

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# Comportement d'un Soutènement en Paroi Moulée

## Behaviour of a Diaphragm Wall

F.DELMAS Ingénieur,  
 M.GANDAIS Directeur du L.E.M., S.I.F. Entreprise Bachy,  
 P.HABIB Directeur du Laboratoire de Mécanique des Solides, Ecole Polytechnique,  
 H.JOSSEAU Ingénieur, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées,  
 M.P.LUONG Ingénieur, Laboratoire de Mécanique des Solides, Ecole Polytechnique,  
 G.PILOT Chef de Section, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France

**RESUME** - Cet article présente les résultats des mesures effectuées sur une paroi moulée en béton armé de 20 m de hauteur constituant le soutènement d'une fouille de 21 m de profondeur ouverte dans un sol constitué de formations typiques de la Région Parisienne. La paroi est ancrée au moyen de quatre nappes de tirants forés précontraints. Au cours des terrassements, on a mesuré la pression du sol sur la paroi, les déformations du béton, les efforts dans les tirants et les déplacements de la paroi. On présente les résultats les plus caractéristiques de cet ensemble de mesures que l'on compare à ceux obtenus par le calcul en éléments finis et par le calcul en poutre élastique tenant compte d'une réaction élastoplastique du sol.

### INTRODUCTION

Les immeubles construits dans les grandes villes comportent souvent plusieurs niveaux en sous-sol si bien que les travaux commencent généralement par l'ouverture d'une fouille de profondeur importante. La stabilité de cette fouille est fréquemment assurée par une paroi moulée en béton armé, ancrée par des tirants forés provisoires pendant les travaux et étayée ultérieurement par les planchers du sous-sol. Bien que les méthodes d'étude des parois ancrées par plusieurs nappes de tirants donnent des résultats assez satisfaisants, le comportement de ces ouvrages est encore mal connu. C'est dans le but de le préciser que des mesures ont été effectuées sur une paroi moulée soutenant une fouille de 21 m de profondeur, ouverte lors de la construction d'un immeuble à la limite Sud de Paris (immeuble de la S.E.R.E.T.E. dans le 13<sup>e</sup> arrondissement).

### DESCRIPTION DU SITE ET DE LA PAROI

Les sondages effectués à l'emplacement de l'immeuble ont mis en évidence les formations suivantes (fig. 1) :

- des alluvions sablo-graveleuses comportant une forte proportion d'éléments fins,

- le sable de Beauchamp qui est un sable fin très argileux,

- les marnes et caillasses constituées d'une alternance de marne blanche et de bancs calcaires très fracturés, les marnes étant largement prépondérantes.

Les piézomètres n'ont indiqué la présence d'aucune nappe sur la hauteur reconnue. Cependant le degré de saturation du sable de Beauchamp et des marnes et caillasses est voisin de l'unité. Les caractéristiques mécaniques du sol au voisinage de la

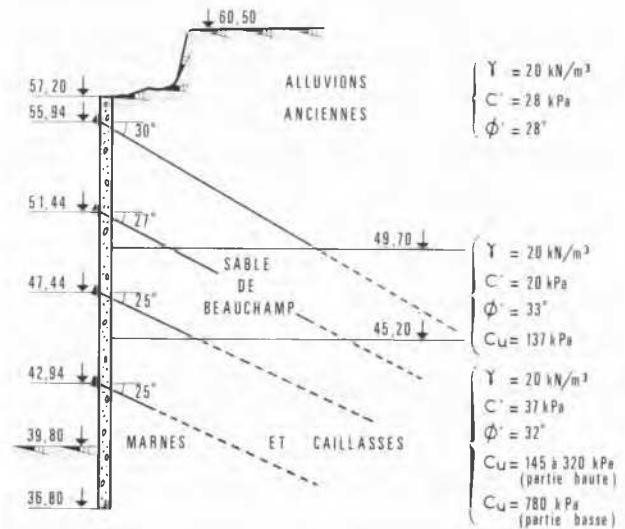


Fig. 1 - Caractéristiques du sol et de la paroi.

zone des mesures ont été déterminées à partir d'essais triaxiaux UU et CD dont les résultats sont reportés sur la coupe de la figure 1.

La profondeur de la fouille à réaliser était d'environ 21 m. Une première excavation de 3,30 m de profondeur, débordant l'emprise de l'immeuble a tout d'abord été creusée. Le reste de la fouille a été exécuté à l'intérieur d'une enceinte en paroi moulée en béton armé coulée à partir du premier niveau d'excavation. La paroi qui a une épaisseur de 0,60 m et une hauteur de 20,4 m a été coulée par panneaux alternés, les largeurs respectives des panneaux pri-

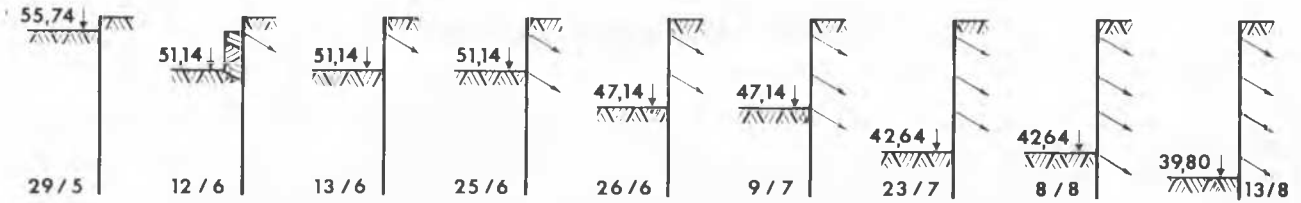


Fig. 2 - Phases de travaux (phases de terrassement et de mise en tension des tirants).

maires et secondaires étant de 1,75 m et de 5,07 m. Elle était ancrée par 4 nappes de tirants forés type Bachy mis en place dans le sol et précontraints au fur et à mesure des terrassements. L'ancrage d'un panneau primaire était assuré par 4 tirants, celui d'un panneau secondaire par 8 tirants dont les caractéristiques sont données dans le tableau I.

L'étude du projet a été faite à partir d'un calcul en poutre élastique tenant compte d'une réaction élastoplastique du sol (Boudier et al. 1969) sur la base des caractéristiques géotechniques moyennes du site. La succession des phases de travaux est indiquée figure 2.

Nappe	Type	Longueur libre (m)	Longueur de scellement (m)	Tension de précontrainte théorique (kN)
1	TMF	13	9	366
2	TMD	12	6	611
3	TMD	6	9	840
4	TMD	3	9	1040

Tableau I - Caractéristiques des tirants d'un panneau secondaire.

#### PARAMETRES MESURES - INSTRUMENTATION

Les mesures intéressent un panneau secondaire, le panneau 34. Elles avaient pour objectif de mesurer la pression du sol sur la paroi, les déformations relatives du béton, les tensions d'ancrage, les déformées successives et les déplacements de la tête de paroi.

Les mesures de pression du sol ont été effectuées sur toute la hauteur du panneau côté terrain et sur la hauteur en fiche côté fouille. On a utilisé 33 cellules Glötzl 200 mm x 300 mm (28 côté terrain, 5 côté fouille) appliquées contre les parois de la tranchée avant bétonnage au moyen de petits vérins fixés sur la cage d'armature.

Les déformations relatives du béton ont été mesurées au moyen de 20 extensomètres Télémac à corde vibrante. Les tensions des 8 tirants du panneau 34 ont été suivies au moyen de cales dynamométriques

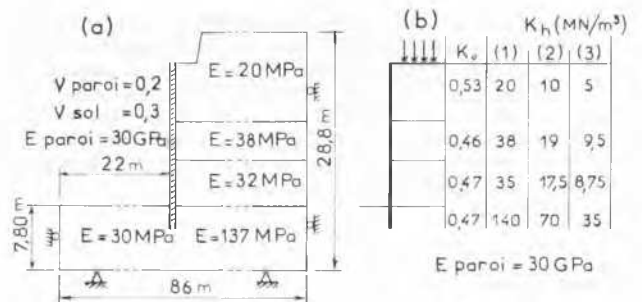


Fig. 3 - Hypothèses des calculs

- a) éléments finis,  
b) en poutre.

Glötzl. Les mesures de déformée effectuées au moyen d'un inclinomètre ont dû être interrompues à la fin de la 2e phase de travaux en raison d'une détérioration de l'appareil. Les déplacements horizontaux de la tête de paroi ont été suivis au moyen d'un "tassomètre" (distancemètre) à fil invar dont une extrémité était scellée au fond d'un forage subhorizontal de longueur 15 m pratiqué au niveau de la tête de paroi. Des mesures de déplacements horizontaux par visées optiques ont également été faites sur d'autres panneaux dans le cadre de contrôles de chantier indépendants de la recherche entreprise.

#### ETUDE THEORIQUE

Une étude théorique du comportement de la paroi a été faite à partir de deux modes de calcul :

- le calcul par la méthode des éléments finis tenant compte d'un comportement élastique du sol (Guellec et al. 1976). Ce calcul intéresse le comportement de la paroi en fin d'excavation, cette dernière étant supposée réalisée en une seule fois. Les hypothèses du calcul sont présentées figure 3a, les valeurs du module d'Young du sol sont déduites des essais triaxiaux CD.

- le calcul en poutre élastique tenant compte d'une réaction élastoplastique du sol (calcul en poutre). La paroi a été calculée pour 3 ensembles de valeurs  $K_h$  du module de réaction (fig. 3b), les calculs intégrant l'ensemble des phases de travaux. Les paramètres de cisaillement définissant les valeurs limites des réactions sont les paramètres effectifs indiqués figure 1.

La valeur  $E = 30$  GPa du module d'Young de la paroi, adoptée dans les deux types de calcul, est tirée de l'exploitation des mesures inclinométriques et extensométriques effectuées au début des travaux. Les tensions de précontrainte considérées dans les calculs sont les valeurs moyennes mesurées pour chaque couple de tirants immédiatement après leur mise en tension.

## RESULTATS ET DISCUSSION

On présente principalement les résultats expérimentaux obtenus à la fin de l'excavation, la discussion portant exclusivement sur ceux-ci.

### Déplacements horizontaux

Le déplacement de la tête de paroi par rapport au point de scellement du tassomètre est de 15 mm en fin d'excavation. L'analyse des mesures optiques (fig. 4a) effectuées sur des panneaux voisins du panneau 34 (panneaux 29 à 33) indique que le déplacement de la tête de paroi en fin d'ouverture de la fouille est d'environ 45 mm. Ceci implique que le point de scellement du tassomètre subit un déplacement horizontal d'environ 30 mm et que les déformations du sol intéressent une zone étendue à l'arrière de la paroi.

Le calcul par éléments finis qui donne un ordre de grandeur assez satisfaisant du déplacement de la tête de paroi (30 mm) et du point de scellement du tassomètre (19 mm) indique que des déplacements horizontaux de 5 mm se produisent à la surface du sol à 60 m en arrière de la paroi. En revanche le calcul en poutre indique des déplacements de la paroi très inférieurs aux déplacements réels (fig. 5c). Ceci tient au fait que dans ce type de calcul les scellements de tirants sont considérés comme fixes.

### Tensions d'ancrage

Les tensions des tirants d'une même nappe évoluent de façon parallèle et sont du même ordre sauf dans le cas de la nappe inférieure où leur différence atteint 350 kN. L'évolution de la tension du tirant le plus sollicité de chaque nappe est représentée figure 4b. La comparaison des tensions moyennes de chaque couple de tirants mesurées en phase finale, avec les valeurs calculées (tableau II) ne fait pas apparaître de divergence importante entre les mesures et les calculs. Le calcul par éléments finis donne toutefois des résultats plus satisfaisants.

Nappe		1	2	3	4
Tension effective de précontrainte (kN)		324	635	704	845
Tension finale (kN)	mesurée	375	700	770	870
	éléments finis	359	691	804	1010
	calcul en poutre	329	643	725	855

Tableau II - Comparaison des tensions d'ancrage mesurées et calculées en phase finale.

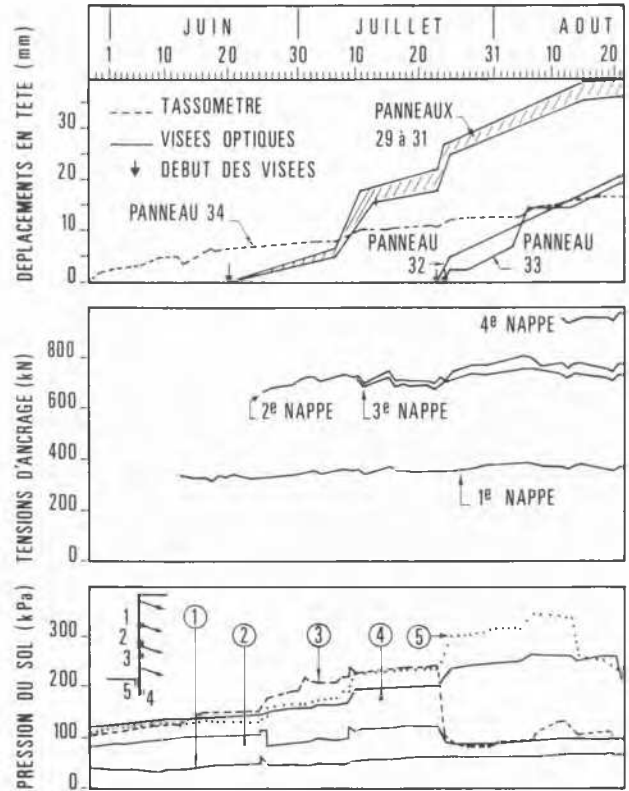


Fig. 4 - Variation de paramètres caractéristiques mesurés au cours des terrassements.

### Pression du sol et moments fléchissants

Les valeurs initiales et finales de la pression du sol mesurées le long de la paroi sont représentées figures 5a et 5b. L'évolution générale de la pression du sol entre ces deux stades est reflétée par les courbes de la figure 4c représentant ses variations en 5 points caractéristiques de la paroi. L'allure du diagramme expérimental de pression en fin d'excavation correspond bien à celle des diagrammes obtenus par les deux types de calculs au moins dans les deux tiers supérieurs de la paroi. La comparaison des pressions mesurées aux valeurs théoriques des pressions actives (fig. 5b) et passives (non représentées), calculées à partir des paramètres de cisaillement effectifs, indique que le sol reste en équilibre élastique en arrière de la paroi et est en équilibre plastique de butée au voisinage du fond de fouille. Ceci peut expliquer la divergence entre les mesures et le calcul en éléments finis (basé sur l'hypothèse d'un comportement purement élastique du sol) dans la partie inférieure de la paroi.

En ce qui concerne les moments fléchissants en fin d'excavation (fig. 5d), on constate, surtout dans la partie supérieure de la paroi, une assez bonne concordance entre les valeurs résultant du calcul en poutre et les valeurs expérimentales déterminées à partir des déformations relatives du béton en tenant compte pour celui-ci d'un module d'Young de 30 GPa.

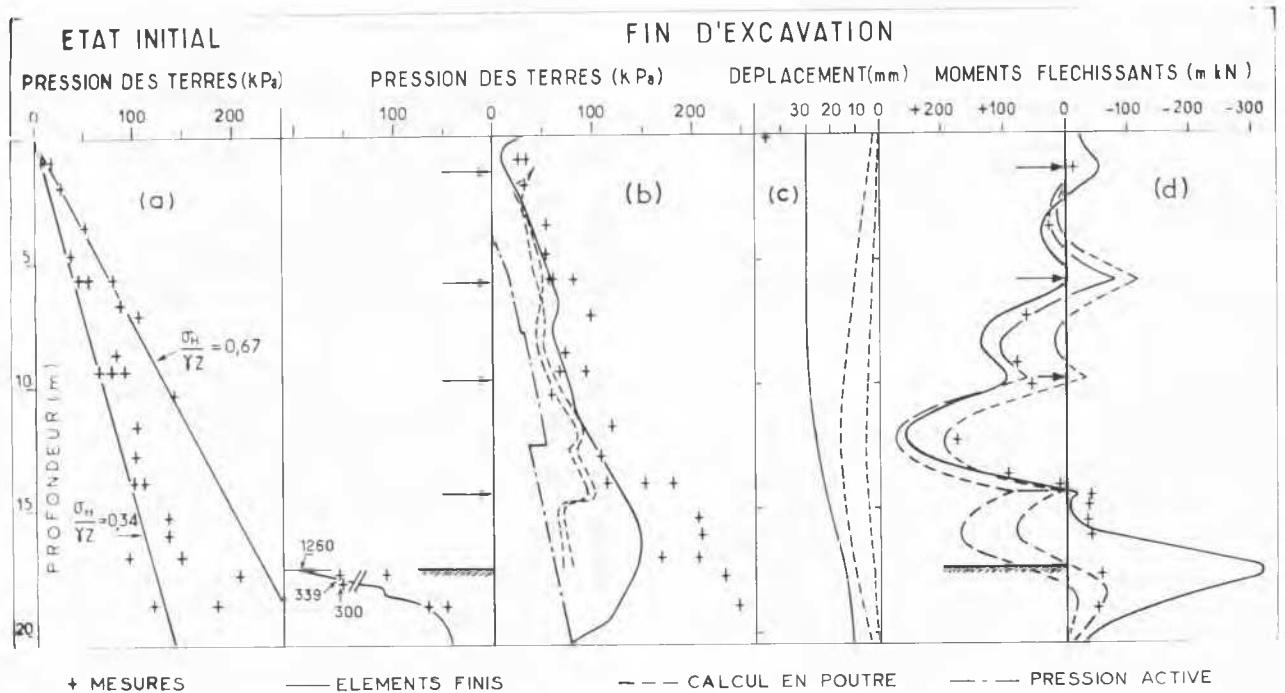


Fig. 5 - Interprétation des mesures de pression du sol, des déplacements et des moments fléchissants.

Le calcul en éléments finis conduit à des valeurs sensiblement plus fortes, mais du même ordre, dans la partie supérieure et totalement divergentes dans la partie inférieure. Cette divergence est vraisemblablement due à l'existence d'une zone en équilibre plastique au voisinage du fond de fouille. Le calcul en éléments finis, considérant le sol comme purement élastique, ne peut en tenir compte alors que le calcul en poutre basé sur un schéma élastoplastique conduit à des valeurs plus réalistes.

#### CONCLUSIONS

1. Les déformations du sol derrière la paroi intéressent une zone étendue dont la largeur est supérieure à 3 fois la profondeur de la fouille.

2. La confrontation des mesures aux résultats du calcul fait apparaître que le calcul en poutre élastique tenant compte d'une réaction élastoplastique du sol permet une évaluation correcte des éléments servant au dimensionnement d'une paroi (moments fléchissants, réactions d'ancrage) mais ne permet pas d'évaluer ses déplacements qu'il sous-estime fortement. Le calcul en éléments finis au contraire, bien que tenant compte ici de schémas très simplifiés, donne une image globale plus réaliste du comportement de l'ouvrage et du sol qui l'environne. La prise en compte ultérieure, dans ce type de calcul d'un schéma de comportement élastoplastique du sol ainsi que de la succession des phases de travaux devrait conduire à une bonne concordance avec les mesures.

#### BIBLIOGRAPHIE

BOUDIER J., GILLARD J., MASTIKIAN L. 1969  
 "Calcul de stabilité des parois moulées sur ordinateur. Comparaison avec des observations faites in situ. Cas particulier d'une enceinte cylindrique", C.R du 5e Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondation, Mexico, Sessions Spéciales 14 et 15, p. 45-49.

GUELLEC P., HUMBERT P., RICARD A. (1976)  
 "La méthode des éléments finis et le système Rosalie", Bull. de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 81, p. 152-162.