



1

© CÉDRIC HELSLY

LE HAVRE PORT 2000 - PHASE 3 - SUITE ET FIN D'UN PROJET AU LONG COURT

AUTEURS : ETIENNE RAIMBAULT, INGÉNIEUR D'ÉTUDES, SOLETANCHE BACHY FRANCE - PIERRE GALLIARD DE LAVERNEE, INGÉNIEUR PRINCIPAL, SOLETANCHE BACHY FRANCE - STÉPHANE GALY, DIRECTEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FRANCE - CHRISTOPHE DUBERN, RESP. PÔLE TRAVAUX NEUFS, MAINT. & SURV. OUVRAGES, HAROPA PORT - PHILIPPE JOIGNANT, RESP. PÔLE ÉTUDES GÉOTECHNIQUES ET STRUCTURES, HAROPA PORT

SOLETANCHE BACHY FRANCE, MANDATAIRE D'UN GROUPEMENT AVEC ATLANTIQUE DRAGAGE ET BOUYGUES TP RF POUR LE GÉNIE CIVIL, RÉALISE POUR HAROPA PORT / LE HAVRE LA CONSTRUCTION DES POSTES 11 & 12 DE PORT 2000 DANS LE PROLONGEMENT DES 3500 m DES DIX PREMIERS POSTES À QUAI RÉALISÉS PAR SOLETANCHE BACHY LORS DES DEUX PREMIÈRES PHASES DANS LES ANNÉES 2000. CES POSTES À QUAI POUR PORTE-CONTENEURS ONT UNE LONGUEUR DE 350 m ET UN TIRANT D'EAU DE 17 m. LE MARCHÉ DE CONCEPTION-RÉALISATION COMPREND AUSSI UN QUAI EN RETOUR DE 111 m, LES DRAGAGES, LA PROTECTION ANTI-AFFOUILLEMENT, DEUX DUCS D'ALBE D'AMARRAGE DE 350 t, L'AMÉNAGEMENT DE 47 ha DE TERRE-PLEINS ET L'AUSCULTATION DE L'OUVRAGE.

HISTORIQUE DU PROJET

Au début des années 2000, Haropa Port/Le Havre (ancien Grand Port Maritime du Havre regroupé avec les ports de Rouen et de Paris depuis le 1^{er} juin 2021) se lance dans la réalisation de 12 nouveaux postes à quai de 350 m, dans le but de doubler son trafic de conteneurs à moyen terme.

Ces postes à quai et leurs terre-pleins permettent de recevoir de plus grands porte-conteneurs sans dépendre du niveau de marée ni du passage

d'écluses. La phase 3 de ce projet de grande ampleur consiste en la création des deux derniers postes sur un linéaire utile de 700 m et d'un quai en retour de 111 m.

L'entreprise Soletanche Bachy est impliquée dans chacune des 3 phases de construction de Port 2000 :

- Phase 1 (2001-2005) : réalisation des 4 premiers postes à quai et des terre-pleins de la phase 2 ;
- Phase 2 (2007-2010) : réalisation des postes 5 à 10 et des terre-pleins de la phase 3 ;

1- Vue d'ensemble du projet Port 2000 - Phase 3.

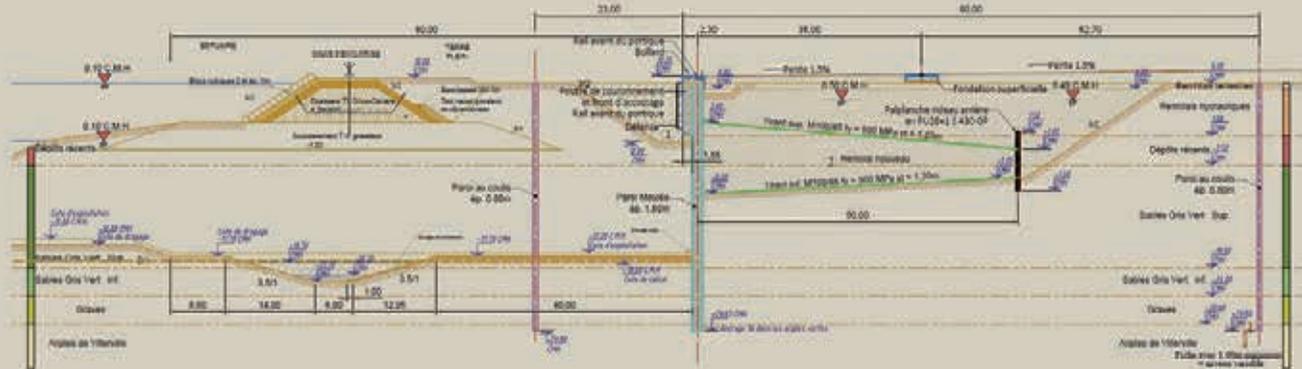
1- Overall view of the Port 2000 project - Phase 3.

- Phase 3 (2020-2022) : construction des 2 derniers postes à quai du projet et pose d'un dispositif anti-affouillement le long du quai (figure 1).

DESCRIPTIF DES TRAVAUX ET CONCEPTION (figure 2)

Dans le cadre de la phase 3 de Port 2000, Soletanche Bachy intervient en tant que mandataire d'un groupement comprenant notamment Bouygues Travaux Publics Régions France pour la réalisation du génie civil et Atlantique Dragages (groupe Boskalis) pour les opérations de dragage. La maîtrise d'œuvre est assurée par Haropa Port/Le Havre, tant sur la phase conception que sur la phase exécution. Les travaux consistent en la création

VUE EN COUPE DU QUAÏ ET DES OUVRAGES PROVISOIRES



© SOLETANCHE BACHY

2

d'un quai en paroi moulée de 1,5 m d'épaisseur et 40 m de profondeur, coiffé d'une poutre de couronnement arasée à +10,20 CMH (Cote Marine Havraise), qui vient liaisonner les panneaux de paroi moulée et reçoit le rail avant des portiques de manutention des conteneurs. La poutre de couronnement est également équipée de couples de bollards d'une capacité unitaire de 200 t espacés tous les 28,80 m, nécessaires à l'amarrage des navires. La partie supérieure de la paroi est équipée d'un masque d'accostage d'épaisseur 1,55 m sur

2- Vue en coupe du quai et des ouvrages provisoire.

3- Talutage dans les dépôts récents qui continuent à s'essorer.

2- Cross-section view of the quay and temporary structures.

3- Sloping in recent deposits on which dewatering continues.

une hauteur de 9 m, qui accueille les défenses espacées tous les 14,40 m, dont le rôle est de protéger l'ouvrage lors de l'accostage des navires. La voie de roulement arrière des portiques est, quant à elle, disposée sur une semelle filante dont l'axe est situé à 35 m en arrière de celui du rail avant.

L'ouvrage est retenu par 2 lits de tirants passifs situés au niveau de la paroi à la cote -8,00 CMH et +3,00 CMH. Les tirants espacés de 1,20 m sont raccordés à un rideau de palplanches situé 50 m en arrière du quai. Afin de mettre en place l'ensemble tirants-palplanches

et de réaliser le masque d'accostage, des terrassements à l'avant sur 10 m de hauteur environ, et à l'arrière de la paroi moulée sur 18 m de hauteur environ, sont nécessaires. Afin de pouvoir exécuter ces terrassements à sec, une paroi au coulis périphérique est réalisée autour du quai, ancrée dans un horizon argileux imperméable afin de constituer plusieurs boîtes étanches et de faciliter le rabattement des nappes par pompage pendant les mouvements de terre. Le recours à ce dispositif provisoire est issu du retour d'expérience de la phase 1 ; la réalisation de cette paroi avait alors été entreprise en cours de projet après des difficultés à atteindre les objectifs de rabattement dans un site dont le sol comporte plusieurs aquifères, dont la nappe des graves de fond alimentées par la marée.

Les remblais en arrière du quai, engagés après la pose des tirants d'ancrage, sont menés en réutilisant les matériaux issus des déblais et présentant les caractéristiques requises pour répondre à la portance du futur terre-plein ; ce dernier sera aménagé par son exploitant.

Une fois les travaux de quai achevés et après retrait des dispositifs provisoires d'étanchéité et de la digue d'enclosure permettant de s'isoler du bassin en phases travaux, on procède aux travaux de déblaiement par moyens terrestres et par dragage pour atteindre la cote d'exploitation prévue à -17,20 CMH. Le marché prévoit également la mise en place d'une protection anti-affouillement le long du quai sur une largeur de 40 m.

Les dispositifs d'amarrage sont complétés par deux ducs d'Albe de 350 t unitaire situés en extrémité Ouest du quai.



© SOLETANCHE BACHY

3



6

© SOLETANCHE BACHY

paroi moulée et -5,50 CMH au niveau du rideau arrière en palplanches. Comme cela avait été fait sur un certain linéaire de la phase 2, les 50 derniers mètres du poste 12 sont réalisés avec une conception légèrement différente, qui consiste essentiellement en une remontée du tirant inférieur, posé horizontalement à la cote -4,50 CMH entre la paroi moulée et le rideau arrière. Cette disposition est rendue possible par un approfondissement local du substratum argileux et donc de la fiche de paroi, qui permet de compenser l'augmentation de butée

6- Levage à l'horizontale des cages d'armature.

7- Réalisation du masque d'accostage côté bassin.

6- Horizontal lifting of rebar cages.

7- Execution of the berth facing wall on the harbour basin side.

mobilisée engendrée par la remontée du tirant. Le recours à cette disposition variante est intéressant pour deux raisons :

- Il permet de limiter les volumes de déblais et remblais pendant les phases travaux ;
- Il permet de réduire l'énergie de pompage côté terre-plein, avec une profondeur de rabattement réduite par rapport à la conception de base.

Par ailleurs, les fondations des ducs d'Albe initialement prévues en structures métalliques ont été réalisées en barrettes de paroi moulée.

CAS PARTICULIER DU RETOUR DE QUAI (figure 4)

Le retour de quai n'est pas destiné à accueillir des navires, mais à retenir les remblais du dernier poste. Un accès pour les bateaux de servitude est possible sur cette partie d'ouvrage. La cote d'exploitation côté bassin est variable, avec une pente à 3,5/1 depuis le quai principal vers l'extrémité du retour. À noter également que la paroi n'est ancrée dans les argiles de Villerville que sur les 22 premiers mètres. Sur les 86 m de quai restants, Soletanche Bachy a donc eu plus de liberté que sur le quai principal pour proposer diverses optimisations concernant la fiche de paroi, les tirants d'ancrage et le rideau arrière, et même l'épaisseur de paroi qui est réduite à 1,20 m sur les 50 derniers mètres de quai.

PHASAGE TRAVAUX DÉTECTION PYROTECHNIQUE

La ville du Havre et ses installations portuaires ayant subi de nombreux bombardements pendant la seconde guerre mondiale, il est nécessaire de procéder, préalablement à toute activité de forage ou de terrassement, à une campagne de détection pyrotechnique. Il s'agit de localiser, dans l'enceinte du projet, d'éventuelles munitions de guerre.

Le linéaire des parois moulées et coulés est quadrillé avec un maillage dense de forages, avant détection par magné-



7

© CEDRIC HELSLEY



© SOLETANCHE BACHY

Sur les autres zones de travaux, avant les terrassements une détection pyrotechnique est réalisée par passes, en détectant sur 5 m, avant d'autoriser le terrassement sur 4 m. Une détection maritime vient compléter ceci à l'avant de l'ouvrage pour la déconstruction de la digue et le début des dragages.

RÉALISATION DE L'ENCEINTE ÉTANCHE

L'enceinte étanche périmétrale en paroi au coulis, ancrée dans les argiles de Villerville, facilite le rabattement de la nappe avant les opérations de terrassement des deux côtés du quai. La réalisation de cet ouvrage provisoire est évidemment couplée à la mise en place d'un dispositif de pompage comprenant puits et piézomètres (sélectifs ou non) permettant de rabattre et de contrôler efficacement les niveaux de nappe.

RÉALISATION DE LA PAROI MOULÉE (figure 5)

Vient ensuite le forage de la paroi moulée, qui va s'ancrer sur une hauteur

de 1 m dans les argiles de Villerville, à environ 40 m de profondeur.

Les panneaux de paroi de 7,20 m de long sont équipés de 2 cages d'armatures de 3,15 m chacune.

Le poids des cages varie entre 18 et 25 t sur le linéaire du quai principal, à l'exception du panneau d'angle à la jonction avec le retour de quai, qui accueille 2 cages liaisonnées "en L" sur toute leur hauteur, pour un poids total de 42 t.

On dispose de suffisamment de place sur site pour que les 3 éléments constitutifs des cages soient rabotés sur place en position horizontale ; les cages sont ensuite descendues dans leurs panneaux respectifs entièrement assemblées. Cette opération, inhabituelle sur la plupart des chantiers urbains avec des emprises plus réduites, nécessite une phase de levage à l'horizontale avant le passage à la verticale, qui se fait par le biais de deux grues et un ensemble de palonniers équipés de poulies, complété par un système d'accroche spécifique sur les cages (figure 6).

8- Terrassements en cours côté terre-plein.

9- Mise en évidence des différentes enceintes de rabattement de nappe.

8- Earthworks underway on earthfill area side.

9- Illustration of the various groundwater lowering chambers.

la voie de roulement avant des portiques et les bollards pour l'amarrage des navires, est réalisée dans un second temps. Afin de ne pas sur-solliciter cette poutre en phases travaux, des plots de clavage sont disposés tous les 4 panneaux, soit tous les 28,80 m.

Le bétonnage de ces plots se fait à la suite des opérations de dragage côté bassin, après stabilisation du déplacement des panneaux de paroi moulée.

TRAVAUX CÔTÉ TERRE-PLEIN

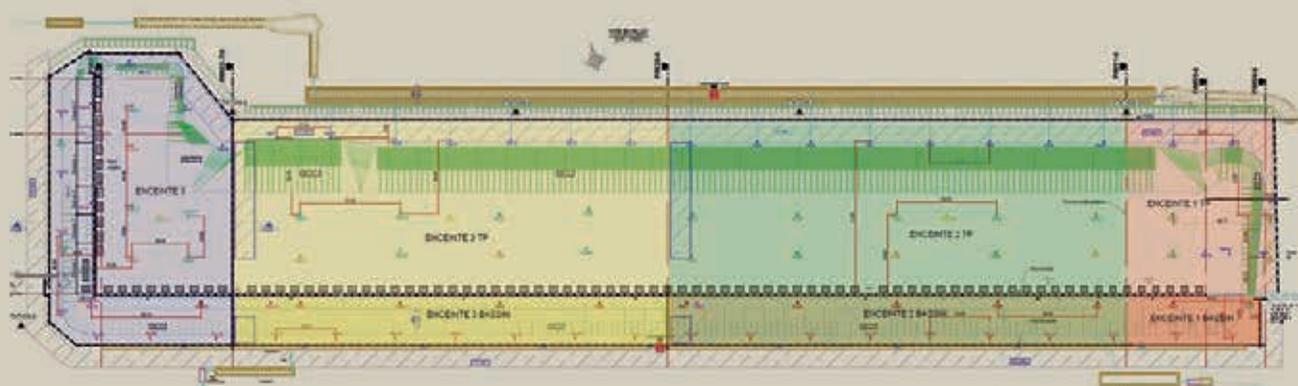
Les terrassements à l'arrière du quai se font à l'abri du rabattement, entre +9,20 CMH et -9,00 CMH sur le linéaire de quai réalisé en base, et entre +9,20 CMH et -5,50 CMH sur le linéaire de variante (figure 8).

Le fonçage du rideau de palplanches parallèlement au quai permet de réaliser un écran d'ancrage arrière des deux lits de tirants maintenant le quai. Chaque tirant possède une tête rotulée qui vient s'insérer dans l'organe d'ancrage prévu dans la paroi moulée. À son autre extrémité, un écrou rotulé est disposé en arrière des palplanches.

TRAVAUX CÔTÉ BASSIN (figure 7)

Une fois la paroi moulée réalisée, il est procédé au rabattement de nappe et aux terrassements à l'avant du quai sur une hauteur de 10 m afin de réaliser le masque en béton armé à partir de la cote +1,10 CMH permettant de couvrir les 8 m de marnage et qui accueille les défenses d'accostage et les échelles. La poutre de couronnement, qui reçoit

MISE EN ÉVIDENCE DES DIFFÉRENTES ENCEINTES DE RABATTEMENT DE NAPPE





© SOLETANCHE BACHY
10

Le remblaiement par compactage jusqu'à la cote d'exploitation du quai autour de +10,20 CMH se fait par réemploi de matériaux sableux ou sablo-graveleux du site. Les puits de pompage peuvent être arrêtés côté terre-plein à la fin du remblaiement. Les travaux de génie civil relatifs à la fondation de la voie arrière sont alors engagés sur le principe d'une semelle superficielle enterrée de 1 m de haut pour 5 m de large, avec un léger élargissement à 6 m dans les zones d'ancrage et de rochage des futurs portiques. La fourniture et la pose des rails seront réalisées par le futur exploitant.

MISE EN EAU ET DRAGAGES

À ce stade les travaux de réalisation du quai sont quasiment terminés. On peut alors déposer la digue d'enclosure du quai pour le mettre en eau, puis procéder aux dragages à l'avant du quai jusqu'à la cote d'exploitation à -17,20 CMH.

L'ultime étape consiste à claver la poutre de couronnement et à équiper les boîtes d'ancrage et de brochage des portiques. La tolérance de pose est de quelques millimètres en altimétrie et en planimétrie. Il est donc nécessaire de réaliser la pose une fois que sont consommés les déplacements du quai liés aux dragages.

10- Puits de pompage.

11- Exemple de données inclinométriques consultables sur la plateforme Geoscope.

10- Pumping shaft.

11- Example of inclinometer data consultable on the Geoscope platform.

PRÉCISIONS SUR LE DISPOSITIF DE MISE HORS D'EAU

La capacité de l'entreprise à rabattre efficacement la nappe joue un rôle vital pour le bon déroulement du chantier, en amont des opérations de terrassement :

- Côté bassin pour la réalisation du masque d'accostage ;
- Côté terre-plein pour la pose du rideau arrière et des tirants.

Les objectifs minimaux de rabattement sont de -1,00 CMH, soit environ 7 m côté bassin pour la réalisation du masque d'accostage et -9.00 CMH, soit environ 17 m côté terre-plein sur la majeure partie du linéaire pour la mise en œuvre du rideau arrière de palplanches et du lit inférieur de tirants. Pour pouvoir commencer les terrassements sans nécessairement avoir un rabattement uniforme sur tout le linéaire du projet, la zone est divisée en 2 enceintes distinctes de chaque côté de la paroi moulée du quai principal,

auxquelles vient s'ajouter une enceinte supplémentaire au niveau du retour de quai où la paroi n'est pas ancrée dans les argiles de Villerville (figure 9).

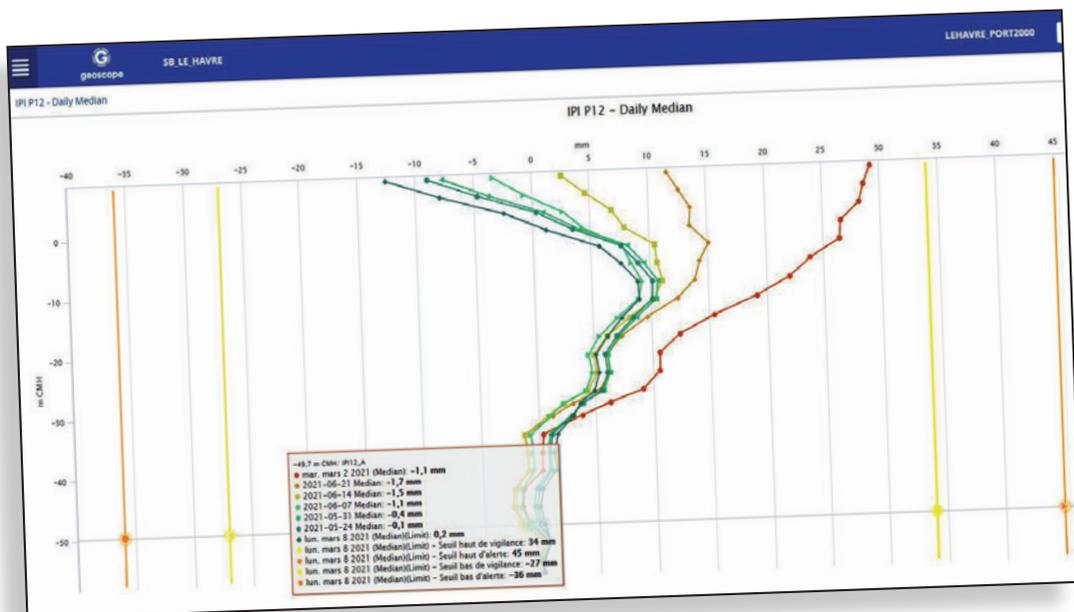
Le dispositif de pompage est constitué de puits de 400 mm de diamètre, avec un gravier filtre 0,8/1,2 mm de 100 mm d'épaisseur annulaire et un taux d'ouverture de crépine supérieur à 10% (figure 10). Ces puits, équipés de pompes de capacité 20 m³/h, sont implantés le long de l'enceinte périphérique en paroi coulis avec un espacement moyen de 30 m. Côté terre-plein, ils sont descendus dans les sables gris verts inférieurs à -21,00 CMH ; côté bassin, ils sont forés jusqu'à la cote -16,00 CMH, sauf au niveau du retour de quai où, la paroi moulée n'étant pas ancrée dans le substratum argileux et la nappe côté bassin étant en relation avec le terre-plein, ils atteignent également la cote de -21.00 CMH.

Pendant les opérations de rabattement, les niveaux d'eau sont contrôlés par le biais d'un réseau de piézomètres, certains crépinés toute hauteur, d'autres sélectifs dans les sables gris-verts supérieurs et inférieurs, ce qui permet de connaître le niveau de rabattement dans chacune des 3 nappes du projet.

CALCULS AUX ÉLÉMENTS FINIS ET AUSCULTATION

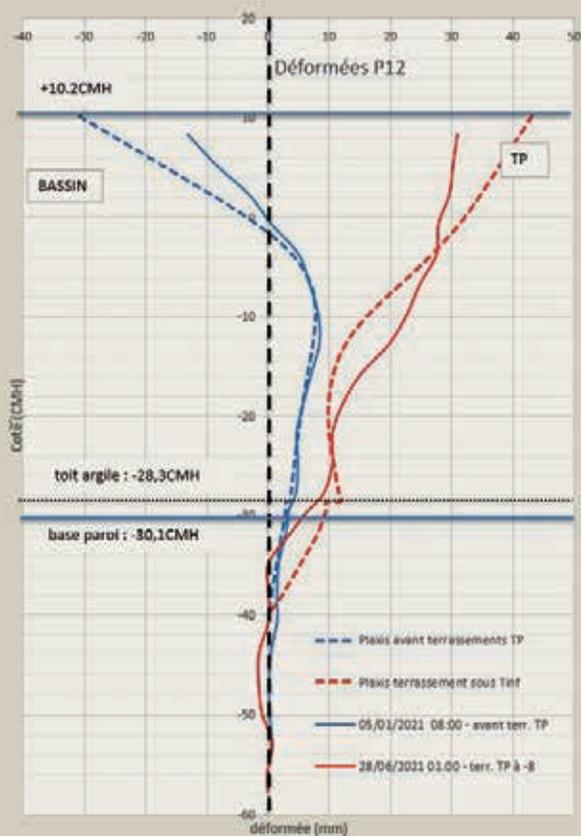
Une instrumentation permettant un suivi de l'ouvrage est demandée par le maître d'ouvrage en phase travaux. Afin de pouvoir continuer l'observation du comportement de l'ouvrage, les moyens de contrôle et de suivi matériel et logiciel devront lui être remis à la fin du chantier. Les mesures des déformations de la paroi moulée, de tension dans les tirants et de niveau d'eau sont donc fournies mensuellement à Haropa Port/Le Havre sous forme de rapports météorologiques.

Le long du quai principal, 7 panneaux sont équipés de chaînes inclinométriques numériques de 65 m de long (dont 25 m d'ancrage sous la base de paroi) qui comprennent chacune 23 capteurs permettant ainsi d'avoir un point de mesure tous les 2 ou 3 m. Les données sont envoyées à un serveur d'acquisition et sont consultables sur la plateforme Geoscope développée par Sixense (figure 11). Ce dispositif est complété par un ensemble de points topographiques disposés régulièrement en tête de paroi moulée et relevés par le géomètre du chantier à intervalles rapprochés pendant les phases critiques du chantier (rabattement de nappe, terrassements, dragages).



11 © SOLETANCHE BACHY

COMPARAISON DES DONNÉES INCLINO- MÉTRIQUES ET DES RÉSULTATS DES CALCULS AUX ÉLÉMENTS FINIS



12

© SOLETANCHE BACHY

Sur ces 7 profils inclinométriques, 4 sont équipés de cales dynamométriques (un total de 4 par profil aux extrémités de chacun des deux tirants) permettant de mesurer l'effort de traction dans les tirants. La cellule

de charge est placée entre l'écrou et la plaque de répartition du tirant dans la paroi moulée. La déformation de la cellule est mesurée par des cordes vibrantes et permet d'obtenir la traction dans le tirant.

Des calculs aux éléments finis sont réalisés sur 2 coupes du quai principal (une pour chacun des deux postes). Pendant les études d'exécution, ces modèles ont également été utilisés

pour affiner la vérification de la stabilité d'ensemble du quai en simulant une réduction des propriétés de résistance des sols.

Pendant les travaux, on confronte les déformations de la paroi obtenues avec des chaînes inclinométriques aux déformées calculées avec le logiciel Plaxis, à partir desquelles on a défini les seuils de vigilance et d'alerte (figure 12).

À la fin des travaux et en vue de la mise en service du quai, il s'agira de fournir à Haropa Port/Le Havre des modèles aux éléments finis calés le plus fidèlement possible sur le comportement réel de la paroi, tel que décrit par l'instrumentation pendant les phases travaux. □

12- Comparaison des données inclinométriques et des résultats des calculs aux éléments finis.

12- Comparison of inclinometer data and the results of finite-element calculations.

PRINCIPALES QUANTITÉS

- Forages pyrotechniques : 12 000 m
- Paroi coulis : 61 000 m²
- Paroi moulée : 37 000 m²
- Puits de pompages pour assécher la fouille de 700 000 m³ pour la pose des tirants
- 2 500 000 m³ de mouvements de terres liés au quai et au terre-plein
- 1 100 t de palplanches et 1 100 tirants passifs de 37 à 50 m
- 45 défenses d'accostage
- 40 000 m² de tapis anti-affouillement en géotextile coffrant injectés de mortier de ciment

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Haropa Port / Le Havre

MAÎTRE D'ŒUVRE : Haropa Port / Le Havre - Direction de la maîtrise d'œuvre et de l'ingénierie

ASSISTANT MAÎTRISE D'ŒUVRE : Setec Terrasol

ENTREPRISES : groupement Soletanche Bachy France (mandataire), Atlantique Dragage, Bouygues Travaux Publics Régions France

ABSTRACT

LE HAVRE PORT 2000 - PHASE 3 - CONTINUATION AND COMPLETION OF A LONG-TERM PROJECT

ETIENNE RAIMBAULT, SOLETANCHE BACHY FRANCE - PIERRE GALLIARD DE LAVERNEE, SOLETANCHE BACHY FRANCE - STÉPHANE GALY, SOLETANCHE BACHY FRANCE - CHRISTOPHE DUBERN, HAROPA PORT - PHILIPPE JOIGNANT, HAROPA PORT

Since January 2020, Soletanche Bachy France, leader of a consortium with Atlantique Dragage and Bouygues TP RF for civil works, has been working for Haropa Port Le Havre on the construction of Port 2000 berths 11 & 12 following on from the 3500 metres of the first ten berths executed by Soletanche Bachy during the first two phases in the 2000s. The contract covers the design and construction of berths for container ships, each 350 metres long, of draught 17 m, and a 111-metre side quay, dredging, protection against undercutting, two 350-tonne mooring posts and the development of 47 ha of open storage area. A monitoring system is provided to monitor movements of the structure in the works and operating phases. □

LE HAVRE PORT 2000 - FASE 3 - CONTINUACIÓN Y FINAL DE UN PROYECTO A LARGO PLAZO

ETIENNE RAIMBAULT, SOLETANCHE BACHY FRANCE - PIERRE GALLIARD DE LAVERNEE, SOLETANCHE BACHY FRANCE - STÉPHANE GALY, SOLETANCHE BACHY FRANCE - CHRISTOPHE DUBERN, HAROPA PORT - PHILIPPE JOIGNANT, HAROPA PORT

Desde enero de 2020, Soletanche Bachy France, en representación de un consorcio de ingeniería civil que comparte con Atlantique Dragage y Bouygues TP RF, realiza para Haropa Port Le Havre la construcción de los puestos 11 y 12 de Port 2000, en la prolongación de los 3.500 m de los diez primeros puestos de atraque realizados por Soletanche Bachy durante las dos primeras fases, en los años 2000. El contrato incluye el diseño-realización de los muelles de atraque para portacontenedores, de 350 m cada uno, con un calado de 17 m, así como un muelle de retorno de 111 m, los dragados, la protección anti-erosión, dos duques de Alba de amarre de 350 t y la habilitación de 47 ha de terraplenes. Se emplea un dispositivo de auscultación para hacer un seguimiento de los desplazamientos de la obra en las fases de obra y de explotación. □