

MODELISATION BI- ET TRIDIMENSIONNELLE PAR ÉLÉMENTS FINIS D'UNE EXCAVATION SOUTENUE: CAS D'UN RIDEAU DE PALPLANCHES BUTONNÉ

FETHI KITCAH ⁽¹⁾, SADOK BENMEBARK ⁽¹⁾, ABDALLAH ANNANE ⁽²⁾

⁽¹⁾Département de Génie Civil, Université de Biskra

⁽²⁾Institut de Génie Civil, d'Hydraulique et d'Architecture. Département de Génie Civil. Université de Batna

RESUME

Le développement des travaux dans des zones très urbanisées nécessite généralement l'excavation d'une fouille soutenue par un écran de soutènement. Les effets de l'excavation ainsi que les différents types d'écrans à utiliser exigent une attention particulière en vue de s'assurer que les risques d'instabilité n'engendrent aucun désordre aux ouvrages avoisinants. On traite dans ce travail une modélisation numérique par éléments finis en 2D et 3D d'une excavation soutenue par un rideau de palplanches butonné et fiché dans une couche d'argile molle. On s'est attaché dans cette étude à préciser l'incidence de l'effet tridimensionnel, de la rigidité du rideau et de nombre de butons horizontaux sur les mécanismes de rupture (par comparaison avec l'analyse bidimensionnelle). La simulation numérique a permis d'interpréter au mieux le comportement de l'ouvrage durant l'excavation, et illustrer le rôle déterminant joué par certains facteurs dans la qualité des calculs finalement obtenus.

MOTS CLES: Butons, Excavation, Rideau de palplanches, Simulation numérique, Stabilité.

ABSTRACT

The development of work in highly urbanized areas typically requires excavating a dig supported by a retaining wall. The effects of the excavations and the various types of used screens require specific attention to make sure that the risks of instability do not cause any disorder to neighboring structures. Treated in this work; a numerical analysis by finite elements in 2D and 3D of excavation supported by a single braced sheet-pile wall inset in soft clay. We focused in this study to specify the incidence of three-dimensional effect, the rigidity of the wall and the number of horizontal struts on failure mechanisms (compared with two-dimensional analysis). The numerical simulation helped to better interpret the behavior of the sheet-pile wall during construction, and illustrate the role played by some factors in the quality of calculations finally obtained.

KEYWORDS: Struts, Excavation, Sheet-pile wall, Numerical analysis, Stability.

1 INTRODUCTION

L'accélération et le développement des travaux dans des zones fortement urbanisées conduit généralement à la réalisation des constructions qui nécessite souvent l'excavation d'une fouille soutenue par un écran de soutènement.

En raison d'encombrement, ces excavations se situent à coté des ouvrages et immeubles en service, et leur stabilité reste un enjeu essentiel aux différentes phases des travaux.

Par ailleurs, ces travaux d'excavation ont une influence importante sur l'état des contraintes de terrain avoisinant, la modification de ces contraintes engendra des mouvements

pouvant provoquer des désordres majeurs dans les ouvrages voisins. La précision de ces mouvements n'est pas à ce jour satisfaisante à cause de la complexité du problème (Delattre [08]).

D'une manière générale, les règlements de calcul (Eurocode 7) tendent à imposer de vérifier que les mouvements induits par un projet restent dans les limites acceptables. Afin de progresser et améliorer les méthodes de calcul, il convient par conséquent de faire des observations concurrentement quantitatives et qualitatives sur le comportement d'écrans de soutènement qui serviront de référence pour le calcul numérique et permettre de préciser les méthodes de calcul empirique et semi-empirique.

Intérêt accordé aux effets d'excavations soutenues par le système des appuis (butonnage) a suscité de nombreux travaux de recherche (Balay J [2], Dysli M et al [09], Potts et Fourie [24], Jardine et al [15]) pour étudier l'influence des différents facteurs affectant les mouvements du sol et le comportement de l'ouvrage.

Dans ce travail, on propose d'étudier numériquement par la méthode des éléments finis le comportement d'une excavation soutenue par un rideau de palplanches boutonné et installé dans zone argileuse très molle, les principaux facteurs pouvant affecter à la fois les mouvements du sol et la cinématique du rideau ont été pris en compte.

2 REPARTITION DES PRESSIONS DES TERRES SUR LES FOUILLES BUTONNEES

2.1 Méthodes de calcul

Le calcul des ouvrages de soutènement quel que soit leur type passe souvent par l'application des actions de poussée et de butée aux calculs des sollicitations exercées à l'ouvrage par le terrain, les méthodes de calcul cités par exemple par Eurocode 7-1 et Delattre [7] sont les méthodes empiriques et semi-empiriques, analytiques et numériques.

En ce qui concerne les méthodes empiriques et semi-empiriques, elles s'appuient sur un référentiel qui tient compte du comportement observé des ouvrages.

Les premiers travaux ont été proposés par Coulomb [6] et Boussinesq [4], ils ont subi de nombreuses validations expérimentales. Dans le prolongement des travaux des Rankine [25], Boussinesq [4] a proposé pour un matériau granulaire une expression triangulaire de la répartition des contraintes de poussée sur un mur de soutènement, et les contraintes croissent linéairement avec la profondeur. Mais le développement des réseaux de transport dès le début du vingtième siècle a obligé les ingénieurs de réaliser des lignes enterrées de métro qui nécessite une excavation soutenue latéralement par des écrans butonnés, l'instrumentation de ces ouvrages permet de collecter assez rapidement des mesures relatives à leur comportement, elles révèlent que les pressions sur l'écran n'obéissent pas à la loi de répartition triangulaire prédite par les théories de Rankine [25] ou de Boussinesq [4] (Delattre [08]). Cette dissimilitude est due, d'un côté, à une relative souplesse, qui permet la déflexion entre appuis, et, d'autre côté, à une cinématique de l'écran pour laquelle la déflexion a tendance à croître avec la profondeur.

D'une manière générale, les méthodes empiriques et semi-empiriques ont été développées plus particulièrement en Allemagne et aux Etats unies en reposant sur une base expérimentale en partie commune. Pour les allemands, la méthode de calcul habituellement utilisée pour le dimensionnement des écrans de soutènement est de type semi-empirique (Sonja M [26]), la poussée est calculée

analytiquement en basant sur les règles classiques de Coulomb et Rankine. La redistribution de la poussée dépend du type de soutènement et les conditions d'appui.

À propos des travaux menés par les américains, une première proposition de procéder au dimensionnement des ouvrages de soutènement est due à Terzaghi [29] qui a établi un diagramme trapézoïdal de redistribution des pressions applicable au cas des fouilles creusées dans des sables. Peck [22] a proposé un diagramme semblable applicable au cas des fouilles creusées dans les argiles plastiques basé sur des mesures effectuées lors de la réalisation du métro de Chicago et d'hypothèses formulées par Terzaghi [30]. À la suite de nouvelles données expérimentales provenant de divers chantiers, ces diagrammes initiaux ont été ajustés et qui ont permis aux (Terzaghi et Peck [31] ; et Tschebotarioff en particulier [32]) d'avoir de diagrammes bénéficiant d'une large validation expérimentale (figure 1).

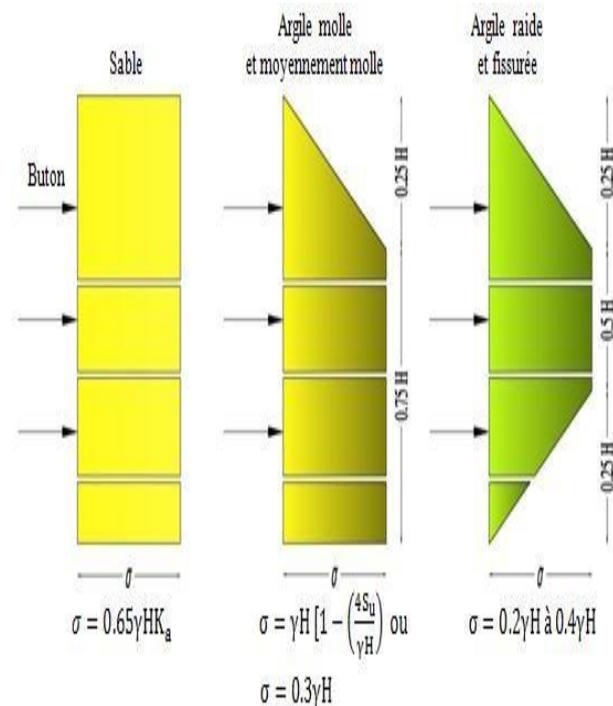


Figure 1 : Diagramme des pressions pour le dimensionnement des blindages des fouilles, d'après Terzaghi et Peck [31]

3 STABILITE DES FOUILLES BUTONNEES

La stabilité d'une excavation soutenue par des écrans de soutènements a été étudiée par plusieurs auteurs en vue de s'assurer que les déformations causées par l'excavation soient suffisamment petites, et les risques dus aux différents modes de ruptures (déplacements, rotations...) doivent être pris en compte. La première approche détaillée qui concerne les déformations des ouvrages est due à Peck [22] qui a établi sur la base de la compilation de résultats de mesures (parois berlinoises et rideaux de palplanches butonnés et ancrés), des diagrammes de tassement provoqués par la réalisation d'excavations dans différentes

catégories de terrains. D'après son diagramme, le tassement dans les argiles très molles à molles est supérieur à 2%, la distance horizontale d'influence des tassements derrière la paroi peut atteindre quatre fois la profondeur de la fouille. Dans le cadre de cette étude, Peck [22] avait mis un indice de stabilité $N = \gamma W/c_u$ pour calculer le coefficient de sécurité vis-à-vis du soulèvement du fond de fouille.

Les premières études de ce phénomène de soulèvement du fond de fouille sont dues à Terzaghi [30], qui a démontré que dans le cas des fouilles creusées dans l'argile saturée, la profondeur d'une fouille dont la longueur est grande devant la largeur est limitée à la valeur :

$$H_c = N_c C_u / (\gamma - C_u / B\sqrt{2}) \quad (1)$$

Où C_u : désigne la cohésion non drainée de l'argile, N_c : le facteur de portance applicable aux fondations superficielles parfaitement rugueuses ($N_c = 5,7$ pour Terzaghi), γ : le poids volumique de l'argile et B : la largeur de la fouille.

Les développements ultérieurs de cette méthode d'analyse ont permis à Terzaghi [30] et Bjerrum et Eide [3] de déterminer un facteur de sécurité vis-à-vis du soulèvement de fond de fouille.

Mana et Clough [18] ont souligné que ce facteur n'est pas complètement correct au niveau des détails mais qu'il constitue un indice satisfaisant pour la plupart des sols. La figure 2 rappelle la façon dont le facteur de sécurité est calculé.

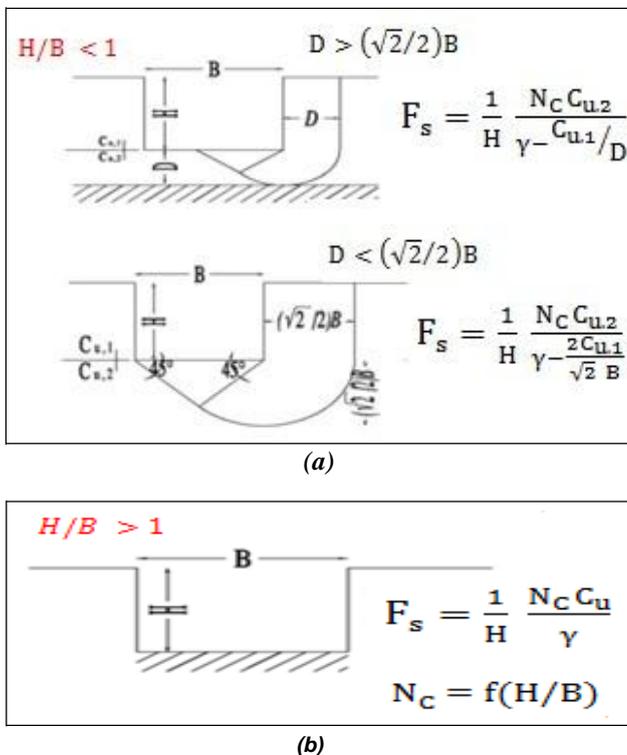


Figure 2 : Détermination du coefficient de sécurité vis-à-vis du soulèvement du fond de fouille : (a) d'après Terzaghi [30] et (b) d'après Bjerrum et Eide [3]

D'autres études ont été menées par la méthode des éléments finis afin de compléter les recherches antérieures, Mana et Clough [18] ont mis en évidence que, si le facteur de sécurité F_s est supérieur à 1,4 à 1,5, les déplacements horizontaux de l'écran restent faibles, de l'ordre de 0,5 % de la hauteur totale de l'écran. Ils montrent également que, si ce facteur est inférieur à 1,5, les déplacements horizontaux de l'écran deviennent importants.

4 MODELISATION NUMERIQUE D'UNE EXCAVATION SOUTENUE PAR UN RIDEAU DE PALPLANCHES

4.1 Définition du modèle

L'objectif de l'étude menée dans ce travail est de réaliser une modélisation numérique bi et tridimensionnelle par éléments finis d'un rideau de palplanches butonné, afin de savoir si les effets tridimensionnels, le nombre des butons horizontaux et la rigidité de l'écran ont une influence sur les mécanismes de déformations (par comparaison avec l'analyse bidimensionnelle). Le modèle retenu concerne une fouille partiellement soutenue d'une hauteur finale (H) égale à 6 m, de largeur (B) égale à 24 m. le rideau de palplanches utilisé est du type Hoesch 134 en forme de Z, a une longueur $L_p = 12m$ avec un ancrage de 6m dans la couche d'argile. Il est modélisé par des éléments de structure, c'est à dire des poutres ayant une rigidité axiale $EA = 3,591 \cdot 10^6$ KN/m et une rigidité flexionnelle $EI = 5,335 \cdot 10^4$ KN.m²/m.

Afin d'assurer la stabilité, une série de 2 butons du type (IPB 360 ST 37) est placée le long du rideau. La première série se trouve à 1m de profondeur et la deuxième à 3m, l'espacement horizontal des butons est d'environ 2m. La rigidité de référence EA des butons est égale à 3801 KN.

Une structure est représentée de part et d'autre de l'écran par une charge de 50 KN/m² ayant 9m de longueur, distante de 3m de rideau, ainsi qu'une autre charge de 10 KN/m² ayant de circulation (figure 3).

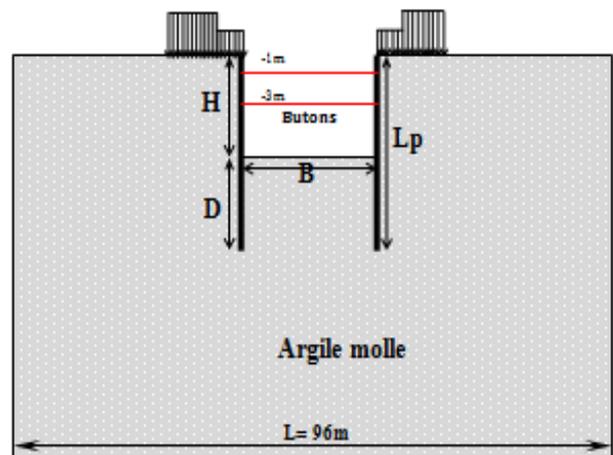


Figure 3 : Modèle retenu pour l'étude

Le comportement de l'argile molle a été représenté par le modèle élasto-plastique non linéaire Hardening Soil Model (HSM), les caractéristiques élastiques de la couche d'argile (tableau 1) sont celles utilisées dans le travail de (H-G Kempfert et B Gebreselassie [16]) après avoir effectué des essais triaxiaux en condition drainée pour une contrainte de confinement initiale variant entre 50 et 200kPa.

Tableau 1: Paramètres mécaniques de la couche d'argile

Symbole	Unité	Valeur
γ	KN/m ³	19,5
φ'	[°]	25,3
C'	KN/m ²	13,2
ψ'	[°]	0
E_{50}^{ref}	KN/m ²	3253
E_{Oed}^{ref}	KN/m ²	2948
E_{ur}^{ref}	KN/m ²	19170
ν_{ur}	[-]	0,20

4.2 Le modèle numérique

La simulation numérique a été réalisée en conditions bidimensionnelles de déformations planes en utilisant le logiciel PLAXIS 2D et le PLAXIS 3D Tunnel dans le cas tridimensionnel. Le maillage du modèle comporte 1000 éléments triangulaires à 15 nœuds dans le cas bidimensionnels et environs 6000 éléments dans le cas tridimensionnel (figure 4).

Selon les propositions de Mestat P [19], les limites verticales du maillage peuvent être ramenées à environ de six fois la hauteur de l'excavation (H) et la limite horizontale inférieure à quatre fois la hauteur de la fouille. Le maillage doit être relativement resserré autour de la fouille, c'est-à-dire le long de la paroi et sous le fond de fouille pour représenter de manière satisfaisante les concentrations de contraintes provoquées par les singularités géométriques (Mestat P [19]).

La construction a été réalisée en six étapes de calcul successives, décrites brièvement ci-dessous :

Étape 0 : Initiation des contraintes (procédure K0).

Étape 1: Activation de différentes charges.

Étape 2: Mise en place du rideau de palplanches par activation des éléments de poutres.

Étape 3 : Première excavation jusqu'au 1,5 m de profondeur.

Étape 4 : Deuxième excavation jusqu'au 4m + activation de la première série des butons.

Étape 5 : Troisième excavation jusqu'au 6m + activation de la deuxième série des butons

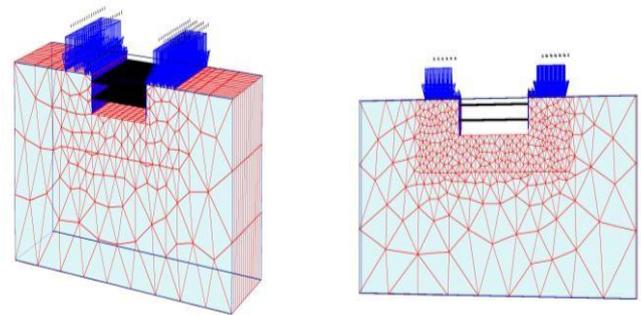


Figure 4: Maillages retenus : (a) maillage tridimensionnel et (b) maillage bidimensionnel

5 COMPARAISON ENTRE LA MODELISATION BIDIMENSIONNELLE ET TRIDIMENSIONNELLE

Dans la grande majorité des cas, une modélisation réaliste par éléments finis doit considérer les étapes de la construction de l'ouvrage. Arafat N [1] suggère d'analyser ce problème selon deux points de vue : Étude de la modélisation de chaque partie d'un ouvrage de soutènement (sol, soutènement, butons, tirant,...) et détermination des paramètres correspondants. Étude de l'influence de chaque partie de l'ouvrage sur l'ensemble du modèle.

L'objectif de l'étude menée dans ce travail se contente essentiellement d'étudier l'effet de l'espacement horizontal entre les butons et la rigidité de l'écran.

5.1 L'effet de l'espacement horizontal entre les butons

Dans cette partie, on fait varier la distance horizontale entre appuis afin d'étudier son influence sur la stabilité de l'écran. La longueur totale suivant l'axe Z dans le model 3D est égale à 30m, donc ; on va tout simplement deviser cette longueur en plusieurs distances égales. Trois configurations ont été traitées dans lesquelles les butons sont distants respectivement de [3,75m (9 butons), 2,5m (13 butons), 1,8m (17 butons)].

La figure (5) présente les tassements en surface de la phase [4 et 5], on remarque que le tassement associé aux excavations dans les argiles molles est de l'ordre de 3,2% (phase 5) et de 2,75% (phase 4) de la profondeur de l'excavation, par comparaison avec le diagramme des tassements établi par Peck [22], ces résultats sont bien confirmés. On remarque également que le profil de tassement prend une forme concave en raison de la limitation des déformations au moyen

d'un buton. La valeur maximale du tassement est située à une certaine distance qui peut être estimée à la moitié de la profondeur finale (H) de l'excavation et diminue ensuite progressivement à mesure qu'on s'éloigne du rideau, cette valeur correspond aux résultats de Mana et Clough [18]. Les résultats numériques présentent un écart assez faible (10%) sur la valeur des tassements max entre les calculs 2D et 3D.

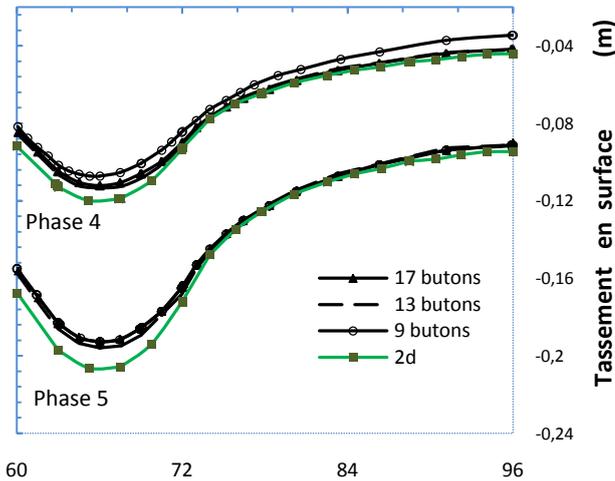


Figure 5: Les tassements en surface derrière le rideau

Clough et O'Rourke [5] ont souligné que le profil de tassement dans le cas des argiles molles a une forme trapézoïdale. La valeur maximale est constante jusqu'aux trois-quarts de la profondeur du soutènement et diminue pour atteindre une valeur nulle à une distance égale à environ deux fois la profondeur (figure 6). Alors que Hsieh et Ou [14] ont proposé un profil décrit par deux lignes droites, et le tassement s'annule à une distance est égale à quatre fois la profondeur du soutènement.

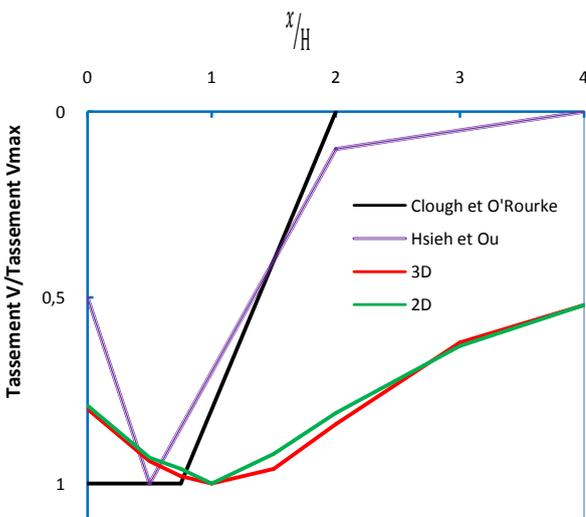


Figure 6: Méthodes de détermination des tassements d'après Clough et O'Rourke [5] et Hsieh et Ou [14]

Du fait que les deux méthodes sont de type empirique, une dissimilitude est bien distincte entre les profils. Hsieh [14] souligne qu'il y a des hypothèses fondamentales sur lesquelles ces deux méthodes s'appuient ; d'une part les déformations horizontales doivent être connues et d'autre part le rapport entre le déplacement maximal horizontal et le déplacement maximal vertical est supposé appartenir à l'intervalle $\delta_v^{max} = (0,5 - 0,7)\delta_h^{max}$.

La figure (7) représente le déplacement latéral du rideau de palplanches. Les déplacements maximaux observés varient entre $0,0075H$ (phase 5) et $0,005H$ (phase 4), et situés respectivement à la moitié et aux trois-quarts de la hauteur de l'écran. Cette figure met clairement en évidence que l'augmentation de nombre de phases d'excavation va permettre de changer complètement la cinématique de l'écran et ça revient à l'activation des butons qui retiennent la partie supérieure tandis que la partie inférieure tend à se déformer.

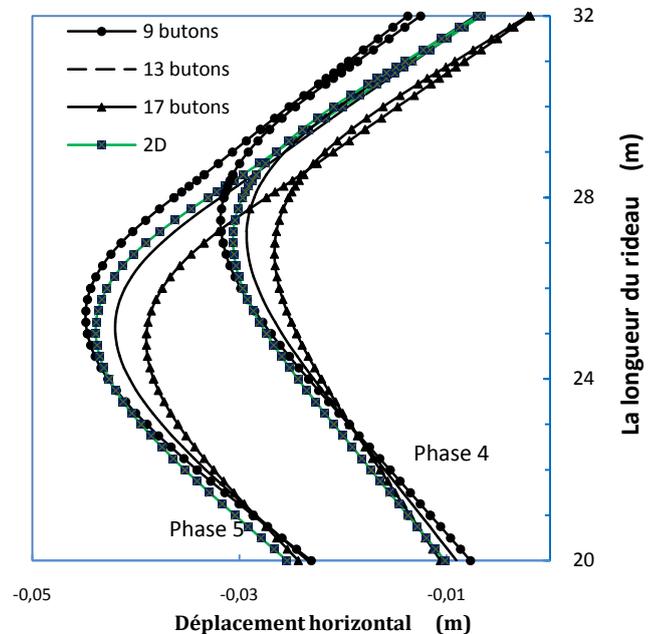


Figure 7: Déplacement horizontal du rideau de palplanches

À partir des études récentes, dans des argiles molles, on observe que nos valeurs correspondent mieux à celles obtenues par Peck [22] et Ou & al [21] et Wengang Z [33]. L'écart entre les calculs 2D et 3D sur le déplacement horizontal maximal est de 4%.

Les résultats obtenus des moments fléchissants au cours de l'excavation sont illustrés dans la figure (8). La modélisation tridimensionnelle montre que la diminution du nombre de butons horizontaux conduit à une augmentation du moment de l'écran. On note par la suite que les moments maximaux se trouvent toujours à la moitié et aux trois-quarts de la hauteur de l'écran, un écart de 10% entre l'utilisation de 9 et de 17 butons, et lors de l'utilisation de 13 butons, les calculs sont en bonne concordance avec ceux en 2D.

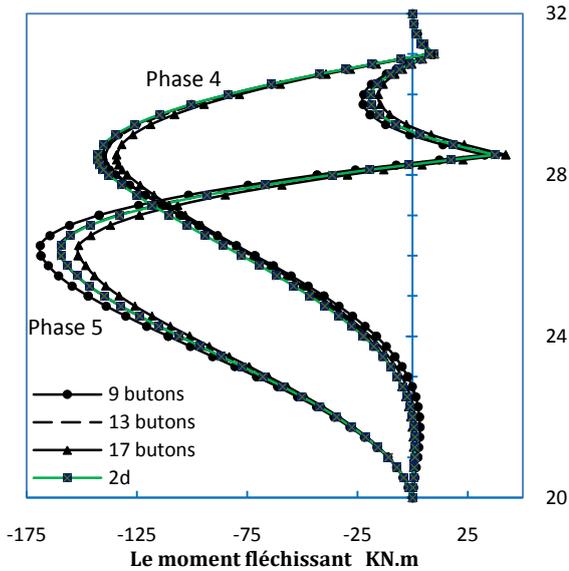


Figure 8: Profil du moment fléchissant pour différentes étapes d'excavation

Au moment de calcul d'une excavation dans l'argile molle, il faut envisager l'éventualité d'une rupture par soulèvement du fond de fouille (Smith et Hou [27]). La figure (9) représente le soulèvement du fond de fouille à la fin de la phase (4 et 5). D'après ces résultats, on peut conclure que le soulèvement provoqué est dû à la réponse en déchargement qui intervient dans le comportement du sol situé en dessous de la zone excavée. Le coefficient de sécurité calculé d'après la formule de Terzagui [29] [voir figure (2)] est égal à 1,6 ; Mana et Clough [18] soulignent que tant que le facteur de sécurité vis-à-vis de soulèvement est supérieur à 1,5 ; les déplacements latéraux de l'écran restent faibles, de l'ordre de 0,5% de la hauteur de l'écran. Une autre remarque faite par Sonja M [26], il indique que le suivi précis du soulèvement du fond de fouille ne présente pas d'intérêt particulier, car il n'est pas nécessaire de connaître le niveau au centimètre près.

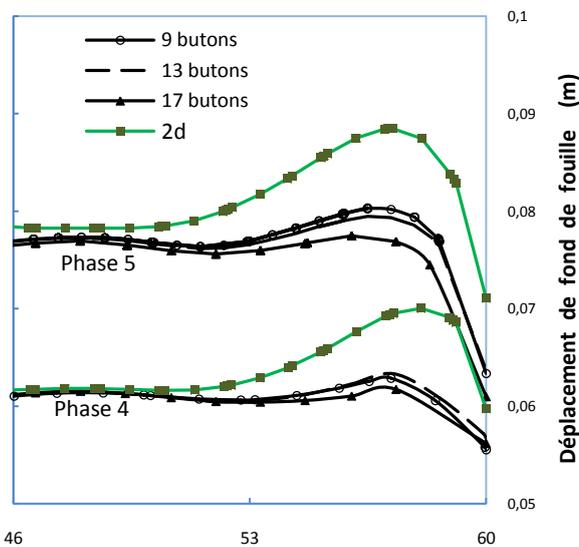


Figure 9: Soulèvement de fond de fouille pour différentes étapes d'excavation

L'espacement horizontal entre appuis joue un rôle important dans le comportement du soutènement, puisqu'il contrôle le taux de déconfinement autorisé (Sonja M [26]). La figure suivante présente les efforts maximaux calculés dans les butons (de 6 à 20 butons le long de l'écran). Après la dernière phase de calcul, on constate d'une part que la diminution de l'espacement entre les butons induit une diminution importante des efforts, mais elle est moins significative lorsque l'espacement devient inférieur ou égal à 2m (Fernands [11]) et d'autre part que le calcul en 2D donne des résultats fortement sous-estimés. On remarque par ailleurs que le lit inférieur est le plus sollicité, car la cinématique de l'écran est très importante dans cette partie.

L'écart obtenu entre les modélisations 2D et 3D est de l'ordre de 50%.

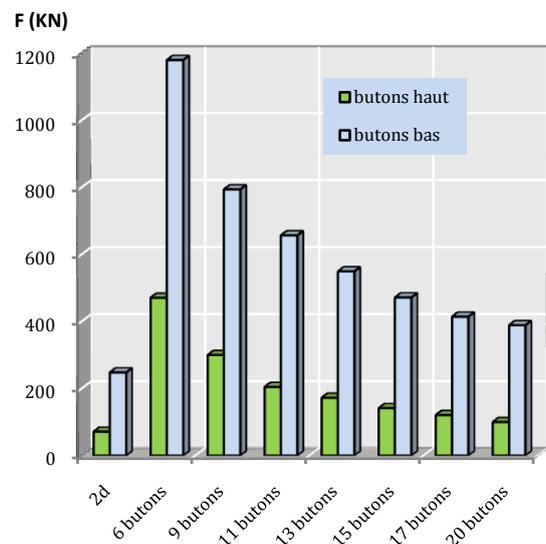


Figure 10: Valeurs calculées des efforts dans les butons.

5.2 L'effet de la rigidité de l'écran

Cette partie se focalise sur l'étude de la rigidité du rideau de palplanches et sa répercussion sur à la fois la cinématique du rideau et le champ de déplacement de sol environnant. On a proposé deux autres types de rideaux dont les différentes caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Différentes caractéristiques des rideaux.

		Hoesch 95	Hoesch 134 (réf)	Hoesch 215
e	(mm)	8	9,5	12
S	(cm ²)	121	171	274
I	(cm ³)	7130	25500	53550
EA	(KN/m)	2,541 10 ⁶	3,591 10 ⁶	5,754 10 ⁶
EI	(KN.m ² /m)	1,497 10 ⁴	5,335 10 ⁴	1,124 10 ⁵

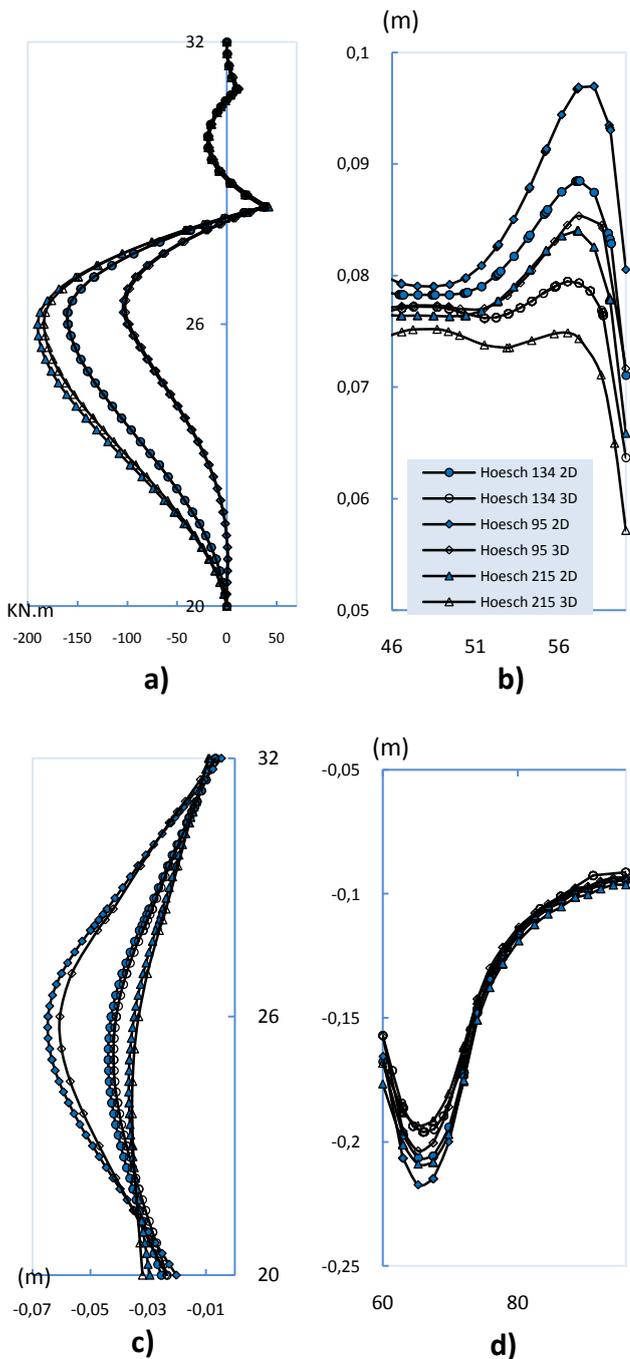


Figure 11 : Résultats obtenus ;a) le moment fléchissant, b) déplacement du fond de fouille, c) déplacement horizontal du rideau, d) le tassement en surface derrière le rideau

Dans cette analyse, les profils sont différents au niveau des moments fléchissants, dont la valeur maximale augmente avec la rigidité (figure 11a). En contrepartie, cette rigidité provoque une diminution aussi bien sur les déformations du rideau que sur les mouvements du sol environnant. Cette étude permet de tirer des conclusions plus utiles en termes d'épaisseur minimale de l'écran afin d'assurer la stabilité complète de l'ouvrage.

6 CONCLUSION

Dans cet article, une étude numérique par éléments finis a été menée afin d'étudier le comportement d'une excavation soutenue par un rideau de palplanches butonné et fiché dans une couche d'argile molle. Par manque de mesures expérimentales, on s'est intéressé à la prise en compte d'effets tridimensionnels afin de trouver les conditions optimales d'une modélisation bidimensionnelle qui pourra donner des résultats satisfaisants.

La modélisation numérique met clairement en évidence le rôle joué par l'espacement horizontal des butons vis-à-vis des efforts calculés, la diminution de cet espacement entraîne en effet une diminution significative de ces efforts. En revanche, le mouvement de sol environnant et les déplacements du rideau ne sont pas affectés. Afin d'obtenir un meilleur accord entre les deux modélisations, l'espacement horizontal des butons en 3D doit être celui proposé en 2D.

Une autre observation très intéressante en termes de la rigidité du rideau, l'analyse montre que les déplacements ont été minimisés lorsqu'on applique un rideau plus rigide. Cette remarque nous permet de mieux choisir la rigidité adéquate de telle façon que les mouvements en arrière restent admissibles et ne provoquent aucun tassement différentiel des bâtiments avoisinants.

La profondeur de l'encastrement du rideau est un autre facteur censé nécessaire à la stabilité, plus la fiche est profonde plus le coefficient de sécurité est élevé.

Enfin, les études présentés montrent du point de vue global la performance de la modélisation 3D afin d'affiner les calculs et de mieux saisir le comportement d'ensemble de l'ouvrage.

REFERENCES

- [1] Arafat N. (1996) : Contribution à l'étude des problèmes de déchargement dans les massifs de sol : Application à la modélisation des ouvrages de soutènement. ; 247p.
- [2] Balay J. (1984) : Recommandations pour le choix des paramètres de calcul des écrans de soutènement par la méthode aux modules de réaction. Note d'information technique. Ministère de l'urbanisme et des transports. LCPC.
- [3] Bjerrum L., Eide O. (1956): Stability of strutted excavations. Géotechnique, vol. 6, 1, pp. 32-47.
- [4] Boussinesq J. (1882) : Note sur la détermination de l'épaisseur minimum que doit avoir un mur vertical, d'une hauteur et d'une densité données, pour contenir un massif terreux, sans cohésion, dont la surface est horizontale, Annales des Ponts et Chaussées, Tome 3, , pp. 623-643.

- [5] Clough G.W., O'rouke T.D. (1990): Construction induced movements of in situ walls, Proc. of the Conf. on Design and Performance of Earth Retaining Structures, Ithaca (New York), Cornell University, pp. 439-470.
- [6] Coulomb C.A. (1776) : Sur une application des règles de maximis et de minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture, Mémoires de l'Académie des Sciences présentés par des savants, 7, pp. 343-382.
- [7] Delattre L. (2001) : Un siècle de méthodes de calcul d'écrans de soutènement. I. L'approche par le calcul – les méthodes classiques et la méthode au coefficient de réaction. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 234, Sept-Oct 2001, 35-55.
- [8] Delattre L., Marten S. (2003) : Un siècle de méthodes de calcul d'écrans de soutènement. II. Les approches empiriques et semi-empiriques. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 244-245, Mai- Juin-Juillet 2003, 31-50.
- [9] Dysli M., Fontana A., Rybisar J. (1979) : "Enceinte en paroi moulée dans des limons argileux : calculs et observations" Comptes rendus, Septième congrès européen de mécanique des sols et des travaux de fondations, Vol. 3, pp. 197-205.
- [10] Fadi H C., Walid C., Hussein M., Isam S (2010) : Interaction excavation profonde-structure : aspects numériques dans les cas bi- et tridimensionnels. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2010 –Grenoble.
- [11] Fernandes M.M. (1986): "Three dimensional analysis of flexible earth-retaining structures" Second international symposium on numerical models in geomechanics, Ghent, pp. 433-438.
- [12] Finno RJ, Tu XX. (2006): Selected topics in numerical simulation of supported excavations. In: Proceedings of the international conference on numerical simulation of construction processes in geotechnical engineering for urban environment, Bochum, Germany; p. 3–19.
- [13] Finno R.J. Roboski J.F, ASCE S.M. (2005): Three-dimensional responses of a tied-back excavation through clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 131(3), 273-282.
- [14] Hsieh P. G., Ou C. Y. (1998): Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation. Canadian Geotechnical Journal 35(6), 1004-1017.
- [15] Jardine R.J., Potts D.M., Fourie B., Burland B (1986): "Studies of the influence of non-linear stress strain characteristics in soil-structure interaction" Géotechnique, Vol. 36, No. 3, pp. 377-396.
- [16] Kempfert H.-G., Gebreselassie B. (2006): Hand book of the Excavations and Foundations in Soft Soils, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [17] Malcolm D. BOLTON et al. (2014): Ground movements due to deep excavations in Shanghai: Design charts. Front Struct. Civ. Eng 8(3): 201–236.
- [18] Mana A.I., Clough G.W. (1981): Prediction of movements for braced cuts in clay, Proc. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 107, GT6, pp. 759-777.
- [19] Mestat P. (1997) : Maillages d'éléments finis pour les ouvrages de géotechnique Conseils et recommandations. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées - 212 - novembre-décembre - RÉF. 4161 - PP. 39-64.
- [20] Mohammad S., Imanzadeh S., Bagherinia KH., (2013): Characteristics of diaphragm wall lateral deformations and ground surface settlements: Case study in Iran-Ahwaz metro Tunnelling and Underground Space Technology 35 p 109–121.
- [21] Ou C.Y., Hsieh P.G., Chiou D.C. (1993): Characteristics of ground surface settlement during excavation. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 30, n°5, p 758-767.
- [22] Peck R.B. (1969a): Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground. 7th ICSMFE, Mexico. State of the art volume 7(3), 225-290.
- [23] Peck R.B. (1943): Earth Pressures Measurements in Open Cuts Chicago Subway, Trans. ASCE, 108, , pp. 1008-1036.
- [24] Potts D.M., Fourie A.B. (1984): "The behaviour of a propped retaining wall : results of a numerical experiment "Géotechnique, Vol. 34, No. 3, pp. 383-404.
- [25] Rankine W.J.M. (1857): On the stability of loose earth, Trans. Roy. Soc. London, vol. 147.
- [26] Sonja M. (2005) : Étude expérimentale et méthodologique sur le comportement des écrans de soutènement. Thèse de doctorat (PhD), LCPC. France, 301p.
- [27] Smith LM., Ho D.K.H. (1992) : "Influence of construction technique on the performance of a braced excavation in marine clay" International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol. 16, pp. 845- 867.
- [28] Terzaghi K. (1941): General Wedge Theory of Earth Pressure, Trans. Am. Soc. Civil Engrs, vol. 106, pp. 68-97.
- [29] Terzaghi K. (1943a): Theoretical Soil Mechanics, New York, John Wiley & Sons, 510 p.

- [30] Terzaghi K. (1943b): Liner-plate tunnels on the Chicago subway, Trans. ASCE, pp. 970-1008, 1090-1097.
- [31] Terzaghi K., Peck R.B. (1967): Soil mechanics in engineering practice, New York, John Wiley & Sons, Seconde édition, 729 p.
- [32] Tschebotarioff G.P. (1973): Foundations, retaining and earth structures, New-York, McGraw-Hill, deuxième édition, 642 p.
- [33] Wengang Z., Anthony T.C. G., Feng X.,(2015) : A simple prediction model for wall deflection caused by braced excavation in clays. Computers and Geotechnics 63 p 67–72.