

The background image is a composite of two aerial views of a port construction site. The left side shows a large, rectangular concrete structure under construction in the water, with a boat moving nearby. The right side shows a completed or nearly completed port area with several large blue gantry cranes and a ship docked at a pier.

*Journée technique et scientifique du CFMS,
coorganisée avec la FNTP - 16 septembre 2021
Amphi Auguste Brûlé, FNTP, 3 rue de Berri, Paris*

Ouvrages Portuaires

Calais Port 2015 : Remblai hydraulique et môle central avec caisson

Intervenants : Ph. Graille et L. Moscone (ARCADIS)



Objectifs du projet

Adapter le port aux évolutions futures des trafics

- Augmentation taille des navires (240m)
- Augmentation prévisionnelle des trafics
- Évolution des modes de transport des marchandises (fret, cabotage)
- Adaptabilité des aménagements à long terme et à très long terme

Montage contractuel

Port de Boulogne/Mer-Calais (SEPD)

- Exploitation commerciale
- 50 ans à partir de 2015

Calais Port 2015 (SPD)

- Réalisation, entretien et maintenance
- Mise en service: 2021

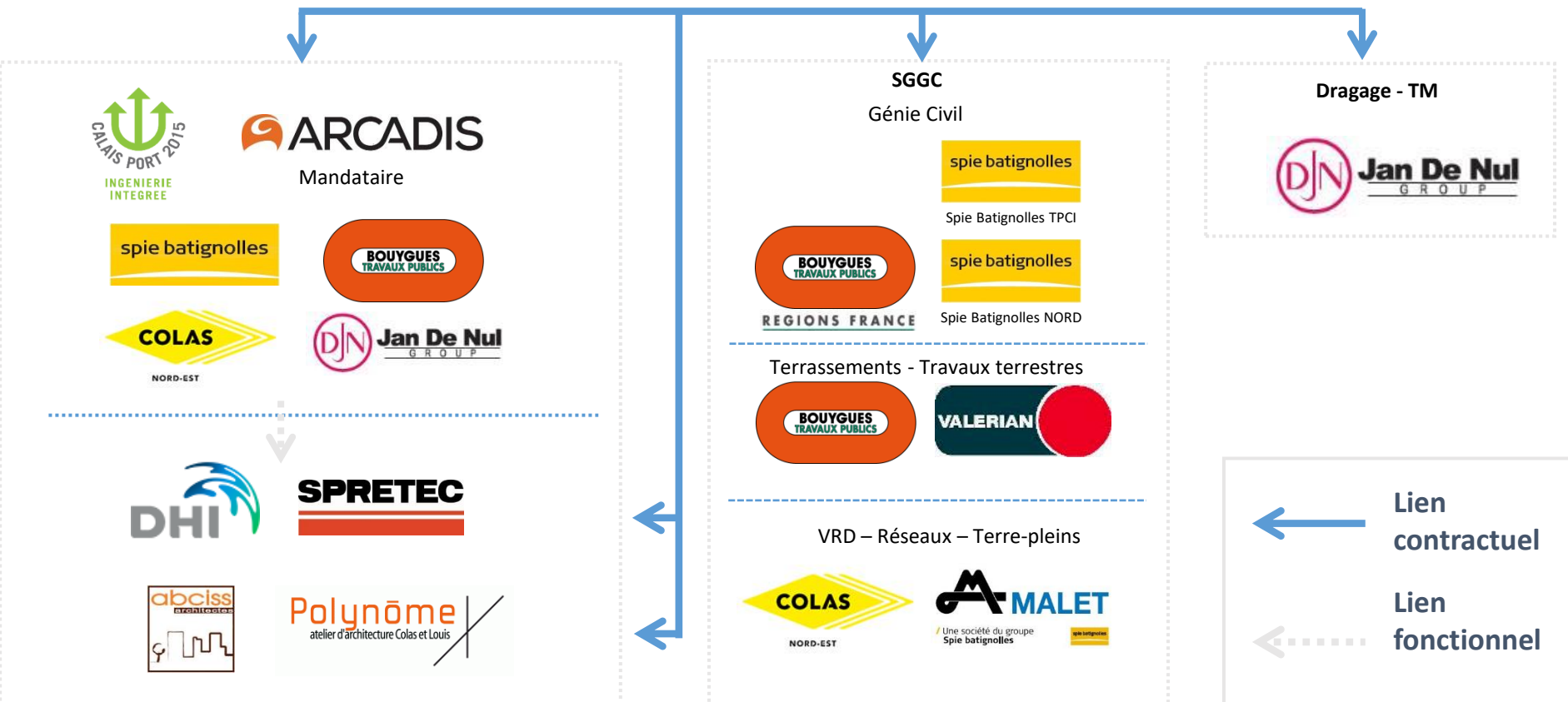
Livraison de l'ouvrage par le Concepteur-Réalisateur



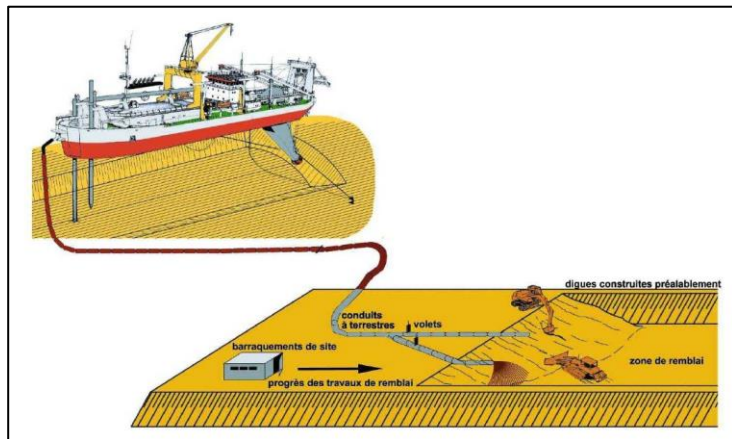
Groupement Concepteur - Réalisateur



Mandataire du Groupement



Travaux de remblaiement hydraulique



1ère phase de remblaiement hydraulique

- De juillet et août 2016
- Remblaiement hydraulique : environ 800 000 m³

2ème phase de remblaiement hydraulique

- De mars à mai 2017
- Remblaiement hydraulique : environ 3 200 000 m³
- Préchargements nécessaires directement mis en place lors de ce remblaiement hydraulique

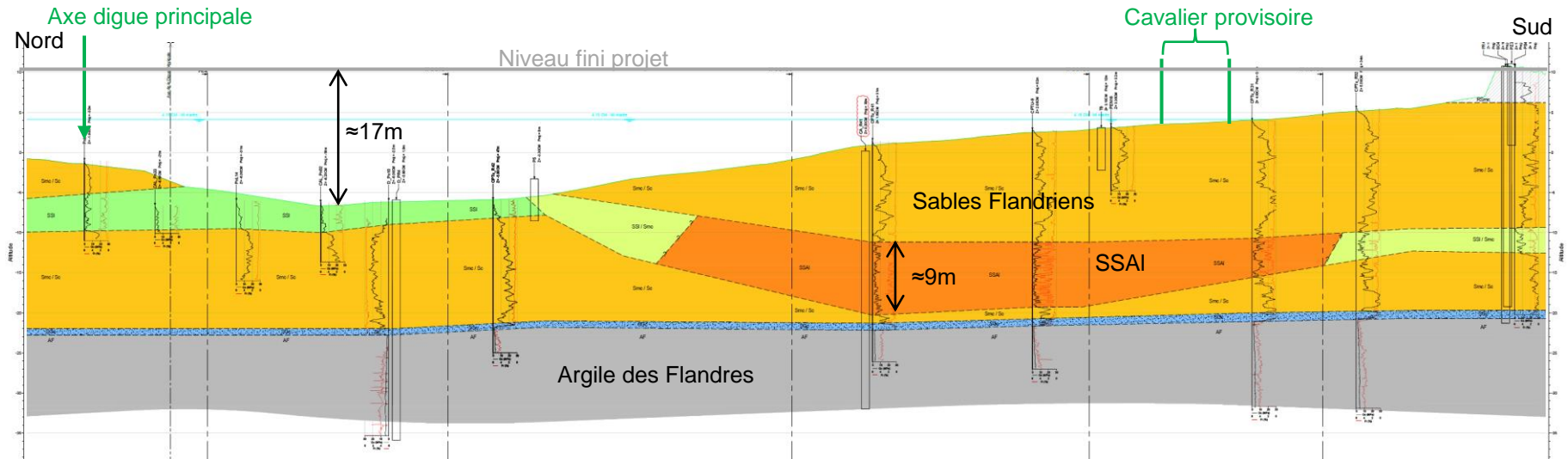
Conditions géotechniques du site

Stratigraphie du site :

- Sables Flandriens avec Sables Silteux Argileux lâches (SSAI)
- Argile des Flandres : argile raide et surconsolidée

Remblais hydrauliques :

- Sables relativement propres d'épaisseur variable



Traitements des terrains

Conception des traitements Terrains en place et Remblais hydrauliques repose sur :

- Le respect des objectifs de tassements imposés par le cahier des charges du projet
- L'atteinte d'un objectif minimal de densification des remblais

Consolidation de SSAI :

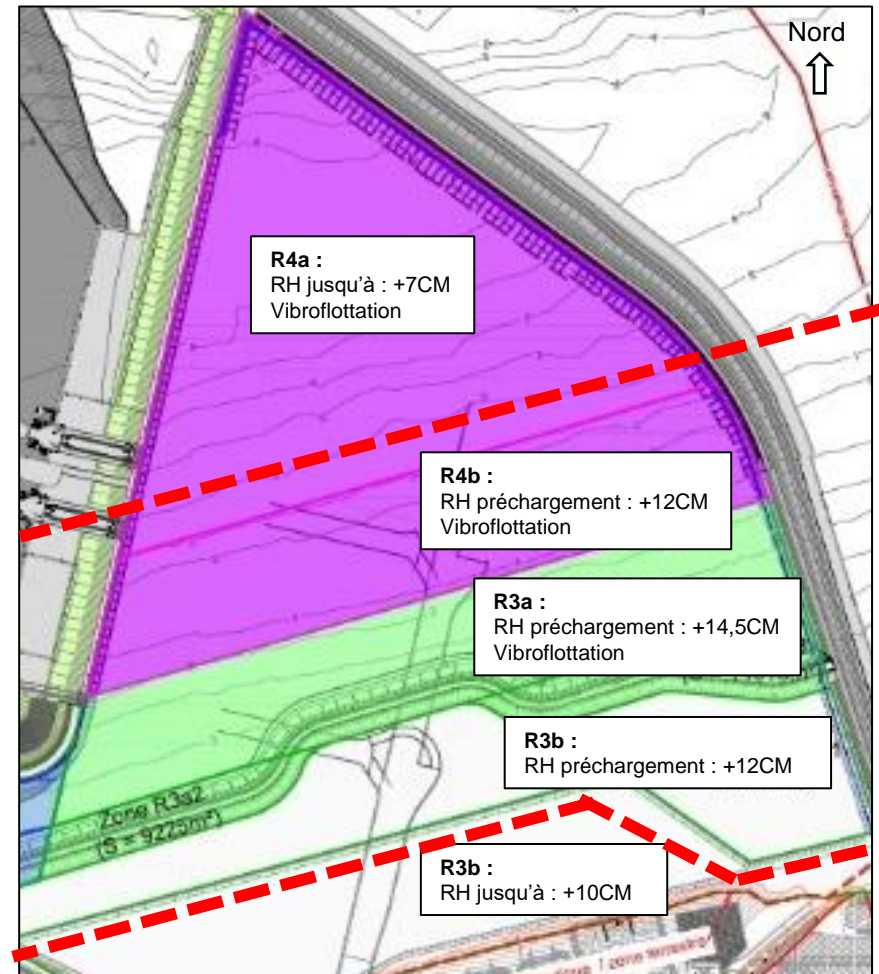
- Préchargements (6 à 8 mois) directement mis en place lors de la place des remblais hydrauliques

Traitement des Remblais hydrauliques dépend de :

- L'épaisseur des remblais à traiter
- La nature de ces remblais : essentiellement des sables propres avec quelques passages silteux
- La méthode et les conditions de mise en œuvre des remblais par refoulement (densification par action combinée du compactage hydraulique et du passage répété des chenilles des bulldozers)

Traitements des RH par :

- Vibrocompactage
- Compactage dynamique en complément du VC



Remblais	Remblaiement hydraulique	Préchargements	Enlèvement précharg. / mouvements Rb*	Traitements terrains : VC et/ou CD
R3b	07/16 à 08/16 : RH phase1	09/16 à 02/17 : 6 mois	09/17 à 11/17	09/17 à 12/17
R3a	03/17 à 05/17 : RH phase 2	06/17 à 01/18 : 8 mois	02/18 à 05/18	08/17 à 01/18
R2		06/17 à 11/17 : 6 mois	12/17	10/17 et 01/18
R4b		06/17 à 12/17 : 7 mois	01/18 à 02/18	07/17 à 12/17
R4a		Non concerné	12/17 à 05/18	06/17 à 10/17
R1		Non concerné	Non concerné	08/17 à 10/17

Rb : remblais ; VC : vibrocompactage ; CD : compactage dynamique

Traitements des remblais hydrauliques

Vibrocompactage

- Maille triangulaire : 4,4 m ; 2 ateliers avec aiguilles en tandem
- Surface traitée : 265 000 m² ; points de traitement (y compris reprises) : 17 000 u

Compactage dynamique :

- Maille carrée : 5 m ; Masse cylindrique acier de 21 tonnes, Hauteur de chute de 20 à 25 m
- Profondeur d'amélioration : environ 7m
- Surface traitée : 162 000 m² ; points de traitement (y compris reprises) : 16 000 u

Compactage de surface :

- Compacteur à bille polygonale oscillante (type V6), bille de 26 tonnes
- Profondeur d'amélioration : 1 à 2 m



Contrôle de la compacité des RH

Contrôles basés sur CPT

En phase conception :

- Etablissement d'un profil de résistance de pointe (q_c) minimal de façon à respecter un objectif de densité relative (D_r)

Contrôles chantier :

- Campagne CPT de référence (environ 1 CPT / 1 000 m²) sur l'ensemble RH pour cartographier les zones de remblais à densifier et définir les modalités de traitement.
- Après traitement (par vibrocompactage et / ou par compactage dynamique) ou absence de traitement (pour les zones de remblais hydrauliques ayant déjà atteint leur objectif de compacité) :
 - ✓ Campagne CPT de réception (environ 1 CPT / 200 m²)
 - ✓ Le cas échéant : Traitements complémentaires, puis nouvelle campagne de CPT sur zones concernées

Quantités :

- Campagnes CPT de contrôle des remblais hydrauliques (avant et après traitement) : 3 500 u ; 35 000 ml



Enjeux du projet vis-à-vis des tassements

Critères de tassement

Critères de tassements du cahier des charges pour l'ensemble des terre-pleins = critères en cours d'exploitation des plateformes :

- Tassement instantané absolu ≤ 1 cm sous application des charges d'exploitation
- Tassements absolus différés ≤ 5 cm pour une durée de service de 25 ans, avec un maximum de 0,5 cm par an (sauf la 1^{ère} année d'exploitation : 1 cm)

Démarche de conception

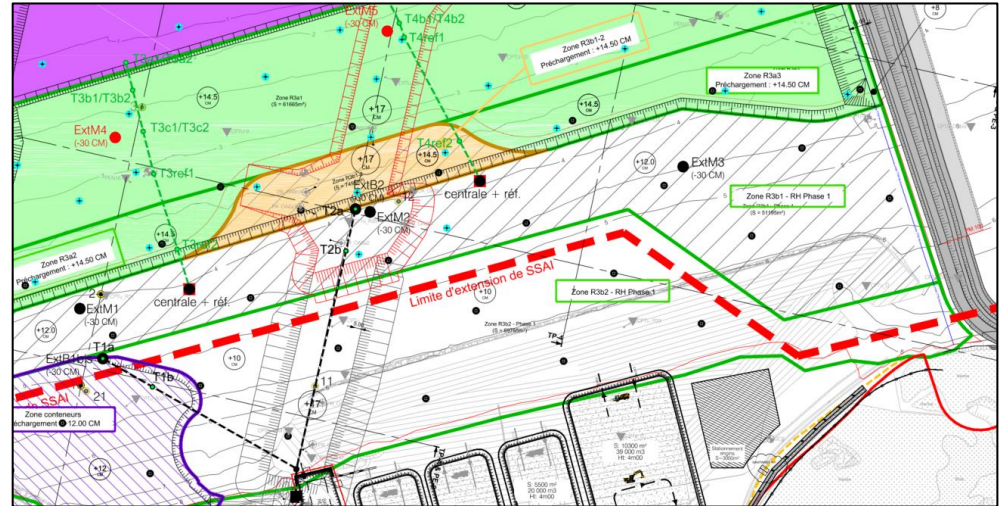
- Elaboration de modèles géotechniques pour l'estimation des tassements sur la base de l'ensemble des reconnaissances du projet pour chacun des remblais
- Estimation des tassements à partir de ces modèles
- Comparaison des estimations avec les critères définis
- Le cas échéant, réalisation d'une seconde estimation après prise en compte d'un traitement de terrain adapté (préchargement, traitement par VC ou CD,...) et nouvelle comparaison des résultats avec les critères définis.

=> Définition d'un plan de traitement de terrain

Vérification des critères :

- Pendant l'exploitation des terre-pleins : suivi de bornes de tassements réparties sur l'ensemble des plateformes
- En cours de travaux : vérification de la validité des hypothèses prises en compte dans les calculs de tassements par comparaison entre estimation de l'évolution des tassements et mesures pendant la durée du chantier

Plan d'instrumentation



Plaques de tassements

- Mises en place au niveau fini des remblais préchargés ou non
- Répartis sur l'ensemble de la plateforme
- Relevés hebdomadaires par géomètre

Chaînes tassométriques

- Mises en place avant remblaiement hydraulique
- 4 chaînes d'environ 150 ml positionnées au niveau de l'ancienne plage
- Mesures automatiques

Extensomètres magnétiques en forage

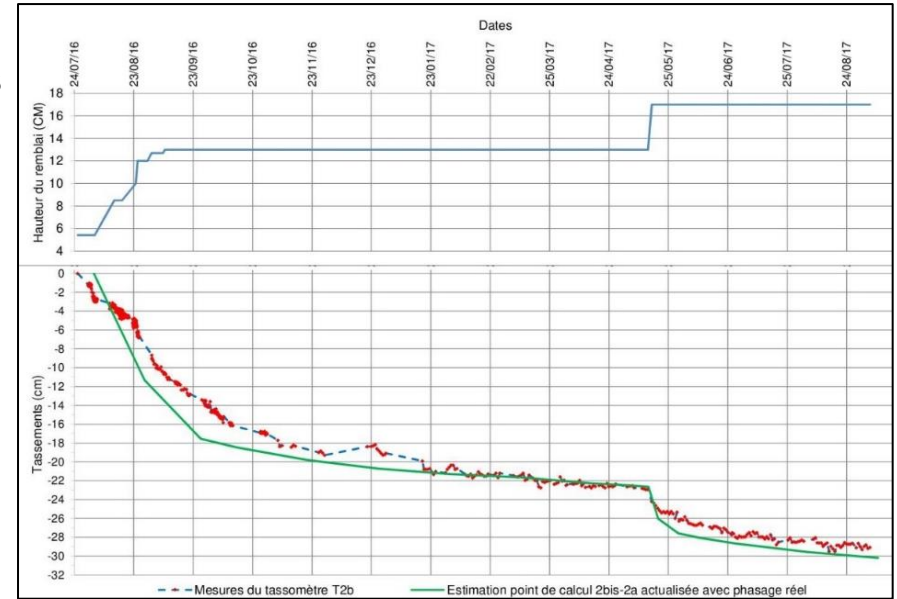
- Mises en place dans forages au niveau fini des remblais préchargés ou non
- Nombre : 15 ; Longueur : 40 à 50 m ; 9 à 10 bagues
- Mesures manuelles

Exploitation des mesures :

Comparaison directe entre estimations et mesures

Pendant préchargement

- Exemple de comparaison entre estimations au droit d'un point de calcul et mesures d'une chaîne tassométrique, après recalage du phasage de mise en place des remblai

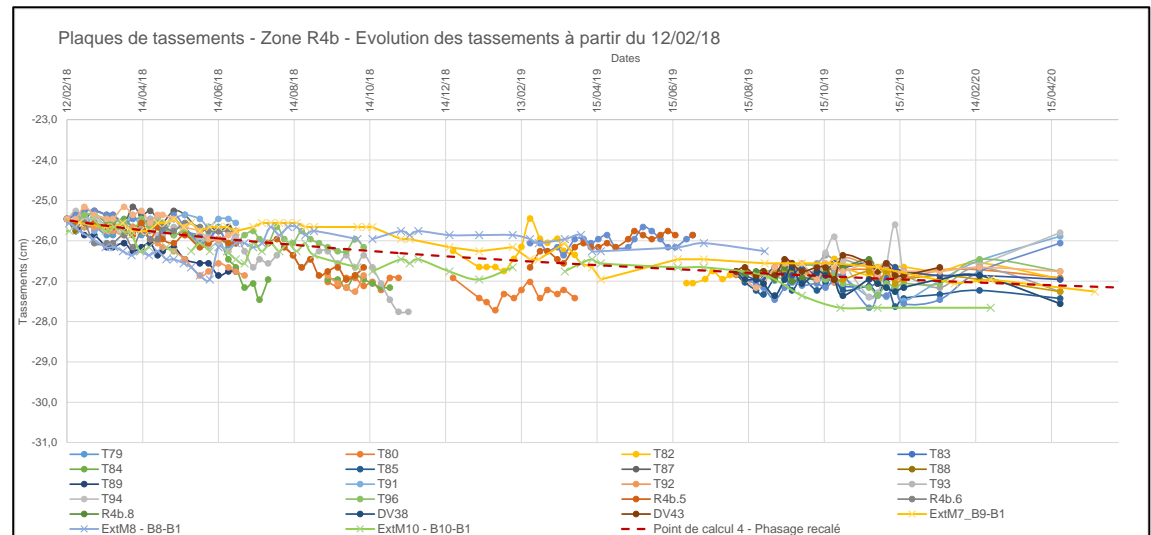


Après enlèvement des préchargements

- Exemple de comparaison entre estimations au droit d'un point de calcul avec les mesures des plaques de tassements et celles de 3 extensomètres entre février 2018 et avril 2020

⇒ Difficulté d'avoir des mesures en continue pour les plaques et perturbations par travaux

⇒ Extensomètres présentent mesures plus continues, mais difficiles à mettre en place et représentent une gêne pour les travaux

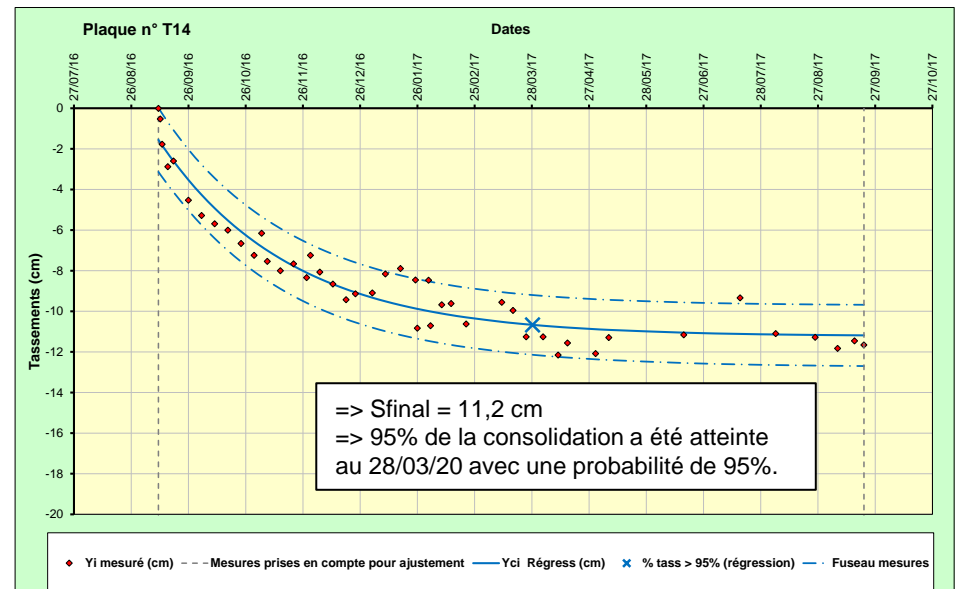
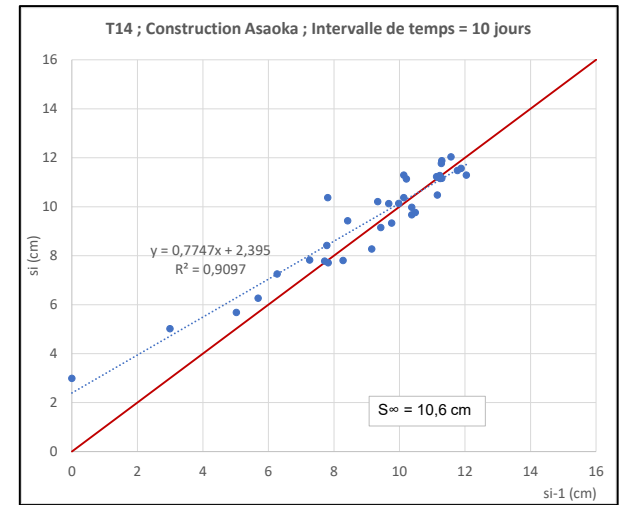


Exploitation des mesures :

Utilisation de méthodes d'ajustement pour la prédiction de l'évolution des tassements

Consolidation primaire et enlèvement des préchargements

- Méthode d'Asaoka 1978 usuellement utilisée mais plusieurs inconvénients :
 - ✓ Le pas des mesures doit être constant
 - ✓ Dans la représentation graphique, l'intersection de la bissectrice et des points du graphe est généralement mal définie
 - ✓ Il est impossible de déterminer l'incertitude entachant les résultats
 - Méthode alternative d'ajustement des tassements par une loi exponentielle : Méthode de Recordon 1988, reprise par Baguelin 1999. Avantages :
 - ✓ Cohérente avec équations de la théorie de la consolidation de Terzaghi et équivalente à la méthode d'Asaoka
 - ✓ La détermination du tassement final et du degré de consolidation primaire par ajustement visuel ou automatique
 - ✓ Calcul des incertitudes entachant les résultats
 - ✓ Applicable à l'analyse des tassements secondaires en remplaçant la loi exponentielle par une loi logarithmique
- ⇒ Exemple avec les mesures d'une plaque de tassement



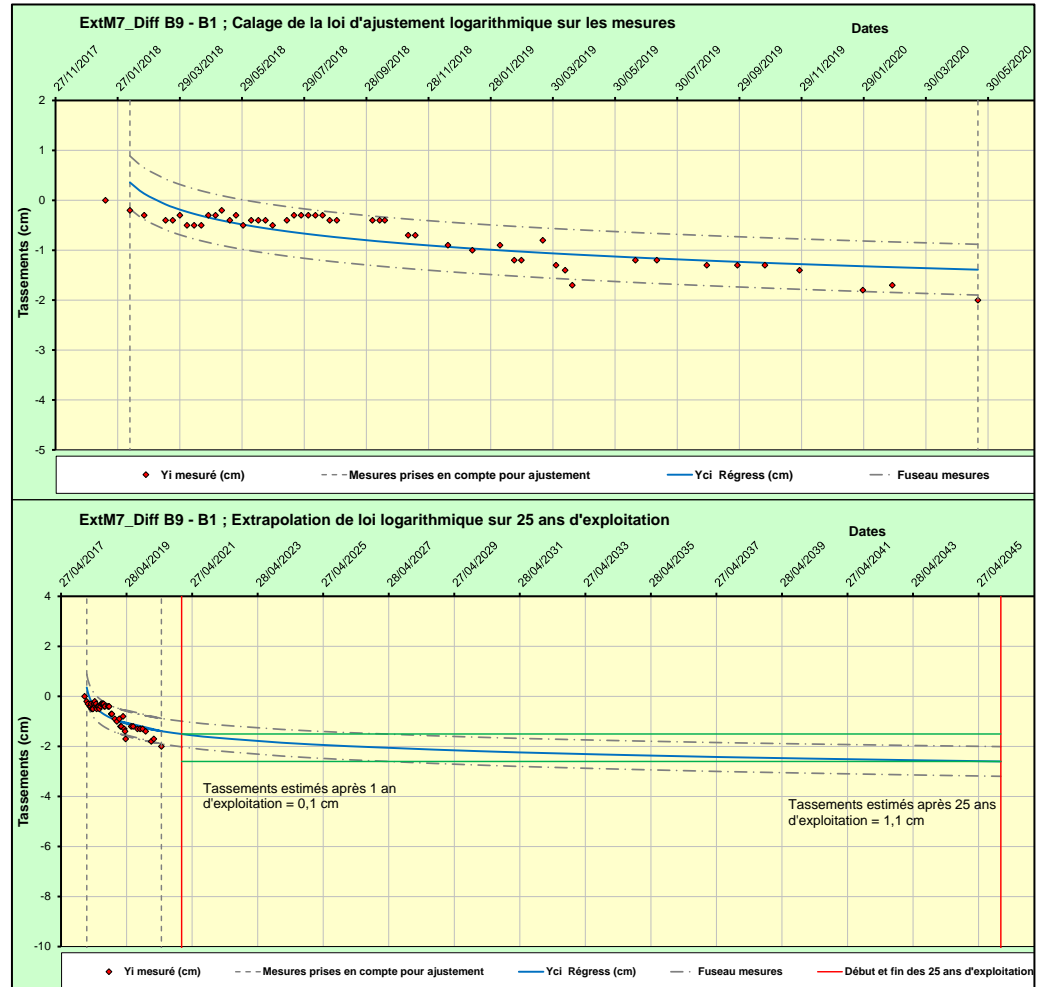
Exploitation des mesures :

Utilisation de méthodes d'ajustement pour la prédiction de l'évolution des tassements

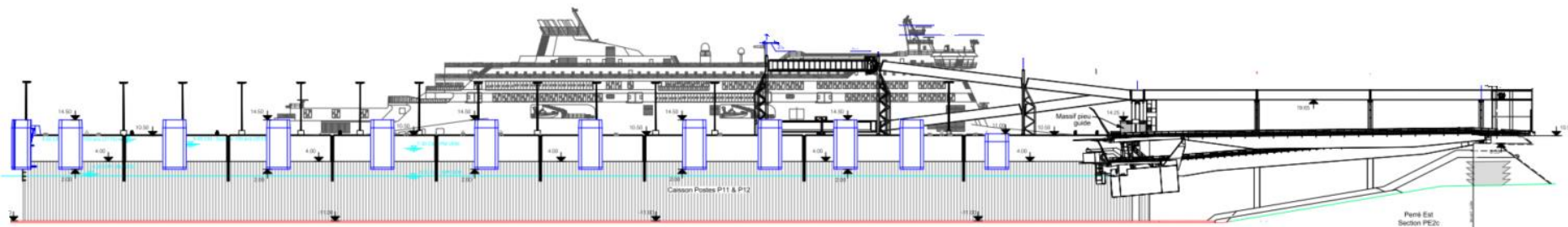
Consolidation secondaire et vérification des critères de tassements à long terme

- Utilisation de la même méthode afin de s'intéresser à la consolidation secondaire des terrains : fluage pour les terrains argileux, « ageing » pour les terrains sableux
- Remplacement de l'équation décrivant la consolidation primaire par celle de la consolidation secondaire
- Vérification des critères du cahier des charges après 25 ans d'exploitation

⇒ Exemple d'ajustement et d'extrapolation avec les mesures d'un extensomètre



Le môle P11-P12 - Fonctionnalités – principales caractéristiques



- Accueil de ferries de 240 m, jusqu'à 8,50 m de tirant d'eau
- Longueur x largeur du môle : 288 m x 27 m
- Hauteur totale : 22 m, fonds protégés par matelas anti-affouillement à -11.00 CM
- Prévues pour passerelles piétonnes ultérieures



Les passerelles roulières flottantes

- Passerelle flottante double pont ballastable :
 - rampe supérieure : 3 voies VL ou 2 PL
 - rampes inférieures : 2 x 1 voie PL
- Longueur x largeur : 95 m x 34 m
- Poutre d'embarquement flottante adaptable à la largeur navire
- Guidage par pieu guide Ø2000

Constitution du caisson

Palplanches

- Rideau mixte HZM1080A double S430 (lg 33,50m)
- Palplanches intercalaires AZ18-700 S355 (lg 25,50 m)
- Rideaux intercalaires transversaux (closoirs) tous les 29 m) AZ32-750 S430 constituant 10 cellules

Poids total : 7 434 Tonnes

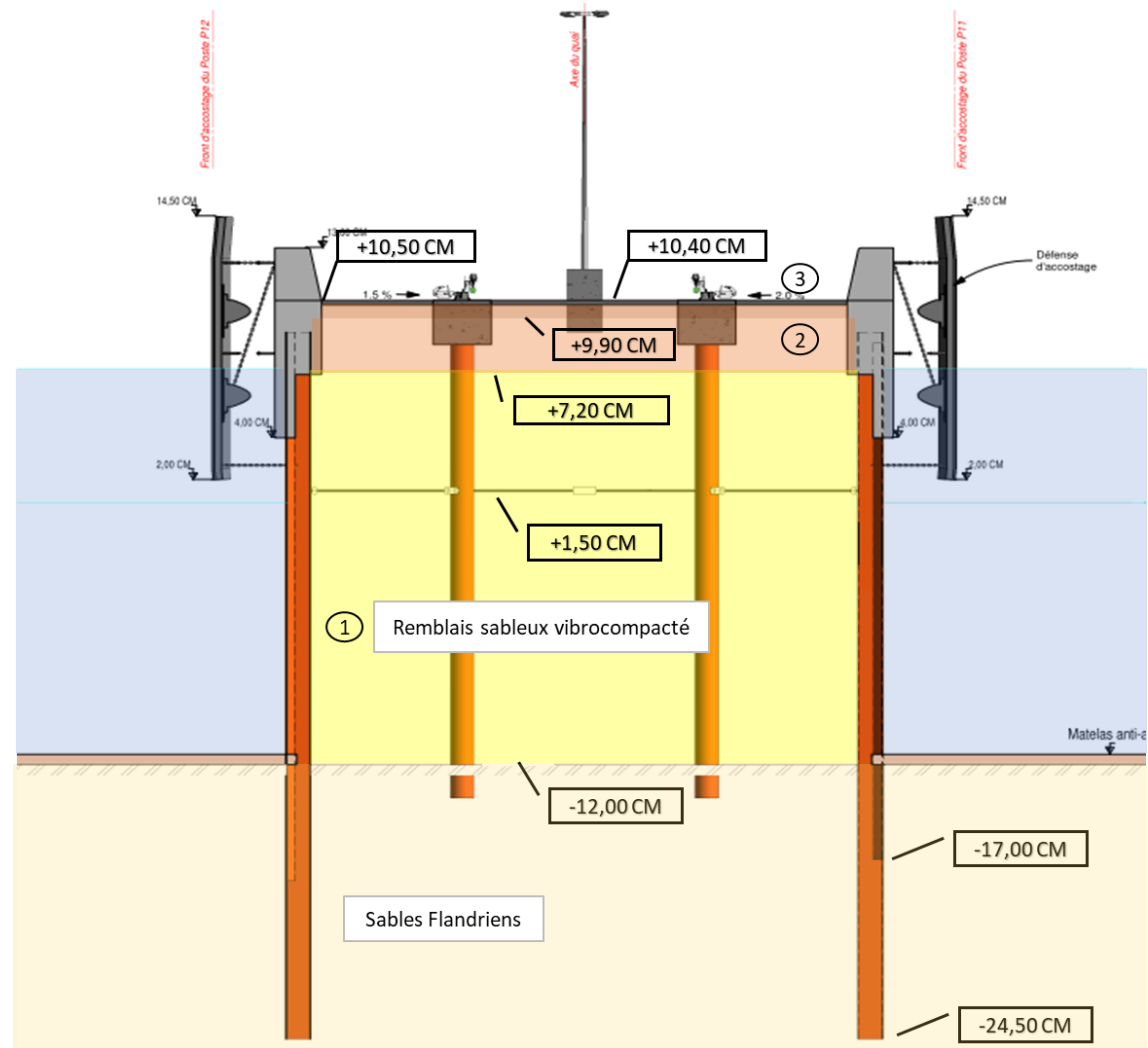
Tirants

- Tirants transversaux $\varnothing 100\text{mm}$ M104 Grade700 multi-articulés à la cote +1,50 CM
- Tirants longitudinaux dans les caissons d'about $\varnothing 115\text{mm}$ M118 Grade700 multi-articulés à la cote +2,00 CM

Poids total 455 Tonnes

Poutre de couronnement béton armé

- Filante avec joints à emboîtements tous les 40 à 50 m 2,00 m x 3,50 m de hauteur de +7,00 CM à +10,50 CM
- Retombée de poutre de +4,00 CM à +7,00 CM
- Réhausses ponctuelles pour maintien défense

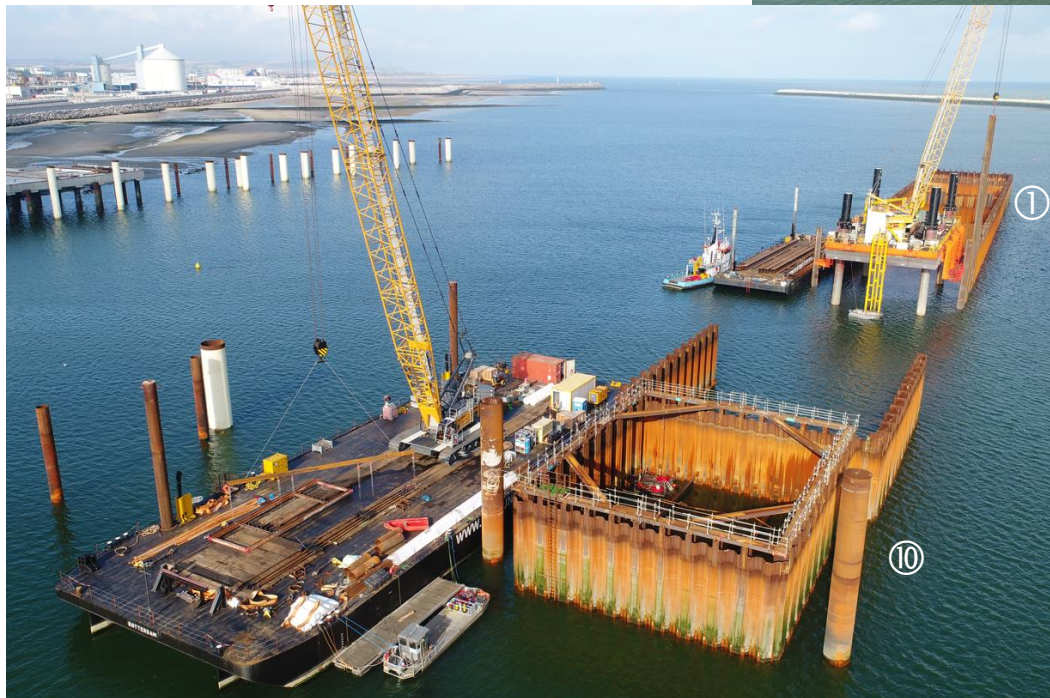
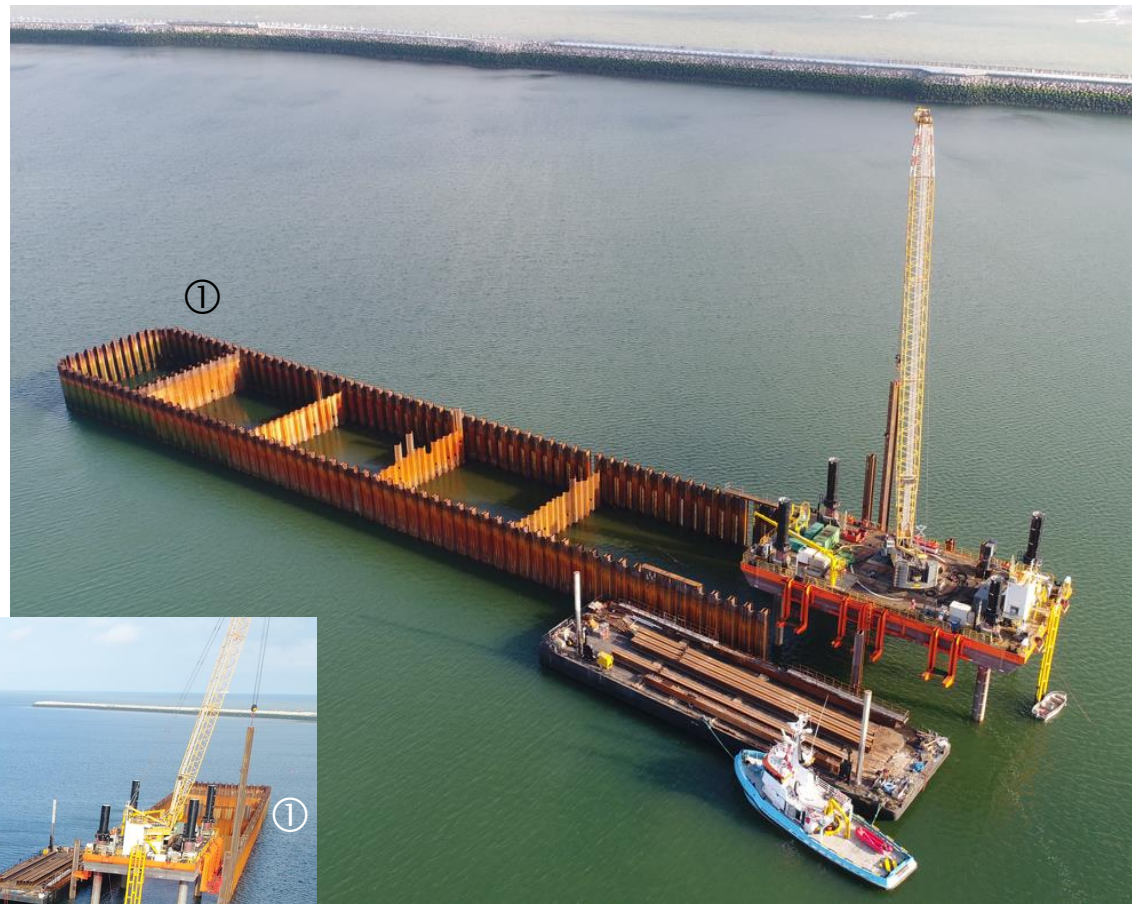


Mode constructif

Mise en œuvre des rideaux par vibrofonçage et battage par moyens exclusivement maritimes

- 1 plateforme auto-élevatrice avec grue de 250 T et système de guidage des HZM
- 1 barge flottante avec grue 250 T pour pose tirants et autres travaux annexes

- ⇒ Travail en mer ouverte avec abri partiel de la digue
- ⇒ Vérification des rideaux à la fatigue (agitation portuaire)



Cellules d'extrémité ① et ⑩ auto-stables avec tirants transversaux et longitudinaux

Cellules intermédiaires ② à ⑨ en fonctionnement transversal avec uniquement des tirants transversaux

⇒ Intérêt d'un découpage en cellules

Mode constructif

Cellule d'extrémité n° 1

- Réglage des tirants
- ⇒ Rôle fondamental des plaquettes d'articulation pour la relaxation des efforts en compression

Mise au point des phases transitoires se sont avérées très exigeantes

- ⇒ Phasage de réalisation précis
- ⇒ Justification de nombreuses phases intermédiaires travaux, modèles de calcul longitudinaux et transversaux
- ⇒ Cas de charge tempête dans le bassin pris en compte
- ⇒ Dialogue constructif et permanent

Ingénierie / Méthodes / Travaux



Mode constructif – Phases de remplissage de chaque cellule

Phase 1

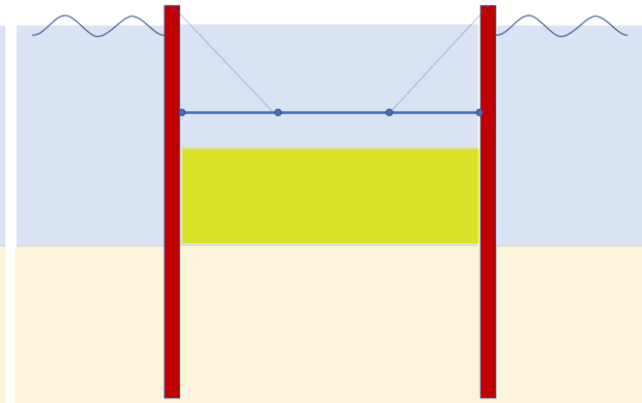
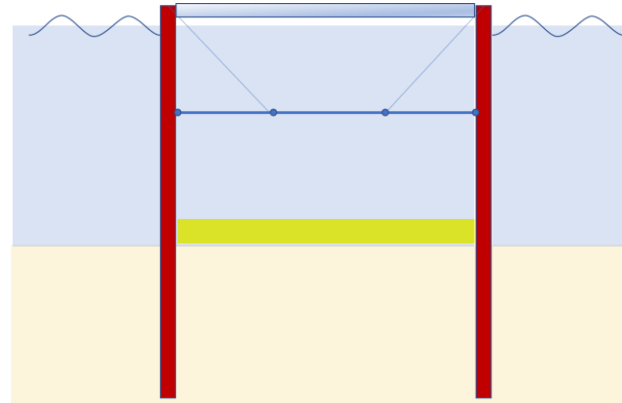
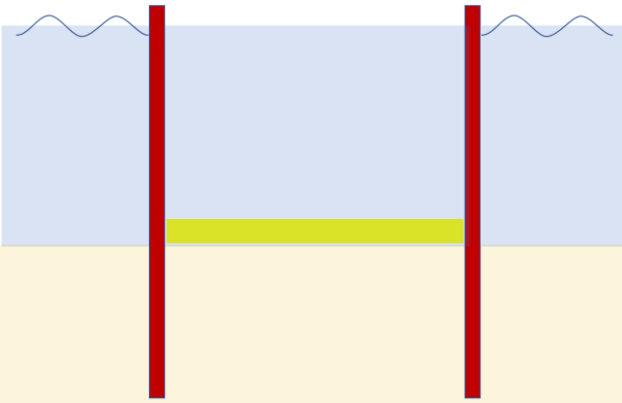
- Remblaiement sur 2 m d'épaisseur moyen
- Pas d'effet sur les rideaux
- Encore grande souplesse des rideaux

Phase 2 : Pose boutons en tête puis tirants

- pour rigidifier l'écartement entre rideaux
- pour support réglage tirants
- pour éviter toute mise en compression du tirant posé sous l'effet de la houle

Phase 3 :

- Remblaiement complémentaire
- Enlèvement boutons pour réutilisation cellules voisines
- Conservation suspentes tirants mais plus de risque de mise en compression des tirants sous l'effet de la houle



Mode constructif – Remblais marins

Origine

- Livrés par la société CFG après dragage au large de la Belgique

Caractéristiques

- Sable de type D1 au sens du GTR
- Pourcentage de fines < 10% (4 à 6%)
- Vibrocompactable
- Autostable avec un coefficient d'uniformité $C_u < 13$

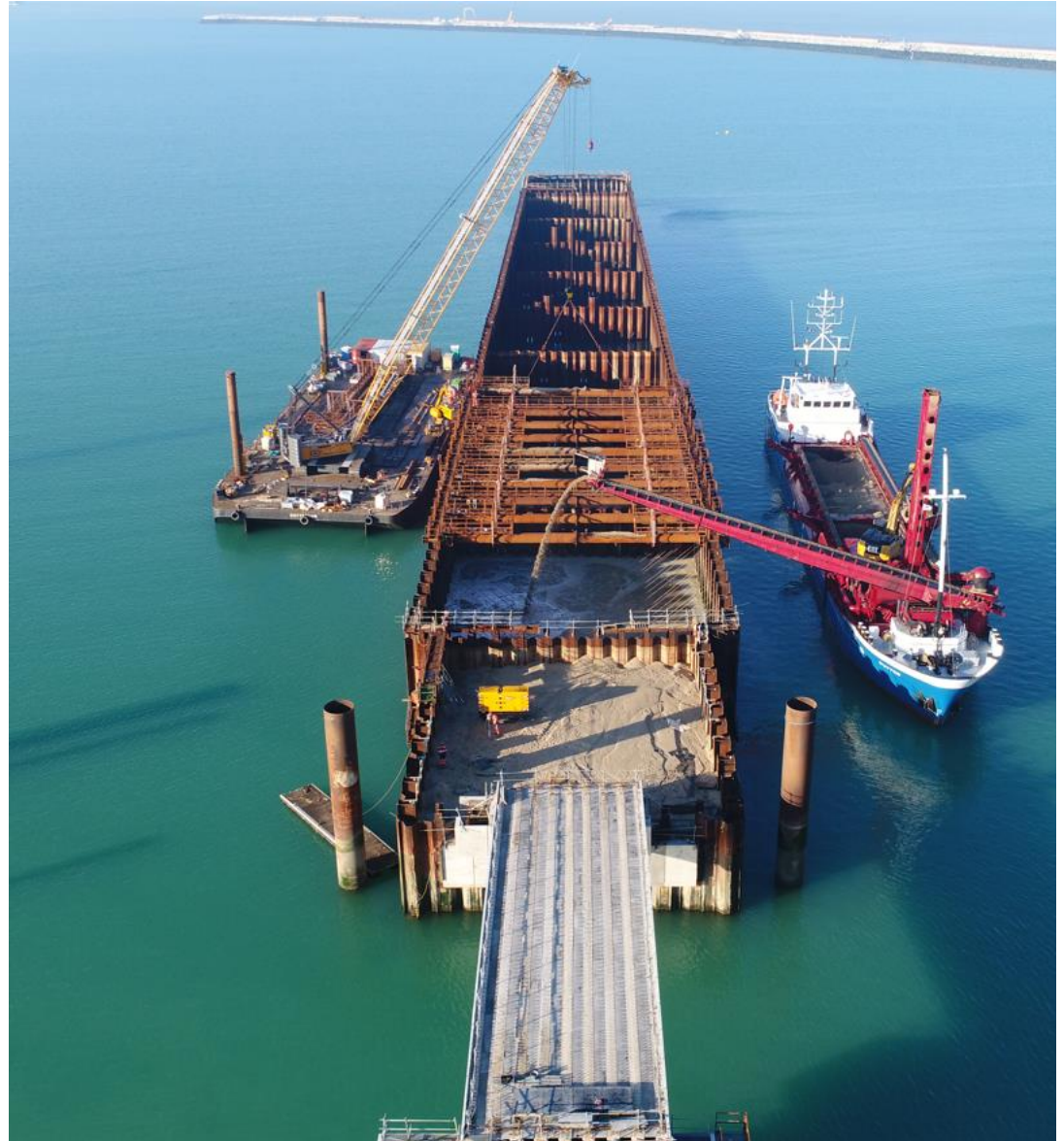
Mise en œuvre

- A la bande transporteuse à partir d'un navire de 1 500 m³ faisant la navette entre le site d'extraction et le chantier
- Cycle de 12 heures dont 3 h de déchargement
- Etat lâche dans le caisson nécessitant forcément une densification

Caisson 9 en cours de remplissage

Caisson 10 rempli et vibrocompacté (plot d'essai achevé)

Pont d'accès pour accès terrestres en cours



Mode constructif – Problématiques des fines

Problématique

- Le d_{50} du sable reste fin et laisse craindre à terme des pertes de fines au travers des serrures des palplanches sous l'effet des gradients hydrauliques
- Pathologie déjà constatée par le passé avec les sables de Calais

2 solutions envisagées

- Recherche d'un sable grossier $d_{50} > 0,8 - 1$ mm
- Mise en œuvre d'un géotextile filtre en pontage des serrures des palplanches intercalaires

Mise en œuvre

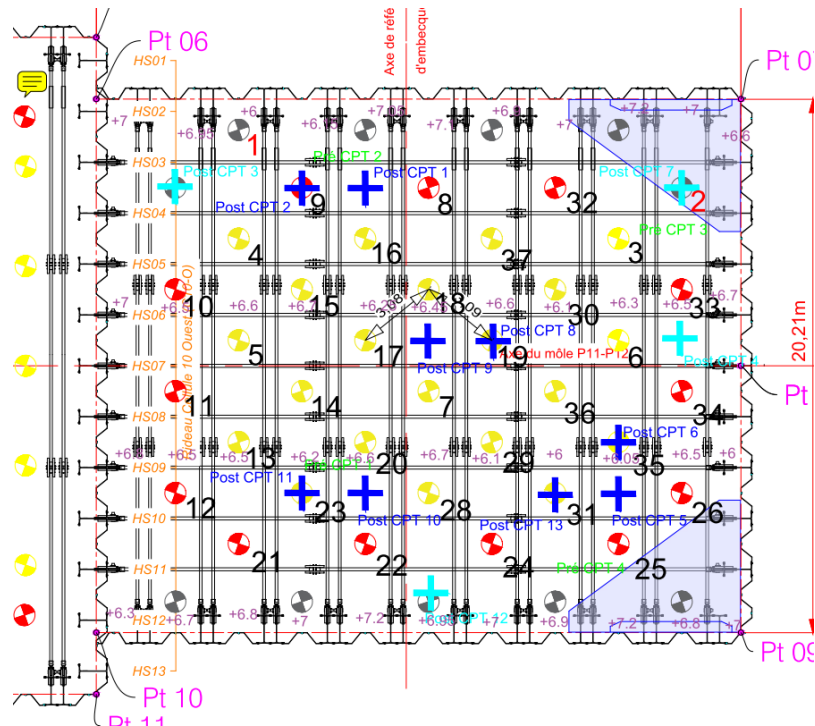
- 2ème solution retenue après réalisation d'un plot d'essai terrestre



Mode constructif – Améliorer la compacité des remblais

Objectifs

- Le sable simplement déversé dans les cellules reste dans un état lâche
- Compactage nécessaire pour :
 - limiter les tassements sous charges d'exploitation (< 1 cm à court terme)
 - Limiter les déformations transversales du caisson sous les charges d'accostage (réaction des défenses d'accostage de près de 500T) et d'amarrage (150 T par bollard)
- Améliorer la résistance au cisaillement



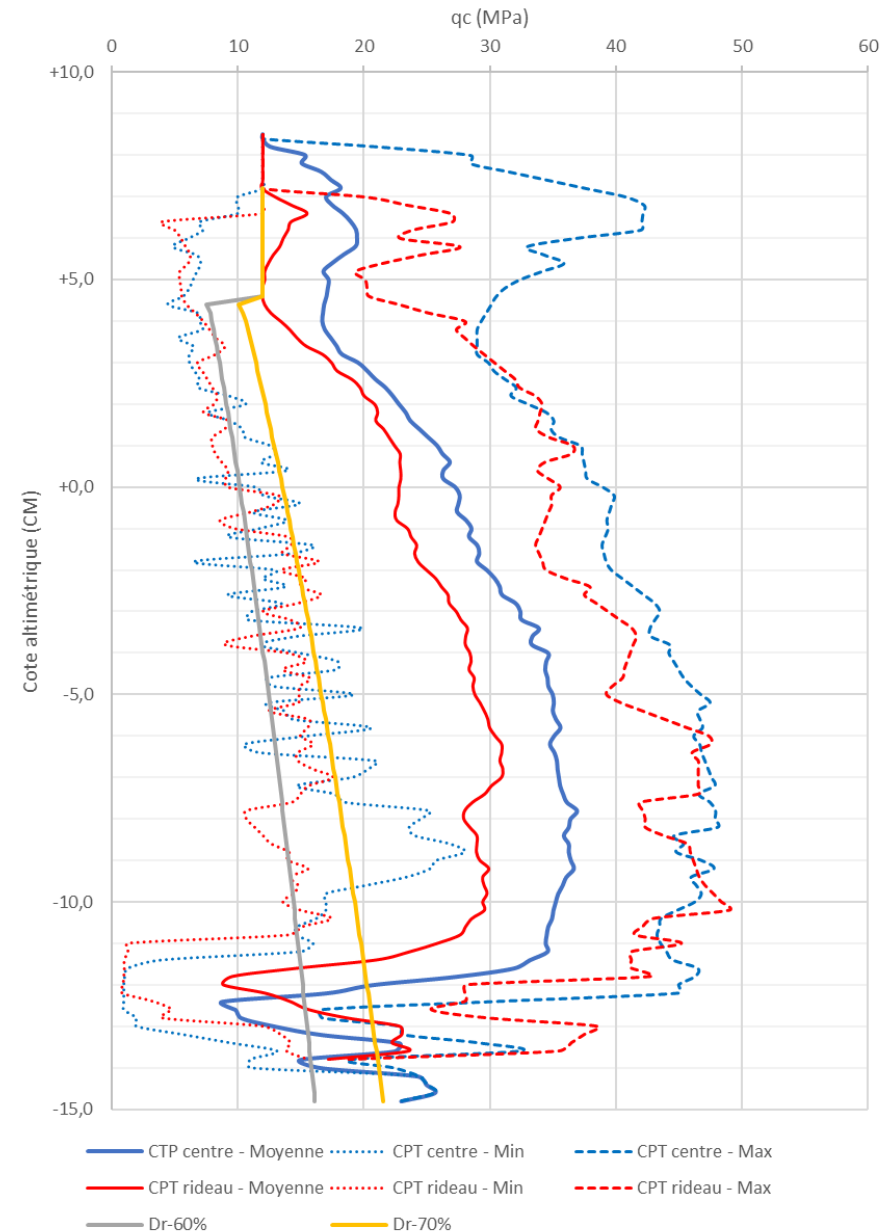
Mise en œuvre

- Traitement de toute la hauteur des remblais (19 m de -12 CM à +7 CM)
- Maillage des points de traitement imposé par la position des tirants (globalement 3 m entre les points)
- Minoration de l'énergie de compactage aux abords des rideaux et traitement à marée montante haute (démarrage du traitement au-dessus de la marée moyenne)
- Plot d'essai sur cellule 10

Vibrocompactage - Résultats

- A l'issue des traitements les volumes « perdus » en surface représente environ 8% de la hauteur de traitement
- Contrôles réalisés par le biais de 90 CPT profonds répartis uniformément sur l'ensemble des cellules en zone centrale et proche rideaux
- Les valeurs de q_c à avoir pour obtenir une densité relative de 60 % ou 70 % sont très largement dépassées
- Les compacités proches rideau sont moindres qu'au centre des cellules mais restent néanmoins suffisantes
- Il est systématiquement mis en évidence une couche pluri-décimétrique de très faible résistance à la cote -12 CM. Il s'agit très vraisemblablement d'horizons silteux résultant des dépôts après les opérations de dragage / nettoyage des fonds et durant toutes la phase de mise en œuvre des rideaux
- Ces mauvaises caractéristiques localisées en base de remblai ne sont pas préjudiciables au comportement d'ensemble des remblais
- Compactage par moyens terrestres « classique » par couche de 50 cm au-dessus de la cote +7,00 CM.

$q_c(Z)$ pour tous les caissons (hors CPT C10 proche rideaux)



Merci de votre attention

Et vos questions ?

