

# 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.*

# Soutènement d'une fouille par une paroi cylindrique

## Use of arch effect in circular retaining diaphragm wall

J. P. WALTER, Ingénieur en chef, Coyne & Bellier, Paris, France

F. TARALLO, Ingénieur, Tractebel Z, Bruxelles, Belgique

**RESUME** Trois fouilles de 88 m de diamètre, de 20 m de profondeur, ont été réalisées dans des remblais hydrauliques et des sables et argiles quaternaires lors de la construction du Terminal Méthanier de Zeebrugge. Le soutènement de la fouille et son étanchéité périphérique sont réalisés par une paroi moulée, quasi cylindrique, de 1,2 m d'épaisseur, très peu ferraillée travaillant en voûte. Un renfort intérieur en béton a été coulé en place au fur et à mesure de l'excavation. Des études assez développées pour cet ouvrage de dimension exceptionnelle ont permis de prévoir son comportement. Les déplacements mesurés lors de l'excavation ont été de l'ordre des déplacements prévus.

### INTRODUCTION

Le soutènement de fouille ou de puits par une paroi moulée fonctionnant en voûte est une conception fréquemment utilisée pour des ouvrages de 40 à 50 mètres de diamètre. Dans le cadre du futur Terminal Méthanier de Zeebrugge, une paroi de 88,1 m de diamètre extérieur et de 40 m de profondeur a été projetée et réalisée en trois exemplaires. Le projet a fait l'objet d'études approfondies et d'une instrumentation qui a permis la surveillance de l'ouvrage en cours d'excavation et la comparaison aux prévisions. Les réservoirs de stockage de Gaz Naturel liquéfiés de ce Terminal, semi-enterrés, sont construits à l'intérieur d'un encuvement en béton armé selon la configuration schématisée sur la figure 1. La paroi moulée permet, en phase provisoire, l'exécution d'une fouille et d'un rabattement de nappe de plus de 20 m. En phase définitive, la paroi est incorporée dans la paroi périphérique de l'encuvement.

### LE PROJET DE SOUTÈNEMENT

#### Conditions géotechniques

Le terminal est construit sur un remblai hydraulique très récent, la stratigraphie rappelée sur la figure 1 est la suivante:

- de + 8 m à - 7 m remblai hydraulique
- de - 7 m à - 28 m formations quaternaires  
3 horizons d'épaisseur variable
  - . 3 à 10 m d'argile sableuse de caractéristiques faibles,
  - . 2 à 10 m de sable fin,
  - . 10 à 13 m de sable moyen dense
- de - 28 m à - 38 m argile tertiaire sur-consolidée

- de - 38 m à - 90 m formations tertiaires  
sablo-argileuses
- au-dessous de - 90 m argile des Flandres

#### Conception du soutènement

Le soutènement est constitué d'une paroi moulée de 1,2 m d'épaisseur, construite par panneaux juxtaposés. La paroi moulée est raidie en tête par une poutre circulaire de 2 x 2 m de section. Un contremur continu de 0,8 m d'épaisseur est coulé au fur et à mesure de l'excavation. La paroi équilibre par effet de voûte la poussée de l'eau et du sol. Cependant l'équilibre global du talus pour une rupture circulaire passant sous le pied de la paroi est assuré sans prendre en compte l'effet de voûte.

La poutre de ceinture, le contremur et le sol dans la partie en fiche contribuent au raidissement de la paroi et confèrent une sécurité importante vis-à-vis du flambage. Les études et le comportement réel du prototype ont montré que le contremur n'était pas nécessaire à la stabilité du soutènement.

#### Calculs

Des études poussées ont été effectuées, elles comprennent :

- une étude paramétrique du comportement axisymétrique de la paroi, en utilisant un programme classique de calcul de soutènement,
- des calculs éléments finis élastiques permettant l'étude de l'influence des défauts géométriques de la paroi,
- des calculs éléments finis permettant le calcul du coefficient de sécurité au flambage, avec prise en compte de la non axisymétrie du sol entourant la paroi.

Dans tous ces calculs, le comportement du sol a été simulé par des ressorts élastiques ou élastoplastiques.

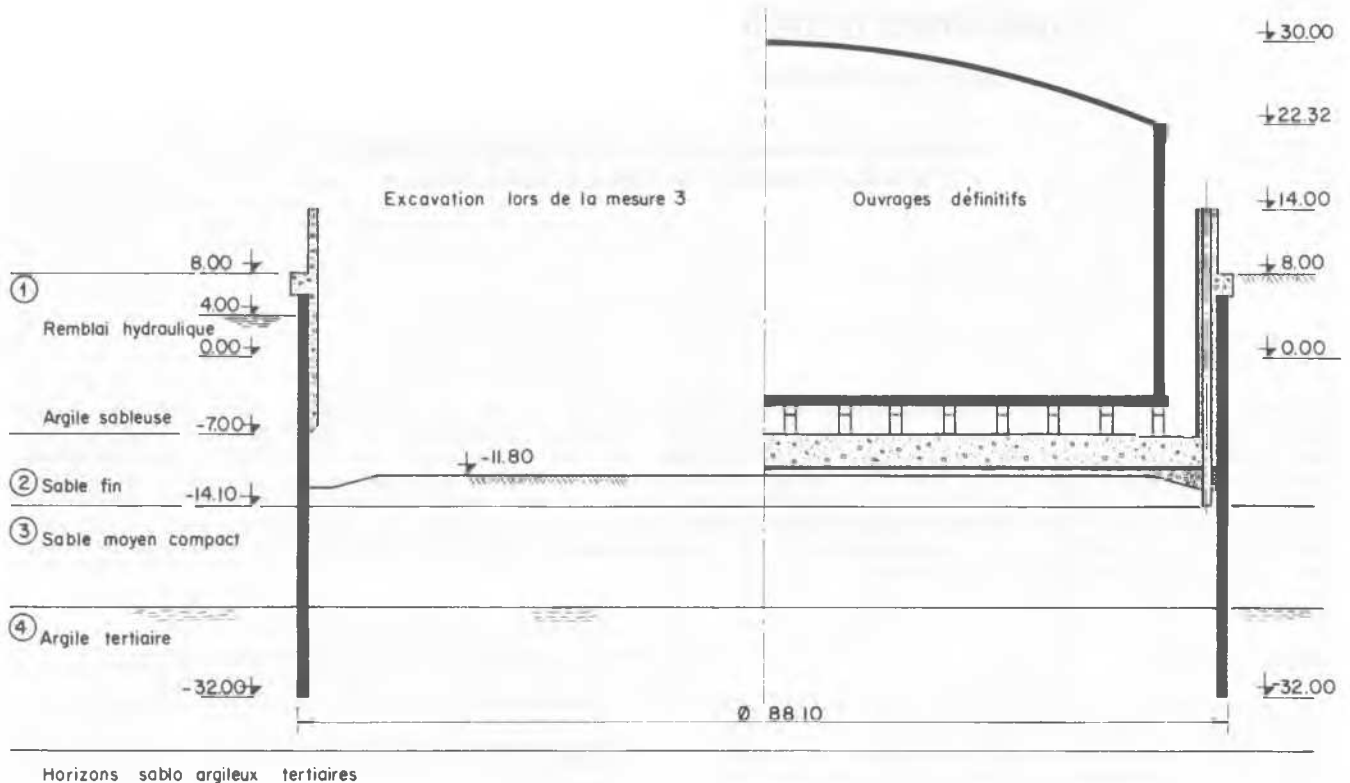


Fig. 1. Schéma des ouvrages en phase provisoire et définitive

### Réalisation

Toutes les précautions ont été prises au niveau des méthodes d'exécution et du contrôle pour obtenir une très bonne qualité.

La paroi moulée a été réalisée par panneaux primaires et secondaires à l'aide de l'Hydro-fraise de Solétanche. Lors de l'exécution des panneaux secondaires, le béton des panneaux primaires a été refraîsi sur une épaisseur de 10 à 20 cm. Aucune autre disposition n'a été prise pour assurer l'étanchéité globale de la fouille, le débit d'infiltration a toujours été inférieur à 2 m<sup>3</sup>/heure.

### PREVISION DU COMPORTEMENT

Les déformations de la paroi lors de l'excavation ont été calculées à l'aide d'un programme ordinateur prenant en compte le comportement élastoplastique du sol. La méthode employée suppose une relation de type élastoplastique entre les pressions du sol sur l'écran et ses déformations. Les paramètres qui interviennent dans cette relation sont les poussées et butées limites, le module de réaction, et le coefficient de poussée au repos. Les variables inconnues du problème sont les déplacements que l'on obtient en écrivant la loi de l'élasticité sur la poutre qu'est l'écran affecté d'une largeur unité. Cette méthode prend en compte l'irréversibilité des déformations du sol, donc l'influence

de l'histoire des chargements, ce que n'aurait pas permis une méthode classique qui en outre ne fournit pas les déformations de l'écran. D'autre part, la méthode ignore les déformations d'ensemble du massif de sol (tels que effet gabion et mouvements du fond de fouille) que seule une méthode aux éléments finis pourrait évaluer, mais qui sont très faibles dans le cas d'une paroi circulaire comme celle de Zeebrugge. Ainsi, la méthode choisie a paru la plus adaptée au problème posé. L'effet de voûte dans la paroi et dans le contremur a été simulé par des butons présentant une raideur équivalente.

Une plage probable du comportement a été calculée en faisant varier chaque paramètre dans une fourchette plausible. L'influence des paramètres principaux a été étudiée :

- module de réaction du sol sur la paroi
- coefficient de poussée active et au repos et coefficient de butée du sol
- raideur horizontale de la paroi et raideur en flexion
- épaisseur de la paroi et du contremur
- nombre des phases d'excavation

L'influence du module de réaction du sol et de la raideur de la paroi est prépondérante. Le tableau 1 donne la valeur du module de réaction du sol dans 3 hypothèses. On a utilisé deux valeurs du module horizontal de la paroi, 10.000 MPa et 20.000 MPa.

TABLEAU I  
Module de Réaction du Sol sur la Paroi  
MN/m<sup>3</sup>

Couche	1	2	3	4
Hypothèse faible	7	10	15	7
Hypothèse moyenne	10	15	20	10
Hypothèse forte	15	20	25	15

#### INSTRUMENTATION

##### Dispositifs mis en place

L'instrumentation mise en place vise à connaître les déplacements de la paroi au cours de l'excavation, elle comprend 3 dispositifs : des tubes inclinométriques verticaux répartis, des repères topographiques en tête de paroi, des extensomètres à corde vibrante.

Les tubes inclinométriques verticaux de 40 m, servent de guide à une torpille équipée d'un pendule. L'angle avec la verticale est mesurée avec une précision de 0.00015 tous les 0,5 m. Neuf tubes ont été installés sur le premier réservoir, 4 sur les suivants.

Les bornes de mesure optique de distance sont implantées en tête de paroi, à la verticale de chacun des tubes inclinométriques. Les entre-distances des bornes, jointes aux distances à une borne fixe, permettent le calcul des déplacements radiaux et tangentiels en tête des tubes inclinométriques. Le nombre surabondant de distances mesurées permet le calcul de l'incertitude.

Des extensomètres à corde vibrante sont disposés à proximité des 2 parements, à 4 niveaux sur 4 verticales du 1er réservoir. Un panneau d'essai a également été équipé d'extensomètres témoins permettant de suivre les déformations hygrothermiques du béton.

##### Calendrier des mesures et exploitation des résultats

Le calendrier des mesures a été adapté au phasage des travaux schématisé par 3 profondeurs d'excavation et 3 niveaux de rabattement. Six mesures ont été effectuées, leur date et le niveau de la fouille sont donnés sur le tableau II. Les données brutes ont été traitées automatiquement de façon à obtenir rapidement l'ordre de grandeur des déformations lors de la phase de surveillance en cours de construction, les résultats obtenus ont été par la suite analysés et sélectionnés de façon à obtenir des résultats fiables qui ont servi à l'interprétation.

Les mesures inclinométriques en liaison avec les mesures topométriques ont permis de connaître avec une précision inférieure à 3,4 mm les déplacements de la paroi.

#### INTERPRETATION DES RESULTATS

Sur la figure 2 sont portées les plages de déplacements observées lors des mesures

TABLEAU II  
Calendrier des mesures et phases d'excavation

Mesure	Date	Niveau Excavation	Niveau Nappe
0	Oct. 82	+ 4,50	- 0,2
1	Nov. 82	- 1	- 5,4
2	Déc. 82	- 7	-11,8
3	Fév. 83	-11,8	-14,1
4	Juin 83	radier coulé	-13,35
5	Oct. 83	radier coulé	-13,1

3 et 5. Sont également représentées : en tireté, les déplacements extrêmes calculés lors de l'avant-projet, en trait plein les déplacements recalculés lors de l'interprétation avec les hypothèses suivantes :

- Module d'Young de la paroi dans le sens horizontal, 16.500 MPa. Ce module a été estimé par calage de la courbe calculée sur la mesure 3, au niveau du fond de fouille où l'influence des conditions en tête est faible. Il permet également une comparaison satisfaisante des mesures et calculs lors des mesures 1 et 2.
- Module de réaction du sol, hypothèse moyenne du Tableau I
- Retrait de la poutre de ceinture et du contremur pris en compte.

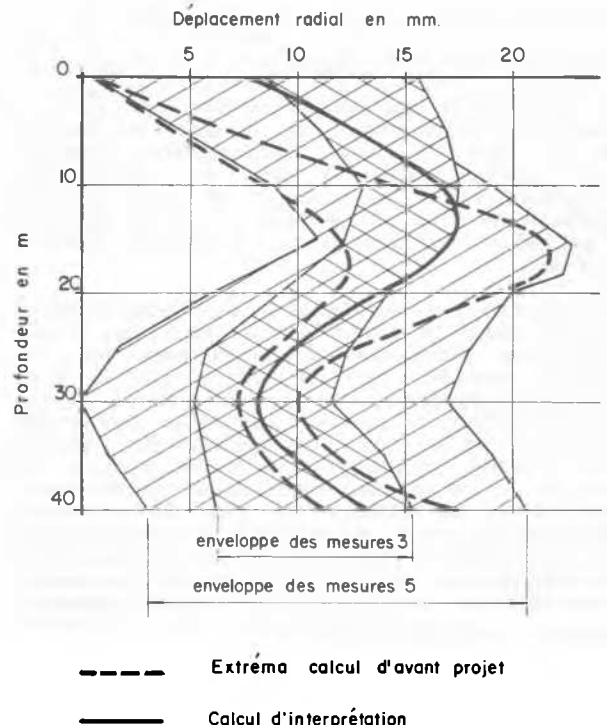


Fig. 2 Comparaison des déplacements calculés et mesurés

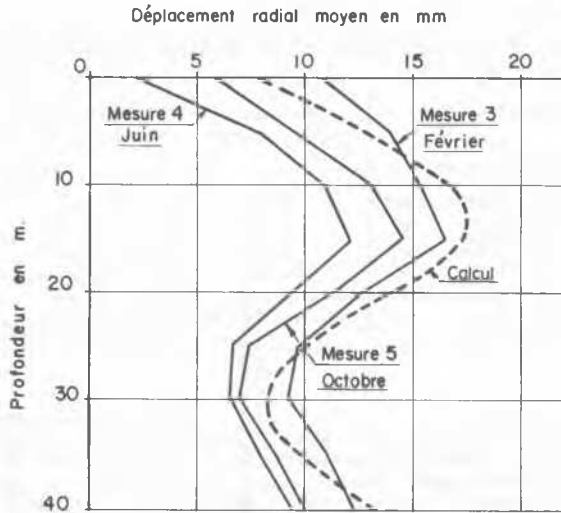


Fig.3 - Déplacements de la paroi après la fin des excavations

## CONCLUSION

Les études de cet ouvrage de dimensions exceptionnelles ont permis de cerner correctement son comportement étroitement lié aux conditions particulières du site. Le calcul du soutènement par une méthode élastoplastique a permis de calculer les déplacements en faisant l'hypothèse fondamentale du travail en voûte de la paroi.

L'ouvrage a été instrumenté pour surveiller le comportement pendant l'excavation et pour comparer les prévisions à la réalité. On a vérifié que la paroi fonctionnait effectivement suivant le schéma prévu et que les déplacements étaient dans la fourchette calculée, moins de 20 mm.

L'interprétation plus fine des résultats a montré l'importance des déformations thermiques du béton, la valeur acceptable du modèle et des paramètres utilisés pour la prévision au niveau du fond de l'excavation notamment et les écarts entre mesure et prévision, vraisemblablement dus aux déformations imposées par le sol et le radier au niveau de la fiche de la paroi.

## REFERENCES

Hébert, F. et Chemaly S. (1979). Les silos H et G de la Zac de la Celle (Le Chesnay).

Calcul des parois par la méthode élastoplastique. Séminaire CEIFI 5-6 Mai, 1982.

Gouvenot D. et Bustamante M. (1979). Mesures in-situ sur les ouvrages maritimes de soutènement. Annales ITBTP, Sept., 1979.

## Importance des effets hygrothermiques

La différence entre les valeurs mesurées et calculées sur les 20 premiers mètres dans la partie excavée, est en très grande partie imputable aux déformations hygrothermiques du béton : refroidissement et retrait de la poutre ceinture et du contremur, variation de température du béton. Sur la figure 3 sont portées les valeurs moyennes des mesures 3, 4 et 5 mettant en évidence l'effet saisonnier, dont l'amplitude est d'environ 8 mm au sommet de la paroi.

## Valeur du modèle de calcul

Le déplacement au niveau du fond de fouille dépend principalement du module horizontal de la paroi ; les déplacements observés lors de la mesure 3 sont peu dispersés, 7 valeurs entre 13 et 14,5 mm et 2 valeurs voisines de 9 mm. Le modèle de calcul associé à un module horizontal de 16.500 MPa conduit à 14 mm.

Par contre la fourchette des déplacements mesurés dans la fiche de la paroi est beaucoup plus large que celle obtenue lors de l'étude paramétrique. On notera que la dispersion s'accroît entre la mesure 3 en fin d'excavation et la mesure 5 effectuée plusieurs mois après le coulage du radier, elle semble traduire une ovalisation du pied de la paroi. Les phénomènes hygrothermiques dans le radier et les déformations différées du sol, conséquence des tassements due aux grandes variations de charges verticales peuvent en être la cause. Le modèle de calcul utilisé ne peut en rendre compte.

## Mesures extensométriques

Les mesures extensométriques sont assez dispersées. Elles traduisent une déformation des panneaux beaucoup plus faible que celle de la paroi dans son ensemble, surtout dans la partie en fiche.