

OPTIMISATION D'UN CONFORTEMENT PAR CLOUAGE VERTICAL SUITE A RETOUR D'EXPERIENCE

REINFORCEMENT WITH VERTICAL PILES : FEEDBACK AND SIZING OPTIMIZATION

Florence BELUT¹, Fatima LUCAS¹, Vincent TALFUMIERE¹.

¹ SNCF RESEAU – Direction Ingénierie & Projet – LA PLAINE ST DENIS

RÉSUMÉ – La technique de confortement des ouvrages instables par clouage vertical est utilisée depuis environ 40 ans sur le réseau ferré national. Son coût élevé a conduit à réfléchir sur son optimisation. Un retour d'expérience a montré que, sous certaines conditions, il est possible de diminuer le coefficient de sécurité prescrit à SNCF Réseau et donc le maillage des pieux. Cette optimisation a été retenue sur un site non encore traité.

ABSTRACT – The vertical soil-nailing technique has been used since 40 years on National Railway Network for landslide stabilisation. Its high cost led to think of an optimization. An experience feedback showed under certain conditions, that the factor of safety using in nail design by SNCF, and piles spacing can be reduced. This optimization is applied to an existing landslide not yet reinforced.

1 Introduction

Le réseau ferré national est le siège de désordres au niveau des ouvrages en terre qui peuvent avoir un impact sur la sécurité et la régularité des circulations des trains. La maintenance du réseau a entre autres pour objectif de traiter préventivement les ouvrages instables par des travaux de confortement. Parfois, il s'agit de travaux curatifs.

Les interventions les plus courantes dans le domaine des ouvrages meubles se font par des techniques de terrassement (par retrait ou apport de matériaux). Ce type de travaux peut ne pas être adapté ou impossible à réaliser du fait des emprises ou des accès. Alors, des solutions alternatives sont envisagées. Le clouage vertical par pieux forés ou battus est l'une d'entre-elles.

2 Principes du clouage vertical et particularités du domaine ferroviaire

Le clouage vertical est utilisé depuis une quarantaine d'années sur le réseau ferré national pour conforter les ouvrages instables. C'est sous l'instigation de l'IFSTTAR (ex LCPC), qu'un premier chantier test est entrepris en 1982 sur le glissement du remblai de Boussy St Antoine, au km 23 de la ligne Paris – Marseille. Les pieux réalisés à la tarière, de diamètre 800 mm, ont permis de réduire de façon très significative les mouvements affectant le remblai dans les deux années qui ont suivi. Une instrumentation spécifique avec inclinomètres et jauges de contraintes avait à l'époque été mise en place sur les pieux et dans le talus pour apprécier leur comportement et quantifier les paramètres mesurés lors de cette expérimentation. Ce chantier a permis de confirmer les hypothèses de calculs par une mise en situation en vraie grandeur, qui se basait sur l'utilisation de la méthode des modules de réaction (Baguelin et al., 1977 et Bourges et Frank, 1989).

Depuis cette période, plusieurs centaines d'ouvrages en terre ferroviaires ont été confortés avec succès par la méthode du clouage vertical (Talfumière, 2011).

Cette méthode (figure 1) repose sur l'hypothèse que la partie du massif en mouvement engendre, par les efforts appliqués sur les clous, une déformation de ces derniers. Les efforts résultants (essentiellement liés à de la flexion) transmis par les pieux sous la surface de rupture s'opposent aux déplacements ; ainsi plus le sol instable se déplace, plus le pieu résiste à ce déplacement de par son inertie.

Cette théorie consiste à résoudre l'équation 1 :

$$EI \cdot \frac{d^4 y}{dz^4} = K_s \cdot [g(z) - y(z)] \quad (1)$$

- E : le module d'Young du pieu
- I : l'inertie du pieu
- K_s : le module de réaction du sol
- $y(z)$ et $g(z)$ respectivement les déplacements horizontaux du pieu et du sol en fonction de la profondeur

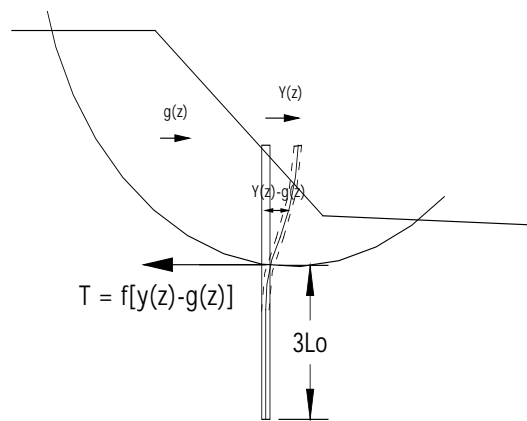


Figure 1 : Principe de la méthode des modules de réaction

L'objectif est d'améliorer le coefficient de sécurité au glissement du talus instable d'une valeur variant de 10 à 20 % suivant les recommandations du guide technique de stabilisation des glissements de terrain (Sève et Pouget, 1998, Durville et al, 2010).

A SNCF RESEAU, l'objectif d'amélioration du coefficient de sécurité est de 25%, soit une diminution des efforts moteurs du glissement de l'ordre de 20%. Cet objectif est recherché depuis les premières études de confortement menées par l'IFSTTAR (ex LCPC). Il est légèrement supérieur à la pratique recommandée car les tolérances de mouvements après travaux dans le domaine ferroviaire sont plus draconiennes (quelques millimètres sur une longueur de 3 mètres).

Les principaux paramètres dimensionnant sont :

- K_s qui dépend du module pressiométrique des sols concernés,
- P_f , la pression de fluage au niveau de la surface de rupture qui va limiter le déplacement libre du sol $g(z)$,
- F , le coefficient de sécurité objectif, à atteindre après mise en place du confortement.

Les calculs de stabilité sont menés à rebours pour établir la situation initiale du site modélisé afin de caler le coefficient de sécurité à une valeur proche de 1, en abattant les valeurs de la cohésion au sein des terrains glissés à des valeurs nulles. La situation après confortement consiste à positionner une ou plusieurs lignes de clous au niveau du tiers central du talus glissé, avec une fiche sous la surface de rupture identifiée, assez importante pour que les pieux puissent être considérés comme infiniment longs.

Le calcul est mené à la fois avec un logiciel de calcul de stabilité pour s'assurer du nouveau coefficient de sécurité et par un logiciel spécifique (PILATE développé par l'IFSTTAR) qui définit les efforts et déformations dans les pieux, à partir du déplacement appliqué au-dessus de la surface de rupture dans le sol instable.

Les calculs sont menés généralement jusqu'en limite du fluage des sols mais d'autres hypothèses de calcul peuvent être adaptées à des cas plus particuliers (sols compressibles,...).

Les pieux utilisés par SNCF RESEAU peuvent être (figure 2) :

- des pieux battus : palplanches, profilés, tubes, caissons de palplanches, rails, ...
- des pieux forés de diamètre 200 à 800 mm, scellés et armés de profilés, tubes ou rails,...

Dans le premier cas, il faut veiller à la problématique des vibrations et à la résistance des terrains (refus prématuré en cas de module pressiométrique supérieur à 25 MPa).

Dans le deuxième cas, les accès à la foreuse sont à aménager et, dans la plupart des cas, une banquette de travail est à construire avant la réalisation des inclusions.



Figure 2 : Exemples de clouage vertical par pieux battus (a), pieux forés (b)

3 Retour d'expérience sur le clouage vertical

Dans une perspective d'optimisation du dimensionnement de la technique de confortement par clouage vertical, un bilan sur le comportement des ouvrages confortés par clouage vertical a été réalisé afin de définir des optimisations possibles concernant le coefficient de sécurité global appliqué à ce type de confortement.

Pour réaliser ce travail, nous nous sommes intéressés à l'activité des glissements avant et après confortement. Huit sites ont été étudiés, ceux-ci sont affectés par des glissements plus au moins profonds et présentent l'avantage d'avoir été instrumentés et suivis plusieurs années avant et après confortement. Chaque ouvrage a fait l'objet d'une analyse technique complète qui a permis d'établir son historique, les hypothèses prises en compte dans le dimensionnement, l'état de l'activité des mouvements affectant les ouvrages avant et après le clouage puis les efforts pris en compte dans le dimensionnement pour stabiliser ces ouvrages.

3.1 Par type de clouage

Les mouvements des sites étudiés ont été suivis par des inclinomètres. L'analyse des résultats de ce suivi montre que la vitesse des mouvements affectant ces ouvrages confortés par clouage vertical est réduite quasi-immédiatement après les travaux de 10 à 20 fois (figure 3a) par rapport à la vitesse initiale. Bien que sur certains ouvrages les mouvements continuent d'évoluer, le confortement permet de ramener l'activité des déplacements à des vitesses annuelles compatibles avec l'entretien courant des voies ferrées.

La figure 3b donne l'exemple d'évolution des déplacements horizontaux en fonction du temps d'un remblai conforté par clouage vertical sur la ligne reliant Bordeaux à Irun. On constate qu'avant le confortement de l'ouvrage, les vitesses des mouvements mesurées par les inclinomètres varient entre 6 cm et 12 cm par an en fonction des saisons. Ces valeurs dépassent largement les seuils admissibles pour une voie circulée à 100 km/h. Le confortement a permis de réduire la vitesse à 1 cm/an. Sur la majorité des ouvrages étudiés, le confortement a permis de diminuer la fréquence des opérations de bourrage au niveau de la voie.

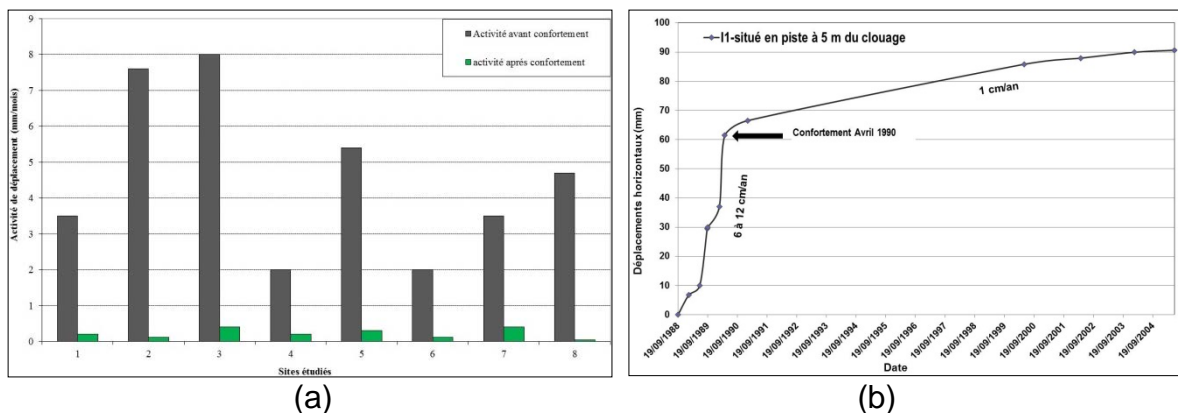


Figure 3 : Activité des déplacements avant et après confortement des sites étudiés (a), Evolution des déplacements en fonction du temps sur un remblai conforté par clouage (b).

3.2 Marge de sécurité effective

Pour calculer la marge de sécurité effectivement nécessaire à la stabilisation des mouvements, les efforts réellement repris par le clouage ont été estimés à partir des déplacements mesurés par les inclinomètres ($g(z)$ réel) après confortement et jusqu'à stabilisation.

La figure 4a présente les résultats obtenus sur les huit sites étudiés. On constate que pour les ouvrages confortés par palplanches, la marge de sécurité dépasse les 25% recherchée dans les études. Cette différence est vraisemblablement liée à des déplacements dus au battage des palplanches. En effet, sur un des remblais conforté par palplanches, il a été mesuré pendant la phase travaux un déplacement de 24.5 mm (figure 4b) dû au battage, conduisant à une marge de sécurité de 62%. Dans le cas du confortement par pieux battus, il est donc difficile à l'état actuel des connaissances de quantifier la part de déplacement due au glissement par rapport à celle liée au battage, et de proposer une optimisation.

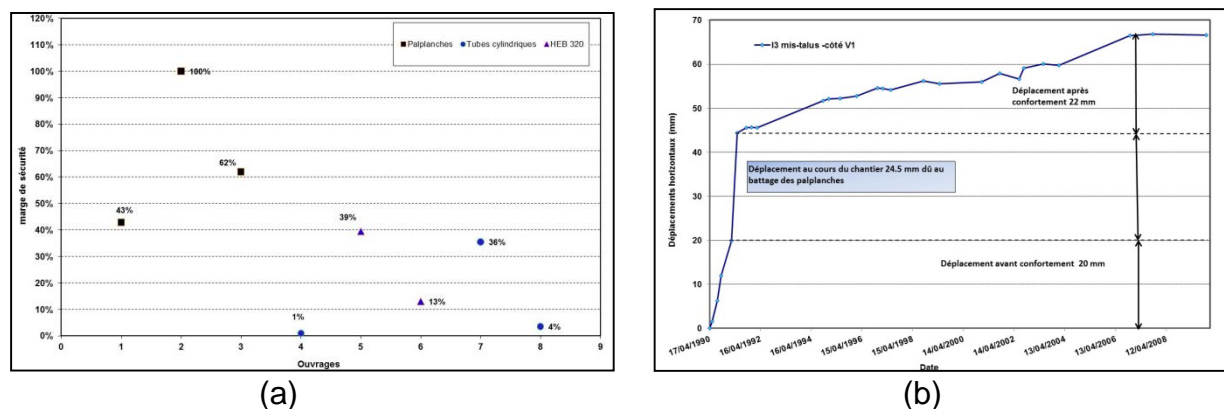


Figure 4 : marge de sécurité réellement obtenue (a), évolution des déplacements inclinométriques d'un site conforté par palplanches (b).

Par ailleurs, dans le cas des pieux forés, on constate que trois ouvrages ont été stabilisés pour des marges de sécurité inférieures à 25%, et deux autres avec une marge de sécurité de 36% et 39%.

En première analyse, il ne semble pas y avoir de lien entre le diamètre des pieux ou le profilé et la marge de sécurité permettant la stabilisation. D'autres paramètres ont très vraisemblablement une influence sur le résultat, tels que la pression de fluage réelle/théorique, les incertitudes liées à la cinématique réelle du glissement, l'espacement entre les pieux, la position des tubes inclinométriques par rapport aux pieux, des pieux par rapport à la surface de rupture etc. Le faible échantillonnage ne permet pas à ce stade de conclure.

Par ailleurs les valeurs pressiométriques (module pressiométrique E_M et pression de fluage p_f) utilisées pour estimer le module de réaction k_s , le déplacement libre du sol $g(z)$ et les efforts à reprendre, peuvent également influencer le comportement des pieux et avoir un impact sur la marge de sécurité permettant la stabilisation. Il est donc nécessaire d'apporter un soin particulier à l'interprétation et au choix de ces paramètres.

Pour confirmer les premiers résultats obtenus et préciser les conditions d'optimisation du coefficient de sécurité, le remblai d'Aurillac situé sur la ligne Figeac à Arvant a été conforté par clouage (diamètre 800 mm et profilés HEB 450) en octobre 2014 avec une amélioration du coefficient de sécurité de seulement 15%. Les mesures inclinométriques réalisées depuis ne montrent pas à ce jour de mouvement significatif mais les travaux sont encore trop récents pour confirmer la stabilisation. La poursuite du suivi inclinométrique permettra de savoir si la marge prise a suffi à stabiliser l'ouvrage.

4 Application du retour d'expérience sur un ouvrage instable

Afin de tester le bien-fondé d'une optimisation des règles de dimensionnement du clouage vertical, un nouvel ouvrage instable, le remblai de Pavilly, a été retenu.

4.1 Présentation du site et historique

Ce remblai de grande hauteur (15 à 20 m) sur la ligne Paris- Le Havre, situé à flanc de coteau sur des formations de versant affectées de glissements anciens, connaît des mouvements lents avec quelques périodes d'accélération, depuis le glissement profond survenu en 1961 après élargissement de ce remblai vers l'aval (il s'agissait de déplacer la plateforme pour créer une déviation au tunnel de Pavilly situé côté le Havre).

Le glissement de 1961 (13 000 m³ sur environ 220 m) a concerné la moitié du remblai et le sol support, créant un bourrelet de pied dans la prairie aval et détruisant l'aqueduc de

traversée situé dans l'axe de la zone glissée, à environ 12 m de profondeur sous le remblai.

Entre 1962 et 1965, des travaux ont permis de remettre l'ouvrage en état : il s'agissait de terrassement (déchargement et création de deux risbermes), de clouage (épis de palplanches liaisonnées par des longrines bétons, pieux chêne et gabions) et de drainage (6 tranchées drainantes transversales).

Le remblai (figure 5) est cependant demeuré instable avec l'apparition de défauts en voie dans les années 1990 puis en 2001, liés en partie à la dégradation des tranchées drainantes. Le site a alors été instrumenté par tubes inclinométriques (1995 puis 2001)

Entre 1999 et 2001, un système de drainage a été rétabli et un confortement par masque drainant a été réalisé pour stabiliser superficiellement le talus et la piste côté V2 (qui présentaient des fissures et des zones affaissées). Cela n'a pas suffi à stabiliser l'ouvrage qui a connu plusieurs phases d'accélération des activités inclinométriques avec cependant peu d'impact en voie. Les mesures ont montré la réactivation du glissement de 1961.

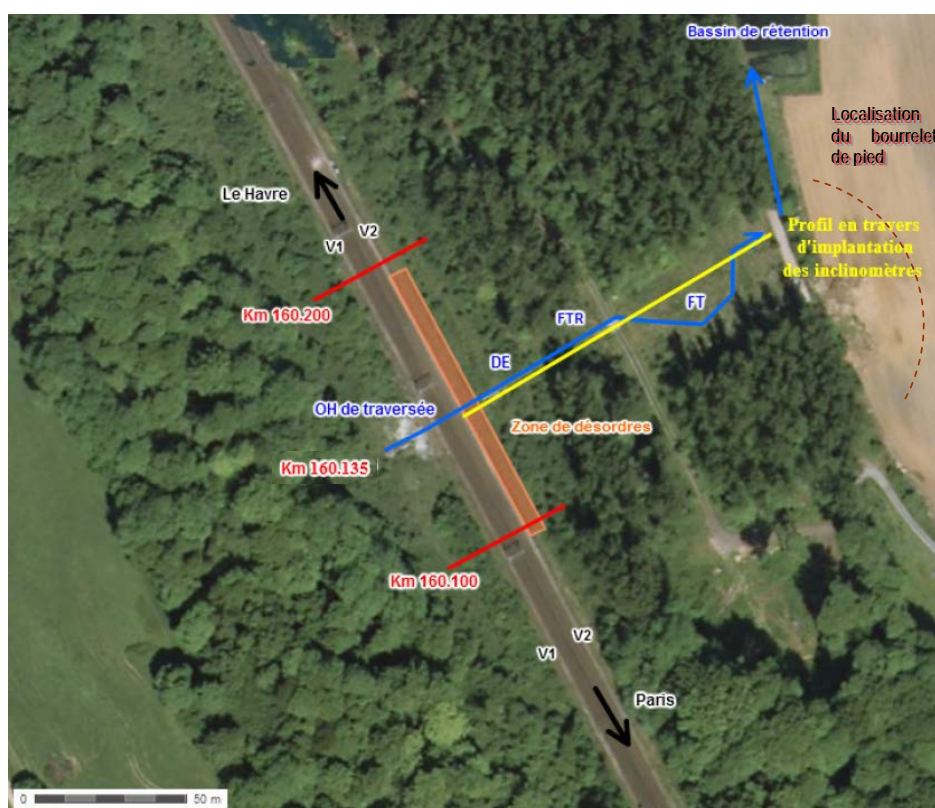


Figure 5 : Vue aérienne avec schéma de la zone (Source Géoportail)

4.2 Problématiques

Des travaux de clouage vertical ont été envisagés pour conforter ce glissement de versant.

Une première étude a été réalisée en 2004 selon les règles de dimensionnement usuelles sur le réseau ferré national.

A l'aide du logiciel Talren et de Pilate (calculs des efforts repris par un pieu isolé), elle a abouti au dimensionnement de pieux de 800 mm de diamètre, armés de profilés HEB 450, de 23,5 m de long et disposés sur trois files avec un espacement de 2,1 m par file, pour un gain de 25 % sur le coefficient de sécurité initial.

4.3 Recherche d'une optimisation

Compte tenu du coût important de ces travaux, une optimisation a été demandée par le Maître d'Ouvrage pour dimensionner une solution plus économique. Celle-ci, basée sur 3 critères, permettait de supprimer une des trois files :

- une recherche de gain du coefficient de sécurité moindre,
- une surface de rupture active plus réduite que le glissement historique et qui ressortirait plus en amont, à vérifier en posant de nouveaux tubes inclinométriques et en analysant plus en détail les niveaux piézométriques,
- l'assouplissement du critère de mobilisation de la pression de contact sol-inclusion, à savoir l'autorisation d'un léger fluage du sol.

Cette optimisation entrainera une stabilisation plus lente de l'ouvrage et n'exclut pas de réaliser la 3^{ème} file ultérieurement en cas de non stabilisation.

Les réflexions menées en parallèle sur la base de l'analyse des clouages verticaux déjà réalisés ont montré que ce cas pouvait répondre aux critères des ouvrages stabilisés plus efficacement que prévu (macropieux et glissement de versant) et donc à une optimisation envisageable du dimensionnement.

Il a donc été décidé de dimensionner l'ouvrage en prenant un abattement sur le coefficient de sécurité d'un tiers (gain de 17% recherché) et une surface de rupture plus réduite que celle de 1961, que les inclinomètres posés en 2009 ont confirmé (très faible activité de l'inclinomètre le plus en aval) ;



Figure 6 : profil géotechnique de synthèse et surfaces de rupture

Cela aboutit (calcul TALREN sur la base du profil géotechnique figure 6) à des efforts moteurs à reprendre de 500 kN/ml au lieu de 710 kN/ml (820 kN/ml pour la surface de rupture de 1961 avec un gain de 25%).

Le gain obtenu pour la surface de rupture de 1961 correspond à 12%, ce qui reste dans la fourchette des recommandations du guide technique (Sève et Pouget, 1998, Durville et al, 2010).

Le dimensionnement des pieux calculé avec PILATE pour ces efforts comporte donc 2 files de pieux de diamètre 800 mm armés de HEB 450, de longueur 23,5 m, espacés de 2,75 m par file.

Le chantier est actuellement programmé en 2017. Après les travaux de confortement, un suivi de l'évolution site est prévu (inclinométrie, géométrie de la voie...) de façon à observer l'influence de la diminution du maillage sur la durée et la vitesse de stabilisation du site.

5 Conclusions

Les premiers résultats de retour d'expérience montrent une possible optimisation du coefficient de sécurité. En effet, l'analyse des mesures inclinométriques des ouvrages étudiés montre dans tous les cas que la vitesse des déplacements après confortement est réduite à des valeurs annuelles admissibles pour la maintenance des voies ferrées.

Dans le cas des pieux forés, cette hypothèse doit cependant être confirmée en alimentant le retour d'expérience par d'autres exemples d'ouvrages confortés par clouage, et par les résultats de suivi inclinométrique sur les remblais d'Aurillac et de Pavilly. L'ensemble des paramètres pouvant avoir une influence sur le déplacement après confortement sera à étudier (diamètre des pieux, mais aussi pression de fluage du sol, effet de groupe, position des inclinomètres par rapport au clouage, du clouage par rapport à la surface de rupture, etc.).

Pour ce qui concerne les pieux battus, il est difficile de retenir une marge d'optimisation précise. En effet, il existe des incertitudes sur les déplacements réels qui ont conduit à stabiliser effectivement le glissement du fait du déplacement qui se produit pendant le battage (impossibilité en l'état actuel des connaissances de distinguer dans ce déplacement la part correspondante à une mise en charge des pieux).

6 Références bibliographiques

Baguelin F., Frank R., Saïd Y.-H. : Etude théorique du mécanisme de réaction latérale des pieux, Bull. liaison Labo. P. et Ch. 92, nov.-déc. 1977, p. 35-58.

Bourges F., Frank R. (1989). Fondations Profondes Techniques de l'Ingénieur, C248-249.

Collectif, (1988). Renforcement des sols par clouage, Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées.

Durville J.L., Magnan J.P., Blivet J.C., Pouget P., Chapeau C., Sève G., Reiffsteck P (2010). Prévention et stabilisation des glissements de terrain : conception, mise en œuvre et maintenance des dispositifs : Guide technique. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), 161p.

Philipponnat G., Bertrand. H. (2008). Fondations et ouvrages en terre. Eyrolles.

Sève G., Pouget P., (1998). Guide technique Stabilisation des glissements de terrain, LCPC.

Talfumière V., (2011). Confortement des ouvrages en terre par la technique du clouage vertical, Revue française de géotechnique, n°134-135, pp 99-109.

Talfumière V., (2011). Maintenance des ouvrages en terre sur le réseau ferré national, Revue française de géotechnique, n°134-135, pp 7-14.