

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 observé du mur de quai du nouveau ‘Port 2000’, Le Havre, France Observed behaviour of a quay wall at the new ‘Port 2000’ at Le Havre, France

S. Marten & L. Delattre

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France

M. Pioline & G. Vincelas

Centre d'études techniques de l'équipement (CETE) Normandie-Centre, Rouen, France

Ph. Joignant

Port Autonome du Havre, Le Havre, France

J. Lavisse

Solétanche-Bachy, Nanterre, France

RÉSUMÉ

Un panneau en paroi moulée du nouveau mur de quai de “Port 2000” au Havre a été instrumenté et surveillé pendant toutes ses étapes de construction. La méthode de construction de ce mur, constitué d’une paroi moulée de 1,20 m d’épaisseur, 1400 m de longueur et 40 m de profondeur, est assez particulière car elle fait intervenir une excavation importante de chaque côté de la paroi. Cette communication présente la technique de construction et discute les résultats des mesures.

ABSTRACT

A diaphragm wall panel of the new deep water quay “Port 2000” at Le Havre has been monitored during all its construction phases. The construction technique for this quay wall, basically consisting of a 1.20 m thick, 1400 m long and 40 m deep diaphragm wall, is quite particular as excavation takes place on both sides of the structure. This paper presents the construction technique and the results of the measurements.

1 INTRODUCTION

La croissance du volume de marchandises conteneurisées et la construction de navires à porte-conteneurs de plus en plus grands avec un tirant d’eau croissant ainsi que le besoin de temps d’escale réduits nécessitent que les ports adaptent leurs moyens d’accueil et de stockage pour accroître leur rôle sur le marché européen. Dans ce contexte, le Port du Havre, premier port français pour les trafics conteneurisés, équipe ses quais existants de nouveaux portiques et augmente sa capacité en construisant à l’extérieur du port existant, en première phase, un nouveau quai en eau profonde de 1400 m de longueur utile directement accessible à toute heure de la marée.

L’ouvrage comprend non seulement le mur de quai lui-même, mais aussi un système d’endiguement et de nouveaux terre-pleins entre l’ancienne digue et le futur chenal (Fig. 1). La section instrumentée de l’ouvrage se trouve à l’extrémité Ouest du quai. Les résultats de cette étude servent à compléter les observations faites sur d’autres constructions comparables, notamment le quai d’Osaka (Delattre et al., 1999), situé aussi au port du Havre.



Figure 1. Vue aérienne de la partie Ouest du chantier. Photo prise au début de l’année 2004. Port Autonome du Havre.

Sur la figure 1, on distingue l’estuaire de la Seine sur la gauche, et les réservoirs de stockage ainsi que l’accès au port existant sur la partie supérieure droite de la photo. Le quai en paroi moulée, en phase de terrassement arrière pour la mise en place des tirants d’ancrage, se trouve en partie centrale de la photo.

2 L’OUVRAGE ET LE SITE

L’ouvrage est constitué par une paroi moulée d’une épaisseur de 1,20 m et d’une profondeur de 40 m ancrée dans le substratum. La paroi est surmontée par une superstructure en béton armé, munie d’un masque d’accostage de 9,10 m de hauteur (Fig. 2).

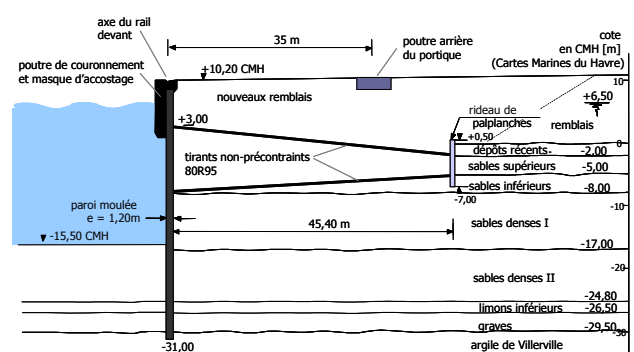


Figure 2. Coupe de la paroi au niveau du panneau instrumenté. Les altitudes sont rapportées au zéro des cartes marines du Havre (CMH).

La paroi est retenue par deux nappes de tirants passifs faiblement inclinés, mis en place après terrassement sur 17 m de hauteur environ derrière la paroi. Ces tirants (constitués de barres d’acier ni gainés, ni graissés, de 80 mm de diamètre) sont fixés à un rideau de palplanches à une distance de 45,40 m en arrière de la paroi moulée. Devant la paroi, le bassin est dragué jusqu’à la cote -15,50 CMH, pour permettre l’accueil des navires porte-conteneurs d’un tirant d’eau de 14,50 m, en toutes conditions de marée.

Les rails des futurs portiques de manutention des conteneurs se trouvent d’une part sur la poutre de couronnement dans l’axe

de la paroi moulée et, d'autre part, sur une semelle superficielle filante située 35 m en arrière.

Le site du nouveau port a été gagné par le passé sur la Seine par remblaiement hydraulique de matériaux sablo-limoneux jusqu'à la cote +10 CMH environ. Sous les remblais se trouve l'ancien lit du fleuve constitué de dépôts récents alluvionnaires limoneux et organiques. En dessous, la formation alluviale principale est composée de sables fins à grossiers, répartis en deux couches principales : en partie supérieure, des sables fins coquilliers, généralement assez propres et pulvérulents, localement finement stratifiés par des lits limoneux ; en partie inférieure, des sables fins à grossiers gris-vert avec des graviers roulés, des galets et des inclusions de sables fins à moyens.

En profondeur, des sédiments continentaux constitués de limons fins plastiques et organiques constituent un horizon très peu perméable. Sous les limons est disposée une couche de graves constituée de sédiments fluviaux. Enfin, le substratum est formé par les argiles de Villerville. Il s'agit d'argiles marneuses noires fermes à raides assez plastiques avec quelques lits de débris de coquilles écrasées.

Les caractéristiques géotechniques sont rassemblées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques du sol (profil à proximité du panneau instrumenté).

couche	cote CMH	γ kN/m ³	ϕ' (ϕ_u) deg	c' (c_u) kPa	q_c MPa	p_L-p_0 MPa	E_M MPa
remblai	+7,5/0	18,0	33	0	10	0,7	7
dépôts récents	0 / -2	16,0	20 (0)	0 (2)	1	-	-
sables sup.	-2 / -5	19,0	37	0	15	2,3	27
sables inf.	-5 / -8	17,0	29	0	3	0,9	6
sable dense I	-8 / -17	20,0	35	0	10	1,7	16
sable dense II	-17 / -25	22,5	39	0	30	4,2	46
limons	-25 / -26,5	17,0	29 (0)	0 (100)	-	1,5	22
graves	-26,5 / -29,5	22,0	40	0	-	4,6	36
argile	substra- tum	20,0	20 (0)	20 (200)	-	1,9	22

(p_L-p_0 et E_M : paramètres de l'essai pressiométrique de Ménard)

Sur le plan hydrologique, deux aquifères principaux peuvent être distingués : les sables et les graves, séparés par la couche peu perméable des limons. Les deux nappes subissent l'influence des marées. Les variations avec la marée de la nappe dans les sables sont plus amorties que celles de la nappe des graves. Pour les études de dimensionnement du quai, elle est estimée à la cote +6,5 CMH, tandis que la nappe des graves est prise en compte à +7 CMH à marée haute et +3 CMH à marée basse.

3 PHASAGE DE CONSTRUCTION

Le phasage de construction est assez classique pour ce type de quai. Présentant une longueur de 1600 m au total pour une longueur utile de 1400 m, il s'agit d'un ouvrage linéaire construit par phases se développant dans le temps et dans l'espace. Les dates indiquées sur les croquis de la figure 3 désignent les étapes des travaux relatives au panneau instrumenté.

À l'issue du bétonnage de la paroi moulée, le terrain est terrassé devant la paroi jusqu'à la cote 0 CMH environ à l'abri d'un rabattement à -5 CMH. Le voile d'accostage et la poutre de couronnement sont ensuite bétonnés (phase 1). Derrière la paroi,

après rabattement à -8,00 CMH environ, le terrain est terrassé jusqu'au niveau du lit des tirants inférieurs. Les tirants et le rideau d'ancrage ont été mis en place en mars 2004 (phase 2). Le terrain est remblayé jusqu'à la cote du lit de tirants supérieur, et ces derniers sont mis en place. Le rabattement de nappe est réduit au fur et à mesure des remblaiements (phase 3). Enfin, le quai est dragué jusqu'à sa profondeur nominale de -15,50 CMH, et la fondation arrière du portique est réalisée. Les digues d'enclôture sont terminées et le quai est mis en service.

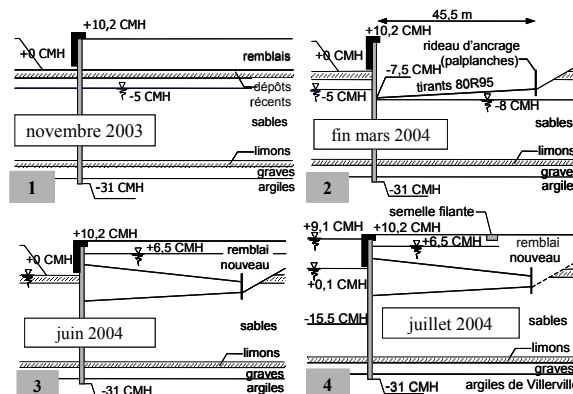


Figure 3. Etapes principales des travaux.

Dans la zone du panneau instrumenté (c'est à dire vers l'extrémité Ouest du quai), le rabattement de la nappe se fait à l'abri d'un voile étanche à l'aide d'un système de puits de pompage.

4 INSTRUMENTATION

Plusieurs quais dont la structure est comparable à celle du Port 2000 ont été instrumentés, en France notamment au Port de Calais (Delattre et al., 1995) et au Havre (Blivet et al, 1981). Pour cette étude, la conception de l'instrumentation est relativement légère, mais elle permet la mesure des déformations de l'ensemble des éléments de structure : la paroi moulée, les tirants d'ancrage et le rideau d'ancrage.

L'instrumentation mise en place concerne en particulier :

- la déformation de la paroi, suivie par quatre inclinomètres, deux étant limités au pied de la paroi moulée et deux étant prolongés dans le terrain sous-jacent ;
- la déformation du terrain entre la semelle de fondation du portique et le rideau d'ancrage, suivie par deux inclinomètres ;
- la déformation du rideau d'ancrage, mesurée par deux inclinomètres ;
- le déplacement de la tête de la paroi, suivi par des mesures topographiques ;
- les déformations des tirants, et donc les efforts auxquels ils sont soumis, mesurés à l'aide de 40 extensomètres à cordes vibrantes ;
- l'évolution des nappes, observée à l'aide d'un ensemble de piézomètres.

Pour les mesures inclinométriques, un système SINCO avec des tubes ronds (\varnothing 70 mm) a été utilisé. Les extensomètres à corde vibrante, fixés sur les tirants à l'aide de colliers en acier, sont des capteurs TELEMAT SC2N. Pour le suivi piézométrique au droit du panneau ont été installés des capteurs électriques IRIS (CNR et PTM/N) ainsi que des capteurs autonomes GLÖTZL (NIV-LOG).

D'après les indications des fabricants, tous les capteurs résistent à l'eau marine.

Les mesures suivent les étapes d'avancement des travaux. Le tableau 2 résume les dates des mesures ainsi que les événements sur chantier.

Tableau 2 : Calendrier des mesures des inclinomètres dans la paroi

Date	n°	Événement
28/04/03	0	Mesure initiale
01/07/03	1	1 ^{er} rabattement de nappe
28/07/03	2	Excavation aval à la cote +5,0 CMH
12/09/03	3	Excavation aval à la cote +1,5 CMH
09/10/03	4	Excavation aval à la cote +1,1 CMH
18/11/03	5	3 jours après le bétonnage de la superstructure
20/11/03	6	5 jours après le bétonnage de la superstructure
15/12/03	7	Fond de fouille aval à la cote 0 CMH
02/02/04	8	Mesure de recalage pour le suivi topographique
12/02/04	9	Terrassement amont à la cote 0 CMH
10/03/04	10	Terrassement amont à la cote -3 CMH
25/03/04	11	Terrassement amont à la cote -7,5 CMH, installation du tirant inférieur
27/04/04	12	Remblaiement amont à la cote +3 CMH, installation du tirant supérieur
18/05/04	13	Remblaiement amont à la cote +6,2 CMH, arrêt du pompage et remontée de la nappe
04/06/04	14	Remblaiement amont à la cote +8 CMH, l'eau du bassin varie avec la marée
01/07/04	15	Remblaiement amont à la cote +9 CMH, mesure de recalage avec les inclinomètres arrières
15/07/04	16	Dragage sous l'eau du bassin à la cote -5 CMH
30/07/04	17	Dragage du bassin à la cote finale de -15,5 CMH
10/09/04	18	6 semaines après le dragage final

5 COMPORTEMENT DE LA PAROI

Les courbes ont été établies en considérant que le pied des tubes, encastré dans les argiles de Villerville sur une hauteur de 10 m, est fixe (Fig. 5 et 6). Cette hypothèse s'est avérée fautive au moins à partir de la mesure 10 (terrassement derrière la paroi). Les courbes sont donc valables à une rotation et une translation d'ensemble près. La qualité des mesures topographiques dépend largement de l'intégrité des stations et du repositionnement des appareils tout au long des mesures. Les deux stations sont situées à une distance de 90 m derrière la paroi moulée et sont fondées sur le voile étanche qui isole le chantier d'une trop forte alimentation en eau au travers des aquifères.

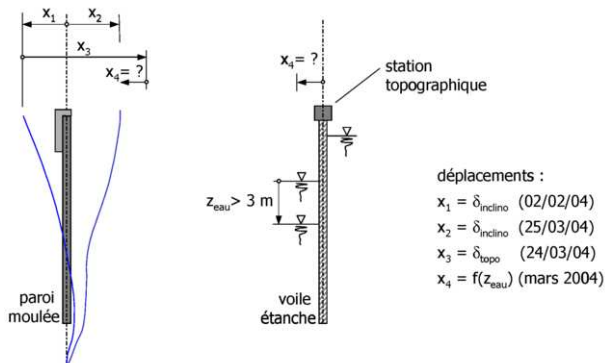


Figure 4. Schéma de déplacements en tête de la paroi moulée par rapport au mouvement probable de la station topographique.

Cette disposition qui semblait assurer la stabilité des massifs de référence s'est avérée insuffisante, le voile étanche et donc les stations étant susceptibles d'être soumis à des mouvements créés par des niveaux différents de la nappe rabattue de part et d'autre (Fig. 4). La mesure initiale topographique a ainsi été effectuée environ au moment du déplacement maximal de la paroi moulée vers l'aval (x_1). Pourtant, la mesure inclinométrique du 25/03/2004 (x_2), faite lorsque le terrassement en amont était au fond de fouille, indique un déplacement en tête bien inférieur à celui mesuré par topométrie (x_3). Il est donc possible que le rabattement de la nappe ait donné lieu à un déplacement (x_4) de la station, ne pouvant pas être mesuré avec les systèmes installés.

La déformée de la paroi moulée lors des différentes phases de construction est résumée sur les figures 5 et 6. Le pied de la

paroi se trouve à la cote -31 CMH. En dépit des incertitudes mentionnées ci-dessus, on peut distinguer trois phases principales.

Lors des étapes d'excavation devant le mur et de la construction de la superstructure, la paroi travaille en console et s'incline vers le futur bassin. En phase 8, le déplacement en tête est environ de 4 cm, ce qui est inférieur à 50% de la valeur calculée lors du dimensionnement (effectué à l'aide de la méthode au module de réaction).

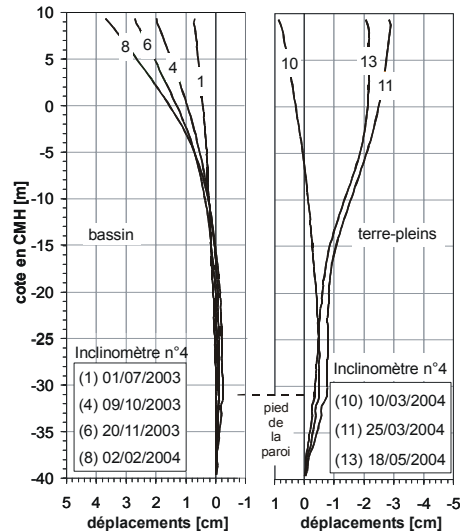


Figure 5. Déformation de la paroi. Mesures inclinométriques lors de l'excavation devant le quai (à gauche) et lors du terrassement, l'installation des tirants et enfin le remblaiement en arrière (à droite).

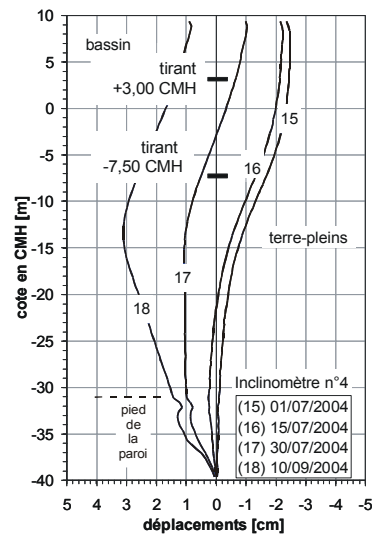


Figure 6. Déformation de la paroi. Mesures inclinométriques lors du dragage du bassin du quai.

Le terrassement derrière la paroi modifie sa cinématique. On observe un déplacement en pied de la paroi, accompagné par un basculement en tête vers les terre-pleins. En phase 11, le déplacement en tête est de 3 cm environ. L'installation des tirants et le remblaiement réduisent ces déplacements, mais on note bien l'influence des tirants qui empêchent la paroi de se déplacer. C'est lors du dragage du quai (effectué sous un niveau d'eau qui varie avec la marée) que le mouvement d'ensemble de la structure change à nouveau de sens. Dans un premier temps, la paroi subit une translation, et c'est à partir de la mesure 17, suite au dragage au fond du bassin, que le pied de la paroi se déplace vers l'aval.

La mesure 18 montre l'effet du temps : les dernières mesures ont été effectuées à peu près à marée haute, l'augmentation des déplacements et surtout le développement du ventre au niveau

du fond du bassin sont dus à un comportement relativement plastique des couches profondes.

La figure 7 présente les déplacements mesurés en tête de la paroi, d'une part calculés avec les mesures inclinométriques, d'autre part obtenus par le suivi topographique. Des déplacements positifs indiquent un mouvement vers le bassin. Comme indiqué ci-dessus, les mesures sont à interpréter avec précaution, mais on peut quand même constater une bonne concordance.

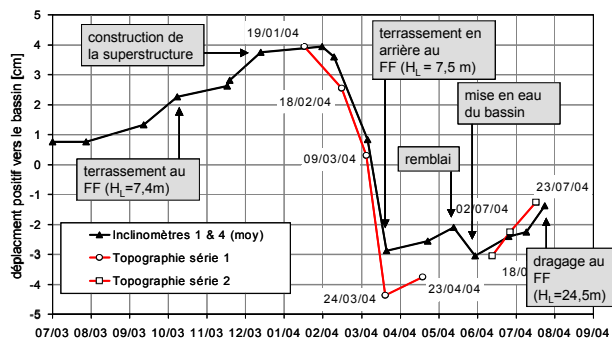


Figure 7. Comparaison des déplacements de la tête de la paroi déduits des mesures topographiques et inclinométriques (H_L : hauteur libre, FF : fond de fouille).

6 EFFORTS DANS LES TIRANTS

Cinq paires de tirants ont été instrumentées avec des extensomètres à cordes vibrantes. Ces capteurs mesurent la fréquence d'une corde qui est libre de vibrer à sa fréquence propre, laquelle varie avec la tension de la corde et donc avec la distance entre ses deux extrémités (les capteurs utilisés ici ont une longueur totale de 30 cm). Les capteurs sont installés par paires, l'un au-dessus et l'autre au-dessous, sur les tirants du lit inférieur et du lit supérieur, à une distance de 3,5 m de la paroi moulée et du rideau d'ancrage respectivement.

La figure 8 présente l'effort moyen d'ancrage, évalué à partir de l'ensemble des extensomètres.

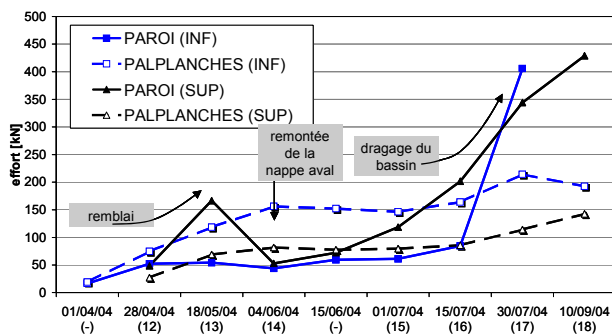


Figure 8. Effort de tension moyen dans les tirants pour les quatre emplacements des capteurs (mesures effectuées aux dates indiquées, entre parenthèses les numéros des mesures inclinométriques correspondantes).

Ce diagramme permet de donner l'évolution de l'effort d'ancrage bien qu'un nombre croissant d'extensomètres ait présenté des défaillances. Ainsi les déformations moyennes sont calculées au minimum à partir du résultat de mesure obtenu sur deux extensomètres, sauf pour les trois dernières mesures concernant le lit de tirants inférieur, côté paroi moulée, où seuls subsistent un extensomètre en fibre inférieure et un extensomètre en fibre supérieure. Les possibles origines de cette défaillance croissante sont analysés dans Marten (2005).

Le développement des efforts normaux dans les tirants est gouverné par trois aspects. Premièrement, la mise en place du

remblai se traduit principalement par une augmentation des efforts dans le lit supérieur, côté paroi moulée. Les courbes de déformation confirment ce comportement, car elles indiquent un déplacement significatif en partie supérieure de la paroi, et plus faible en profondeur. Deuxièmement, on observe que les efforts du côté du rideau de palplanches semblent être assez indépendants de ceux mesurés à l'autre extrémité du tirant. Une explication possible est le frottement important des remblais sur les tirants. Une autre explication est le comportement encore mal connu du rideau d'ancrage lui-même, qui est susceptible de se déformer aussi. Le dépouillement des mesures effectuées sur les inclinomètres arrière devrait clarifier cette question.

Troisièmement, le dragage du bassin conduit à une augmentation des efforts dans les tirants, notamment du côté paroi moulée. Pour la dernière mesure, les valeurs mesurées atteignent 30% des valeurs calculées lors du dimensionnement, soit 18% de la capacité des tirants en traction.

7 CONCLUSIONS

La présente étude a d'ores et déjà donné des premiers résultats très satisfaisants. Ainsi, en dépit des incertitudes qui ont été signalées, le comportement de l'ouvrage est bien caractérisé notamment pour ce qui concerne les déplacements de la paroi moulée et les tensions dans les tirants.

Les données viennent compléter celles qui sont déjà disponibles pour ce type d'ouvrage, acquises notamment sur le quai d'Osaka du port du Havre et le quai en eau profonde du Port de Calais. De plus, elles ont permis d'entreprendre une première modélisation numérique avec un modèle couplé (Marten et al., 2004), effectué *a posteriori* pour les phases 1 et 2, et prévisionnel pour les phases 3 et 4 (Fig. 3).

Les données devraient permettre de caractériser le mode de fonctionnement du système d'ancrage passif et de préciser les modalités de dimensionnement. Elles permettent également de préciser la cinématique mise en jeu par le mode de chargement particulier de ces ouvrages et de quantifier les ordres de grandeur des déplacements auxquels ils sont soumis.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier vivement H. Trufley du CETE Normandie-Centre à Rouen qui a effectué une grande partie des mesures, et R. Tresallet de l'entreprise Solétanche-Bachy pour sa bonne collaboration sur le chantier.

RÉFÉRENCES

- Blivet J.-C., Bonafous P., Frank R. et Josseume H. 1981. Comportement d'un quai en paroi moulée au port du Havre. *Bulletin Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*. N°113, 111-133
- Delattre L., Duca V. et Mespoulhe L. 1999. Etude expérimentale du quai Osaka du port autonome du Havre. *Rapport interne du LCPC*. Septembre 1999, 146 p.
- Delattre L., Mespoulhe L. et Faroux J.P. 1995. Monitoring of a cast in place concrete quay wall at the port of Calais, France. *Field Measurements in Geomechanics. 4th International Symposium*. Bergamo, Italy, 73-80
- Marten, S. 2005. *Étude expérimentale et méthodologique sur le comportement des écrans de soutènement*. Thèse de doctorat (PhD). École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
- Marten S., Delattre L., Nguyen Ph.-D., Bourgeois E., Joignant P. et Gobert J.-L. 2004. The new deep water quay "Port 2000" of Le Havre, France : field monitoring and performance prediction using a FEM-coupled model. *IXth Symposium on Numerical Methods in Geomechanics*. August 2004, Ottawa, Canada, 565-571