



1  
© CEDRIC HELSLY

# LA ROTULE DU QUAÏ DE FOS-SUR-MER

AUTEURS : CHRISTOPHE SOUSTELLE, DIRECTEUR TRAVAUX, SOLETANCHE BACHY FRANCE -  
GUSTAVO PEREIRA, INGÉNIEUR PRINCIPAL AU BE GROUPE, SOLETANCHE BACHY

SOLETANCHE BACHY FRANCE, MANDATAIRE DU GROUPEMENT SOLETANCHE BACHY FRANCE / MENARD / EUROVIA / BUESA, CONSTRUIT UNE EXTENSION DE QUAÏ À CONTENEURS POUR LE GRAND PORT MARITIME DE MARSEILLE SUR LA COMMUNE DE PORT-SAINT-LOUIS-DU-RHÔNE (13). CE NOUVEAU QUAÏ, DE 240 M DE LONG ET DE 17 m DE TIRANT D'EAU, A DÉBUTÉ EN AVRIL 2018 PAR LES TRAVAUX D'INSTALLATION GÉNÉRALE ET SERA LIVRÉ 24 MOIS PLUS TARD, EN AVRIL 2020. SITUÉS ENTRE DEUX QUAÏS EXISTANTS, LES TRAVAUX CONSISTENT EN UN RACCORDEMENT DE CES DERNIERS, AFIN D'AGRANDIR LA ZONE D'EXPLOITATION DES CONTAINERS DONT LE TRAFIC EST EN CROISSANCE DANS LA RÉGION MARSEILLAISE.

## CONCEPTION

Le contexte géotechnique à Fos comprend une couche superficielle de sables (épaisseur réduite, en général), suivie par une couche épaisse de limons normalement consolidés (jusqu'à -19 CM). Le substratum est

formé par les cailloutis de Crau, avec des degrés d'altération, de compacité et de cimentation divers. La construction du quai nécessite l'installation, par clapage et moyens terrestres, d'une épaisseur de remblais atteignant 20 m, déposés directement sur les limons de

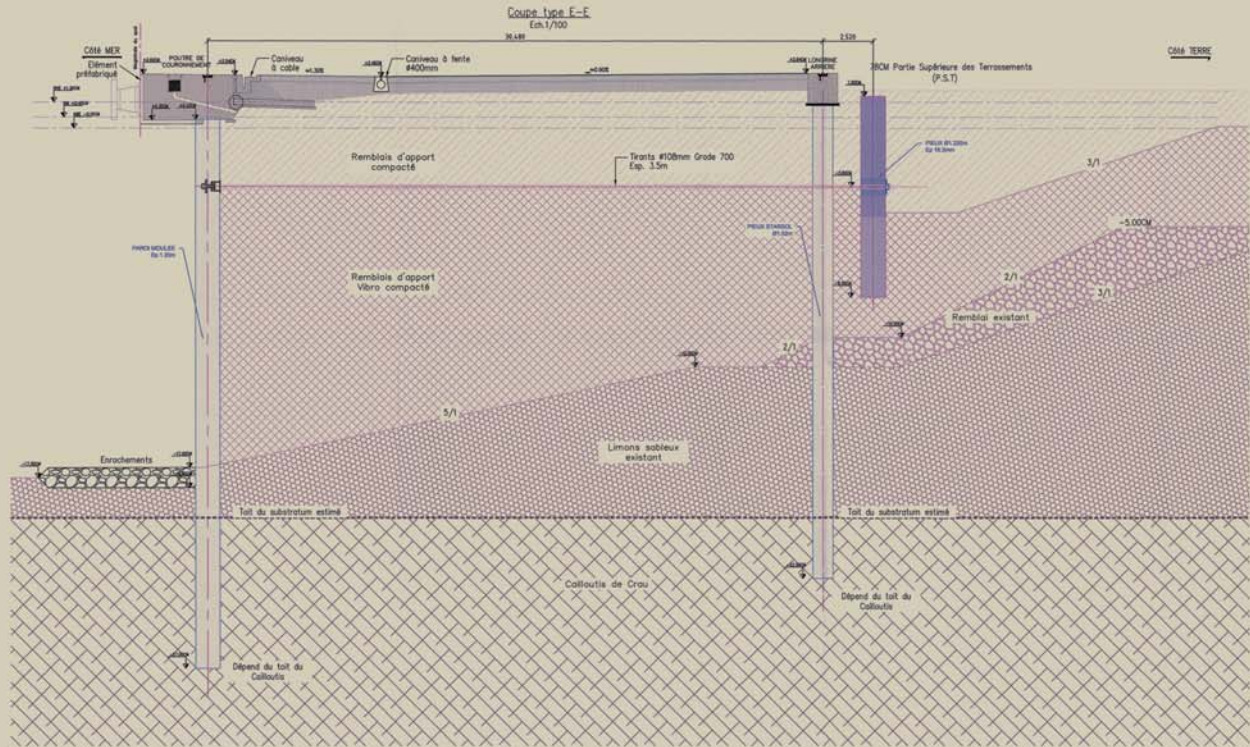
1- Vue d'ensemble du quai.

1- Overall view of the quay.

façon à former la plate-forme finie autour du niveau +2,5 CM.

La solution de base proposée par le marché consistait en un soutènement du type combi-wall (pieux tubulaires en acier de diamètre 1800 mm espacés de 3,9 m, complétés par des

## COUPE TYPE DU QUAÏ



© SOLETANCHE BACHY

2

palplanches), appuyé par un niveau d'ancrages passifs (tirants métalliques de 120 mm et contre-rideau continu en palplanches PU32). Cependant, le retour d'expérience des ouvrages adjacents laissait anticiper des difficultés de battage des pieux et palplanches,

**2- Coupe type du quai.**  
**3- Calculs Plaxis pour le quai.**

**2- Typical cross section of the quay.**  
**3- Plaxis calculations for the quay.**

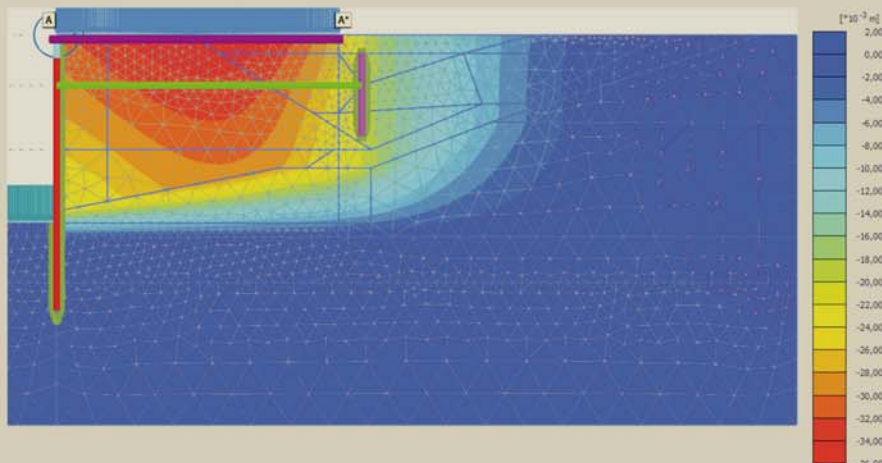
notamment à cause de la résistance du substratum. Une analyse comparative effectuée par le groupement a permis de déterminer le potentiel d'une solution alternative en parois moulées ; cette solution permettrait de garantir, avec un degré de fiabilité satisfaisant,

l'encastrement de la fiche dans les cailloutis de Crau, tout en gardant une performance globale au moins aussi élevée que celle de la solution de base (notamment en termes de résistance, raideur et durabilité).

La solution variée développée par le groupement est basée sur une paroi moulée de 1200 mm d'épaisseur, fortement ferrillée et fichée à -26 CM dans le cailloutis sain ( $p_l > 6$  MPa). Comme pour la solution de base, le soutènement est retenu par un niveau d'ancrages passifs. À la différence de celle-ci, chaque tirant (du type Asda 500 MPa avec 110 mm de diamètre) est relié à un pieu métallique faisant office de contre-rideau (figure 2).

Les calculs ont été effectués majoritairement avec le support de logiciels internes du groupe Soletanche Bachy (notamment : PARIS pour les calculs d'interaction sol structure, CACAO pour le ferrailage automatisé des parois moulées), ainsi qu'avec des logiciels externes de référence (en particulier PLAXIS et ROBOT, logiciels aux éléments finis pour des analyses géotechniques et structurales, respectivement) (figure 3). Parmi les facteurs clés de la conception de la solution, on peut indiquer :

## CALCULS PLAXIS POUR LE QUAÏ



© DR

3



4

© CÉDRIC HELSLY

le comportement mécanique des remblais à court et à long terme (facilité par la qualité des matériaux de carrière concassés, ainsi que par le traitement par vibrocompactage), les tassements de plate-forme (fortes épaisseurs de remblais, directement sur des limons compressibles), l'analyse du comportement sismique du quai (y compris les analyses de propagation d'ondes pour optimisation du coefficient sismique pseudo-statique), ainsi que la conception de la poutre de couronnement (monolithique, liaisonnée aux quais existants et obéissant à des critères de dilatation thermique et de retrait assez contraignants). On peut aussi souligner les charges très élevées associées à des critères de défor-

mation contraignants, pour les grues portiques travaillant sur des quais de cette dimension. Les études de la solution variante ont été entièrement développées en interne par Soletanche Bachy, tant pour la partie géotechnique (parois, tirants, remblais, hydrogéologie, pieux) que pour le génie civil (poutres de couronnement, poutre de voie de grue arrière, ouvrages annexes), avec la collaboration des autres membres du groupement (en particulier Menard pour l'amélioration de sol). Ce mode d'organisation a permis d'assurer une interface souple entre les équipes études et commerce (en phase d'appel d'offres), et entre les études et l'équipe chantier (en phase d'exécution).

**4- Vue générale du chantier de parois moulées. 5 & 6- Benne hydraulique KS.**

**4- General view of the diaphragm wall project. 5 & 6- KS hydraulic bucket.**

fendable de 420000 t de matériaux de carrière de granulométrie variée. Ce n'est pas moins de 200 camions qui ont approvisionné ce chantier pour atteindre des cadences de mise en œuvre de 10000 t par jour. Les carrières locales du massif de la Nerthe ont permis, non seulement d'assurer les cadences élevées, mais également de disposer de matériaux nobles de granulométries 40/400, 0/100 et 0/40 permettant d'assurer la stabilité globale de cette digue provisoire.

**DÉROULEMENT DES TRAVAUX**

**JUIN À SEPTEMBRE 2018**

Cette première phase a consisté, pour Buesa, à mettre en œuvre une digue longitudinale stable. Les travaux sont réalisés par clapage avec une barge

**OCTOBRE 2018**

Les travaux de vibrocompactation de Menard permettent de consolider cette digue et de lui apporter les caracté-



5

© CÉDRIC HELSLY



6

© CÉDRIC HELSLY



© CEDRIC HELSIVY

ristiques mécaniques nécessaires à sa stabilité globale. Sur la base d'un maillage de 3,5 m x 3,5 m, l'aiguille vibrante a réalisé en 3 semaines plus de 400 impacts pour atteindre un module Em de 30 MPa et un Dr jusqu'à 90%.

#### NOVEMBRE 2018

Arrivée du matériel de paroi moulée : centrale à boue, équipements de bétonnage et porteurs LB 855 (figure 4).

**7- Bétonnage des parois moulées.**  
**8- Réparation des outils de forage.**

**7- Diaphragm wall concreting.**  
**8- Repairing drilling tools.**

Le choix a été fait d'excaver les parois à l'aide de deux types d'outils : une benne hydraulique de type KS (figures 5 et 6) et une benne lourde M8 pour l'ancrage dans le substratum. En 3 postes, une équipe de 30 personnes permet de réaliser les parois moulées, de 28 m de profondeur et de 1,2 m d'épaisseur, à une cadence de 4 à 5 panneaux par semaine. Le volume total de béton (figure 7) à couler représente plus de

9000 m<sup>3</sup>, mobilisant deux centrales à béton. L'ancrage des parois se fait dans des alluvions de la Crau consolidées par les temps géologiques. Ces alluvions, composées de galets roulés de 100 à 200 mm dans une matrice indurée ressemblant à du béton, mettent à mal les outillages (figure 8). Les bennes lourdes assurent cependant l'ancrage du pied de paroi, critère de choix technique par notre client qui avait proposé une solution de base en combi-wall.

La solution en paroi moulée permet d'assurer un ancrage parfait dans tout type de terrain et répond aux charges toujours plus fortes apportées par les futurs portiques de déchargement des containers.

#### FÉVRIER 2019

La nouvelle année voit la mise œuvre, par les équipes de Soletanche Bachy, de la poutre de quai. Il s'agit d'un ouvrage d'une hauteur de 2,30 m et d'une largeur de 4,60 m. La base de la poutre de couronnement est située sous le niveau de la mer (figure 9). Un masque a donc été constitué en bétonnant les enrochements en place et en les surélevant d'un bardage pare-écume. Il faut cependant un peu de clémence du ciel pour pouvoir couler en place des plots de 16 m de long au fil de l'eau et à l'abri des enrochements. ▷



© CEDRIC HELSIVY

8



9

© SOLETANCHE BACHY



10

© CEDRIC HESLY

Après plusieurs semaines de béton de propreté immergé et d'élévation du mur de protection, les équipes de Soletanche Bachy ont pu mettre en œuvre les murs préfabriqués à l'abri de pompes de relevage et dans une enceinte quasi étanche (figure 10). La poutre comporte en effet, côté mer, un mur préfabriqué (figure 11). Le GPMM, en raison de ses expériences précédentes, a souhaité ajouter une peau supplémentaire pour retarder les agressions de la mer. Cet ouvrage permet de réduire les impacts des agressions chimiques de l'eau de mer et des agressions mécaniques des vagues. Utilisant un béton de haute durabilité,

tous les moyens ont été mis en œuvre pour augmenter la durée de vie de l'ouvrage. Démarrées 6 mois auparavant, les études de béton, en partenariat entre le laboratoire de Soletanche Bachy et Lafarge, ont permis d'atteindre des objectifs de faible porosité (< 12%) et de faible diffusion des ions chlorures (<  $3 \cdot 10^{-12}$  m/s). Pour conserver les performances obtenues sur ces bétons, il a été choisi de monter une aire de préfabrication foraine sur le site (figures 12 et 13). En effet, il n'était pas envisageable, dans le temps imparti, de redémarrer les études de béton avec une centrale à

**9- Recépage de la paroi et terrassement pour la poutre.**

**10- Mise en place des murs préfabriqués.**

**11- Coupe de principe de la poutre.**

**9- Trimming the wall and earthworks for the beam.**

**10- Placing precast walls.**

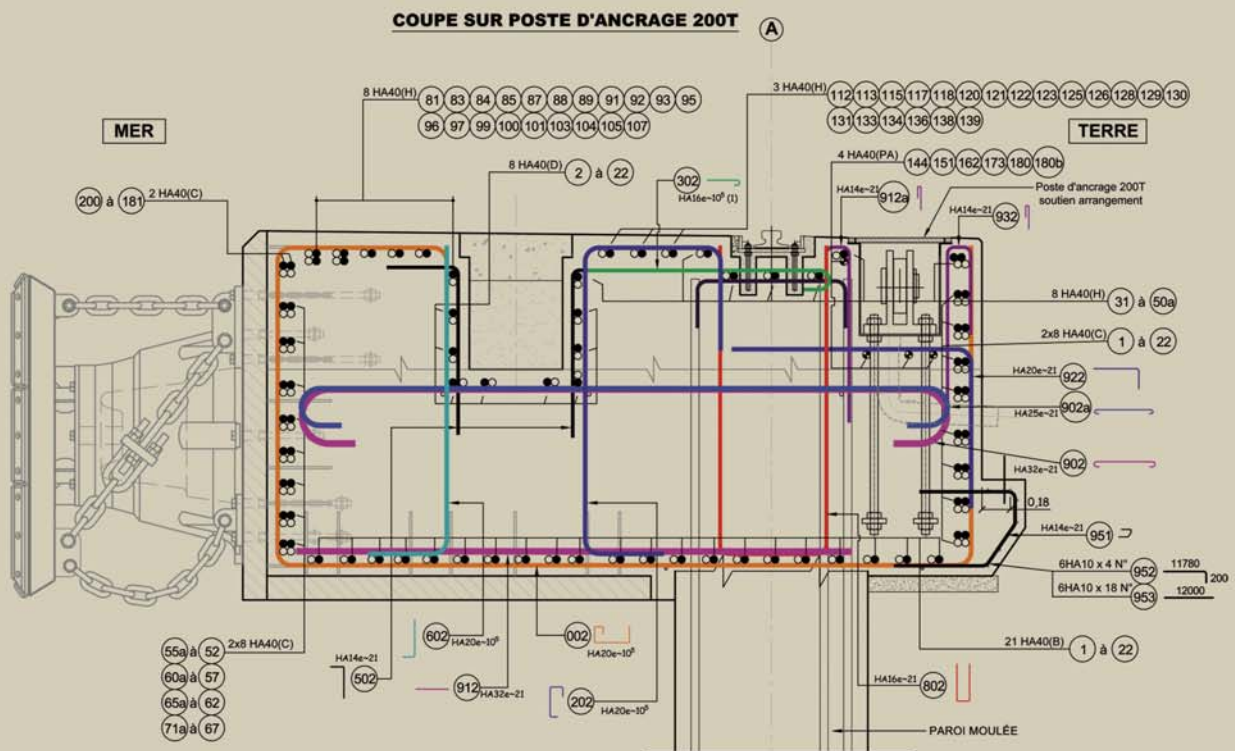
**11- Schematic cross section of beam.**

proximité d'une usine de préfabrication. La surface disponible autour du site a permis de monter une aire de préfabrication et de couler les 110 éléments préfabriqués en 2 mois. Ces masques, composés d'attentes en barre inox, ont nécessité de créer une aire de retournement spécifique pour pouvoir apposer une couche de peinture époxy, constituant une protection supplémentaire sur le béton haute durabilité.

**MARS ET AVRIL 2019**

Les équipes des armaturiers peuvent à présent confectionner la poutre de couronnement, au sec et à l'abri de la houle (figure 14).

**COUPE DE PRINCIPE DE LA POUTRE**



11

© SOLETANCHE BACHY



© SOLETANCHE BACHY  
12



13

**12- Aire de préfabrication.**  
**13- Stockage des éléments préfabriqués.**  
**14- Ferrailage de la poutre.**

**12- Precasting area.**  
**13- Storage of precast parts.**  
**14- Beam reinforcement.**

Une équipe de 10 compagnons met en place barres HA 40, épingles et étriers. Après le raccordement sur le quai existant, la cadence des armatures monte à 12 m de poutre par jour.

Les équipes de génie-civil de Soletanche Bachy ferment la poutre à l'arrière par des coffrages et placent tous les équipements à incorporer dans la poutre : échelles, défenses, bollards, caniveaux, voie de roulement, réseaux. L'ensemble est posé à l'aide de gabarits et les bétonnages se font en 2 levées de 200 m<sup>3</sup> environ.

Le raccordement est un point essentiel abordé dès la phase de la conception. Le quai de la rotule raccorde deux quais existants exploités par les sociétés Seayard et Eurofos. La construction du nouveau quai génère des déplacements non négligeables, notamment lors de la pose du tirant d'ancrage et du terrassement à l'avant du quai.

La solution en parois moulées permet de dissocier les ouvrages en réalisant le raccordement aux quais existants en dernier lieu.



14  
© CEDRIC HESLY

Auparavant, une équipe d'hydrodémolition a découpé 2 m de quai de chaque côté de l'ouvrage faisant office de clavetage.

## PROCHAINES ÉTAPES

### MAI À AOÛT 2019

Il s'agira, dans un premier temps, de rabattre la nappe, afin de pouvoir installer 2250 m de tirants passifs de diamètre 110 mm et leurs tubes d'ancrage arrière (figure 15). La stabilité globale du quai est assurée par l'ancrage de la paroi moulée en pied dans les cailloutis de Crau et par ce tirant ancré à un tube arrière.

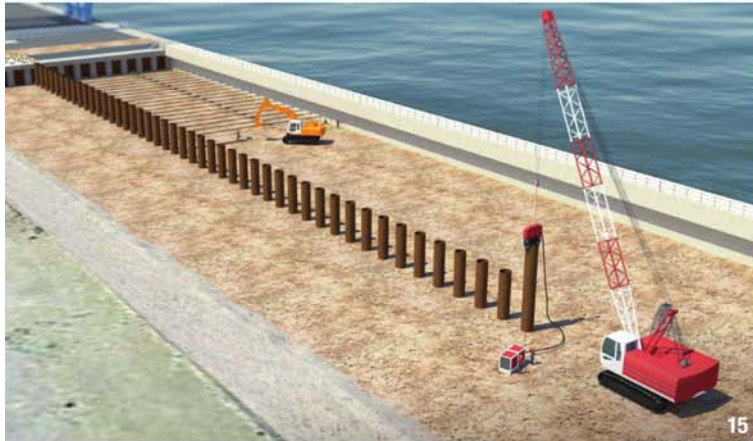
Le niveau des tirants est situé sous le niveau général de la mer. Un réseau de puits et de pompes sera donc mis en œuvre pour assurer l'assèchement de la fouille 24h/24. Le phasage comporte les opérations successives de terrassement côté terre, pose des tirants et des tubes d'ancrage, terrassement côté mer pour récupérer les déblais à l'avant du quai et les gerber à l'arrière avec les moyens nautiques et terrestres de Buesa.

Une deuxième opération de vibrocompactage sera nécessaire pour améliorer les capacités portantes de la plateforme définitive ainsi créée.

Les tirants passifs de type M108 de Asdo seront accouplés en fond de fouille et reliés à la paroi moulée par un système de rotules mises en place au préalable dans les cages d'armatures de ces dernières (figure 16).

### SEPTEMBRE À OCTOBRE 2019

Il s'agira des dernières opérations de génie civil avec la poutre arrière (figure 17).



15

© SOLETANCHE BACHY



17

© SOLETANCHE BACHY

Celle-ci est fondée sur 79 pieux de type Starsol de 1020 mm de diamètre, ancrés à 25 m de profondeur. Cette poutre recevra le rail arrière du portique de déchargement.

**NOVEMBRE 2019  
À MARS 2020**

Les réseaux et les plates-formes seront mis en place par Eurovia pour une livraison au mois d'avril 2020. □



16

© SOLETANCHE BACHY

15- Vue 3D des terrassements pour mise en place des tirants passifs et des tubes.

16- Vue de la rotule dans les cages d'armatures de parois moulées.

17- Vue 3D de la réalisation de la longrine arrière.

15- 3D view of earthworks for placing passive tie anchors and tubes.

16- View of the "rotule" in the concrete reinforcing cages of diaphragm walls.

17- 3D view of execution of the rear longitudinal member.

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**DIGUE PROVISOIRE :**  
401 000 t

**PAROIS MOULÉES :**

- Longueur : 240 m

- Béton : 9 000 m<sup>3</sup>

- Acier : 1 200 t

**MASQUES PRÉFABRIQUÉS :**

114 éléments unitaires

**POUTRE DE COURONNEMENT :**

- Béton : 2 456 m<sup>3</sup>

- Acier : 415 t

**TIRANTS :** 68 unités (2 400 m)

**PIEUX :** 79 unités

**LONGRINE ARRIÈRE :**

- Béton : 720 m<sup>3</sup>

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Grand Port Maritime de Marseille

**MAÎTRE D'ŒUVRE :** Grand Port Maritime de Marseille

**ASSISTANCE À LA MAÎTRISE D'ŒUVRE :** Cerema / Fondasol / Brl

**CSPS :** Veritas

**ENTREPRISES :** Groupement Soletanche Bachy France (mandataire) /

Menard / Buesa / Eurovia

## ABSTRACT

### THE "ROTULE" OF THE QUAY AT FOS-SUR-MER

CHRISTOPHE SOUSTELLE, SOLETANCHE BACHY FRANCE - GUSTAVO PEREIRA, SOLETANCHE BACHY

At Fos-sur-Mer, for the port authority Grand Port Autonome de Marseille, the consortium led by Soletanche Bachy is building a quay 240 m long with a 17-metre draught between two existing quays. Originally planned as a combi-wall, the solution finally adopted consists of a diaphragm wall anchored in the Crau gravel and anchored by a system of passive tie anchors connected to steel piles acting as an inner curtain wall. The wall is topped by a capping beam protected on the sea side by precast sheets of high-durability concrete. The rear track of the handling gantry rests on a longitudinal member with foundations on Starsol piles. □

### LA RÓTULA DEL MUELLE DE FOS-SUR-MER

CHRISTOPHE SOUSTELLE, SOLETANCHE BACHY FRANCE - GUSTAVO PEREIRA, SOLETANCHE BACHY

En Fos-sur-Mer, por cuenta del Gran Puerto Autónomo de Marsella, el consorcio liderado por Soletanche Bachy realiza un muelle de 240 m de longitud y 17 m de calado entre dos muelles existentes. Inicialmente prevista en combi-wall, la solución elegida consta finalmente de una pantalla de hormigón anclada en la grava mediante un sistema de tirantes pasivos unidos a pilotes metálicos que actúan como contramuro. La pantalla está coronada por una viga, protegida del lado mar por placas prefabricadas de hormigón de gran durabilidad. La vía posterior del pórtico de mantenimiento reposa sobre un larguero sustentado por pilotes Starsol. □