

SOUTÈNEMENT DES DEBLAIS INSTABLES ET DE GRANDE HAUTEUR : LES PAROIS CLOUEES : CAS DE LA ROCADE MEDITERRANEENNE

Abdelfattah MOBARRAA:Chef de Service Etudes et Réalisation à la DOA
Saïd JAFRANE:Chef d'Aménagement de la Rocade Méditerranéenne (MEDA)

PLAN DE LA COMMUNICATION

- Résumé
- Historique sur la genèse de la technique
- Description du projet
- Le dimensionnement : Paramètres géotechniques, Coefficients sismiques, Calcul de stabilité et coefficients de sécurité partiels
- Constituants de la paroi clouée : Ancrages, drainage, Treillis soudé , panier de répartition et Béton projeté
- Procédure d'exécution des parois clouées
- Conclusion

Résumé

Le thème a pour objectif de présenter la technique des parois clouées, ses fondements, les méthodes de dimensionnement, la formulation du béton projeté ainsi que les techniques de mise en oeuvre telles qu'elles ont été utilisées sur le tronçon de la Rocade reliant Jebha à bni Boufrah.

On passera en revue les investigations géotechniques faites ainsi que les paramètres de calcul. Puis on parlera des logiciels utilisés pour le dimensionnement (SLIDE par l'entreprise et TALREN par la mission de contrôle) pour dégager les similitudes obtenues sur les coefficients de sécurité partiels quoique que les approches de calcul soient différentes.

Un passage sera consacré à la formulation du béton projeté qui a nécessité différentes modifications avant l'obtention de la formulation optimale donnant les caractéristiques de mise en oeuvre et de résistance escomptées.

La procédure d'exécution sera explicitée.

Mots-clé:soutènement- paroi clouée -ancrage passif –dimensionnement –formulation - phasage des travaux

Historique sur la genèse de la technique

Le renforcement des sols regroupe un ensemble de techniques d'amélioration des propriétés mécaniques de ces sols par la mise en place d'inclusions résistants travaillant à la traction, à la compression ou à la flexion.

Parmi ces techniques, celle concernant le clouage des sols ; qui peut être utilisé soit pour la réalisation de massifs de soutènement, en déblai, soit pour le renforcement de talus existants.

Le clouage a débuté en France avec un premier mur en sol cloué construit à Versailles en 1972, l'expérience française n'a cessé de progresser, plus de 100000 m² de murs ont été construits dans le cadre du projet national "CLOUTERRE".

L'ensemble des recherches et études conduites dans le cadre de ce projet a permis d'aboutir aux Recommandations Clouterre 1991, qui ont marqué une avancée importante dans les domaines suivants :

- Mécanisme et comportement des ouvrages durant leur construction et leur exploitation ainsi qu'à la rupture, ont été abondamment observés et décrits

- en s'appuyant sur des ouvrages expérimentaux en vraie grandeur, des ouvrages en service et des modèles réduits en laboratoires ;
 - L'analyse à la rupture de trois ouvrages expérimentaux en vraie grandeur a mis en évidence les différents modes de rupture des ouvrages en sol cloué et permis de valider la méthode de dimensionnement ;
 - Cette méthode repose sur le concept des états limites (ELU) en prenant en compte les critères de résistance des différents composants de la structure de l'ouvrage ;
 - La justification du parement utilise les règles du béton armé aux états limites (BAEL) et une schématisation des forces exercées par les clous et le sol sur le parement ;
 - Une banque de données constituée à partir d'essais de clous réalisés sur de nombreux sites en France a été constituée par le CEBTP et des corrélations permettant d'évaluer les caractéristiques mécaniques de l'interaction « sol/clou » ;
 - Les reconnaissances et essais indispensables à la conception des ouvrages sont définis en regard des règles de dimensionnement recommandées ;
-
- Les dispositions constructives, qui sont un élément important de la stabilité des ouvrages durant leur construction, sont traitées de manière détaillée ;
 - La durabilité fait l'objet de règles simples pour les ouvrages temporaires ou permanent.

D'autres activités de recherche ont débuté en 1992 pour se terminer en 1999, et les principaux thèmes étudiés dans le cadre du projet CLOUTERRE II ont été :

- ✓ L'observation des déplacements des murs en sol cloué ;
- ✓ Le dimensionnement du parement des murs ;
- ✓ Le comportement au gel des ouvrages ;
- ✓ Le comportement sous séisme des soutènements ;
- ✓ Le clouage du front de taille des tunnels ;
- ✓ La banque de données d'essais d'arrachement de clous et suivi des Recommandations CLOUTERRE 1991.

Description du projet

Le clouage tel qu'il a été adopté sur le tronçon de la Rocade Méditerranéenne JEBHA- BNI BOUFRAH a consisté à renforcer un sol en déblai, au fur et à mesure de son excavation, par la mise en place de barres passives, inclinées à 10° sur l'horizontale, travaillant essentiellement à la traction et généralement placées parallèlement les unes aux autres.

Le massif de sol renforcé est construit de haut en bas et pour éviter que la terre ne s'écoule entre les barres, on place un parement généralement constitué d'un treillis soudé et d'un béton projeté. Ce parement est incliné à 1H/5V.

Pour le projet en question, le soutènement en sol cloué est réalisé par phases successives au fur et à mesure de l'excavation des terres. Chaque phase comporte :

- Un terrassement de hauteur limitée, sur une longueur limitée ;
- La mise en place de clous et leur scellement avec un coulis ;
- L'installation éventuelle d'un système de drainage ;
- La réalisation éventuelle d'une partie de parement.

Le phasage peut différer de l'ordre présenté ci-dessus, notamment en présence de conditions géotechniques particulières.

Les clous, dont le diamètre est $\varnothing$ 32mm, sont mis en place par scellement d'une armature dans un forage de diamètre $\varnothing$ 100 mm au moyen d'un coulis de ciment dont la formulation est fixée en fonction du rapport E/C=0,5 pour un dosage moyen de 20 l/ml.

Les passes de terrassement sont limitées en longueur (47m) et en hauteur (3,5m). L'ordre des opérations associées à chaque phase peut être aménagé en fonction du comportement des sols.

Les clous confèrent au massif de terrain meuble renforcé une résistance en traction parallèlement à l'axe des clous. La mobilisation d'un effort de traction dans les clous, qui est consécutive à une elongation horizontale du sol, se traduit par un déplacement vers l'aval du plan du parement et un tassement du massif sur lui-même.

Méthodes de dimensionnement

L'analyse de la stabilité d'un mur en sol cloué peut, a priori, être abordée soit par un calcul en déformation, soit par le calcul à la rupture.

Le calcul en déformation, effectué par les éléments finis, c'est la méthode adoptée par le sous-traitant ALPI de CO qui utilise le logiciel canadien SLIDE (SAP 2000),

Les méthodes classiques de calcul à la rupture, vérifient l'équilibre d'une partie du massif limitée par une surface de rupture potentielle sous l'effet des actions extérieures et des efforts mobilisés dans le sol et les clous. On a les méthodes classiques des «tranches» (Fellenius, Bishop) ou des «perturbation» (Raulin et al), ces méthodes permettent un passage continu de l'étude de la stabilité interne à l'étude de la stabilité externe, puis à celle de la stabilité générale vis-à-vis d'un grand glissement englobant l'ouvrage. C'est la méthode adoptée par la mission de contrôle (le BCEOM) qui utilise le logiciel TALREN pour vérifier les notes de calcul de l'entreprise.

Les clous utilisés dans le cadre du projet ont les caractéristiques suivantes :

Diamètre nominal en mm	Poids kg/m	Tension de fluage en N/mm ²	Tension de rupture en N/mm ²	Déformation élastique	Tension maximale admissible N/mm ²	Charge admissible à la traction MN
32	6,277	547	658	21%	255	0,387

:Le coulis n'est pas pris en compte dans l'appréciation des sollicitations résistantes des clous (traction, flexion, cisaillement), ni dans l'appréciation du moment d'inertie. Par contre, pour l'interaction sol/clou, la section transversale extérieure du clou, y compris le coulis de scellement, qu'il s'agisse de frottement latéral ou de butée latérale est prise en compte.

Le frottement latéral limite q_s est déterminé par des essais d'arrachement (NF P 94-242-1). La longueur d'adhérence des clous d'essai ne doit pas être inférieure à 3 m, ni à 30

fois le diamètre de forage. Le nombre minimal d'essais d'arrachement à réaliser est de 15 pour une surface de 45.000 m².

Au démarrage du projet et en l'absence de paramètres géotechniques propres aux différentes sections devant recevoir les parois clouées, la mission de contrôle a fixé des paramètres moyens suivants :

Famille de terrain	Nature du sol	Essais d'arrachement réalisés (PK)	Poids volumique (KN/m ²)	Φ' à long terme (°)	C' à long terme (KPa)	Rc28j (MPa)	Traction limite de fluage T (MN)
1	FLYSCH stratifié	14+650	20	22	50	30	0,245
2	FLYSCH gréseux fracturé	9+275	22	41	45	30	0,214
3	Grès peu fracturé	10+000	22	41	45	30	0,262
4	Marne	14+100	21	30	40	30	0,245

Les coefficients représentatifs du séisme ont été arrêtés comme suit :

$\sigma_h = 0,16g$ et $\sigma_v = 0,5 \sigma_h$ et le coefficient de sécurité partiel minimal a été fixé à **1,30** sous action sismique.

Après exécution des investigations géotechniques et détermination des paramètres géotechniques réels des sols des sites en adoptant la méthode de

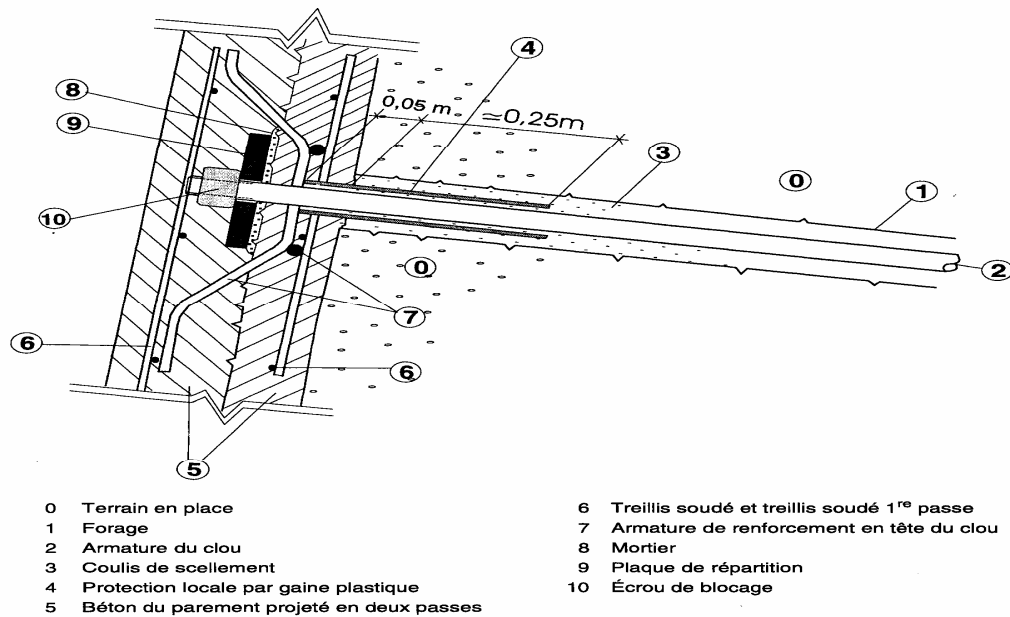
HOEK et BROWN (logiciel Rock-Lab), le dimensionnement des différentes parois clouées à conduit aux dispositions suivantes :

PKD	PKF	Nombre de bermes de 7 m	Longueur moyenne des clous (m)	Poids volumique (KN/m ²)	Φ' à long terme (°)	C' à long terme (KPa)	Facteur de sécurité à LT $\sigma_v = 0,5 \sigma_h$
6+350	6+657	2	15	22	41	50	1,48
7+800	7+929	2	16	23	43	120	1,88
8+085	8+303	4	18	22	32	130	1,49
9+075	9+275	5	18	22	41	45	1,28(*)
14+607	14+857	3	27	20	22	50	1,38
28+030	28+283	4	24	21	27	50	1,35
29+000	29+200	4	24	26	36	113	1,36

(*) : le coefficient partiel de sécurité calculé par la paroi du PK 9+075 est inférieur au coefficient de sécurité minimal de 1,30 donc cette paroi est soit sous dimensionnée soit la technique n'est pas adaptée.

Le parement en béton armé est projeté contre le terrain en 2 phases sur une épaisseur de 20 cm. Quel que soit le mode de réalisation, aucun vide ne doit subsister entre le terrain et le parement. Compte tenu des particularités de sa construction, le parement en béton armé comporte un ferrailage constitué de deux nappes de treillis soudé type TS 4,5x150x150 répondant aux spécifications des normes NF A35-015 et NF A35-022, avec un renfort éventuel autour des têtes de clous par des paniers de répartition (flexion et/ou

poinçonnement).

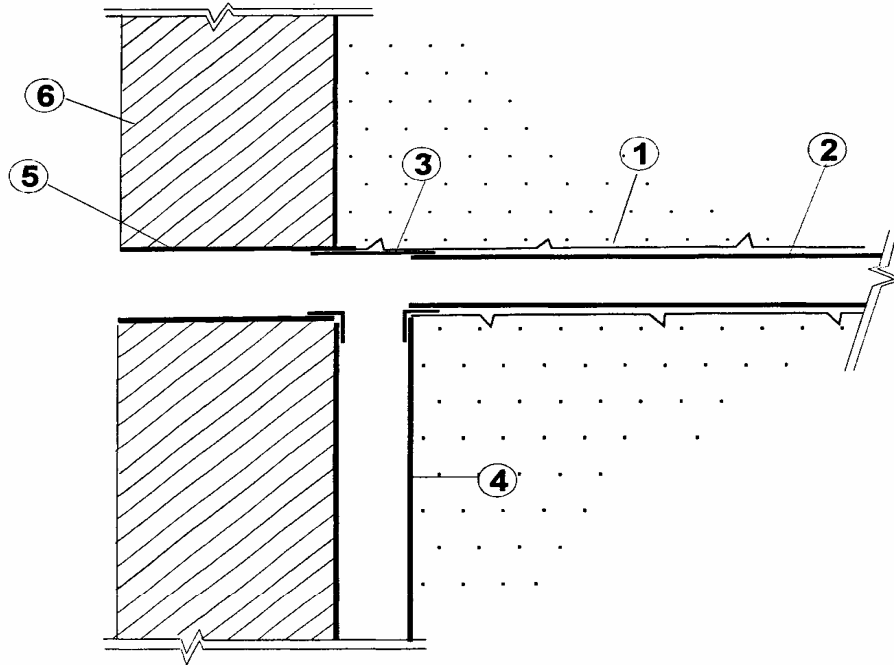


L'espacement des joints verticaux en élévation dans le parement est de 22 m.

Les joints sont conçus de manière à s'opposer à l'entraînement des particules solides du terrain à l'amont du parement et c'est pour cette raison que la décision de placer un joint en géotextile de largeur 40 cm (joint DUTEX) a été prise.

Une fiche minimale est obligatoire pour tous les ouvrages. Cette fiche a été fixée à 0,30 m.

Lors de l'exécution du projet, il s'est avéré nécessaire de prévoir un drainage interne efficace de l'interface sol - parement réalisé au moyen de drains Subhorizontaux (forages équipés de tubes crépinés gainés par un géotextile pour satisfaire aux conditions de filtre). La longueur et la densité des drains sont déterminées en fonction des données géotechniques. Les choix effectués sont confirmés ou corrigés au fur et à mesure de l'avancement des travaux



- 1 Forage
- 2 Drain avec tube crépiné + gaine en géosynthétique éventuelle
- 3 Raccord en té
- 4 Tube d'évacuation vers un collecteur
- 5 Tube d'accès au drain
- 6 Parement

✚ Pour le béton projeté, les granulats employés sont conformes aux normes NF P 189-301 ou NF P18-302. Les courbes granulométriques sont continues de manière à obtenir un bon rendement de projection. La tolérance admissible par rapport à la courbe granulométrique optimale retenue par le MOE, à la suite d'essais préalables ou de convenance, est inférieure à 10% et le sable utilisé possède un faible pourcentage de grains plats et un gravillon dont le coefficient d'aplatissement est inférieur à 30. On emploie des granulats roulés au lieu de granulats concassés.

Les ciments sont conformes aux spécifications de la norme NF P15-301 et l'eau est conforme à la norme NF P18-303. Le dosage en ciment est de l'ordre de 500 kg/m³ de béton. Le rapport E/C est de l'ordre de 0,5.

Pour les adjuvants, la mise en œuvre du béton projeté ou l'amélioration de sa qualité en place a été conditionnée par l'utilisation d'adjuvant traditionnels pour béton ; accélérateurs de prise et fluidifiants qui répondent aux spécifications des normes NF P18-103 et P18-338 .

Procédure d'exécution des parois clouées

Pour les parois clouées, les travaux de confortement des talus par clouage profond et

béton projeté, sont réalisés suivant un phasage décrit par la suite :

- Phase 1 :

Exécution des terrassements suivant les profils des plans d'exécution ; sur une hauteur 3,50 m, le sommet de talus a une forme arrondie pour permettre une bonne adhésion du béton projeté sur le sol décapé de la couche végétale ;

L'exécution des déblais est réalisé de façon à obtenir un talus le plus régulier possible ; les hors profils qui ne peuvent pas être évités ; sont remplis et mesurés et devront faire l'objet d'une compensation additionnelle qui doit être agréée.

L'application d'une première couche de béton projeté sur une épaisseur d'environ 5cm, avec la fonction de stabilisation immédiate du talus ; cette procédure a pour but d'assurer une stabilité à court terme pour des terrains qui autrement pourraient présenter des phénomènes d'instabilité superficielle.

- Phase 2 :

Exécution sur les 3,50 m de hauteur du talus supérieur des perforations destinées à l'exécution du clouage selon un maillage 1,80m Vx 2,20m H et le premier lit est ancré à 0,80m du niveau de la berme.

La pose des barres en acier $\varnothing=32\text{mm}$ à l'intérieur des forages et l'exécution des perforations subhorizontaux de diamètre 100 mm et de longueur supérieure aux longueurs des clous, mise en place à l'intérieur de ces perforations des tubes micro fissurés en PVC revêtus avec une nappe en géotextile.

Mise en place du premier grillage métallique interne avec maille 150 x 150mm de diamètre du fil 4.5mm et du panier de répartition réalisé avec un fil de 6mm de diamètre et dimensions de 90x90cm, qui seront fixés aux boulons d'ancrages.

Mise en place ; en correspondance de chaque boulon ; de la plaque d'appui de dimension 200 x 200mm et d'épaisseur 20mm et des boulons de serrage ; une fois l'injection aura fait prise, serrage du boulon et découpage de la partie externe du tube d'injection et exécution, sur les 3,50 m de hauteur du talus, d'une deuxième couche de béton projeté avec une épaisseur de 7.5cm.

- Phase 3 :

Mise en place du deuxième grillage métallique externe avec maille 150x150mm et diamètre du fil 4.5mm ; qui sera fixé au premier grillage par barres de liaison.

Exécution ; sur les 3,50m de hauteur du talus ; d'une troisième couche du béton projeté avec une épaisseur de 7.5cm.

- Phase 4 :

Exécution des terrassements suivant les profils des plans d'exécution, sur les 3,50 m inférieurs et pour une hauteur maximale totale du déblai de 7,00 m avec application d'une première couche de béton projeté sur une épaisseur d'environ 5cm.

L'épaisseur finale du béton projeté devra être au minimum de 20cm en tous les points.

Conclusion

Les principaux avantages du clouage pour les soutènements sont :

- Un matériel réduit pour la construction ; la construction ne nécessite qu'un matériel limité et léger : un engin de terrassement pour l'excavation, un engin de forage et une centrale d'injection ou un engin de battage pour la mise en place des barres, une machine à projeter le béton ;
- Une rapidité d'exécution puisque la construction se fait en même temps que les terrassement ;
- Le clouage est bien adapté aux sites délicats, il permet de réaliser des ouvrages dans des pentes difficiles. Il peut être réalisé par plots, en courbe ou avec un parement incliné ;
- Une bonne adaptation aux sols hétérogènes ; dans la mesure où la densité des clous peut être adaptée à la nature et à la résistance des sols rencontrés ;
- Un coût très compétitif dans la mesure où il conjugue rapidité et simplicité d'exécution avec l'utilisation de matériels légers ;

Le clouage présente cependant certaines limitations à savoir :

- Des déplacements latéraux et verticaux inhérents au fonctionnement même de la technique ; surtout en site urbain à cause des ouvrages existants situés à proximité, il convient de vérifier que ces structures vont pouvoir supporter sans dommage une déformation horizontale du sol en extension ainsi qu'une déformation verticale de tassement différentiel.
- Une utilisation limitée aux sols hors nappe ou à l'abri d'un rabattement de nappe, tant pour des problèmes d'exécution que pour la stabilité à long terme, sans un rabattement l'ouvrage est à l'abri des surpressions interstitielles.
- Une utilisation difficile ou délicate dans certains sols : sable pulvérulent sans cohésion, sables bouillants et sols contenant des poches d'eau, sols très argileux où la teneur en eau peut augmenter après la construction.