

DIMENSIONNEMENT ET SUIVI D'UNE PAROI CLOUEE DE 20 M. DE PROFONDEUR

Mounir BOUASSIDA : Professeur, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis.,
Foued KANOUN : Expert indépendant en géotechnique
Slaheddine HAFFOUDI: Directeur, Hydrosol-Fondations

RÉSUMÉ : La construction d'une clinique privée au gouvernorat de l'Ariana (cité Ennasr) composée de cinq étages, y compris trois sous-sols, a nécessité l'exécution d'une excavation de profondeur variant de 12 à 20 m de profondeur. Le profil géotechnique est composé d'une couche de marne fissurée, hors nappe d'eau, jusqu'à 30 m de profondeur. Pour assurer la stabilité de l'excavation, l'exécution d'une paroi clouée avec un parement en béton projeté, avec un treillis soudé, a été décidée. Un système de renforcement par des clous et tirants d'ancrage de longueur variable de 4 à 18 m a été exécuté. Le présent article traite du dimensionnement de la paroi clouée, conduit avec le logiciel Plaxis 2D, incorporant une exécution par étapes. Les mesures des déplacements horizontaux à l'aide d'inclinomètres sont avérés largement inférieures à ceux prédits par le logiciel Plaxis. Une analyse rétrograde a permis de conclure que le module de rigidité du sol en place est de l'ordre dix fois celui du module pressiométrique pour retrouver le déplacement de la paroi clouée.

MOTS CLES : paroi clouée, excavation, déplacement horizontal, clouage.

DIMENSIONING AND MONITORING OF A 20 M. DEEP NAILED WALL

ABSTRACT: A 12 to 20 m deep excavation in urban area revealed necessary to build a health care center having five floors including three basements at Ariana City (Tunisia). Geotechnical conditions mainly consisted in a very stiff fissured marl layer extending to 30 m deep with no presence of water table. A designed nailed wall with shot-crete facing and a double wire-mesh served as a lateral support of the excavation comprising the installation of nails with different length from 4m to 18 m. This paper presents the design of the nailed wall performed by Plaxis 2D software using Mohr-Coulomb model for the soil and taking into account the in-situ stage construction. Observed lateral wall movements from inclinometer measurements were significantly smaller to those predicted by the numerical analysis. Back analysis showed that a ratio equals to 10 of the soil deformation modulus to the pressure meter modulus would give comparable lateral displacements of the nailed wall.

KEYWORDS: nailed wall, excavation, horizontal displacement, nailing.

تصميم ومتابعة لبناء غطاء مثبتا بالمسامير لحفرية عميقة

ملخص: في إطار مشروع بناء مصحة متعددة الاختصاصات ذات خمسة طوابق في ولاية أريانة (حي النصر) تم اللجوء إلى إنجاز حفرية يتراوح عمقها بين 12 و 20 مترا لتشمل ثلاث طوابق تحتية للمبنى. و حيث يشمل القص الجيوتقني على تربة صلبة تتخللها إنشاقات بدون وجود مائدة مائية. و للتمكن من إنجاز الحفرية العميقة بدون دروع أفقية تم اللجوء إلى عملية تقوية التربة بمسامير حديدية يتراوح طولها من 4 إلى 18 مترا مثبتة على أطراف الحفرية بغطاء من الخرسانة المسلحة. ويتطرق هذا البحث إلى تصميم و حساب الغطاء المقوى بالمسامير « Paroi clouée » عن طريق المبرمج Plaxis الذي يشمل على كل المراحل التي تمر بها عملية البناء و قد تم التثبت من نجاعة هذا الغطاء المقوى بالمبرمج الرقمي بمتابعة التحرك الافقي لأطراف الحفرية بألة قياس « Inclinomètre » أثناء فترة الإنجاز. و من ثم استخلص أن الخصائص التي تم اعتمادها لنمذجة التربة كانت منخفضة جدا حيث أن التقدير الرقمي للتحرك الافقي كان عاليا.

(*) Le présent article est extrait de la publication en anglais présentée par les auteurs lors du 19^{ème} Congrès International de la mécanique des sols et de géotechnique (Seoul, Corée du Sud, 2017)

INTRODUCTION

Les travaux d'excavation à ciel ouvert nécessitent des solutions de soutènement accompagnées d'un suivi lors des travaux de l'évolution du déplacement horizontal qui ne doit pas dépasser une valeur admissible. Dans le cas d'une excavation profonde et de grandes dimensions en plan, notamment en milieu urbain, le renforcement par clouage impliquant une construction par étapes est souvent recommandé. C'est dans ce contexte que s'est déroulée la construction de la polyclinique Amilcar à la cité Ennasr (Gouvernorat Ariana) qui est composée de cinq étages dont trois niveaux sont enterrés.

Le terrain en pente de ce projet présente une dénivellée de 9m entre les limites Est et Ouest, alors que la construction du bâtiment nécessite une excavation de 12 m de profondeur du côté Ouest et atteignant 20,5 m de profondeur du côté Est.

Les bords de l'excavation sont entourés par des bâtiments d'habitation existants des côtés Nord et Sud à une distance de 7m, la route de Borj Turki du côté Ouest et un parking automobile du côté Est. Les bâtiments d'habitation existants sont fondés sur des semelles encastrées à la profondeur 2m par rapport aux niveaux de leurs sous-sols.

En raison de la grande profondeur et des dimensions en plan étendues de l'excavation un mode de soutènement latéral est exigé pour assurer à la fois la stabilité des bords et du parement de l'excavation et également pour contrôler les déplacements engendrés auprès des bâtiments environnants.

Le système de soutènement latéral adopté pour assurer l'exécution de l'excavation a consisté en une paroi clouée avec un parement constitué d'un béton projeté.

Le présent article traite du dimensionnement, du suivi et du contrôle de l'exécution par étapes de l'excavation de 12 m à 20m de profondeur et de l'exécution des clous du type passif. En outre, une synthèse des résultats de mesures inclinométriques et des essais d'arrachement de clous a permis de procéder à la validation de prédictions numériques obtenues avec le logiciel Plaxis 2D.

1. BREF APERÇU DU CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

La reconnaissance géotechnique du site a comporté l'exécution de deux sondages carottés et deux sondages pressiométriques menés jusqu'à 30m de profondeur. La lithologie du site est caractérisée par une couche de marne argileuse surmontée d'une formation de marne fracturée très épaisse avec des intercalations de couches graveleuses d'épaisseur variant de 0,6 à 1,3 m. La présence d'une nappe d'eau n'a pas relevée sur la profondeur des sondages exécutés.

La coupe géotechnique adoptée pour le dimensionnement est résumée dans le tableau 1. Un poids volumique total de 20 kN/m^3 a été adopté pour

(*) Le présent article est extrait de la publication en anglais présentée par les auteurs lors du 19^{ème} Congrès International de la mécanique des sols et de géotechnique (Seoul, Corée du Sud, 2017)

les couches d'argile marneuse et de marne fracturée, d'épaisseurs respectives 6 et 24 m.

Tableau 1. Paramètres géotechniques retenus pour les couches de sol

Couche	E (MPa)	E_M (MPa)	φ' (°)	c' (kPa)
Marne argileuse	160	67	21	25
Marne fracturée	230	110	26	65

E: module de Young (déformation)

E_M : module pressiométrique

c' & φ' : cohésion drainée et angle de frottement drainé (résistance du sol à long terme).

SOLUTION DE SOUTÈNEMENT

Elle consiste en une paroi clouée construite selon les étapes détaillées ci-après. Les quatre premiers mètres de profondeur de l'excavation sont renforcés avec 4 lits de clous de type HA32 de longueur 4m, cette longueur réduite est due à la présence des bâtiments d'habitation environnantes (Figure1). Les espacements, horizontal et vertical, entre les clous sont respectivement égaux à 2m et 1m.

Le clouage se poursuit avec trois lits de clous, du type GEWI 500/550 rebars de longueur 18m, poursuivis de six lits de clous de même type de longueur 12 m. Tous les clous (HA32 et GEWI) qui ont une limite élastique (contrainte seuil) égale à 500 MPa sont espacés de 2m et 1,5 m respectivement suivant l'horizontale et la verticale.

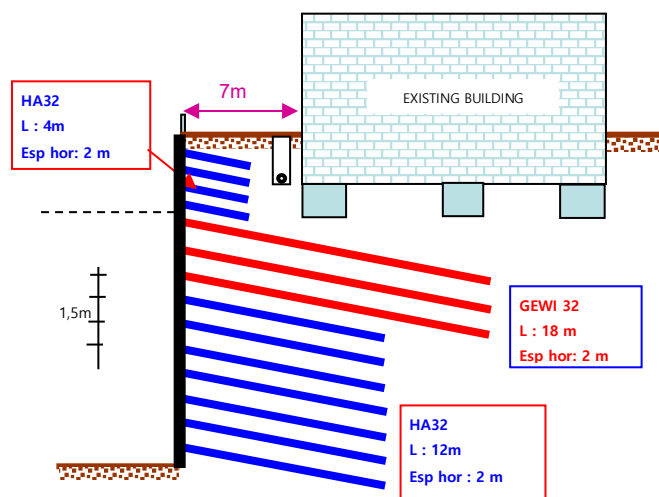


Figure 1. Coupe verticale de l'excavation sur le flanc gauche

(*) Le présent article est extrait de la publication en anglais présentée par les auteurs lors du 19^{ème} Congrès International de la mécanique des sols et de géotechnique (Seoul, Corée du Sud, 2017)

2. DIMENSIONNEMENT DU RENFORCEMENT PAR CLOUAGE

Le dimensionnement de la paroi clouée repose sur la considération de l'interaction sol-structure pour estimer les forces et déformations dans les éléments constitutifs du soutènement latéral et de vérifier la stabilité globale du système sol-paroi. Cette étude a été menée avec le logiciel Plaxis 2D qui permet de tenir compte de l'ensemble des phases de construction programmées pour l'exécution de la paroi clouée.

Le modèle de calcul adopté assimile, d'une part, le sol comme étant un milieu élastoplastique régi par la loi de comportement de Mohr-Coulomb, et, d'autre part, les clous sont assimilés à des éléments de poutre caractérisés par leur rigidité axiale EA, leur rigidité de flexion EI et un frottement latéral unitaire. Le parement des clous est assimilé à une plaque caractérisée également par une rigidité axiale et de flexion (Clouterre, 1992).

Le sol renforcé est décrit par un modèle de déformation plane construit avec le logiciel Plaxis 2D (version 9). L'option d'une construction par étapes comportant six étapes de calcul a été mise en oeuvre. Un dimensionnement du côté de la sécurité conduit à se restreindre à des prédictions numériques pour le cas plus défavorable correspondant à l'analyse du côté Est où la profondeur de l'excavation est maximale, soit de 20,5 m.

La construction par étapes adoptée consiste à activer, pour chaque phase de prédiction, deux rangées horizontales de clous et une profondeur d'excavation de 3m. Les phases de calcul sont les suivantes.

Phase initiale: remise à l'état initial des terres;

Phase 1 : excavation à 3 m de profondeur;

Phase 2 : activation de deux rangées de clous sur les 3 m de profondeur excavés, suivi d'une nouvelle excavation à 3 m de profondeur sous la phase précédente d'excavation;

Phase 3 : recommencer de nouveau la phase N° 2;

Phase finale: activation des clous exécutés durant la dernière rangée située à 2m au dessus.

La figure 2 montre les sorties du logiciel Plaxis en termes du déplacement total. La valeur maximale de ce déplacement est d'environ 4,68 cm autour de la tête du clou.

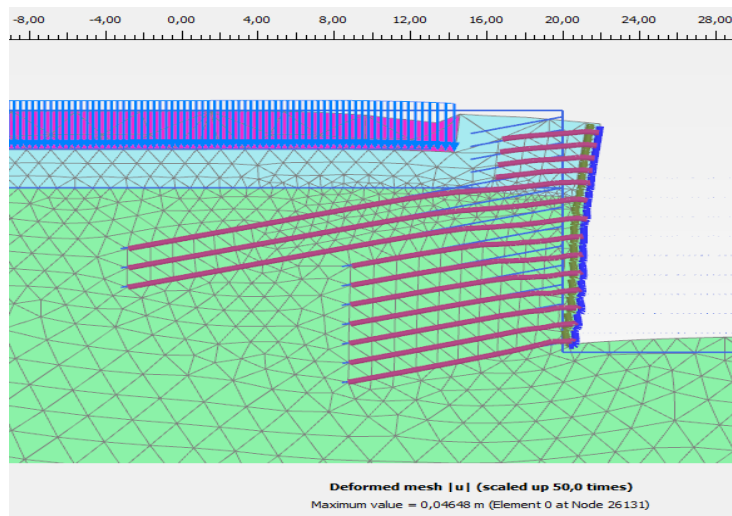


Figure 2. Prédiction du déplacement total à la fin de l'excavation (configuration du maillage déformé)

2. EXÉCUTION DE LA PAROI CLOUÉE

Les travaux d'excavation ont été précédés par la mise en place de trois tubes inclinométriques à mi-longueur et derrière le flanc Est, et les flancs Sud et Nord de l'excavation en vue de suivre les déplacements horizontaux lors de l'avancement des travaux. Pour chaque phase de l'excavation, de profondeur variant de 3 m à 4m, les positions des inclusions à exécuter sont repérées; les forages correspondants sont exécutés en conformité avec la longueur dictée par le dimensionnement qui varie de 4m à 18m et une inclinaison de 10° par rapport à l'horizontale. Ensuite, on procède à l'exécution des clous qui sont noyés dans un coulis d'injection à fort dosage en ciment.

L'exécution d'un treillis soudé d'épaisseur 20 cm est mise en oeuvre avec des panneaux préfabriqués. Les têtes des clous sont encastrés, à mi-épaisseur du treillis soudé, à l'aide d'une plaque métallique de dimensions $20 \times 20 \text{ cm}^2$.

Les Figures 3 et 4 illustrent les composantes du système de soutènement, à savoir:

- les clous exécutés dans les trous de forage inclinés;
- le maillage avec deux nappes d'acier assurant l'appui latéral des clous séparés par l'Enkadrain (matériau synthétique) servant pour le drainage;
- le mode de fixation du clou avec une plaque d'acier au treillis soudé.

(*) Le présent article est extrait de la publication en anglais présentée par les auteurs lors du 19^{ème} Congrès International de la mécanique des sols et de géotechnique (Seoul, Corée du Sud, 2017)



Figure 3. Vue d'ensemble de l'exécution du système de soutènement



Figure 4. Détails de fixation d'un clou avec une plaque métallique au milieu de la nappe en treillis soudé.

Il a été décidé de ne pas exécuter les clous lors de la dernière étape d'excavation dont le parement sera protégé, contre toute sorte d'altération, par le biais la couche de béton projeté. Après achèvement de la paroi clouée, sa stabilité sera assurée avec le voile en béton armé du bâtiment à construire.

L'excavation a été exécutée par étapes; lors de chaque étape le sol est excavé sur une épaisseur de 3 m et deux rangées de clous sont mises en place.

Des nappes de géosynthétique de drainage de largeur 1m, disposées entre les clous sur toute la profondeur excavée, ont été fixées au parement (Figures 5 et 6).

Cette étape est poursuivie avec l'exécution du parement composé d'un panneau de treillis soudé, des plaques de fixation en acier et achevée par l'exécution du béton projeté. Les détails d'exécution du béton projeté ont été

() Le présent article est extrait de la publication en anglais présentée par les auteurs lors du 19^{ème} Congrès International de la mécanique des sols et de géotechnique (Seoul, Corée du Sud, 2017)*

présentés dans le rapport délivré après l'approbation finale de la conformité des travaux du système de soutènement "paroi clouée" (Simpro, 2016).

EXÉCUTION DES CLOUS

L'avancement de l'excavation et la mise en place des clous s'est produit par étapes tous les 2 à 3 m de profondeur. La mise en oeuvre de l'excavation et le mode de soutènement s'est faite conformément au dimensionnement prévu initialement (avant les travaux). Toutefois, quelques modifications mineures ont été apportées à ce dimensionnement notamment en présence des réseaux divers existants auprès du parement.

Les clous de renforcement ont été exécutés, en fonction de la profondeur, avec un espacement horizontal variable de 1,5 à 2,5 m. Alors que l'espacement vertical des clous était fixe, soit de 1,5 m, sur trois côtés de l'excavation. Excepté pour le côté Sud où, sur les 4 premiers mètres de profondeur, les clous de renforcement étaient courts (de longueur 4 m) et d'espacement vertical égal à 1m. Cette situation est due à la présence des bâtiments d'habitation distants de 7 m du parement de la paroi clouée (Fig. 2).

Lors de l'avancement des travaux d'excavation, des essais d'arrachement de clous de longueur 4 m, 11 m et 18 m ont été réalisés pour mesurer la résistance au frottement latéral mobilisée par ces clous. En particulier, à partir des résultats d'essais d'arrachement d'un clou de longueur 18 m le frottement latéral unitaire a été estimé à 150 kPa.

3. VALIDATION DU DIMENSIONNEMENT

Quatre essais d'arrachement ont été exécutés sur des clous d'essais à différentes étapes de l'excavation. Deux types de chargement, l'un à vitesse de déplacement imposée, et l'autre à un niveau de contrainte imposé, ont été exécutés tel que détaillés dans le rapport d'interprétation présenté par Hydrosol Fondations (2015). Les résultats d'essais d'arrachement ont permis de vérifier que le frottement latéral unitaire est d'environ 150 kPa dans la couche d'argile marneuse supérieure, et d'environ 250 kPa dans la couche de marne fracturée sous-jacente. Ces deux caractéristiques sont nettement supérieures à la résistance de frottement adoptée pour le dimensionnement, soit 120 kPa.

La Figure 5 montre l'équipement utilisé lors du suivi de l'essai d'arrachement en vraie grandeur exécuté sur un clou de type HA32 de longueur 12 m testé sur le côté Ouest de l'excavation.

La Figure 6 illustre la courbe "chargement-déplacement" enregistrée lors des mesures de l'essai d'arrachement. A partir de cette courbe on voit que le chargement à la rupture du clou testé correspond à une force de 400 kN.

(*) Le présent article est extrait de la publication en anglais présentée par les auteurs lors du 19^{ème} Congrès International de la mécanique des sols et de géotechnique (Seoul, Corée du Sud, 2017)



Figure 5. Equipement utilisé lors du suivi de l'essai d'arrachement sur un clou HA32

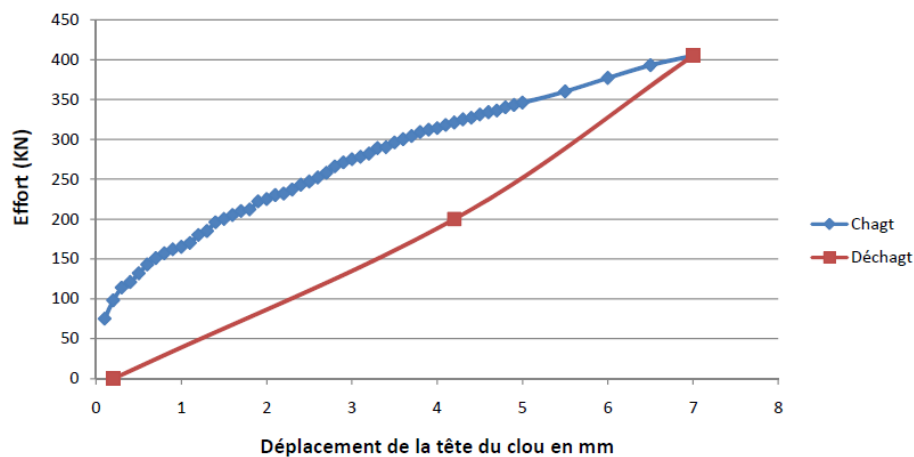


Figure 6. Courbe de chargement obtenue à partir de l'essai d'arrachement d'un clou HA 32 de longueur 12m

4 SUIVI ET CONTRÔLE DU COMPORTEMENT DE L'EXCAVATION

L'évolution du déplacement horizontal de la paroi clouée est fournie par des mesures à l'inclinomètre effectués à la fin de chaque étape de l'excavation. L'ensemble des mesures inclinométriques indique que le déplacement horizontal maximum est de 2 à 3 mm au niveau supérieur de l'excavation, c.à.d. une valeur très faible. En date du 20 novembre 2015, au cours de la sixième étape de l'excavation, qui correspond à la profondeur de 5m avant d'atteindre le fond, les mesures à l'inclinomètre ont fourni un déplacement horizontal de l'ordre de quelques millimètres.

(*) Le présent article est extrait de la publication en anglais présentée par les auteurs lors du 19^{ème} Congrès International de la mécanique des sols et de géotechnique (Seoul, Corée du Sud, 2017)

A l'aide d'une analyse rétrograde, un tel déplacement correspond à des valeurs du module de Young égal à dix fois à celle adoptée pour les prédictions numériques.

Étant donnée la valeur très faible du déplacement horizontal, qui est de l'ordre de la précision des mesures à l'inclinomètre, on en conclut que le pressiomètre n'est pas recommandé pour mesurer les caractéristiques élastiques de sols raides. En effet, pour de tels sols, le module de déformation élastique très élevé correspond à la marge de déformation très faible. Ainsi, pour la caractérisation de la couche marneuse il aurait été préférable de recourir à des essais au dilatomètre, un appareil qui demeure mieux adapté à cette catégorie de sols.

Par ailleurs, la verticalité du parement de l'excavation lors de la progression en profondeur n'était pas facile à respecter, notamment à cause du module de rigidité très élevé de la couche de marne. Une telle situation a été maîtrisée par l'usage d'un matériel de levés topographiques à haute précision pour vérifier la verticalité à la fin de chaque étape de l'excavation.

La figure 7 montre une vue générale de la paroi clouée à la fin de la dernière étape d'excavation. Il est à souligner qu'au fond de l'excavation le renforcement par clouage n'a pas été exécuté. Cette recommandation découle d'une étude de stabilité mise à jour du système de soutènement qui a permis de tenir compte des résultats des essais d'arrachement de clous effectués. L'exécution du soutènement avec une paroi clouée de surface totale 3900 m² a nécessité une durée de neuf mois.



Figure 7. Vue de la paroi clouée à la fin de l'excavation de profondeur 20

5 CONCLUSION

Le présent article était consacré au dimensionnement et à l'exécution d'une paroi clouée de grandes dimensions atteignant la profondeur 20,5 m, en guise de soutènement latéral, en vue de construire une polyclinique privée dans une zone urbaine.

() Le présent article est extrait de la publication en anglais présentée par les auteurs lors du 19^{ème} Congrès International de la mécanique des sols et de géotechnique (Seoul, Corée du Sud, 2017)*

Le dimensionnement de la paroi clouée a été fait sur la base d'une étude d'interaction sol-structure conduite avec le logiciel Plaxis 2D. Lors du suivi d'exécution, les déplacements horizontaux déduits des mesures à l'inclinomètre étaient très faibles (d'environ quelques millimètres). Alors que les prédictions numériques ont fourni un déplacement horizontal maximal, au niveau supérieur de la paroi clouée, égal à 4,5 cm. Une analyse rétrograde a montré que le module de déformation élastique du sol devrait être égal à dix fois celui adopté à partir des essais pressiométriques. Les auteurs sont convaincus que le recours à l'essai pressiométrique était inadéquat pour mesurer le module de déformation de la couche marneuse. Le module d'un tel sol raide est très grand même dans une marge de déformation très faible.

6 REMERCIEMENTS

Les auteurs sont reconnaissants pour le staff de la polyclinique Amilcar qui a bien fourni l'aide et l'accord pour publier des données et les résultats relatifs au cas d'étude présenté dans cet article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Clouterre. (1993). Soil nailing recommendations (English recommendations "Recommandations Clouterre, 1991. FHWA-SA-93-026.
- 2) Hydrosol-Fondations (2014). Rapport de reconnaissance géotechnique du projet de construction de la polyclinique Amilcar. Tunisie.
- 3) Hydrosol-Fondations. (2015). Note technique d'exécution des essais sur clous d'essai. Tunisie.
- 4) Kanoun, F., Haffoudhi, S. & Bouassida M. (2017). Design and Follow up of 25 m Depth Nailed Diaphragm Wall. Proceedings of the 19th ICSMGE, Seoul 2017, vol ?? 1999-2002.
- 5) Simpro (2016). Rapport de fin des travaux de la paroi clouée de la polyclinique Amilcar. Tunisie.