

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.

Comment un mur de quai sinistré a pu être remis en place How a distressed quay wall could be moved backed in place

B. Simon

Terrasol, Montreuil, France

P. Barras

CETE Sud Ouest, Saint Médard en Jalles, France

RÉSUMÉ

Le quai Chef de Baie 1 construit en 1982, composé d'un rideau mixte pieux/palplanches, a été victime d'un déplacement soudain et inattendu en février 2001 qui imposa l'arrêt de son exploitation ainsi qu'un remblaiement d'urgence côté bassin. Les investigations entreprises ont permis d'identifier que les désordres avaient été provoqués par la rupture de plusieurs tirants qui supportaient des contraintes excessives, certains depuis la construction. Ceci put être corroboré grâce à un modèle numérique aux éléments finis avec le logiciel Plaxis, intégrant l'ensemble des données pertinentes. Le même modèle a été utilisé avec profit pour simuler plusieurs scénarii de redressement du quai et choisir l'association d'une excavation provisoire du terre plein et d'une précontrainte par tirants provisoires pour réaliser cet objectif. Le comportement du rideau durant ces opérations s'est révélé conforme aux prévisions du modèle numérique.

ABSTRACT

Chef de Baie 1 Quay built in 1982 as a combined pile-sheet pile wall suffered unexpected and sudden displacement in February 2001 which led to stop all operations and place emergency backfill to stop this evolution and restore safety. Investigations led to identify that disorder was the outcome of accidental breakage of a few of the anchor tendons which had sustained excessive stresses for a time period back to construction. This could be corroborated by the results of a 2D FEM numerical analysis using Plaxis software where all pertinent features could be included. The same model was used to simulate different solutions of moving back the wall and choose a combination of controlled temporary excavation behind the wall and pre-stressing through temporary tie anchors as a way to restore initial alignment. The wall behaviour during the operations agreed well with the predictions of the numerical model.

1 INTRODUCTION

Le quai Chef de Baie 1 est un ouvrage essentiel du terminal forestier du port de La Rochelle - La Pallice, sur la côte atlantique française. Ce terminal traite en effet plus de 30 % des bois et dérivés importés en France par voie maritime. Il accueille également un trafic important de navires mixtes : vraquiers, grumiers et porte-conteneurs. Ce quai a été mis en service en 1982.

Le 12 février 2001 en début d'après-midi des désordres ont été constatés. Sur la partie ouest de l'ouvrage, la poutre de couronnement présentait une déformation pluricentimétrique vers le plan d'eau accompagnée de tassements importants des terre-pleins.

Un remblaiement effectué en urgence à l'avant du quai a permis de bloquer ces déplacements et stabiliser l'ouvrage.

Compte tenu de l'importance capitale de ce quai dans l'exploitation du port, des investigations très complètes ont été engagées afin de déterminer les causes de ces désordres et pouvoir proposer les mesures de réparation les mieux adaptées.

2 DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Le quai Chef de Baie 1 est conçu pour accueillir des navires de 14 m de tirant d'eau (Fig. 1). Il a une hauteur totale de 23,5 m. La surcharge d'exploitation prévue sur terre-plein atteint 60 kPa. Le marnage atteint 6,56 m en situation de vives eaux exceptionnelles.

Le quai est constitué d'un rideau de soutènement supportant la voie de grue côté bassin, relié par des entretoises à une longrine fondée sur pieux supportant la voie de grue arrière. L'ensemble fonctionne comme un portique ancré par des tirants passifs à la cote (+2,80 CM).

Le rideau frontal est de type mixte pieux-palplanches. Les pieux de diamètre 1220 mm (épaisseur 12,7 mm, limite élastique $\sigma_e = 490$ MPa) sont ancrés à la cote moyenne (-19,0 CM). Ils sont espacés de 1,7 m avec une palplanche LIIIIn intercalaire. Ils ont été remplis de béton en partie haute.

Les tirants passifs horizontaux à la cote (+2,8 CM) ont un diamètre de 85 mm (limite élastique 450 MPa) et sont ancrés sur un rideau continu de palplanches à 31,5 m en arrière du rideau principal. Ils sont constitués de trois longueurs élémentaires liaisonnées par deux manchons. Des dispositions d'évidement et d'articulation étaient prévues à leur connection avant. Leur espacement est égal à celui des pieux.

Le rideau est surmonté d'une poutre massive de couronnement, d'une hauteur de 2,5 m et d'une largeur de 2,35 m, sur laquelle sont disposés la voie de grue côté bassin et les bollards (tous les 30 m).

La voie de grue arrière repose sur des pieux métalliques espacés de 8,5 m (diamètre 609 mm, épaisseur 12,7 mm) battus au refus. Les entretoises en béton armé (hauteur 0,8 m, largeur 0,5 m) relient la poutre de couronnement à la longrine support de la voie de grue arrière, au droit de chacun des pieux de fondation (tous les 8,5 m).

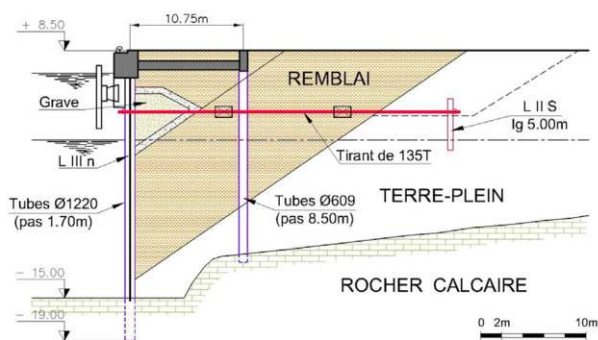


Figure 1. Coupe schématique de l'ouvrage

L'ouvrage a été construit depuis le terre-plein existant, le remblaiement s'effectuant après la mise en fiche du rideau principal et l'installation des tirants passifs reliés au rideau d'ancrage arrière.

Le remblai constitué par un tout-venant calcaire de granulométrie étalée a ainsi été mis en place sur le talus du terre-plein, à travers les tirants laissés à l'air libre.

3 CONSTATATIONS

Les désordres se sont produits le 12 février 2001 entre 12 h et 14 h mais n'ont fait l'objet d'aucun témoignage. Un défaut d'alignement du rail avant sur une centaine de mètres révélait un déplacement général du quai vers le plan d'eau. Des tassements décimétriques du terre-plein pouvaient également être constatés contre la poutre avant, les entretoises ou la longrine arrière (Fig. 2).

Le quai put être mis en sécurité sans délai grâce à la disponibilité d'une drague pouvant claper un volume important de sable immédiatement devant le quai, jusqu'à la cote (-9,00 CM). Ceci permit de stabiliser les désordres.



Figure 2. Déformée de la poutre de couronnement

Le déplacement total de la poutre avant put être estimé proche de 35 cm ; il affectait une longueur totale d'environ 100 m sur les 180 m du quai.

4 INVESTIGATIONS SUR L'OUVRAGE

Une inspection détaillée réalisée à marée basse révéla des anomalies qui touchaient 34 têtes de tirants. Une vingtaine montraient un décollement de la plaque d'appui laissant présumer une rupture du tirant alors que les autres avaient déformé voire déchiré leur pieu support augurant d'un effort excessif dans le tirant.

Des investigations par plongeur (réalisées avant clapage) permirent d'écarter l'hypothèse d'un défaut de l'ancrage et confirmèrent l'absence de fuite de matériau à travers le rideau.

Les terrassements entrepris à l'arrière du rideau pour décharger le rideau révélèrent une fissuration anormale et localisée des entretoises à 2 m de l'encastrement sur la poutre avant. Celle-ci est apparue correspondre à la limite de recouvrement entre les armatures d'attente de la poutre et les armatures courantes des entretoises (absence de recouvrement alterné).

Ils confirmèrent que le remblai était constitué par un tout-venant de blocs calcaires dont certains atteignaient jusqu'à 600 mm. Aucune dénivellée hydraulique entre le terre-plein et le bassin ne put être mise en évidence à marée basse, les remblais grossiers se révélant très perméables.

Aucune trace de corrosion accélérée ne fut mise en évidence sur les différentes parties d'ouvrages dégagées.

Les terrassements permirent de récupérer, à 1,8 m sous sa position théorique, un tirant rompu au droit d'un manchon de fonte. Le constat d'une corrosion très superficielle en établit sans ambiguïté le caractère ancien.

L'extraction partielle d'un autre tirant depuis le rideau avant a montré qu'il n'y avait pas eu cisaillement à l'arrière du pieu. Les dispositions d'évidement prévues pour limiter ce risque pouvaient donc être jugées suffisantes.

Un sondage et des essais pressiométriques furent réalisés pour qualifier le remblai et le substratum calcaire. Aucune anomalie ne put être mise en lumière.

5 EXPERTISE DES CAUSES DU DÉSORDRE

5.1 Évaluation du projet initial

L'expertise s'attachait en premier lieu à vérifier si les notes de calcul établies lors de la construction du quai pouvaient être remises en cause : le dimensionnement de l'ouvrage était basé sur des calculs au coefficient de réaction du rideau avant, dans lesquels différentes hypothèses de contribution des ancrages (tirants et entretoises) avaient été faites.

Différents calculs furent menés sur un modèle comparable à celui du dimensionnement initial pour examiner le poids des incertitudes relatives à l'estimation de certains des paramètres du modèle (coefficient de réaction, fiche du rideau dans le calcaire, module du calcaire) et évaluer l'incidence des hypothèses reconnues discutables dans le modèle initial (contribution effective des entretoises à l'ancrage du rideau avant).

Aucun de ces facteurs n'est cependant apparu de nature à déterminer un comportement de l'ouvrage conduisant, pour les sollicitations envisagées par la note de calculs, à des sollicitations excessives dans les tirants ou les pieux du rideau avant.

5.2 Modélisation Plaxis 2D

Une modélisation plus élaborée fut également conduite par la méthode des éléments finis avec le logiciel PLAXIS, elle seule permettant de reproduire de manière correcte les phases de construction successives : déversement du remblai par des moyens terrestres, depuis le rideau arrière, contre le rideau avant préalablement fiché et ancré. Un modèle de type Mohr-Coulomb fut adopté pour le remblai et le substratum.

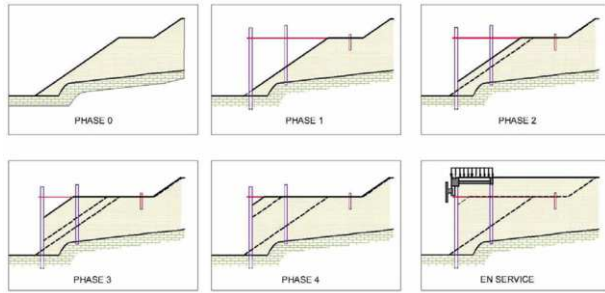


Figure 3. Modélisation des phases de construction.

Les différentes modélisations conduites selon cette approche ont confirmé l'ordre de grandeur des sollicitations estimées pour l'ouvrage en service par les calculs initiaux. En particulier, les tractions dans les tirants étaient trouvées comprises entre 620 kN/ml et 760 kN/ml selon qu'une interaction des tirants avec le remblai (fonctionnement en membrane) était considérée.

Les modélisations par éléments finis ont cependant mis en lumière le fonctionnement singulier des tirants lors des opérations de remblaiement à l'arrière du rideau. Ceux-ci, déjà mis en place, se trouvaient en effet en partie posés sur le terre-plein arrière et en partie suspendus dans la zone en cours de remblaiement.

Il a été montré que ce fonctionnement singulier a été la source de sollicitations parasites dans les tirants :

- par effet de « chaînette », le poids des tirants suspendus sur une portée de 20 m génère une traction (100 kN) qui peut s'ajouter aux sollicitations ultérieures en « consommant » jusqu'à 20 % de la capacité limite des tirants. Cet effet était bien démontré par un calcul en grandes déformations (« updated mesh ») ;
- par l'interaction qui se développe entre la nappe des tirants, distants de seulement 1,7 m, et le remblai qui était poussé entre ces tirants, une partie du poids du remblai sus-jacent se trouve portée de manière définitive par les tirants. Ceci induit dans les tirants des sollicitations de flexion et traction simultanées qui s'ajoutent aux efforts de traction nécessaires à l'ancrage du rideau avant.

A ces deux facteurs, il faut ajouter ceux, non accessibles par le calcul, que constituaient en cours de déversement :

- les chocs des blocs sur les tirants, sources de sollicitations transitoires potentiellement néfastes vis-à-vis du risque de rupture fragile des manchons en fonte ;
- les conséquences d'une « prétension » manuelle des tirants à seule fin de contrecarrer le déversement du rideau vers la mer provoqué par la butée du talus en cours d'édification. Ceci conduisait à une distribution très hétérogène des efforts même au sein d'un groupe de tirants voisins.

Ainsi les conditions particulières adoptées pour la mise en œuvre des remblais derrière le rideau ont pu entraîner des efforts très variables entre tirants voisins, dont certains ont pu même être rompus, au droit des manchons en fonte, dès leur mise en place et sans que cela soit décelé. Le caractère très ancien de la surface de rupture observée sur le manchon récupéré appuyait totalement ce point de vue.

La perte moyenne de capacité des tirants a pu être évaluée par calage de la déformée de la poutre de couronnement, issue du modèle aux éléments finis, sur la déformée observée, avant mise en place du remblai de blocage. La capacité résiduelle a ainsi pu être estimée voisine de 60 % sur un linéaire d'environ 50 m au centre des désordres, et entre 80 et 90 % sur les tronçons de 10 à 20 m qui encadrent. Ces indications sont bien évidemment schématiques, différentes distributions pouvant conduire à un calage également satisfaisant. Néanmoins, ceci souligne que les ruptures n'ont concerné qu'un nombre limité de tirants ; une rupture de tous les tirants sur un tronçon de lon-

gueur significative ne paraissait pas devoir être retenue.

Les sollicitations de flexion subies par les pieux du rideau avant demeuraient inférieures à 75% de la limite élastique selon les résultats du calcul. Une réutilisation des pieux fut donc jugée possible

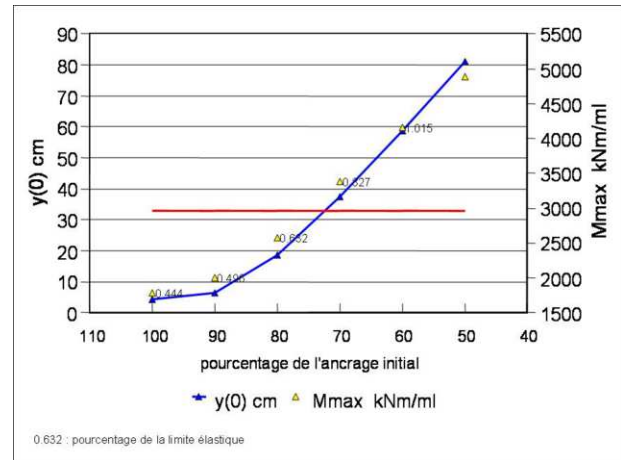


Figure 4. Influence d'une réduction de la capacité d'ancrage.

6 PROJET DE RÉPARATION

Le bon accord auquel il était abouti entre les prévisions du modèle PLAXIS et les déplacements observés a fait considérer que le même modèle pouvait aussi être utilisé avec le plus grand profit pour simuler différents scénarii de redressement du quai.

Cette étude a conclu à la possibilité effective de redresser le quai en associant un terrassement provisoire du terre-plein à (-7,6 CM) et une précontrainte par des tirants provisoires ancrés sur le rideau arrière. Les déplacements calculés en tête du rideau valaient respectivement -0,3 cm et -1,8 cm lorsque les tirants provisoires étaient tendus à 125 kN/ml ou 145 kN/ml.

Sur cette base, un projet complet de remise en état du quai a été élaboré au sein d'une équipe pluridisciplinaire constituée par le Maître d'ouvrage, associant :

- le bureau d'étude Terrasol chargé de l'étude des tirants, du rideau d'ancrage et du rideau avant en interaction avec le remblai ;
- la division Ouvrages d'Art du CETE du Sud Ouest chargée de l'étude des autres parties de l'ouvrage (couronnement, entretoises et poutre arrière) et de l'élaboration du projet de réparation et du dossier de consultation des entreprises.

Un modèle tridimensionnel à barres (logiciel ST1) fut calé sur les résultats du modèle Plaxis 2D pour examiner de manière détaillée les sollicitations dans la poutre de couronnement et les entretoises. Celui-ci établit que :

- la déformation du couronnement n'avait pas entraîné de déformation irréversible des aciers ;
- la poutre se comportait comme une section d'inertie égale à seulement 20% de son inertie théorique, en l'absence de fissuration ; le moment maximum dans la poutre atteignait 4200 kNm ;
- les aciers des entretoises côté poutre arrière avaient subi des déformations irréversibles (plastification) ;
- la poutre arrière était juste suffisante vis-à-vis des grues actuelles.

Au vu de cette expertise, il a été décidé de :

- redresser le quai et changer les tirants dans la zone ayant subi les désordres (demi-longueur du quai 90 m) ;

- reconstruire les entretoises ainsi que la poutre arrière (poutre et fondation) compte tenu de la mise en service de grues de capacité plus élevée.

Un projet détaillant de manière très précise le phasage des opérations à respecter a fait l'objet d'une consultation des entreprises de manière comparable à l'attribution des travaux d'un ouvrage neuf.

7 MISE EN ŒUVRE

Les travaux ont été réalisés selon deux marchés successifs :

- le redressement de janvier à septembre 2003 ;
- le changement des tirants et la reconstruction de la poutre arrière (poutre et appuis) et des entretoises de janvier à mai 2004.

Afin de s'assurer que les aciers du couronnement et que les attentes des entretoises n'avaient pas subi de déformations irréversibles, des aciers ont été équipés de jauge de déformation pour s'assurer que l'opération inverse (redressement de la structure) engendrait des déformations inférieures au palier plastique. Les mesures ont montré comme pour l'entretoise de la figure 5 que les déformations subies étaient restées dans le domaine élastique et que l'hypothèse de conservation du couronnement et des attentes pour entretoises était fondée.

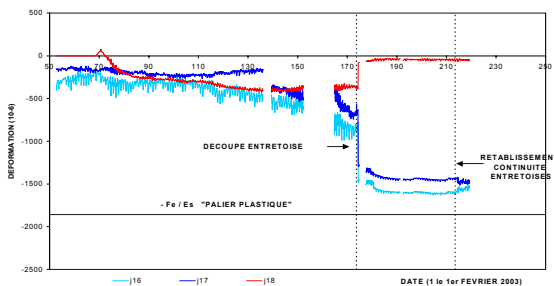


Figure 5. Evolution des contraintes des aciers d'une entretoise durant le redressement.

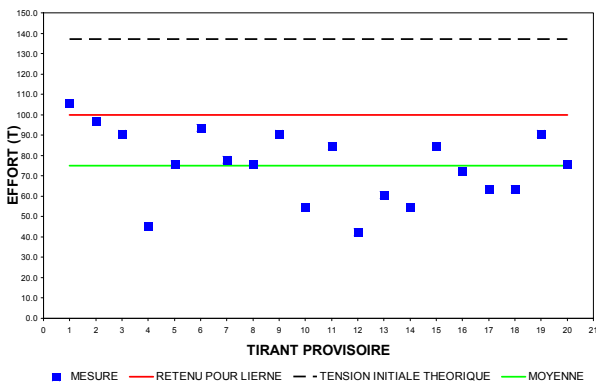


Figure 6. Tensions mesurées dans les tirants provisoires.

Une banquette fut aménagée devant le rideau arrière pour garantir la butée recherchée durant le redressement.

Les tirants provisoires (torons 7T15, limite élastique 175 t) ont été installés à raison de deux tirants pour cinq pieux (un tirant / 4,75 ml). Ils étaient protégés dans une gaine ϕ 80 mm sous la banquette. Ils ont été mis en tension en plusieurs allers et retours afin de minimiser les sollicitations dans le couronnement, jusqu'à une tension maximale de 1400 kN par tirant. Le redressement du quai fut pratiquement contrôlé à vue.

La distribution des efforts en fin d'opération fut établie par pesée individuelle de chaque tirant. La traction moyenne par ti-

rant s'établissait à 750 kN (Fig. 6), soit 176 kN/ml de quai. Cette valeur est légèrement supérieure à celles estimées avant redressement pour des déplacements résiduels de -0,6 cm à -2,0 cm. L'accord est cependant jugé bon puisque la contre-flèche réalisée s'est avérée supérieure (-2 à -3 cm).

Les investigations complémentaires menées en 2003 sur les tirants de la zone non déplacée et l'état du rideau arrière d'ancrage mis à jour lors du redressement ont conduit à intégrer au deuxième marché les tâches suivantes :

- changement de l'ensemble des tirants ;
- mise en place d'un nouveau rideau d'ancrage des tirants à l'arrière du rideau actuel.

L'ensemble de ces travaux s'est achevé en mai 2004, 38 mois après que les désordres sont survenus.



Figure 7. Vue du quai en octobre 2004

8 CONCLUSION

Cet exemple illustre remarquablement l'aide qu'un modèle numérique appuyé sur des observations de terrain, des investigations par sondages et une étude historique peut apporter aux décisions qui sont à prendre après un accident sur un ouvrage, que celles-ci concernent la mise en sécurité initiale ou le choix de la meilleure solution pour remettre en service l'ouvrage en terme de coût et dans le délai le plus court.

La collaboration étroite qui a pu s'établir entre le spécialiste géotechnicien et le spécialiste structure constitue à l'évidence une des clés du succès d'une opération de ce type.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Direction Départementale de l'Équipement de Charente Maritime pour la confiance qu'elle leur a témoignée durant leur mission et l'autorisation de publier ce compte-rendu.

RÉFÉRENCES

- Lemaire J. P. 1983. Le quai en rideau mixte palplanches/tubes du port de La Rochelle – La Pallice. *Colloque palplanches métalliques*, Paris.
- PLAXIS, 1995. *Finite Element Code for soil and rock analyses*. AA. Balkema/Rotterdam Brookfield.