

Apports de l'instrumentation à la connaissance et à la maîtrise des risques : construction et stabilité des digues maritimes.

Contribution of the instrumentation to knowledge and risk control: construction and stability of maritime dykes.

Sébastien Brague, Jean-Christophe Monneret
[sebastien.brague ; jean-christophe.monneret]@soldatagroup.com
Soldata SAS

Téléphone : +33 (0) 1 41 44 85 00, Fax : +33 (0) 1 41 44 85 11, Courriel : info@soldatagroup.com

MOTS CLÉS

Méthode observationnelle ; Instrumentation portuaire ; Instrumentation de digue ; Instrumentation de remblai ;

RÉSUMÉ

Apports de l'instrumentation à la connaissance et à la maîtrise des risques : construction et stabilité des digues maritimes.

Les techniques d'instrumentation géotechnique ont très rapidement évolué depuis dix ans : capteurs automatiques, transmission radio, Insar,... En suivant les règles de la Méthode Observationnelle, les ports ont su en tirer rapidement avantage pour optimiser leurs travaux et leurs opérations de maintenance.

Deux exemples récents permettent d'illustrer cette évolution au cours des travaux d'agrandissement du port de Barcelone : lors de la construction de digues d'abri et lors de la construction d'un terminal de conteneurs.

Dès 2003, l'Autorité Portuaire de Barcelone a su intégrer l'instrumentation comme un outil à part entière de gestion des risques et de pilotage des travaux d'expansion du Port.

Les exemples exposés dans le cadre des travaux de construction ont clairement démontré les avantages directs de l'instrumentation pour

- . Assurer la sécurité au cours des travaux ;*
- . Vérifier les hypothèses de calculs de dimensionnement ou les ajuster le cas échéant ;*
- . Adapter les méthodes constructives et le programme des travaux ;*
- . Anticiper et contrôler le comportement des sols et des structures sur le long terme.*

L'ensemble de l'instrumentation mise en place a dû être adaptée aux contraintes maritimes et constructives du site ainsi qu'aux dimensions atypiques de la zone à contrôler afin d'obtenir un suivi en temps réel renforcé d'un système d'alerte et d'analyse prévisionnelle.

ABSTRACT

The techniques of geotechnical instrumentation have significantly been improved along the last ten years: automatic sensors, radio transmission, InSAR ... By following the rules of the Observational Method, Ports have quickly taken advantage of it to optimize their works and their operations of maintenance.

Two recent examples illustrate this change during the works of enlargement of the Port of Barcelona: during the construction of the breakwater dikes and during the construction of a large terminal of containers.

From 2003, the Harbour Authority of Barcelona have successfully integrated the instrumentation as a key tool for risk management and piloting of the works of expansion of the Port.

The examples exposed within the framework of building work clearly demonstrated the direct advantages of the instrumentation in order to

- . Insure the safety during the works;*
- . Verify the hypotheses of calculations of sizing or adjust them if necessary;*
- . Adapt the constructive methods and the program of the works*
- . Anticipate and control the behavior of grounds and structures on the long term.*

The instrumentation must be adapted to the maritime and constructive constraints of the site as well as to the atypical dimension of the area to be controlled in order to obtain a real time monitoring strengthened by an alarm and a predictive analyzing system.

1. INTRODUCTION

Les techniques d'instrumentation géotechnique ont très rapidement évolué depuis dix ans : capteurs automatiques, transmission radio, Insar... En suivant les règles de la Méthode Observationnelle, les ports ont su en tirer rapidement avantage pour optimiser leurs travaux et leurs opérations de maintenance.

Deux exemples récents permettent d'illustrer cette évolution au cours des travaux d'agrandissement du port de Barcelone : lors de la construction des digues d'abri et lors de la construction d'un terminal de conteneurs.

1.1 Le développement du Port

Depuis les années 90, une vaste opération de réorganisation a été conduite par les autorités pour une meilleure intégration de son port dans la ville de Barcelone. L'ouverture de la nouvelle entrée du port, dite entrée Nord, donne maintenant un accès direct aux activités de transport de passagers et de plaisance. Elle délimite aussi clairement les activités du port commercial et du port de plaisance en séparant leurs trafics et leurs équipements.

Le Port de Barcelone a ainsi réalisé au cours de la dernière décennie divers chantiers visant à optimiser l'utilisation de la zone portuaire. Restait à le doter de nouvelles capacités pour lui donner un haut niveau de compétitivité et d'installations modernes adaptées aux besoins présents et futurs du transport maritime, de la logistique et de la distribution.

En 2001, a été lancé le 4^e projet d'expansion du Port de Barcelone qui permettra à terme le doublement de la superficie portuaire actuelle, atteignant ainsi 1.300 hectares, en réponse aux prévisions de croissance du trafic et aux exigences du commerce international. La déviation du fleuve Llobregat, prévue dans le Plan Delta, permettra au Port de Barcelone et à sa Zone d'Activités Logistiques de se développer au Sud en générant l'espace nécessaire à son expansion.

Le futur port est délimité par les Digues Sud et Est, et son entrée sera de 400 mètres de large et de 20 mètres de tirant d'eau (Figure 1). Les digues de protection créeront une zone protégée où seront construits les nouveaux quais. L'abri généré par la Digue Sud permettra l'aménagement de plus de 400 hectares dont 60 à 100 hectares devant être opérationnels dès 2007, comportant notamment un terminal à conteneurs – le Terminal Prat -.

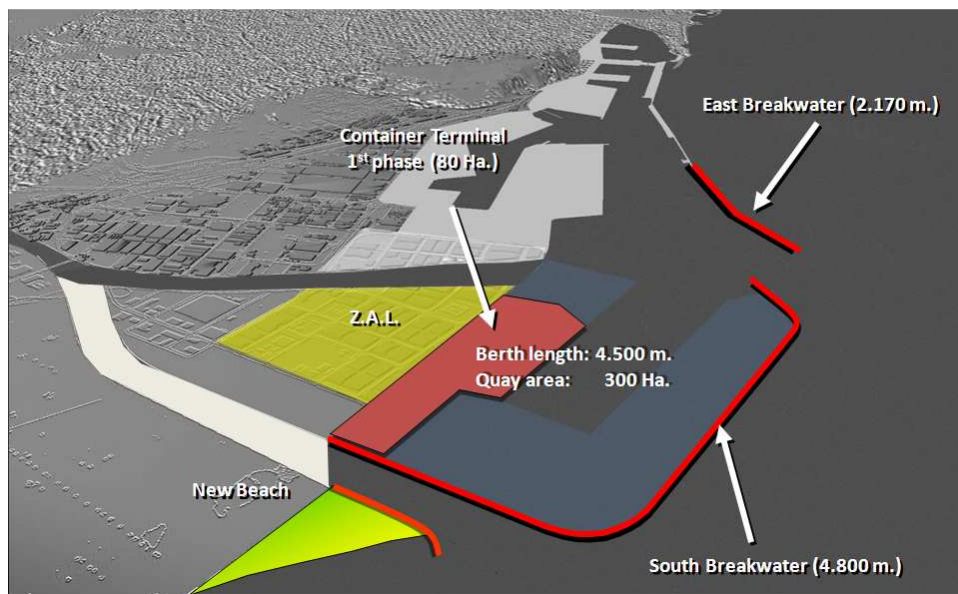


Figure 1 : Projet de développement du Port de Barcelone

1.2 Le contexte du chantier

L'extension du Port de Barcelone est réalisée autour de l'embouchure actuelle du fleuve Llobregat. Les digues reposeront ainsi sur des couches de sédiments constituées essentiellement d'argiles et de limons apportés par le fleuve. Les couches d'argiles limoneuses (avec présences de sables) se superposent jusqu'à une couche de sables et graviers située approximativement à 60 mètres de profondeur.

Compte tenu des conditions géotechniques particulièrement médiocres constituées par ces sédiments sous-consolidés, la construction des digues requiert un contrôle minutieux. En particulier, il est fondamental de pouvoir suivre les tassements, les mouvements de sol et la dissipation des pressions interstitielles dans le substratum, pour garantir la stabilité au cours des différentes phases de construction. Des sinistres par rupture de fondation survenus lors de constructions portuaires analogues incitent à la plus grande prudence.

C'est ce qui conduit le Port Autonome de Barcelone à avoir une approche dite par '**méthode observationnelle**' de l'ensemble du projet et à prévoir une instrumentation élaborée et un système d'auscultation en temps réel, parallèlement aux projets de construction des digues.

2. APPROCHE PAR LA 'METHODE OBSERVATIONNELLE'

La **méthode observationnelle** constitue une approche originale permettant d'adapter et d'optimiser les ouvrages géotechniques en fonction des observations réalisées sur leur comportement lors de la construction.

Dans le cadre de l'extension du port de Barcelone, cette approche a été intégrée dès les premières phases du projet en appliquant le schéma vertueux suivant :

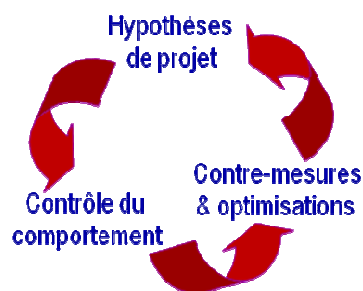


Figure 2 : Schéma vertueux de la 'méthode observationnelle'

Les hypothèses de dimensionnement du projet se sont basées sur les étapes suivantes :

- Réalisation d'une large campagne de reconnaissance géotechnique (figure 3) dans le but de déterminer l'ensemble des paramètres (C_u , C_v ...) qui conditionnent la stabilité des digues et ouvrages prévus pendant leur construction et au cours de leur exploitation (tempêtes...);
- Réalisation de modélisation et d'analyse des hypothèses de pré-dimensionnement (figure 4) pour chacune des étapes du processus constructif (équilibre limite, modèle d'éléments finis).



Figure 3 : Campagne de reconnaissance géotechnique 'offshore'.

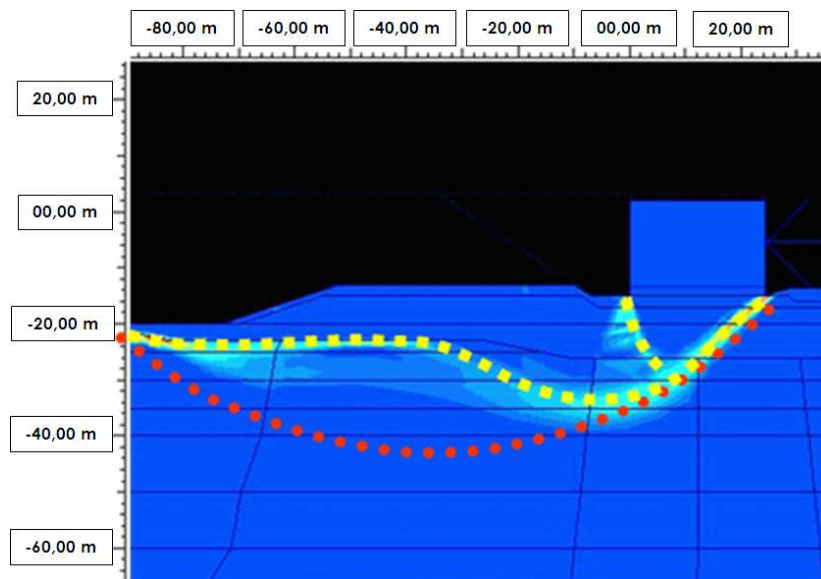


Figure 4 : Formes de rupture de la digue d'abri (en rouge, hypothèse de surface de rupture - équilibre limite -; en jaune, surface de rupture déduite de l'état des contraintes calculées dans le sol - modèle d'éléments finis -).

Le contrôle du comportement des sols a été réalisé à différentes phases du projet :

- Réalisation de plots d'essais instrumentés à grande échelle afin de vérifier/corriger/affiner les hypothèses de dimensionnement et de déterminer les méthodes constructives et le programme des travaux ;
- Réalisation d'un suivi des paramètres critiques de sécurité du chantier et de stabilité des sols et structures permettant de valider chacune des étapes de la construction des digues.

Les paramètres critiques de sécurité du chantier et de stabilité des sols et structures sont :

- L'état de consolidation des sols existants nécessitant le suivi des tassements en surface et en profondeur ainsi que le suivi de la pression interstitielle à différentes profondeurs;
- Les flux des sols existants nécessitant le suivi des déformations horizontales et verticales des sols.

Des réunions hebdomadaires regroupant l'ensemble des acteurs du projet ont permis le pilotage en continu des travaux. Ces réunions avaient notamment pour but de définir les contre-mesures et d'optimiser les

méthodes constructives ou le programme des travaux en tenant compte de l'information fournie par l'instrumentation.

3. APPORTS DE L'INSTRUMENTATION A LA CONNAISSANCE DU COMPORTEMENT DES SOLS ET A LA GESTION DES RISQUES

3.1 Digues d'abri

Description

La digue Sud commence par la prolongation de la rive droite de la nouvelle embouchure du fleuve Llobregat et avance perpendiculairement à la côte sur 2.000 mètres, virant ensuite sur un cap Nord-est jusqu'à atteindre une longueur totale de 4.900 mètres.

La digue Est est une prolongation de l'actuelle digue du même nom sur une distance de 2.170 mètres.

Ces digues délimitent par leurs extrémités la nouvelle entrée du port commercial.

Les tronçons I et III de la digue Sud et la digue Est sont réalisés en remblai traditionnel (figure 5). Le tronçon II de la digue Sud est une digue dite 'verticale' réalisée en posant côte à côte des caissons de béton de grande dimension (figure 6).

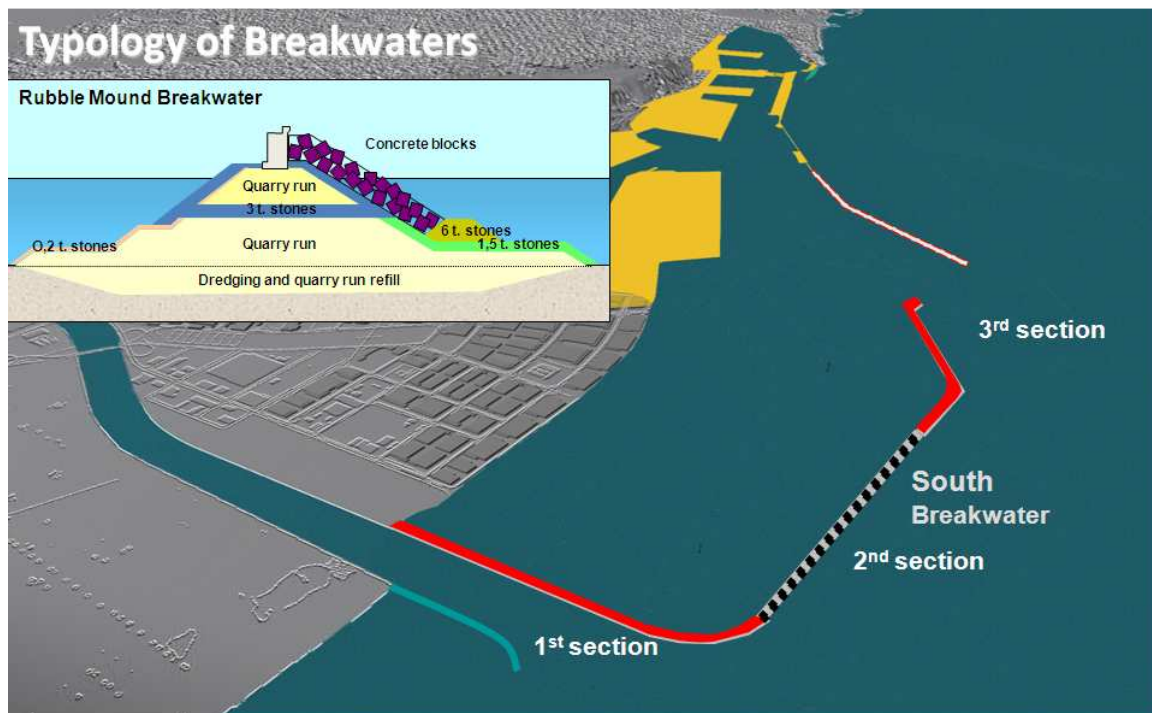


Figure 5 : Digue d'abri – remblai traditionnel.

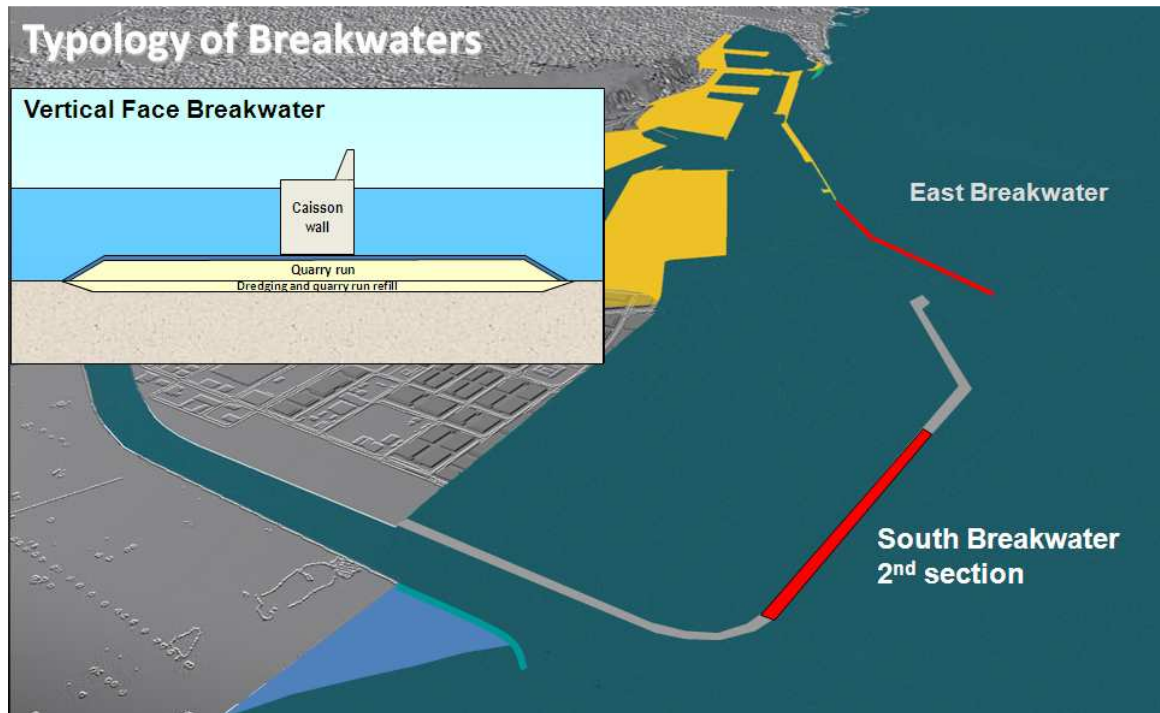


Figure 6 : Digue 'verticale'

Définition de l'instrumentation

La définition détaillée et l'installation de l'instrumentation à près de 35 m de profondeur dans le substratum sous les ouvrages en construction, par 25m de fond, ainsi que la transmission en temps réel des informations sur les ordinateurs du Port Autonome de Barcelone et de l'Université Polytechnique de Catalogne constituaient un défi technologique important. Ce dispositif représentait, par certaines de ses caractéristiques, une première mondiale.

Un appel d'offre international a été organisé par le Port Autonome de Barcelone (APB) pour trouver les meilleures solutions techniques et économiques. Cet appel d'offre – conception-réalisation – a été lancé à partir de spécifications établies en juin 2002 par le Norwegian Geotechnical Institute (NGI) et l'Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

A l'issue de cet appel d'offre, les travaux d'étude de conception et d'installation de l'instrumentation géotechnique sous marine ont été confiés à Soldata au sein d'un groupement.

Dès la signature du marché, les ingénieurs de Soldata ont travaillé, au cours d'une première phase d'étude, en partenariat avec NGI pour établir dans le détail le système d'instrumentation des digues et les méthodes d'installation.

Il a été convenu de déployer 8 sections instrumentées (Figure 7) composées chacune de :

- . 2 chaînes de 5 inclinomètres verticaux situés à différentes profondeurs pour le contrôle des mouvements latéraux du terrain,
- . 1 chaîne de 5 piézomètres situés à différentes profondeurs pour le contrôle de la pression interstitielle,
- . 1 chaîne de 5 jauges de tassement - mesurant la colonne d'eau ou pression hydrostatique instantanée - situées à différentes profondeurs pour la mesure des tassements en profondeur,
- . 1 chaîne de 2 jauges de tassement - mesurant la colonne d'eau ou pression hydrostatique instantanée -situées sur le fond marin pour la mesure des tassements en surface,
- . 1 jauge de référence - mesurant les variations de la colonne d'eau libre - afin de corriger les variations de hauteur dues aux phénomènes météorologiques et maritimes (variation de pression atmosphérique, marée, houle...).

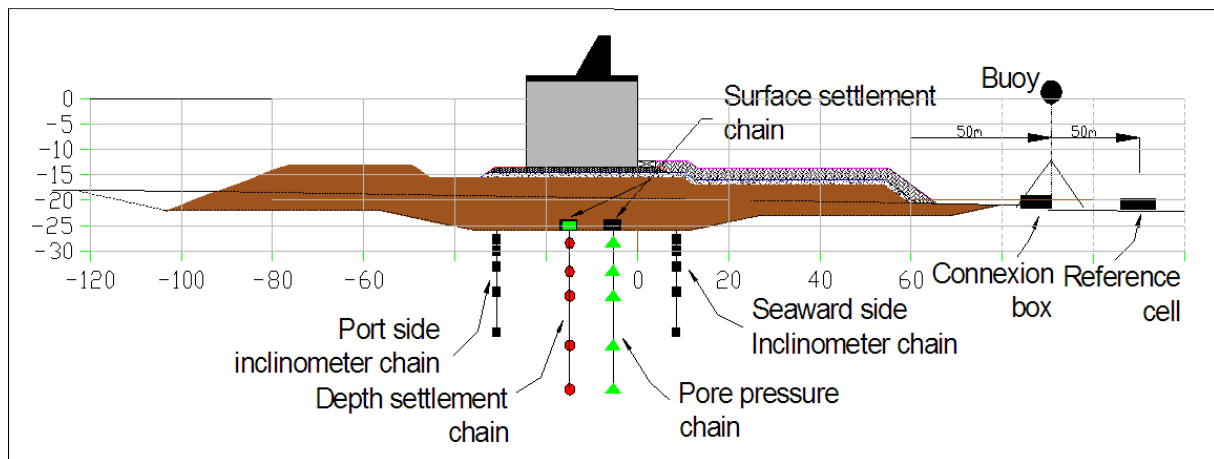


Figure 7 : Section d'instrumentation.

Le système de transmission de données a été étudié avec le plus grand soin. Il comprend :

- . Un câblage reliant chaque instrument à une centrale d'acquisition numérique,
- . 1 bouée de signalisation 'haute mer' embarquant le système d'acquisition et de transmission des données autonome avec son alimentation électrique,
- . Des protections horizontales protégeant les câblages pendant le déversement depuis la surface des blocs constituant le remblai,
- . Un système radio permettant de relier toutes les bouées au phare de Barcelone,
- . Un logiciel de communication et d'acquisition en temps réel des données recueillies par les centrales d'acquisition,
- . Une base de données d'instrumentation permettant de stocker les données pendant plusieurs années,
- . Le logiciel SIG (Geoscope de SolData) pour l'utilisation des données et leur visualisation par Internet pour les interlocuteurs distants.

Instruments utilisés

L'instrumentation en elle-même est soumise à des contraintes importantes liées à la corrosion marine, aux chargements des digues et à l'ampleur des déformations attendues (jusqu'à 4,30 mètres de tassements). L'instrumentation a ainsi été étudiée par les ingénieurs de Soldata ayant l'expérience de l'installation de capteurs sous des remblais compressibles et à grande profondeur, dans des barrages ou dans des ports. Les meilleurs fabricants de capteurs ont été sélectionnés, la nature des aciers et des autres matériaux a été définie avec soin, les câblages en particulier ont fait l'objet d'essais spécifiques. Certains capteurs ont été doublés pour tenir compte de dommages potentiels lors de la mise en place ou au cours de la vie de l'installation.

Enfin tous les capteurs ont été livrés sur le site, testés sur un banc d'essai et réceptionnés avant un conditionnement spécifique pour leur installation.

Acquisition en temps réel et flux de données

Les données, mesurées en temps réel dans le substratum, sont transmises par câble à des bouées de surface. Les câblages ont été étudiés pour supporter la déformation du terrain. Les bouées de surface, de plus de 6 m de haut, sont équipées de panneaux solaires et de batteries, ainsi que d'un réflecteur radar et d'un feu de signalisation autonome. Les panneaux solaires alimentent les capteurs, la centrale d'acquisition numérique et une radio digitale.

A terre, installé dans le phare du port de Barcelone, un ordinateur de contrôle pilote l'acquisition des données transmises par radio. Des protocoles de dialogue sécurisés permettent de récupérer en temps réel toute l'information recueillie en mer par les centrales d'acquisition.

Les données des huit centrales d'acquisition sont alors gérées par le logiciel GEOSCOPE qui visualise en temps réel les informations sur un Système d'Information Géographique. Les données et leur historique sont directement

accessibles. Elles sont disponibles à tout moment tant dans les bureaux du port à travers le réseau informatique local, ainsi qu'à distance et via Internet à l'Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

Toutes les données sont stockées dans une puissante base de données d'instrumentation. Étudiées chaque jour par les experts du Port, ces données permettent de piloter les déversements de matériaux de façon à garantir la stabilité à chaque étape de la construction. Un point est fait chaque semaine au cours de réunions de chantier sur les dissipations de pressions et les mouvements du substratum.

Résultats et contrôle des risques

L'instrumentation mise en place pour la construction des digues d'abri a permis d'assurer la sécurité des travaux et la stabilité des sols et structures. Cela a été un élément déterminant du pilotage du chantier (arrêt et redémarrage décidés à partir des données d'instrumentation). En sus, ses résultats ont été utilisés afin d'ajuster les paramètres d'entrée du modèle numérique d'éléments finis des sols de la zone du Port de Barcelone, outil primordial pour l'ensemble du projet d'expansion du Port en particulier pour la construction du terminal à conteneurs 'Muelle Prat'.

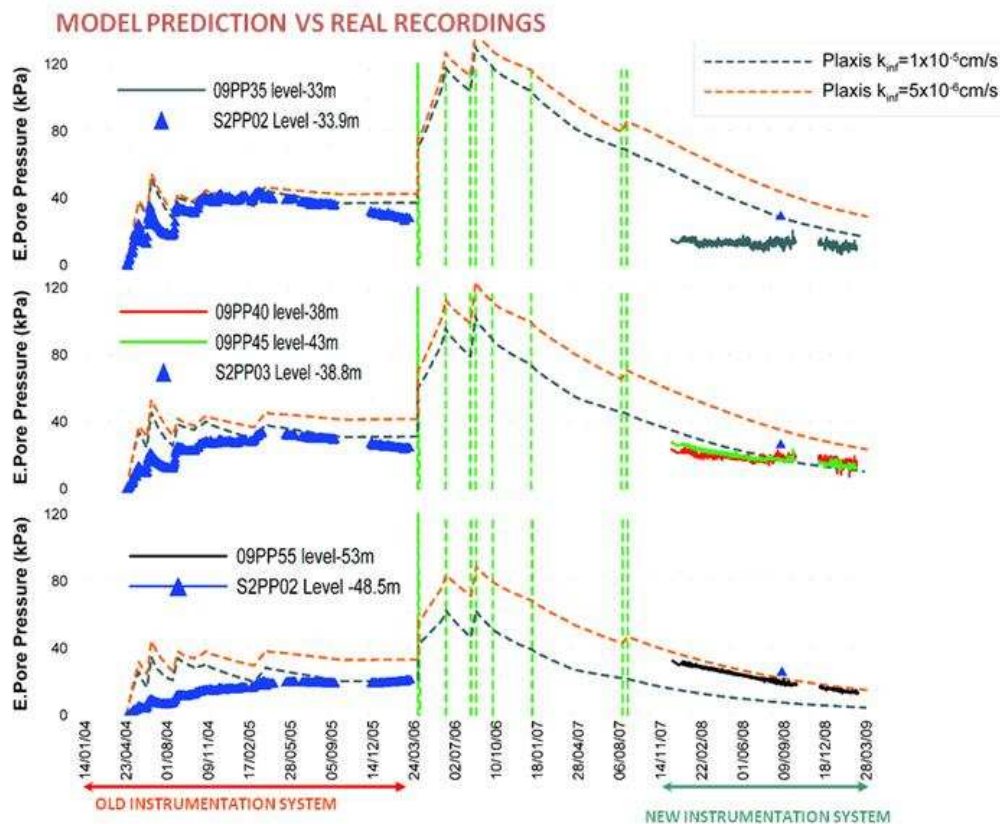


Figure 8 : Modèle prédictif obtenu par éléments finis vs. Résultats d'instrumentation.

Absence de données entre avr 2006 et nov 2007 due à la destruction du système d'acquisition de données de la section d'instrumentation (collision et destructif de la bouée par un porte-conteneur) ; Nov. 2007, installation d'un second système d'auscultation depuis la surface des caissons de la digue; Sept. 2008, mesure de contrôle du système d'auscultation initial faite à l'aide de plongeurs au niveau des connecteurs situés sur le bloc de connexion (fig. 7).

3.2 Terminal à conteneurs 'Prat'

Description

Le Port de Barcelone s'est lancé dans le plus important projet d'agrandissement de son histoire pour devenir le plus grand port d'entrée de marchandises du sud de l'Europe.

Le Terminal Prat est l'élément primordial de cet agrandissement – démarrage de l'activité dans la zone d'expansion du Port -. Situé au sud-ouest du port près de l'embouchure de la rivière Llobregat, il comprend un quai de 1500m et une esplanade d'une superficie de 100 hectares. Il a été conçu pour permettre

l'amarrage des plus grands porte-conteneurs existant actuellement, avec des tirants d'eau de 16 à 18 mètres (Figure 1 – zone en rose).

Définition de l'instrumentation

Initié en 2004, la construction du Terminal Prat s'est vu stoppée suite à un déplacement de près de 600ml de quai dû à la poussée du remblai hydraulique de l'esplanade sur le quai. Cet incident majeur a imposé une révision complète des hypothèses de calculs, du programme de construction et du dispositif de suivi des paramètres critiques de consolidation des sols et stabilité des structures, utilisé pour le pilotage des travaux. L'ensemble de l'instrumentation mise en place a dû être adaptée aux contraintes maritimes et constructives du site ainsi qu'aux dimensions atypiques de la zone à contrôler afin d'obtenir un suivi en temps réel renforcé d'un système d'alerte et d'analyse prévisionnelle.

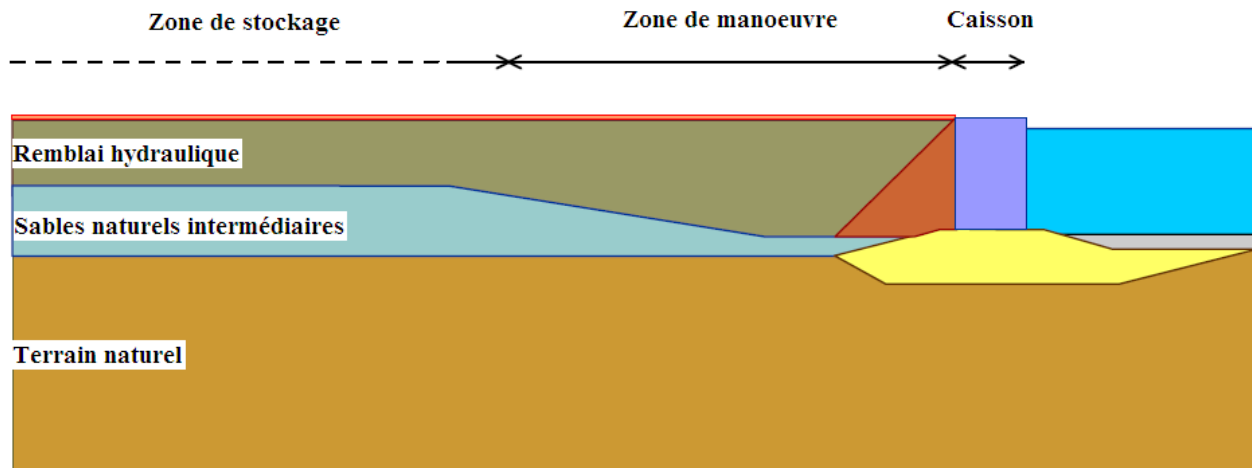


Figure 9 : Coupe schématique du Terminal Prat.

Du fait de sa conception très semblable à celle de la 2nde section de la digue d'abri Sud, l'instrumentation mise en place sous le quai 'Prat' est constituée de sections composées de:

- . 1 chaîne de 5 inclinomètres verticaux situés à différentes profondeurs pour le contrôle des mouvements latéraux du terrain,
- . 1 chaîne de 5 piézomètres situés à différentes profondeurs pour le contrôle de la pression interstitielle,
- . 1 chaîne de 5 jauges de tassement situées à différentes profondeurs pour la mesure des tassements en profondeur,
- . 1 chaîne de 3 piézomètres situés à différentes profondeurs pour le contrôle de la pression du remblai hydraulique sur le caisson préfabriqué,
- . 1 jauge inclinométrique installée dans le caisson pour la mesure d'inclinaison de la structure rigide,
- . 4 points de contrôle topographique automatisé 3D aux 4 angles de la face supérieure du caisson pour la mesure des déplacements de ce dernier.

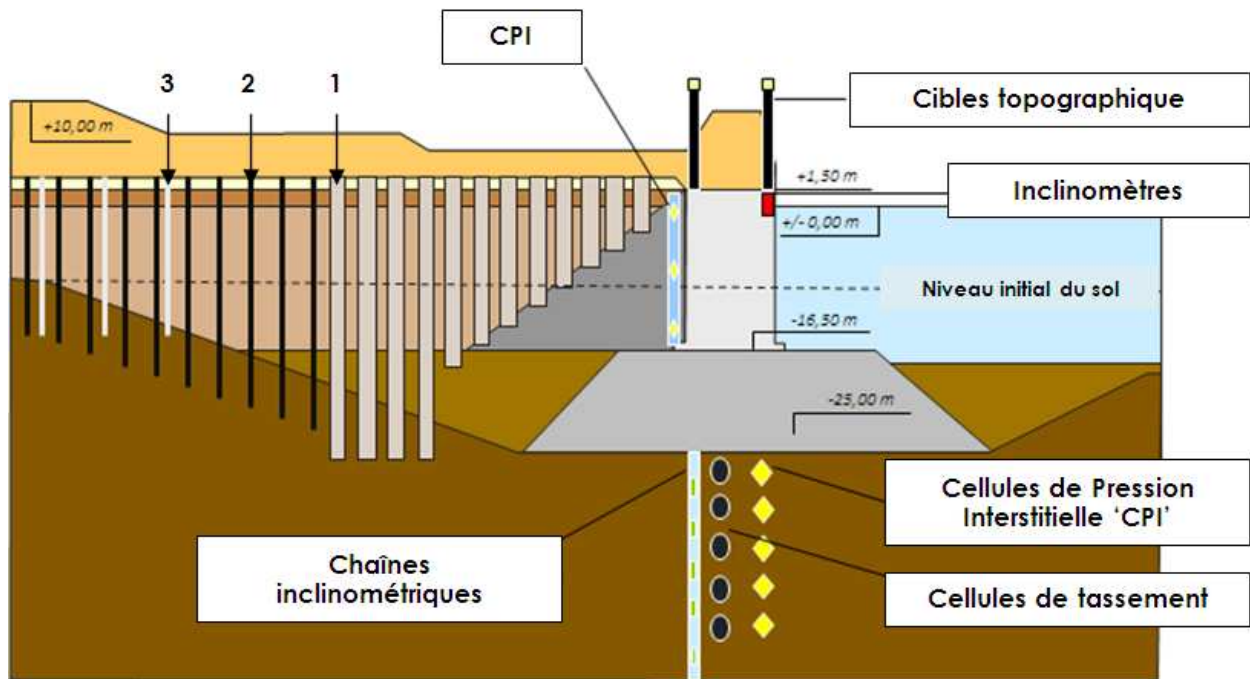


Figure 10 : Section d'instrumentation (1 – Colonnes ballastées / 2 – Drains verticaux / 3 – Pieux préfabriqués)

L'instrumentation de l'esplanade est constitué d'un maillage de :

- . Points de contrôle topographique automatisé 1D (suivi des tassements) sous le remblai hydraulique tous les 80 mètres ;
- . Chaîne de 3 à 5 piézomètres situés à différentes profondeurs pour le contrôle de la pression interstitielles tous les 160 mètres ;
- . Extensomètres incrémentaux de 45 à 60 mètres pour le contrôle des tassements en profondeur tous les 160 mètres.

Résultats et contrôle des risques

Lors de la phase de définition du projet et des méthodes constructives, des zones d'essai de grande dimension ont été réalisées afin de faire le choix des méthodes de traitement et d'amélioration des sols et de vérifier leur efficacité (Fig. 11).

Une meilleure connaissance du comportement du sol associée à un suivi des pressions interstitielles dans toute la zone du terminal Prat a permis de piloter le phasage de déplacement de terre lors des différentes étapes du pré chargement de la zone de près de 100 hectares. Le suivi des pressions interstitielle et la corrélation de ces dernières avec les valeurs obtenues par modélisation numérique ont permis de piloter le déroulement de chacune des phases de travaux et vérifier l'état de consolidation des sols à tout moment (Fig. 12 – exemple de suivi de pressions interstitielles lors de la mise en place d'une surcharge de 4 mètres de hauteur et corrélation des résultats avec le modèle prévisionnel).

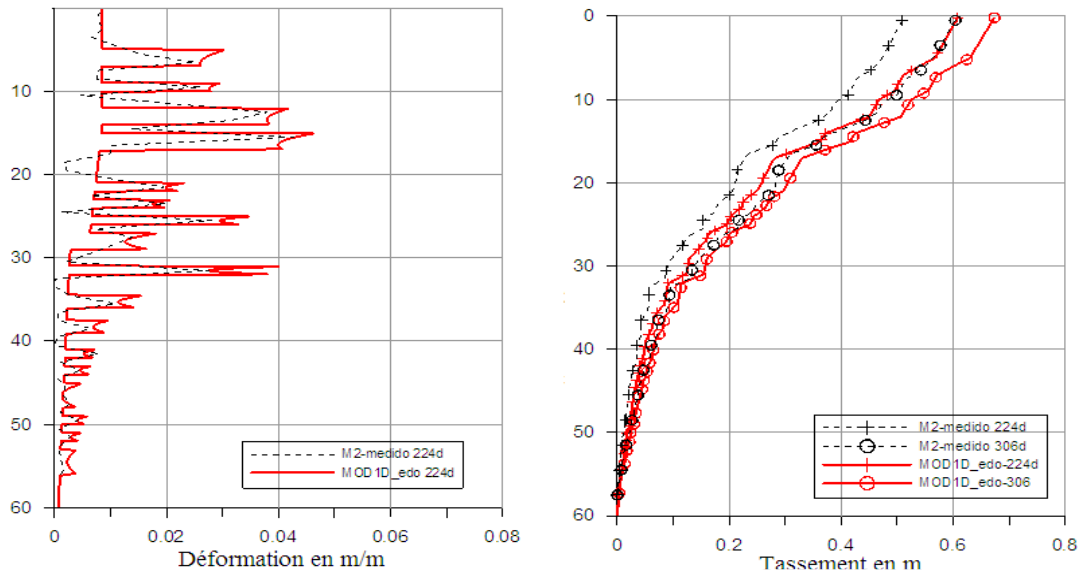


Figure 11 : Distribution des déformations verticales et tassements du sol en fonction de la profondeur – comparaison des résultats d'un essai de chargement avec les calculs prévisionnels à 224 et 306 jours.

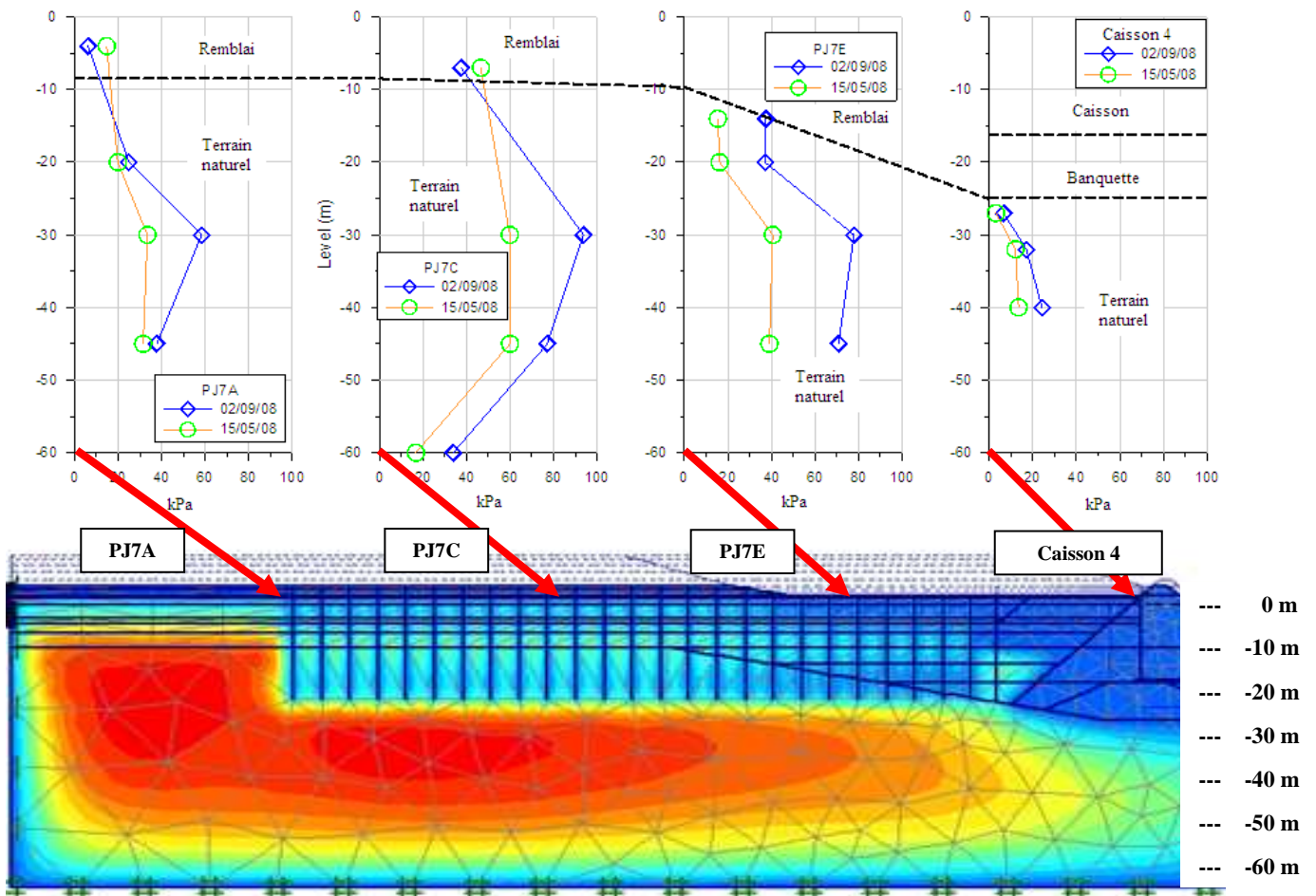


Figure 12 : Distribution des pressions interstitielles dans le sol en fonction de la profondeur – comparaison des mesures (en haut) avec les calculs du modèle prévisionnel (en bas) pour la phase de pré-chargement à +4 mètres. La position des chaînes de CPIs est indiquée par des flèche rouge. La représentation géométriques des calculs du modèle prévisionnel est distordue.

CONCLUSIONS

Compte tenu des avancées technologiques de ces 10 dernières années, l'instrumentation améliore indiscutablement notre connaissance du comportement des sols et des structures ainsi que la gestion et maîtrise des risques des projets portuaires.

L'instrumentation est une partie intégrante et active du Plan de Gestion des risques de construction ou d'exploitation d'infrastructures portuaires avec des objectifs précis :

- . Permettre de vérifier les scénarios de projet et les adapter aux conditions rencontrées ;
- . Vérifier que l'évolution des paramètres suivis lors de la réalisation des travaux ne compromettent pas la sécurité du chantier et la stabilité des structures (existantes et en construction) à court, moyen et long terme ;
- . Alerter avant d'atteindre des niveaux non-acceptables d'évolution des paramètres suivis ;
- . Permettre l'activation opportune de contremesures en cas de détection de variations critiques des paramètres suivis.

Il convient de s'assurer que l'instrumentation déployée répond aux critères suivants :

- . Etre adaptée au contexte spécifique portuaire: typologie d'instrument et de lecture ;
- . Permettre d'anticiper les événements critiques: choix des paramètres représentatifs et définition des limites d'attention et alerte ;
- . Permettre de disposer de données suffisantes pour une interprétation efficace: période d'activation (importance de la Baseline monitoring) et fréquence de lecture ;
- . Offrir une certaine redondance (instruments endommagés ou nécessité de cross-checks) ;
- . Permettre la validation, gestion, interprétation et utilisation de grandes quantités de données : la plateforme SIG.

Les exemples exposés dans le cadre des travaux d'expansion du Port de Barcelone ont clairement démontré les intérêts directs de l'instrumentation pour

- . Assurer la sécurité au cours des travaux ;
- . Vérifier les hypothèses de calculs de dimensionnement ou les ajuster le cas échéant ;
- . Adapter les méthodes constructives et le programme des travaux
- . Anticiper et contrôler le comportement des sols et des structures sur le long terme.

REMERCIEMENTS

Pour leur collaboration professionnelle tout au long du projet et leur aide au moment de réaliser cet article :

AUTORITE PORTUAIRE DE BARCELONE

JAVIER UZCANGA SALAS

DAMIEN TAMAGNAN

DANI TARRAGO