesures

Les mesures d'effort ont débuté le 19 juin 2013, soit 10 jours après la fin du chantier et se sont poursuivies pendant 600 jours. La figure 3 présente l'évolution de l'effort maximal et de l'effort au parement dans le clou n° 4. L'effort au parement n'est pas corrigé de la flexion par manque de mesure.

Sur cette période, malgré la nature du sol, on observe une importante augmentation des efforts dans les inclusions. En particulier la traction croît lors des 200 premiers jours alors qu'aucun chargement supplémentaire n'est imposé. La courbe décrivant l'effort maximal laisse apparaître deux sauts correspondant au creusement d'une tranchée en pied du mur (243 jours) et à la mise en place d'un remblai en tête (517 jours).

La figure 4 présente la répartition des efforts au parement et son évolution dans le temps. Les efforts mesurés en fin de chantier sont très faibles en comparaison des prévisions de la méthode multicritère qui prédisait 80 kN pour le lit de clous n°4. Cependant, ils augmentent considérablement ensuite tout en restant inférieurs aux prédictions.

Le même constat peut être fait en considérant la répartition des tractions le long du clou n° 4 (figure 4). Les efforts sont très faibles après 10 jours et leur répartition est peu conventionnelle, mais ils augmentent ensuite et leur répartition tend vers un schéma plus usuel.

Tout se passe donc comme si les clous étaient mobilisés très progressivement et on observe une transition du court terme vers le long terme, malgré une nature de terrain qui ne le laissait pas présager.

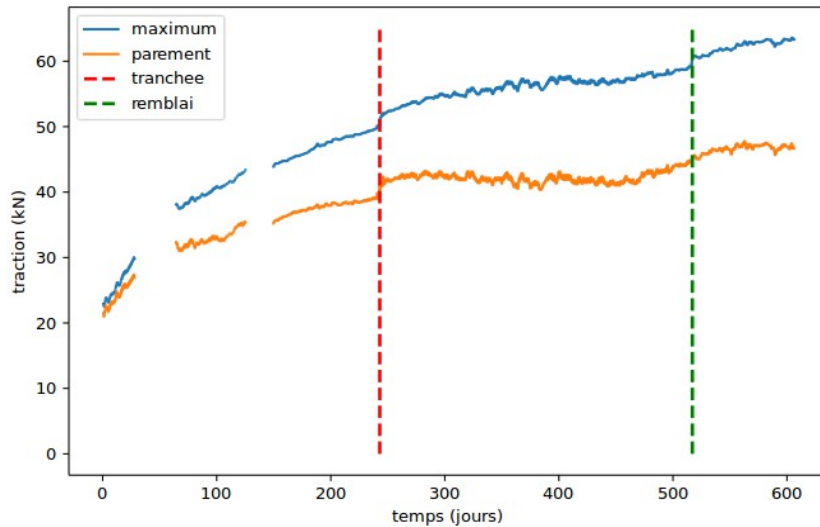


Figure 3. Evolution des tractions dans le clou n° 4 (effort au parement non corrigé de la flexion)

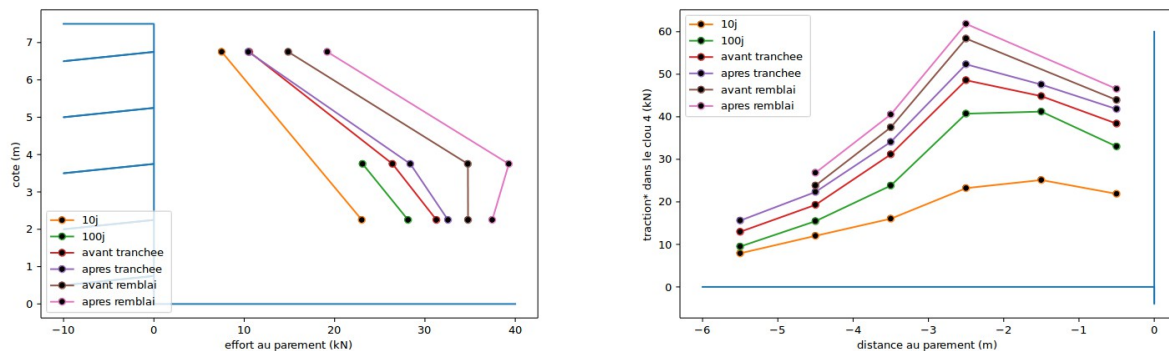


Figure 4. Répartitions des efforts au parement (gauche) et le long du clou n° 4 (droite) à différentes dates. (Effort au parement du clou n° 4 non corrigé de la flexion)

3. Modélisation en éléments finis

Le mur cloué a été modélisé en 3D par la méthode des éléments finis en utilisant le programme de calcul CESAR-LCPC et en respectant le phasage d'exécution. Après une initialisation géostatique des contraintes dans le sol, chaque phase d'excavation (passes de 1m50) a été modélisée. Le clou et l'écaille de la passe n ne sont activés qu'à compter du creusement de la phase $n+1$, conformément à la procédure d'excavation.

Après la simulation de la construction du mur et pour rendre compte de l'augmentation à long terme des efforts dans les clous, la cohésion, initialement prise égale à 6 kPa, a été réduite, de manière homogène dans le modèle de calcul, à 4 puis 2 puis 0 kPa lors de trois phases successives.

Le comportement en déformation du sol a été représenté par un modèle de comportement élastoplastique obéissant au critère de Mohr-Coulomb sans écrouissage.

L'ensemble des paramètres géotechniques utilisés est précisé sur la figure 2 et le module d'Young du sol a été choisi égal à $E_m/\alpha^2 = 360$ MPa (Baud et Gambin, 2013).

Les inclusions sont modélisées à l'aide d'éléments linéiques partageant leurs nœuds avec les éléments de sol et possédant un degré de liberté supplémentaire : le déplacement relatif sol-clou (Bourgeois et al, 2012). La relation entre déplacement relatif de l'inclusion par rapport au sol et effort de frottement est considérée comme linéaire jusqu'au seuil d'arrachement, la pente étant prise égale à la première pente de la loi de Frank et Zhao et le seuil déduit des essais d'arrachement.

La figure 5 présente les répartitions des efforts au parement obtenues. On constate un fort écart entre les valeurs issues du calcul numérique et les mesures expérimentales. Sur l'ouvrage expérimental, l'effort mesuré au parement dans le clou n°4 10 jours après le chantier valait 23 kN. Le même effort calculé par éléments finis vaut 37 kN pour une cohésion de 6 kPa. Les hypothèses de calcul peuvent expliquer pour partie cette différence. En particulier, les caractéristiques du frottement sol-inclusion n'ont pu être déterminées sur l'ouvrage réel, les essais d'arrachement ayant été limités par la section de l'acier.

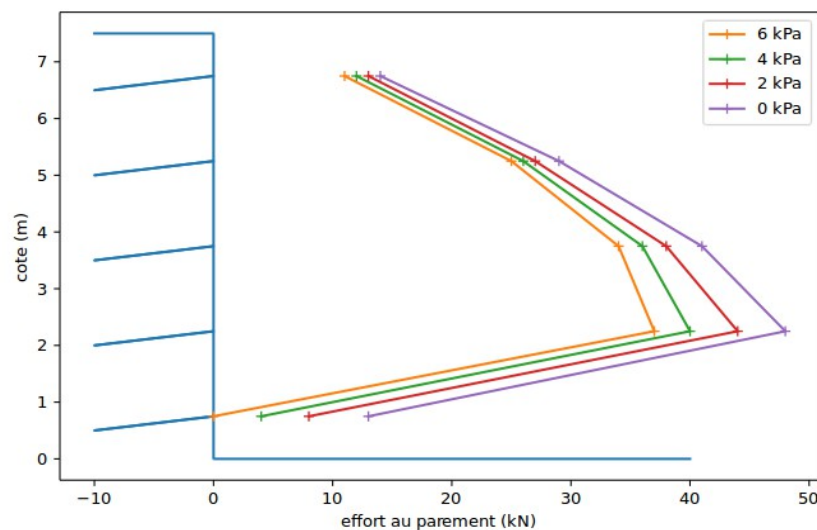


Figure 5. Répartitions des efforts au parement obtenues par éléments finis au cours de phases de perte de cohésion.

On notera cependant que l'augmentation des efforts au parement suite à une perte de cohésion post-construction est comparable à celle mesurée sur le terrain. La forte augmentation des efforts dans les inclusions au cours du temps peut donc s'expliquer par une diminution de la cohésion apparente du sol après excavation. Il est remarquable d'observer cette évolution sur une durée si importante dans un sol grenu et en l'absence de nappe hydraulique.

4. Dimensionnement selon PROSPER

4.1. Le logiciel PROSPER

Les outils traditionnels de dimensionnement des parois clouées reposent sur les méthodes classiques d'analyse de stabilité des pentes, basées sur le choix d'une surface de rupture et la comparaison des efforts moteurs et résistants. Les efforts résistants sont augmentés des efforts stabilisateurs dus aux clous.

L'introduction de ces derniers se fait principalement à l'aide du calcul multicritère (Schlosser et Guilloux, 1981) ou de la méthode en déplacement, qui considère les mêmes modes de rupture des inclusions. Cette dernière approche est celle mise en œuvre dans le logiciel PROSPER développé par le LCPC (Delmas et al, 1986).

Si l'équivalence entre les deux méthodes a été démontrée dans le cadre d'un dimensionnement optimal (Gigan et Delmas, 1987), le logiciel PROSPER ne suppose pas que l'inclusion (ou le sol) soit en situation de rupture comme c'est le cas dans le calcul multicritère.

Un déplacement de la masse en rupture est supposé et les efforts qu'il induit dans les clous sont calculés par intégration de l'équation des poutres. Une boucle d'itération permet ensuite de déterminer le déplacement pour lequel les efforts moteurs et résistants sont dans un rapport satisfaisant pour la sécurité partielle souhaitée sur la résistance au cisaillement du sol. L'intégration de l'équation des poutres permet de déterminer les efforts au parement.

Cette méthode a le défaut de supposer un mouvement de long de la surface de rupture par défaut uniforme, négligeant ainsi la déformabilité du massif. De plus, elle ne prend pas en compte le phasage d'exécution qui a pourtant une influence sur la mobilisation respective de chaque inclusion. En particulier, les efforts développés dans le clou du bas sont en général fortement surévalués, ce clou n'étant en réalité mobilisé par aucune excavation.

4.2. Introduction de déplacements relatifs

Afin de corriger ces défauts, le logiciel Prosper permet d'introduire un déplacement variable entre le haut et le bas de la surface de rupture. Cette fonctionnalité n'est cependant que rarement utilisée faute de connaissances sur la distribution de ce déplacement le long de la courbe de rupture potentielle considérée.

En effet, pour chaque lit d'inclusion, il est possible de définir le rapport entre les déplacements le long de la surface de rupture au niveau du lit et le déplacement maximal au sommet de la paroi. La figure 6 présente les efforts au parement obtenus pour un déplacement homogène de la masse en rupture et ceux, « corrigés », obtenus en considérant une variation de déplacement relatif.

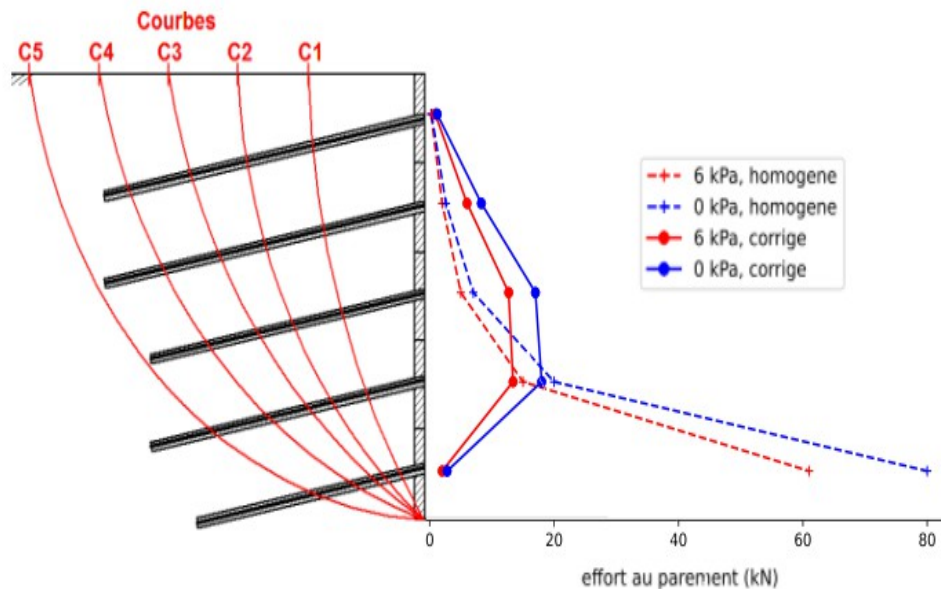


Figure 6. Courbes de ruptures utilisées dans PROSPER et répartition des efforts au parement obtenus en considérant la courbe C2 avec ou sans cohésion.

Expérimentalement on observe que la mobilisation du clou n est principalement causée par l'excavation de la passe $n+1$ et par celle de la passe $n+2$ (Menkiti et Long, 2008). Se basant sur ces observations, il est ici proposé d'imposer les déplacements relatifs suivants :

- clou 1 : 100%
- clou 2 : 90 %
- clou 3 : 70 %
- clou 4 : 25 %
- clou 5 : 1 %

Le profil des efforts au parement obtenu avec ces déplacements corrigés est plus conforme aux observations et à la modélisation en éléments finis.

5. Analyse comparative des résultats

Les valeurs des efforts expérimentaux sont plus faibles que celles prévues par la méthode des éléments finis. La faible sollicitation de l'ouvrage semble confirmée par la difficulté éprouvée par GTS pour le mener à la rupture. Une telle différence entre prévisions numériques et observations expérimentales peut s'expliquer par les hypothèses de calcul. En effet, les caractéristiques de l'interface sol-clou ont été estimées par défaut, les essais d'arrachement ayant été limités par la résistance de l'acier. De plus, le modèle aux éléments finis est sensible aux conditions initiales et la détermination du coefficient de poussée latérale au repos, K_0 , est difficile. Ici, la formule de Jaky a été utilisée.

Le calcul Prosper repose sur un nombre plus faible d'hypothèses. S'agissant d'un calcul à la rupture, il ne tient pas compte des conditions initiales. Les caractéristiques de l'interface sol-inclusion influent cependant sur la transmission des efforts au parement. Et si l'introduction des mobilisations relatives a permis d'obtenir une répartition proche de celle observée, il serait hâtif de généraliser le résultat.

Enfin, l'observation de la perte de cohésion apparente reste à expliquer. Sur une période aussi longue, la variation des conditions météorologiques peut induire une variation de la teneur en eau des sols. Ce phénomène est accentué car, lors de l'excavation, le sol est brutalement exposé à des conditions de surface. Dans des graves, la cohésion résulte également de l'imbrication et le déconfinement conséquent à chaque passe ainsi que la mobilisation progressive des inclusions peuvent modifier la structure du squelette solide.

6. Conclusions et perspectives

L'observation de l'évolution des efforts développés dans les inclusions d'un mur en sol cloué a permis de mettre en évidence une forte perte de cohésion apparente sur une période de 600 jours et ce dans une grave propre et bien graduée. Il est donc nécessaire de réaliser plus d'observations expérimentales, que ce soit sur ouvrage réel ou sur modèle réduit.

Par ailleurs, il a été montré que l'introduction dans le calcul Prosper d'un déplacement relatif non homogène le long de la surface de rupture permet de déterminer une répartition des efforts au parement plus conforme à l'observation. Il est donc important de développer des abaques de déplacement relatif pour optimiser de manière importante le dimensionnement des ouvrages en sol cloué, en particulier le parement.

7. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'entreprise GTS et son responsable Recherche Philippe Robit, ainsi que l'INSA Lyon et Ali Limam pour la mise à disposition de leurs données

expérimentales. Nos remerciements vont également à Philippe Lévêque et Emmanuel Bourgeois dont l'aide fut précieuse dans le développement du modèle en éléments finis.

Enfin nous remercions le Ministère français de la Transition Ecologique et Solidaire pour le financement de la thèse de doctorat dans le cadre de laquelle ces travaux ont été rendus possibles.

8. Références bibliographiques

- Baud J.P., Gambin M. Détermination du coefficient rhéologique de Ménard dans le diagramme Pressiorama. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris. Pp 487-490
- Bourgeois E., Le Kouby A., Soyez L. (2012). Influence of the strip-backfill interaction model in the analysis of the behavior of a mechanically stabilized earth wall. *Soils and Foundations* 52.3. pp 550-561
- Byrne R.J. et al (1996). Manual for design and construction monitoring of soil nail walls. FHWA Editions.
- Delmas P., Cartier G., Abdelhedi A. (1986). Une nouvelle méthode de dimensionnement du clouage des pentes: programme Prosper. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées 141.
- Gassler G. (1987). Vernagelte Gelandesprunge-Tragverhalten und Standsicherheit. Thèse de doctorat. University of Karlsruhe.
- Gigan J.P., Delmas P. (1987). Mobilisation des efforts dans les ouvrages cloués. Etude comparative de différentes méthodes de calcul. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées 147.
- Jacobsz S.W., Phalanndwa T.S. (2011). Observed axial loads in soil nails. Proceedings of the 15th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Maputo. pp 221-227.
- Menkiti C.O., Long M. (2008). Performance of soil nails in Dublin glacial till. *Canadian Geotechnical Journal* 45.12. pp 1685-1698
- Robit P., Rajot J.P., Limam A. (2014). Paroi clouée AD/OC – Une alternative au béton projeté qui renforce le drainage et limite les émissions de CO₂. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Beauvais.
- Schlosser F., Guilloux A. (1981). Le frottement dans le renforcement des sols. *Revue française de Géotechnique* 16. pp 65-77.
- Schlosser F., Unterreiner P., Plumelle C. (1993). Validation des méthodes de calcul de clouage par les expérimentations du Projet National Clouterre. *Revue Française de Géotechnique* 64, pp 11-20.
- Tei K. (1993). A study of soil nailing in sand. Thèse de doctorat. University of Oxford.