

Modélisation numérique par rétro-analyse du comportement des parois moulées butonnées

**N. BENMEBAREK
S. BENMEBAREK**

Laboratoire de génie civil
Université Mohamed-Khider
BP 145
Biskra, Algérie
benmebarekn@yahoo.fr

R. KASTNER

URGC-Géotechnique
INSA de Lyon, France
richard.kastner@insa-lyon.fr

Résumé

La construction du terminus Ouest de la ligne D du métro de Lyon a été réalisée en tranchée couverte à l'abri de parois moulées butonnées dans un horizon de colluvions limoneuses de caractéristiques médiocres. Une étude hydrogéologique préliminaire ayant mis en évidence le risque de rehaussement de la nappe dû à sa coupure partielle par les parois moulées, le soutènement a été dimensionné avec une fiche réduite. Cette configuration présentant un risque de soulèvement du fond de fouille ou de butée insuffisante devant la fiche, la paroi a été instrumentée et suivie tout au long des travaux. Les résultats de ces observations sont analysés. Cette analyse confirme l'incidence marquée des forces d'écoulement liées à l'exhaure sur le comportement mécanique de la paroi et montre également un comportement dissymétrique de la fouille dû au déroulement des travaux. De telles interactions sont difficilement prises en compte dans les approches traditionnelles et ces résultats ont été confrontés par rétro-analyse à des simulations numériques en différences finies où l'effet de l'écoulement est explicitement pris en compte. Cette confrontation a enfin été complétée par une étude paramétrique.

Mots-clés : paroi moulée, modélisation numérique, rétro-analyse, auscultation, comportement, excavation profonde.

Numerical modeling by back analysis of the behavior of strutted retaining walls

Abstract

The construction of the Western terminus of the subway D line in Lyon has been achieved by deep excavation supported by strutted cast-in situ retaining walls driven in silty deposits with poor mechanical characteristics. Following a preliminary hydrogeological study, which showed a risk of a rise in the groundwater level, when intersected by these cast in situ walls the retaining walls were designed with a reduced depth of embedment. This configuration presenting a risk of base heave, the excavation was instrumented and monitored throughout the work. The analysis of the experimental observations confirmed the important influence of the seepage forces on the mechanical behavior of the retaining wall and also showed the unsymmetrical behavior of the excavation due to the progress of the work. Such behavior was taken into account with difficulty in the traditional analyses and the results obtained were compared to back analyses with numerical simulations where seepage was explicitly taken into account. This comparison was supplemented by a parametric study.

Key words : retaining wall, numerical modeling, back analysis, monitoring, behavior, deep excavation.

NDLE : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1^{er} septembre 2003.

Introduction

Le creusement en site urbain induit des déplacements et des déformations du terrain encaissant qui peuvent être la source de désordre et de dysfonctionnement des structures existantes (Boscardin et Cording, 1989). La réalisation d'excavation à l'abri des parois (moulées, palplanches, pieux jointifs) butonnées s'est développée en site urbain, cette technique permettant de limiter les mouvements du terrain à des valeurs admissibles vis-à-vis du bâti et des ouvrages riverains.

La confrontation des résultats de mesures et de calculs montre que ce type d'ouvrage constitue un problème délicat d'interaction sol-structures qui fait intervenir le comportement des sols, la rigidité des parois, l'interface sol-structure, les phases des travaux, les conditions hydrauliques et les conditions de mise en place des butons (Powrie et Batten, 2000 ; Addenbrooke *et al.*, 2000 ; Wong *et al.*, 1996 ; Matos *et al.*, 1998 ; Schweiger *et al.*, 1999 ; Creed et O'Brien, 1991...).

En France, les parois flexibles sont souvent calculées par des méthodes basées sur l'hypothèse de Winkler qui représente le sol par des ressorts indépendants (méthode du coefficient de réaction). Si cette méthode est d'utilisation très commode, il n'en reste pas moins que la simulation de l'action des terres sur le soutènement par des ressorts indépendants est simpliste. En particulier, elle ne permet pas toujours de simuler correctement les redistributions d'efforts liées à la flexibilité des parois de soutènement. Une autre difficulté réside dans la détermination du coefficient de réaction qui divise encore les spécialistes (Schmitt, 1995). De plus, les interactions avec les écoulements souterrains et, notamment, ceux provoqués par la mise hors d'eau de la fouille ne peuvent être pris en compte que de manière très approximative.

Bien que durant ces dernières années les recherches se soient intensifiées pour le développement des codes numériques spécialisés permettant de modéliser l'ouvrage de manière plus réaliste, la confrontation aux chantiers instrumentés est souvent marquée par des divergences. Ainsi, le calcul par rétro-analyse est devenu une contribution importante à la compréhension des phénomènes observés et du comportement du sol (Wong *et al.*, 1996 ; Konietzky, 1994 ; Powrie et Li, 1991). Cette technique tente de modéliser le comportement observé des ouvrages complexes en géotechnique durant et après construction et à identifier les paramètres principaux contrôlant le comportement de l'ouvrage.

Cet article présente une application de cette méthode sur le chantier expérimental du terminus Ouest du métro de Lyon, dans l'objectif d'améliorer la compréhension de l'interaction sol-paroi moulée butonnée et d'identifier les paramètres principaux gouvernant le comportement de l'ouvrage. Une étude paramétrique de l'ouvrage est également présentée.

2

Présentation de l'ouvrage

2.1

Contexte géotechnique

Le site expérimental est la construction de la ligne D du métro de Lyon, réalisée dans des conditions difficiles en tranchée couverte à l'abri de parois moulées butonnées. Une étude hydrogéologique préliminaire a mis en évidence le risque de rehaussement de la nappe dû à sa coupure partielle par les parois moulées. En conséquence, le soutènement a été conçu avec une fiche réduite, impliquant en contrepartie, un risque de soulèvement du fond de fouille.

Sur la profondeur concernée par les travaux, les sondages font apparaître une succession de strates de limons sableux aux caractéristiques d'identification assez voisines. Du point de vue de leur granulométrie, il s'agit de sables fins limoneux avec un pourcentage de passant à 2 microns compris entre 10 et 20 %. En surface, on trouve quelques passages comportant 10 à 30 % de sables plus grossiers. Ces limons peu plastiques ont une limite de liquidité comprise entre 25 et 30 % avec un indice de plasticité voisin de 5 %. Il est à noter que la teneur en eau naturelle de ces limons est localement voisine de leur limite de liquidité ce qui leur confère une grande sensibilité au remaniement constatée notamment lors des terrassements. Les caractéristiques déduites essentiellement d'essais triaxiaux, d'essais scissométriques in situ et d'essais pressiométriques sont présentées dans le tableau I.

2.2

Géométrie de l'excavation

La fouille, large de 9 m et profonde de 8 m est protégée par deux parois moulées en béton armé de 10,5 m de hauteur et 0,60 m d'épaisseur (Fig. 1). Les parois sont réalisées avec un béton de classe C30 et un taux de ferrailage de 1,3 %. Le module d'élasticité E est de

TABEAU I Caractéristiques géotechniques des couches.
Geotechnical characteristics of the layers.

Couches	Profondeur (m)	Poids volumique (kN/m ³)	Cohésion (kPa)	Angle de frottement (°)	Pression limite Ménard (kPa)	Module pressiométrique Ménard (kPa)	Module d'élasticité (MPa)
Sol 1	0-6,2 m	17	2	22	200-400	1-2	7
Sol 2	6,2-9 m	19	0	27	200-400	1-2	7
Sol 3	> 9 m	21	0	35	700-900	3,5-4	12

l'ordre de 34 GPa pour les déformations instantanées et de 11 GPa pour les déformations différées. Ce paramètre variable en fonction de l'âge du béton et des séquences de chargement est pris égal à 20 GPa afin de tenir compte de l'effet différé. Le moment d'inertie effectif I de la paroi varie avec son degré de fissuration. Comme le moment fléchissant au cours des phases d'excavation est inférieur au moment ultime, l'hypothèse d'une paroi non fissurée $I = 0,06 \text{ m}^4$ par mètre linéaire semble être raisonnable. Ainsi, la rigidité de la paroi EI caractérisant sa flexibilité est difficile à évaluer avec précision. Une étude de sensibilité à la rigidité EI s'impose.

Ces parois sont maintenues par deux niveaux de butons passifs avec un espacement de 3 m (pour la section étudiée). Ces butons, de longueur $L = 9 \text{ m}$, sont constitués de profilés métalliques en H (HEB 340) caractérisés par une section $S = 170,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, un module d'élasticité $E = 210 \text{ GPa}$, soit une raideur théorique $R = ES/I = 8 \cdot 10^5 \text{ kN/m}$ où I est la demi-portée du bouton. La raideur théorique utilisée dans le calcul est $8 \cdot 10^5/3 = 2,667 \cdot 10^5 \text{ kN/m}$ par mètre linéaire de paroi. Avant terrassement, le niveau de la nappe oscille entre 4 et 5 m sous le niveau du terrain naturel.

2.3

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé a été destiné à mesurer le déplacement et la déformation des parois, l'effort dans les butons, ainsi que l'incidence du rabattement de la nappe. Ces observations ont été réalisées en utilisant le dispositif suivant (Kastner *et al.*, 1988) schématisé sur la figure 2 :

- quatre tubes inclinométriques fixés aux cages d'armature des parois avant le bétonnage ;
- chaque bouton du tronçon expérimental a été équipé de 6 extensomètres à corde vibrante placés sur une même section. Ce dispositif surabondant, destiné à pallier les pannes inévitables sur un chantier réel, a permis la détermination précise des efforts pendant toute la durée des travaux ;
- une ligne sensiblement orthogonale à la direction de la fouille a été équipée par quatre piézomètres ouverts.

En complément, quatre points au niveau du pied des parois ont été équipés par des capteurs de pression différentielle avec capillaire de mise à l'air libre permettant de compenser les variations de la pression atmosphérique.

L'ensemble des capteurs de pression hydraulique et des extensomètres à corde vibrante, complété par des sondes thermométriques, a été relié à une centrale de mesure automatique.

2.4

Déroulement des travaux

Après un premier terrassement de 1,8 m, le premier niveau de butons passifs a été mis en place à 1,35 m sous le sommet de la paroi. Un remblai sablo-graveleux d'épaisseur 0,50 m, destiné à faciliter la circulation et le stationnement des engins de terrassement, a été mis en place côté Est.

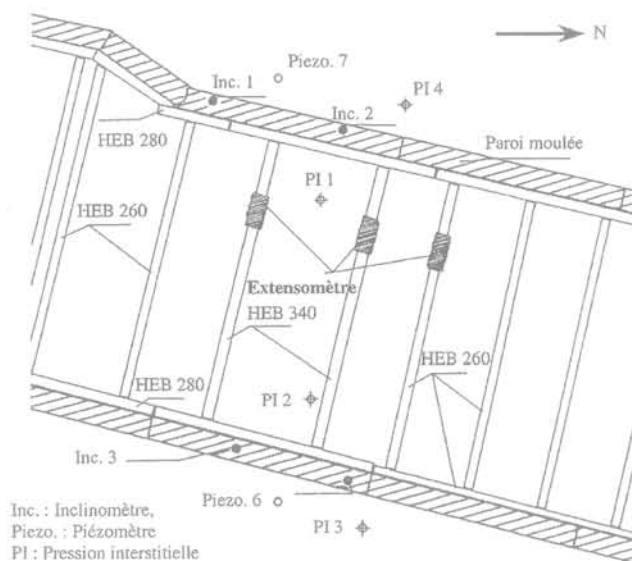


FIG. 2 Vue en plan du plot instrumenté.
Plan view of the monitored site.

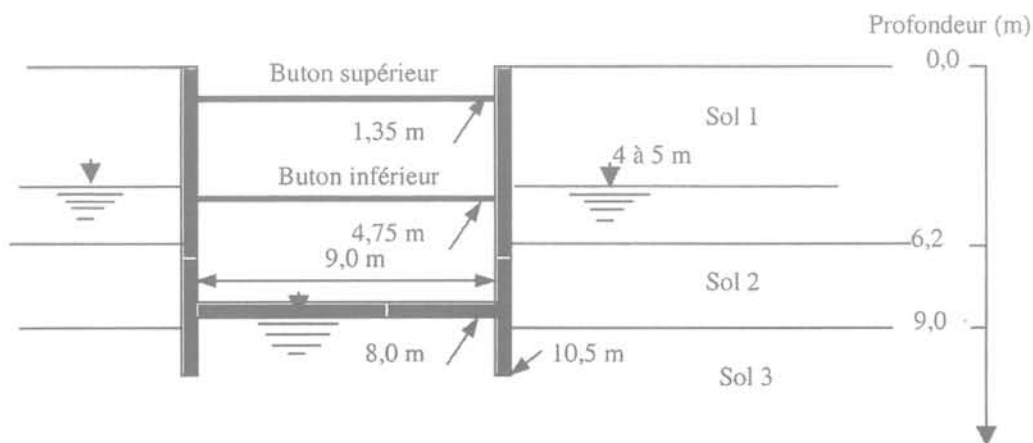


FIG. 1 Profil de l'excavation.
Excavation profile.

Le terrassement est alors poursuivi par étapes jusqu'à 5,2 m de profondeur. Ensuite le deuxième lit de butons passifs a été mis en place à 4,75 m par rapport à la surface. Après réalisation du terrassement final à 8 m de profondeur, un géotextile a été posé en fond de fouille afin de réaliser une couche de circulation graveleuse de 30 à 40 cm d'épaisseur. La tranchée est restée ainsi ouverte pendant 4 mois et demi avant bétonnage du radier inférieur puis réalisation du tunnel. Avant le terrassement final la nappe a été rabattue à 0,5 m au-dessous du fond de fouille.

3

Résultats de l'auscultation

3.1

Comportement des parois

L'évolution de la déformée des parois avec la progression de l'excavation et la pose des butons est présentée sur la figure 3.

Au cours de la réalisation de l'ouvrage, on observe de faibles déplacements horizontaux avant le terrassement final : 0 à 1 mm pour le premier terrassement de 1,8 m et 4 mm pour le deuxième terrassement à 5,2 m. Le dernier terrassement à 8 m de profondeur est marqué par un déplacement relativement important de 15,4 mm. Il est vraisemblable qu'à ce moment, la fiche très courte du rideau, sollicite le sol à un niveau proche de la pression passive limite. Le maintien du pied de la paroi par le sol est alors d'autant moins efficace que le poids volumique apparent du sol est diminué par l'écoulement vertical ascendant entre les deux parois, réduisant en conséquence la pression passive disponible devant la fiche. Par la suite on note un fluage non négligeable du sol en fond de fouille, le déplacement évoluant fortement pendant près de 4 mois, passant de 9 mm à 15,4 mm pour la paroi Est et de 6,5 mm à 4,2 mm pour la paroi Ouest, pour se stabiliser ensuite.

La comparaison du déplacement des parois Est et Ouest (Fig. 3) montre une nette dissymétrie, avec un déplacement d'ensemble vers l'ouest. Cette dissymétrie peut être attribuée à la réalisation d'un remblai de 30 à 40 cm d'épaisseur côté est, à proximité immédiate de la fouille, nécessaire pour la circulation et le stationnement de tous les engins de terrassement.

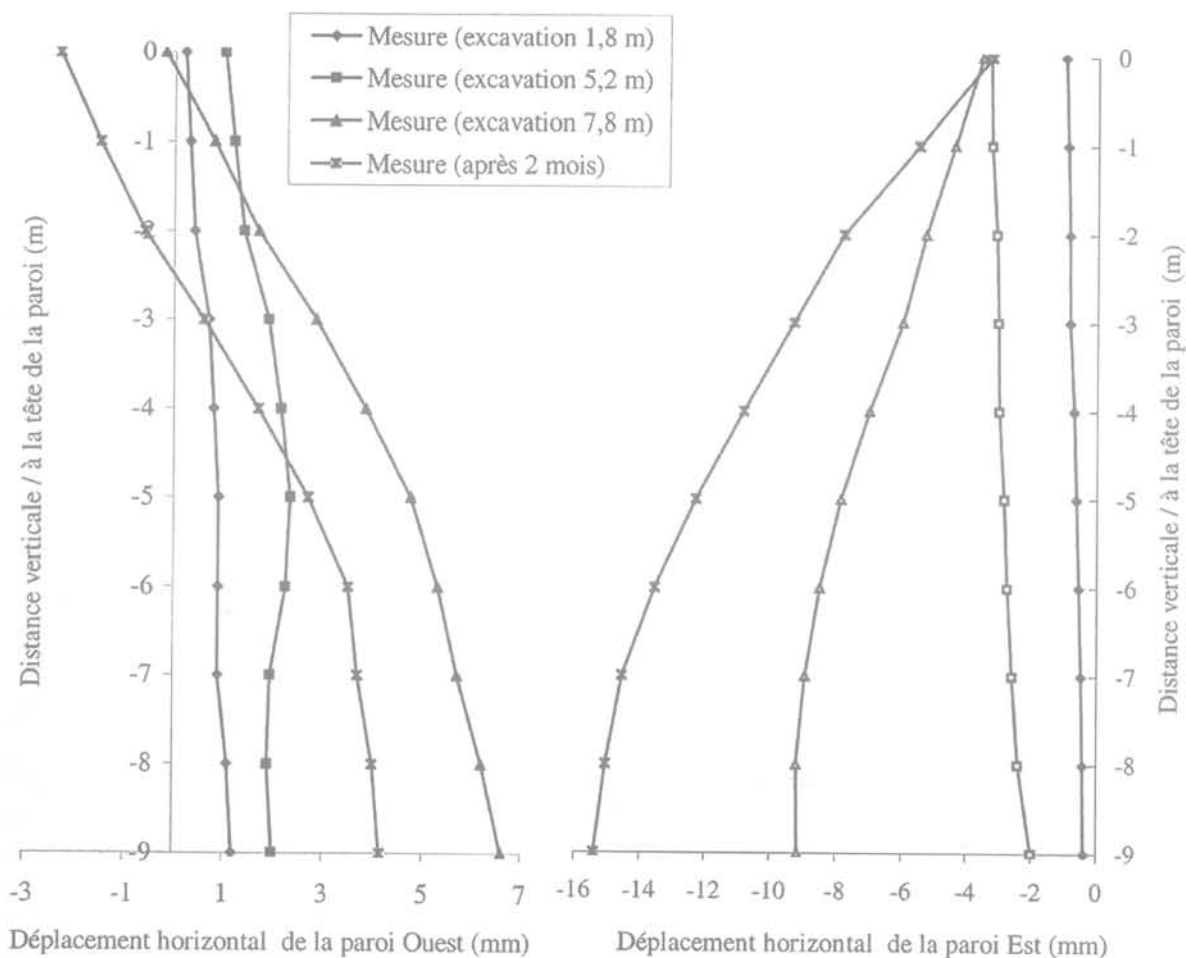


FIG. 3

Évolution des déplacements mesurés des deux parois.
Evolution of the measured displacements for the two walls.

Efforts mobilisés dans les butons

La figure 4 montre l'évolution des efforts dans les butons supérieurs et inférieurs avec la progression des terrassements. Il apparaît que les efforts sont assez mal répartis entre les deux niveaux d'étaie, les butons inférieurs étant relativement peu sollicités.

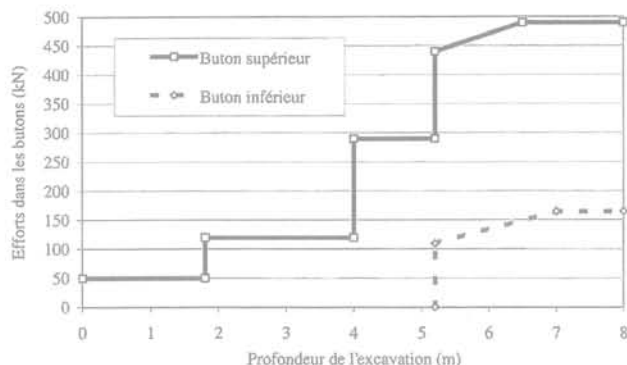


FIG. 4 Évolution des efforts dans les butons en fonction de la progression des terrassements.
Evolution of the strut forces during the excavation progress.

Les mesures simultanées des efforts et des déplacements au niveau des butons permettent de déterminer la compressibilité réelle de ceux-ci. Si l'on admet qu'ils travaillent en compression simple, leur raideur théorique ($\Delta F/\Delta L$) est égale à 8.10^5 kN/m. Pour les butons supérieurs, la raideur expérimentale est de 8.10^4 kN/m et chute à 4.10^4 kN/m environ pour les butons inférieurs, soit des valeurs 10 à 20 fois plus faibles que les valeurs théoriques. Cet écart est probablement lié, d'une part, à la compressibilité supplémentaire des appuis lierne-paroi et buton-lierne et, d'autre part, à la flexion des butons engendrée par le système d'appuis qui n'agit pas comme une rotule parfaite.

4

Modélisation numérique par rétro-analyse

Les modélisations numériques ont été effectuées en utilisant le code FLAC^{2D} en différences finies

explicites (Itasca, 1999), avec l'hypothèse d'un état plan de déformation. Le maillage utilisé est présenté sur la figure 5. Pour limiter les effets de bord, les conditions aux limites suivantes ont été imposées : déplacements horizontaux nuls aux frontières verticales à une distance de cinq fois la largeur de l'excavation et déplacements verticaux et horizontaux nuls à la base du modèle qui se trouve à 30 m de la surface du modèle.

Le sol a été modélisé en élasto-plasticité avec le critère de Mohr-Coulomb. Ce modèle simple et robuste a l'inconvénient d'utiliser pour la partie élastique linéaire du comportement, un module de déformation identique en chargement et déchargement. Il permet cependant de prédire correctement le déplacement des parois à condition de choisir avec précaution le module d'élasticité du sol (Burland et Kalra, 1986 ; Powrie *et al.*, 1999). Les paramètres mécaniques retenus pour les différentes couches, obtenus par des essais *in situ* et au laboratoire, sont résumés sur le tableau I.

Le module de Young, déduit de l'interprétation des essais pressiométriques et triaxiaux correspond à des caractéristiques de déformation en chargement et à un niveau de déformation supérieur à ceux mobilisés à proximité de l'ouvrage. Il est vraisemblable que ces modules devront être fortement augmentés pour tenir compte du chemin en déchargement. Il s'agit là d'un problème propre au modèle de sol retenu.

La paroi a été modélisée avec des éléments poutres. Chaque buton a été représenté par un élément barre relié au nœud de la paroi coïncidant avec sa profondeur. La jonction paroi-buton ne doit pas générer des moments de flexion. Ceci est accompli en asservissant le nœud du buton aux déplacements verticaux et horizontaux des parois. Avec cette procédure, la paroi et le buton peuvent se déplacer sans entraîner de moment entre eux.

Le contact sol-paroi a été modélisé par des éléments d'interface de type Mohr-Coulomb. L'angle de frottement de l'interface a été choisi égal à 1/3 de l'angle de frottement du sol, représentant une interface sol-béton relativement lisse (limon saturé très sensible au remaniement).

Phase 0 : État initial des contraintes

L'état initial des contraintes et de pression interstitielle a été déterminé en considérant un état de contrainte géostatique avec un coefficient de pression des terres au repos $K_0 = 0,5$. La paroi a été considérée comme installée durant cette phase d'état initial.

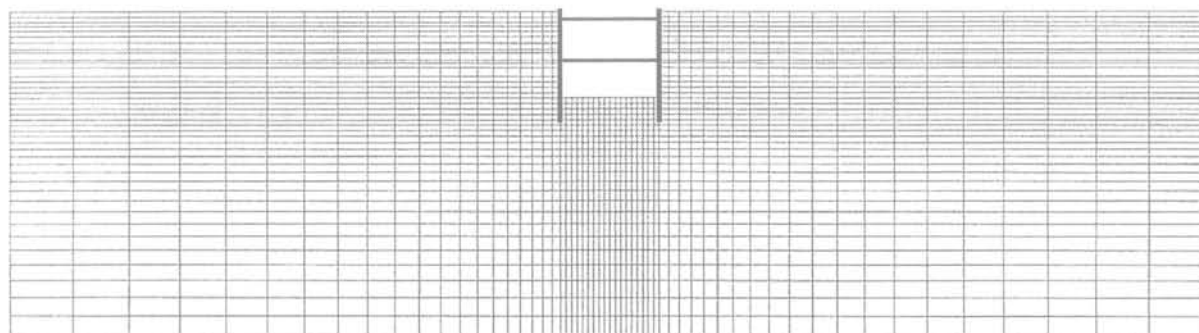


FIG. 5 Maillage utilisé.
Mesh used.

Phase 1 : Excavation jusqu'à 1,8 m

La première phase de terrassement de 1,8 m a été modélisée par désactivation des éléments de cette zone. La première modélisation a été effectuée avec les modules déduits des essais pressiométriques. La confrontation des résultats de cette modélisation aux résultats des mesures montre une divergence inacceptable des déplacements horizontaux (Fig. 6).

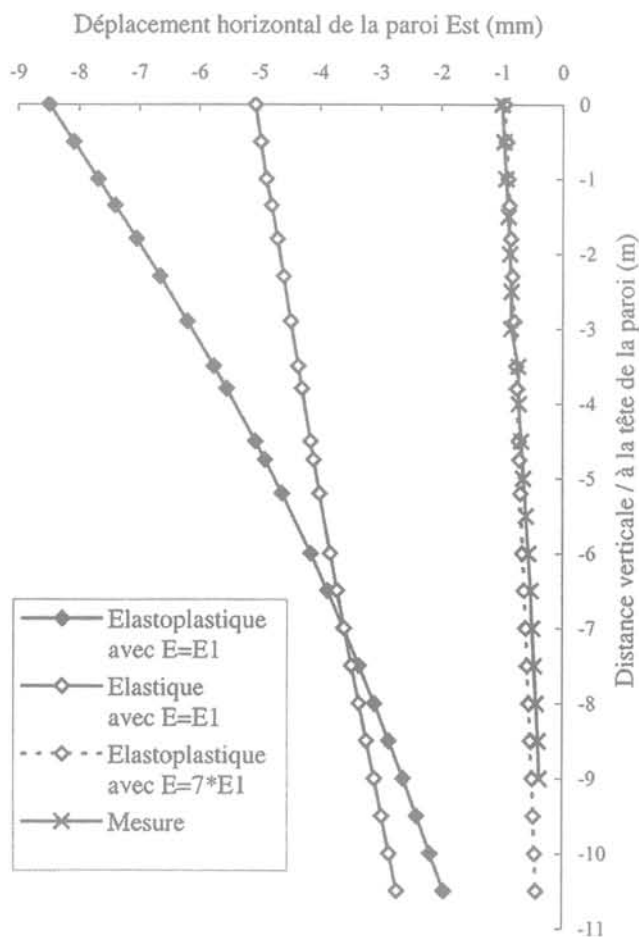


FIG. 6 Confrontation entre simulations et mesure du déplacement de la paroi à l'issue de la 1^{re} étape d'excavation (1,8 m). Comparison between computed and measured wall displacement after the 1st excavation stage (1.8 m).

Le déplacement horizontal de la tête de la paroi obtenu par simulation est 8 fois plus grand que le déplacement maximal de tous les inclinomètres enregistrés durant cette phase qui est de l'ordre de 1 mm. Ces résultats de simulation confirment les résultats des calculs basés sur la méthode de Winkler (Kastner et Ferrand, 1992) où il a été nécessaire d'augmenter le coefficient de réaction recommandé par le LCPC (Balay, 1984) pour retrouver des déplacements compatibles avec ceux mesurés.

Afin d'identifier l'origine de cette divergence, une étude de sensibilité aux paramètres a été faite. Il est apparu que les variations des paramètres concernant la paroi, l'interface et la plasticité des divers horizons de terrain ne permettent pas d'éliminer cette diver-

gence. Même avec un calcul élastique, la divergence reste toujours importante avec un déplacement de la tête de la paroi de l'ordre de 5 fois le déplacement maximal mesuré. Seule l'augmentation des modules d'élasticité des divers horizons de sol par un facteur égal à 7 autorise une bonne concordance entre les mesures et les calculs (Fig. 6). La même observation a été faite par Konietzky *et al.* (1994) et Wong *et al.* (1996). Ce comportement ne peut être expliqué que par l'effet que le phénomène dominant dans ce problème est celui du déchargement du terrain, alors que les essais qui ont été utilisés ici pour identifier la valeur du module d'élasticité sont des essais en chargement (essais triaxiaux classiques, essais pressiométriques) qui conduisent à des valeurs du module 5 à 10 fois inférieures au module en déchargement.

A la suite de ces premières simulations, les valeurs des modules d'élasticité corrigées ont été retenues pour la suite des calculs.

Phase 2 : Mise en place du buton supérieur et excavation jusqu'à 5,2 m

Avant de poursuivre l'excavation, le premier lit de buton a été installé à la profondeur de 1,35 m de la tête de la paroi et une surcharge surfacique a été appliquée sur le côté Est représentant la couche de remblais pour faciliter le déplacement des engins. Ensuite, les terrassements jusqu'à 5,2 m de profondeur ont été simulés par la désactivation des éléments de cette zone en deux étapes.

L'utilisation du module d'élasticité théorique du buton donne un incrément de déplacement de la tête de la paroi négligeable. Des tests par rétro-analyse montrent que les déplacements de la paroi sont fortement influencés par la raideur du buton. La valeur qui reproduit les déplacements mesurés est de l'ordre de 1/5 de la raideur théorique (Fig. 7). Ces résultats confirment les différences observées entre la raideur théorique et les raideurs mesurées. Cette différence peut être attribuée à la compressibilité supplémentaire introduite par les jeux d'assemblage appuis lierne-paroi et buton-lierne et la flexion du buton sous l'effet de son poids propre et des conditions d'assemblage. L'utilisation de butons actifs permettrait de réduire, voire même d'éliminer les jeux d'assemblage des appuis.

On note la difficulté d'obtenir par rétro-analyse une raideur du buton qui satisfasse en même temps le déplacement de la paroi (Fig. 7) et l'effort dans le buton (Tableau II).

Phase 3 : Mise en place du buton inférieur et rabattement de la nappe

Après installation du lit des butons inférieurs à la profondeur de 4,75 m de la tête de la paroi, la nappe a été rabattue jusqu'à 8 m de profondeur.

La perméabilité anisotrope ($k_h = 5 k_v$) du sol permettant un drainage rapide, l'effet des déformations sur les pressions interstitielles a été négligé.

Ainsi la nouvelle distribution des pressions interstitielles, induite par le rabattement de la nappe au fond de fouille, a été obtenue par un calcul d'écoulement non couplé au comportement mécanique. L'effet d'écoulement, induit par le rabattement de la nappe, sur le comportement mécanique sol-paroi est obtenu ensuite simplement en imposant la pression interstitielle ainsi obtenue en tout point du maillage.

TABEAU II Évolution des efforts dans les butons.
Evolution of stresses in the struts.

Profondeur d'excavation (m)		Effort dans les butons (kN)	
		Buton supérieur	Buton inférieur
5,2	<i>in situ</i>	290	–
	simulation	257,13	–
8	<i>in situ</i>	440	110
	simulation	439,5	116,49
7,8	<i>in situ</i>	490	165
	simulation	497,4	174,41

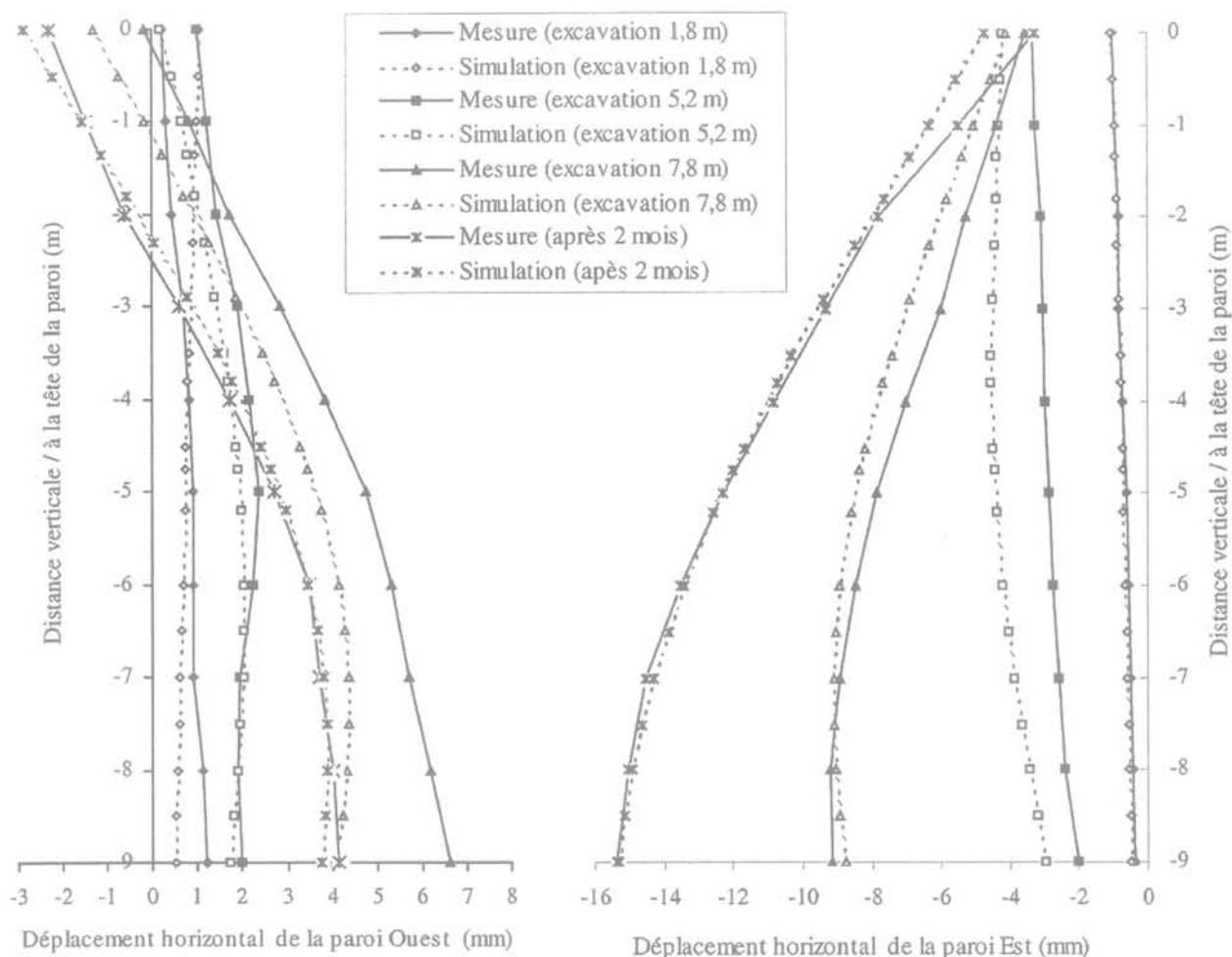


FIG. 7 Confrontation entre simulation et mesure de l'évolution du déplacement des deux parois.
Comparison between computed and measured evolution of the two walls displacement.

La figure 8 montre le nouveau régime d'écoulement établi après la mise hors eau de la fouille. On observe bien le rabattement de la surface libre de la nappe au voisinage de la paroi, côté amont. Une bonne concordance est notée entre les pressions interstitielles mesurées et simulées au pied de la paroi (Tableau III).

L'analyse des résultats de simulation montre que le rabattement de la nappe induit une légère augmentation du déplacement horizontal de la paroi ainsi que des efforts dans les butons.

Phase 4 : Excavation jusqu'à 8 m et mise en place d'une couche de remblais

Cette phase a été modélisée par désactivation des éléments de la zone concernée en plusieurs couches. L'utilisation de la compressibilité réduite du buton supérieur nécessaire pour la concordance des mesures et des calculs durant la phase précédente donne une allure de déplacement de la paroi différente de l'allure observée *in situ*. Le calage du déplacement horizontal de la tête de la paroi nécessite une compressibilité du

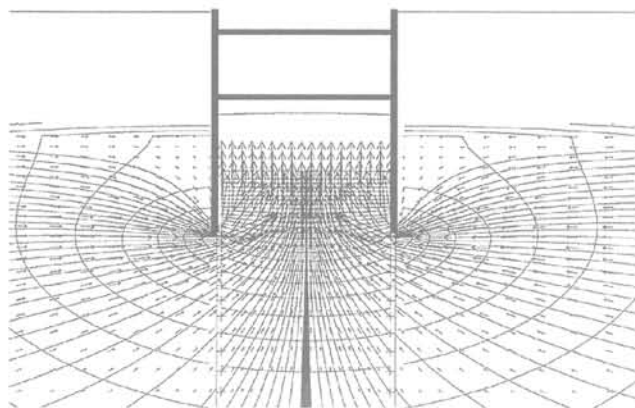


FIG. 8 Régime d'écoulement après rabattement de la nappe.
Flow network after dewatering.

TABLEAU III Pressions interstitielles mesurées et simulées au pied de la paroi.
Measured and computed pore pressures at the wall foot level.

	Pression interstitielle (kN/m ²)	
	Intérieur de l'excavation	Extérieur de l'excavation
Mesure	4×10^4	$3,7 \times 10^4$
Simulation	$4,475 \times 10^4$	$3,79 \times 10^4$

buton supérieur égale à sa compressibilité théorique ce qui peut être interprété par l'annulation de la compressibilité supplémentaire due aux liaisons d'appuis lierne-paroi et buton-lierne durant l'étape précédente. On note une très forte sensibilité du déplacement en pied de la paroi d'une part, à la compressibilité du buton inférieur et d'autre part à la surcharge du fond de fouille. Ce comportement est probablement dû à l'utilisation d'une fiche courte : le sol en fond de fouille est en grande partie en plasticité et de ce fait, son état de contrainte est très sensible à la valeur de cette surcharge verticale.

La figure 9 présente la confrontation des résultats de simulation aux calculs classiques en équilibre limite des pressions de poussée et de butée sur les deux parois. On constate un effet de voûte positif marqué par l'augmentation de la poussée en tête des parois en particulier au niveau du buton supérieur. Concernant les pressions à la base des parois au niveau de la fiche, on observe que, pour la paroi Est, les pressions de poussée sont inférieures à celles obtenues par un calcul traditionnel et la butée est totalement mobilisée. Pour la paroi Ouest, bien que la poussée soit totalement mobilisée la butée n'est mobilisée que partiellement. Il est vraisemblable que les différences de pression sont liées au déplacement d'ensemble de la fouille vers l'ouest causé par la surcharge surfacique du côté Est.

Ces simulations ont donc permis de mettre en évidence une redistribution en pression par effet voûte constatée tant sur ouvrages que sur modèles réduits.

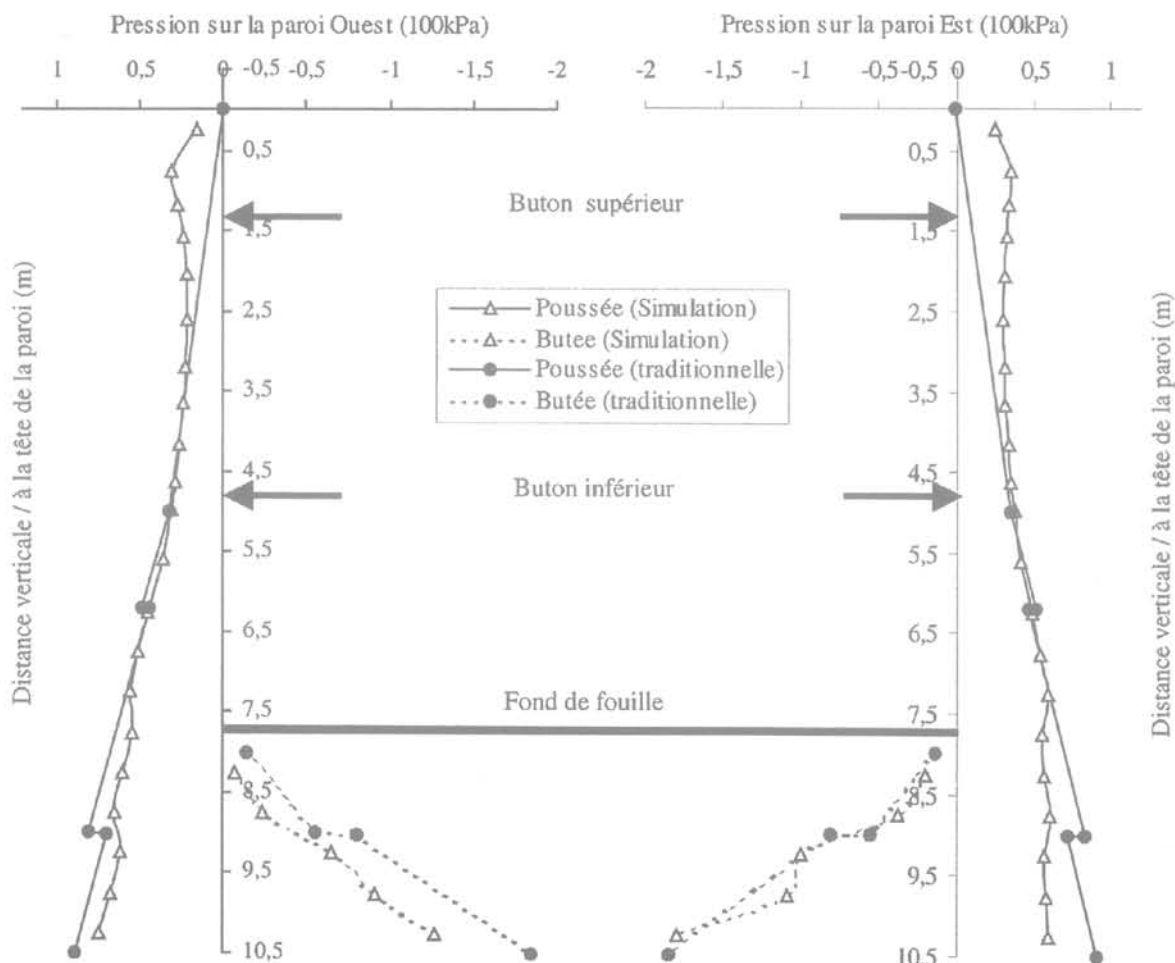


FIG. 9 Confrontation entre simulation et calcul traditionnel de la distribution des pressions sur les parois.
Comparison between computed and traditionally calculated distribution earth pressures on the two retaining walls.

(Masrouri, 1986) dans le cas d'utilisation de plusieurs niveaux de butons passifs. Elles confirment aussi que la fiche est très courte puisque la butée est totalement mobilisée sur la paroi Est. Elles reproduisent, également, correctement le déplacement d'ensemble observé vers l'Ouest qui est lié à la surcharge d'exploitation côté Est.

5

Étude de sensibilité

5.1

Influence de l'angle de frottement de l'interface

Afin de représenter une interface sol-béton relativement lisse (limon saturé très sensible au remaniement) l'angle de frottement de l'interface (δ) a été choisi pour toutes les simulations précédentes égale à 10° , soit de l'ordre du $1/3$ de la moyenne des angles de frottement des couches de sol (ϕ). Une étude de sensibilité du comportement de la paroi à ce paramètre montre que l'augmentation de l'angle de frottement de l'interface entraîne une diminution des efforts dans les butons (tableau IV) et les déplacements de la paroi (Fig. 10). Au-delà de $2/3$ de ϕ l'influence de l'augmentation de l'angle de l'interface devient faible.

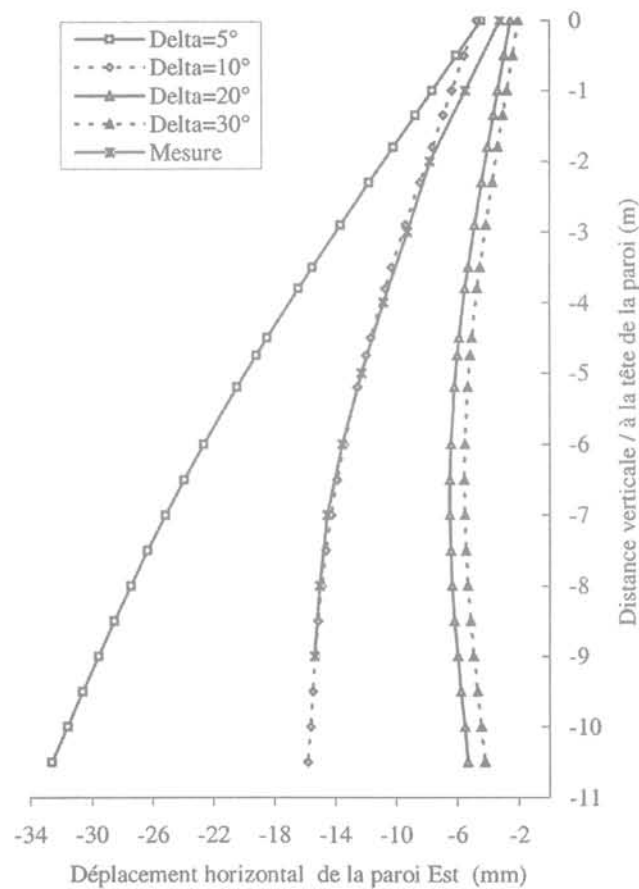


FIG. 10 Influence de l'angle de frottement de l'interface sol-paroi sur le déplacement de la paroi.
Influence of the interface friction angle on the wall displacement.

Pour un angle de l'ordre de $2/3$ de ϕ ($\delta = 20^\circ$), le déplacement maximal et les efforts pour les butons supérieur et inférieur ont diminué respectivement de 59, 26 et 52 %. Alors que pour δ égal à 30° la diminution du déplacement maximal et des efforts pour les butons supérieur et inférieur est de 65, 32 et 59 % : ainsi, au-delà de $2/3$ de ϕ , la variation n'est plus que de 6, 6 et 8 % respectivement.

5.2

Influence de la cohésion du sol

L'incidence de la cohésion du sol sur le comportement de la paroi a été testée pour quatre valeurs : 0 (référence), 2, 5 et 10 kPa (Fig. 11). Les résultats de simulation montrent une très forte sensibilité des déplacements de la paroi et des efforts dans les butons aux cohésions faibles du sol. Une légère augmentation de 2 kPa de la cohésion pour les couches de sol sans cohésion influe sensiblement sur le déplacement de la paroi butonnée. Au-delà de 5 kPa, la sensibilité à la cohésion du déplacement de la paroi et des efforts dans les butons est plus faible. Pour une cohésion de 5 kPa, les

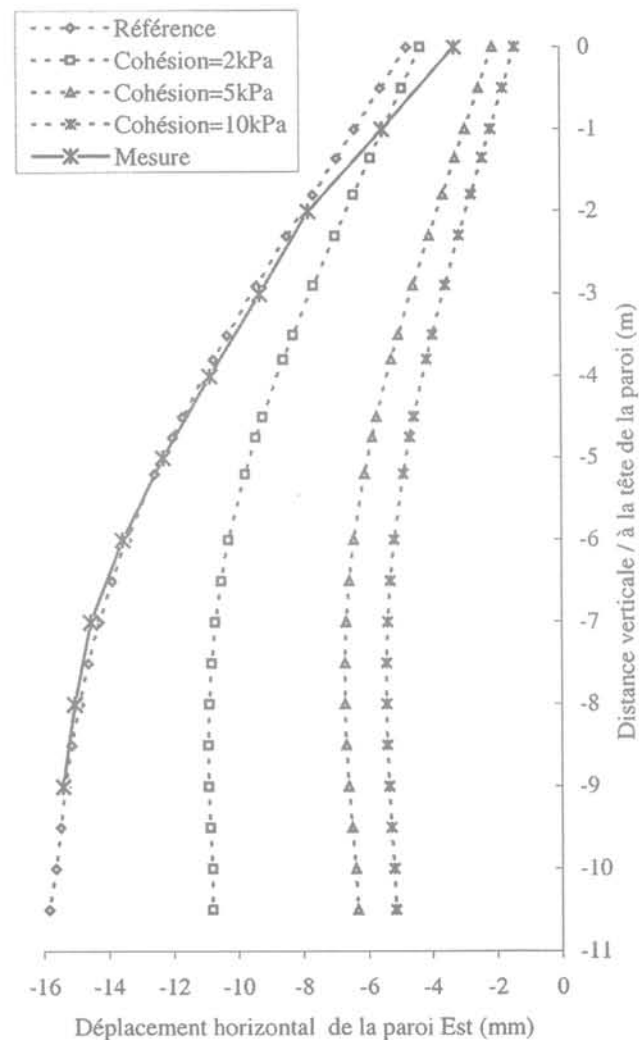


FIG. 11 Influence de la cohésion du sol sur le déplacement de la paroi.
Influence of the soil cohesion on the wall displacement.

efforts ont diminué de 32 et 48 % respectivement pour les butons supérieur et inférieur et le déplacement maximal a diminué de 57,60 % alors que pour une cohésion de 10 kPa les efforts dans les butons supérieur et inférieur et le déplacement maximal ont chuté respectivement de 44, 58 et 66 % c'est-à-dire que pour une cohésion de 5 kPa de plus les pourcentages ont varié respectivement seulement de 12, 10 et de 8 %.

5.3

Influence du rabattement de la nappe

Le rabattement de la nappe au fond de fouille induit un écoulement ascendant du côté aval. Cet écoulement diminue la butée par la réduction du poids apparent du sol (Soubra *et al.*, 1999 ; Kastner, 1982). Afin de montrer l'influence du rabattement de la nappe sur les déplacements de la paroi et les efforts dans les butons, deux simulations ont été faites respectivement pour un rabattement de 1 m (profondeur : 9 m) et à 2 m (profondeur : 10 m) au-dessous du fond de fouille, en phase finale d'excavation (Fig. 12) (Tableau IV). Les résultats de simulation montrent que ce type de rabattement a une influence remarquable sur la diminution du déplacement de la paroi et des efforts dans les butons. Le rabattement de la nappe de 1 m au-dessous du niveau final de l'excavation pour une fiche courte de 2,5 m induit pour le déplacement maximal de la paroi une réduction de 60 % et pour les efforts dans les butons une réduction de 59 et 25 % respectivement pour les butons inférieur et supérieur.

Ce comportement peut être attribué à la réduction des forces d'écoulement verticales en fond de fouille qui conduit à une augmentation des efforts de butée assurant un bon maintien du pied de la paroi (Fig. 12). Ceci conduit également à la réduction des efforts dans le buton inférieur (Tableau IV).

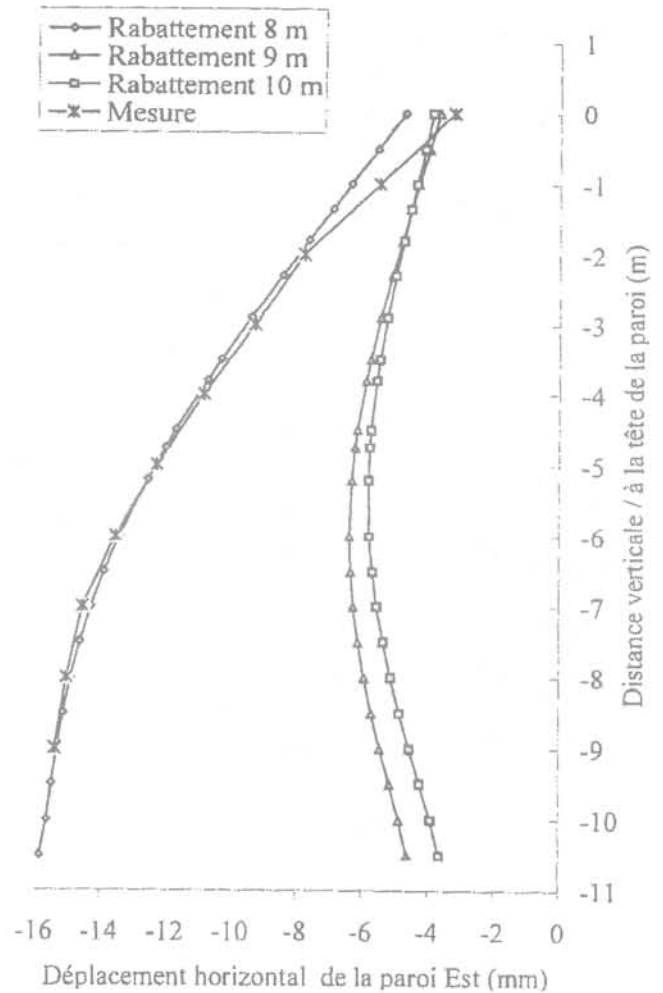


FIG. 12 Influence du rabattement de la nappe sur le déplacement de la paroi.
Dewatering influence on the wall displacement.

TABLEAU IV Influence de la variation des paramètres sur les efforts dans les butons supérieur et inférieur.
Effect of varying parameters on the forces in the upper and lower struts.

Cas de simulation		Effort dans le buton supérieur (kN)	Effort dans le buton inférieur (kN)
Angle de frottement de l'interface sol-paroi	Delta = 5°	563,4	288,51
	Delta = 10°	497,4	174,81
	Delta = 20°	368,7	84,39
	Delta = 30°	339,6	71,13
Cohésion du sol	0 kPa	497,4	174,81
	2 kPa	451,8	136,08
	5 kPa	338,1	91,71
	10 kPa	277,98	73,89
Rabattement de la nappe	8 m	497,4	174,81
	9 m	375,6	72,06
	10 m	357	55,59
Inertie de la paroi	I = 0,06 m ⁴	497,4	174,81
	I = 0,018 m ⁴	482,7	175,08
Module élastique des butons	Ajusté	497,4	174,81
	E = 210 GPa	332,7	382,2

Influence de l'inertie de la paroi

Une variante de simulation a été faite avec une inertie égale à celle de sa section géométrique ($I = b \cdot h^3/12 = 0,018 \text{ m}^4$: $b = 1 \text{ m}$, $h = 0,6 \text{ m}$ (épaisseur de la paroi)). La comparaison des résultats (Fig. 13) montre qu'avec cette inertie (très proche de l'inertie de la paroi supposée fissurée) la déformée obtenue est nettement plus forte que la déformée observée. Par contre, l'utilisation de l'inertie de la section homogénéisée non fissurée (béton et ferrailage) ($I = 0,06 \text{ m}^4$) donne une déformée de la paroi semblable à celle observée.

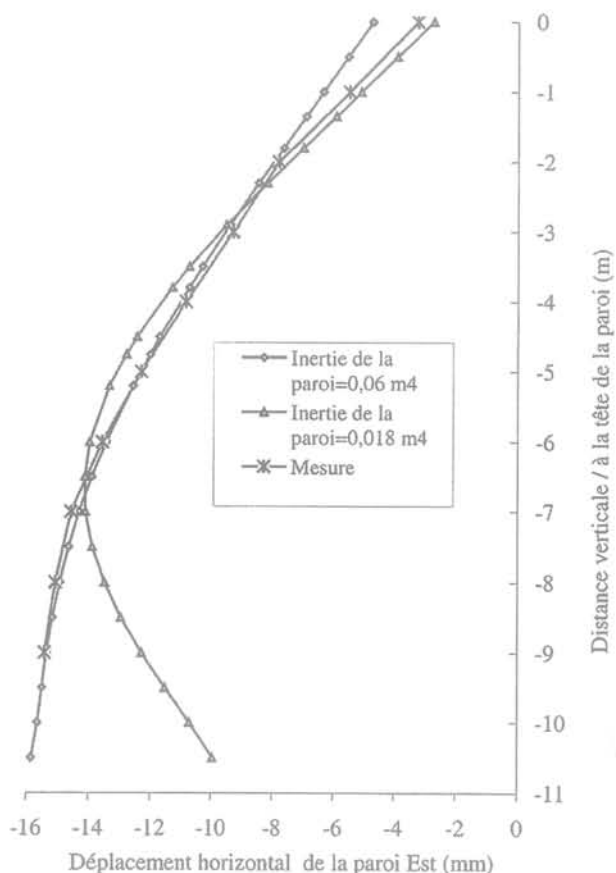


FIG. 13 Influence de l'inertie de la paroi sur son déplacement.
Influence of the wall inertia on its displacement.

Influence de la raideur des butons

L'utilisation de la raideur théorique des butons, dans ce projet, sous-estime les déplacements observés de 60 % et l'effort dans le bouton supérieur de 33 %, alors que l'effort dans le bouton inférieur est surestimé de 119 %.

Les défauts de calage initial, entraînant des différences importantes entre la raideur théorique et la raideur calée de l'ordre de 1/5 dans le présent projet, influent fortement sur le comportement de la paroi.

Seul des butons actifs (avec précontrainte initiale) permettraient de réduire la différence entre la raideur théorique et la raideur réelle en éliminant les jeux d'assemblage.

L'augmentation de la raideur des butons diminue les déplacements de la paroi (Fig. 14) et l'effort dans le bouton supérieur alors qu'elle augmente l'effort dans le bouton inférieur (Tableau IV).

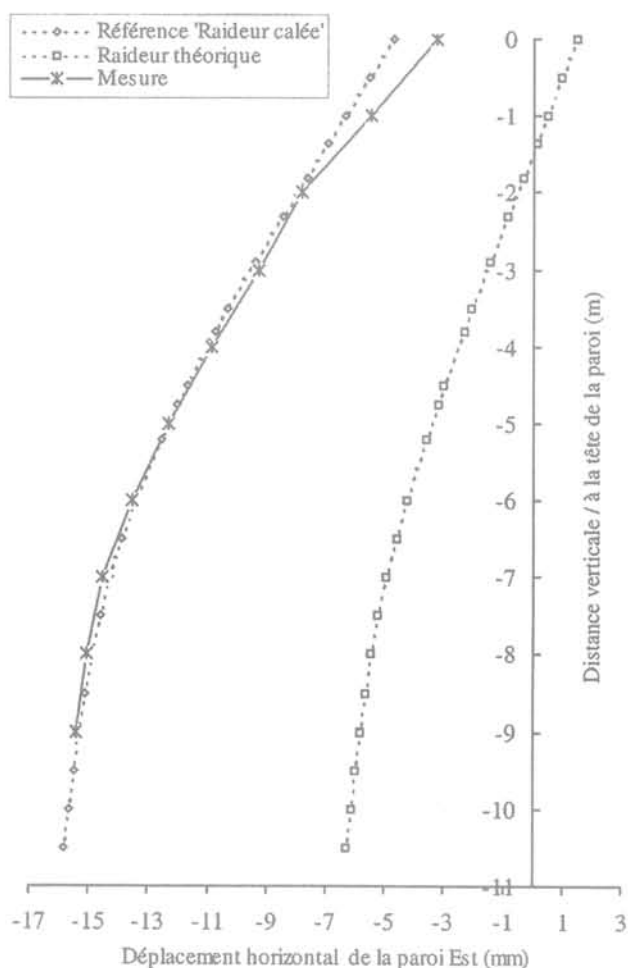


FIG. 14 Influence de la raideur des butons sur le déplacement de la paroi.
Influence of the struts stiffness on the wall displacement.

Conclusion

La confrontation des résultats de mesures expérimentales et des résultats de modélisation numérique à l'aide du logiciel FLAC^{2D} et l'étude de sensibilité des paramètres permettent les conclusions suivantes :

- Avec un modèle de sol élasto-plastique simple utilisant l'élasticité linéaire, les déplacements de la paroi sont fortement influencés par le module d'élasticité du sol. Ce module doit être choisi avec précaution en représentant le phénomène dominant de déchargement du sol.

- L'utilisation des butons passifs présente le risque d'une raideur effective plus faible que la raideur théorique en raison des jeux d'assemblage lierne-paroi et bouton-lierne ce qui réduit l'efficacité du rôle des butons pour limiter les déplacements de la paroi. Les butons actifs permettraient de réduire voire même d'éliminer l'effet des jeux d'assemblage des appuis.
- L'utilisation de l'inertie de la section homogénéisée non fissurée (béton avec un taux de ferrailage de 1,3 %) donne une déformée de la paroi proche de la déformée observée contrairement à l'inertie de la section géométrique.
- L'état de l'interface sol-paroi a une influence importante sur le déplacement de la paroi et les efforts dans les butons. Une interface lisse favorise les déplacements et mobilise plus les butons contrairement à une interface rugueuse.
- Il apparaît que la cohésion joue un rôle important dès lors qu'elle est prise en compte, même pour des valeurs faibles : sa détermination devra donc faire l'objet d'une attention particulière.
- Les déplacements d'une paroi moulée butonnée dans les sols meubles sont très sensibles aux chargements dissymétriques.
- Pour les fiches courtes, l'écoulement ascendant en fond de fouille réduit sensiblement la butée disponible. Ainsi, un rabattement plus important de la nappe permet de retrouver une butée efficace du sol devant la fiche.
- Malgré l'utilisation d'un modèle de comportement du sol très simple vis-à-vis des chemins en contrainte-déformation suivis par le sol au voisinage de l'ouvrage, l'approche en continuum a permis de simuler de manière correcte le comportement dissymétrique des deux parois et ceci, pour l'ensemble des phases de terrassement.
- Le résultat de tels calculs apparaît cependant très sensible à certains paramètres qui sont difficiles à mesurer ou évaluer avec précision, tels que la cohésion du sol et la résistance au cisaillement de l'interface sol-paroi.

Bibliographie

- Addenbrooke T.I., Potts D.M., Dabee B. – « Displacement flexibility number for multipropped retaining wall design ». *Journal of geotechnical and environmental engineering*, vol. 126, n° 8, 2000, p. 718-726.
- Balay J. – « Recommandations pour le choix des paramètres de calcul des écrans de soutènement par la méthode aux modules de réaction ». Note d'information technique, LCPC, Paris, 1984.
- Boscardin M.D., Cording E.J. – « Building response to excavation – induced settlement ». *Journal of geotechnical Engineering*, ASCE, 115 (1), 1989, p. 1-21.
- Burland J.B., Kalra J.C. – « Queen Elizabeth II Conference center : Geotechnical aspects ». *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Part I, 80, December 1986, p. 1479-1503.
- Itasca Consulting Group, Inc. – « FLAC^{2D} User Manual Version 3.4 ». Minneapolis, Minnesota, 1998.
- Kastner R. – *Excavations profondes en site urbain. Problèmes liés à la mise hors d'eau. Dimensionnement des soutènements butonnés*. Thèse de doctorat ès sciences, INSA Lyon 1, 1982, 409 p.
- Kastner R., Pantet B., Ondel C. – « Mesures en continu sur un soutènement du métro de Lyon ». *C.R. Conférence intern. Mesures et essai en génie civil*, GAMAC, vol. II, septembre 1988, p. 221-230.
- Kastner R., Ferrand J. – « Performance of a cast in situ retaining wall in a sandy silt ». *International Conference on retaining structures*, Cambridge, July 1992, p. 20-23.
- Konietzky H. – « Numerical modelling of the behaviour of soft ground for a near-surface tunnelling project in the Rhine/Ruhr district ». *Interfels news*, n° 9, January 1994, p. 1-10.
- Masroufi F. – *Comportement des rideaux de soutènement semi-flexibles*. Thèse de doctorat, INSA Lyon, 1986, 247 p.
- Matos F.M., Silva C.A., Fortunato E. – « The wall conditions below the base of the cut and the movements induced by an excavation in clay ». *Proceedings of the world tunnel congress'98 on tunnels and metropolises Sao Paulo/Brazil/25-30 April 1998*, p. 399-404.
- Powrie W., Batten M. – « Comparison of measured and calculated temporary-prop loads at Canada Water Station ». *Géotechnique* 50, n° 2, 2000, p. 127-140.
- Powrie W., Chandler R.-J., Carder D.R., Watson G.V.R. – « Back-analysis of an embedded retaining wall with a stabilizing base slab ». *Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engng.*, 137, April 1999, p. 75-86.
- Powrie W., Li E.S.F. – « Finite element analyses of an in situ wall propped at formation level ». *Géotechnique*, 41, n° 4, 1991, p. 499-514.
- Schmitt P. – « Méthode empirique d'évaluation du coefficient de réaction du sol vis-à-vis des ouvrages de soutènement souples ». *Revue française de géotechnique*, n° 71, 1995, p. 3-10.
- Schweiger H.F., Freiseder M.G., Breymann H. – « FE-analysis of a deep excavation problem and comparison with in situ measurements ». *Preprint volume of proceedings Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*, Tokyo, Japan, 19-21 July 1999, p. 679-684.
- Soubra A.H., Kastner R., Benmansour A. – « Passive earth pressures in the presence of hydraulic gradients ». *Géotechnique*, 49, n° 3, 1999, p. 319-330.
- Wong I.H., Ooi I.K., Broms B.B. – « Performance of raft foundations for high-rise buildings on the Bouldery Clay in Singapore ». *Canadian geotechnical Journal*, 33, 1996, p. 219-236.
- Wong I.H., Poh T.Y., Chuah H.L. – « Analysis of case histories from construction of the central expressway in Singapore ». *Canadian geotechnical Journal*, 33, 1996, p. 732-746.