



HAL
open science

Injections solides de confortement du quai Freycinet 12 à Dunkerque

Adrien Meyer, Francois Louvel

► **To cite this version:**

Adrien Meyer, Francois Louvel. Injections solides de confortement du quai Freycinet 12 à Dunkerque. Rencontres de l'Ingénierie Maritime 2024, Builders École d'ingénieurs, Jun 2024, Caen, France. hal-04710874

HAL Id: hal-04710874

<https://hal.science/hal-04710874v1>

Submitted on 26 Sep 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modèle à utiliser pour l'article

Nom et adresse mail de l'auteur correspondant

Injections solides de confortement du quai Freycinet 12 à Dunkerque

Auteurs : MEYER Adrien¹ & LOUVEL François² (Times New Roman, 12, Centré)

¹Spie Batignolles fondations, 30 avenue du Général Gallieni 92000 Nanterre, France, e-mail : adrien.meyer@spiebatignolles.fr

²Spie Batignolles fondations, 30 avenue du Général Gallieni 92000 Nanterre, France, e-mail : francois.louvel@spiebatignolles.fr

RESUME : Texte du résumé (100 à 250 mots) en français (utilisez le style Résumé).

Lors des tempêtes de février 2022, les amarres d'un ferry, en escale sur le quai Freycinet 13 de la darse VI du port de Dunkerque, ont cédé. Des remorqueurs ont été mobilisés pour l'assister durant des heures. Les turbulences générées par leurs hélices ont créé un affouillement de 4 à 5 m de profondeur sur un linéaire de 60 m le long du quai Freycinet 12 opposé. Cet affouillement est à l'origine de plusieurs désordres constatés sur l'ouvrage, notamment un affaissement du terre-plein sur une surface de 3000 m². Les désordres étant sensiblement situés en milieu de quai, l'exploitation du quai et du terre-plein était fortement impactée, nécessitant des travaux de confortement par injections solides, préalables à la remise en service. Les reconnaissances par sondages pénétrométriques ont permis de faire un état des lieux et de définir la solution technique adaptée. Le confortement par injections solides a été réalisé sur une zone de 100 m de long, par 428 forages et près de 1600 m³ de mortier mis en œuvre. Les sondages de contrôle et la mission géotechnique G5 ont conclu sur la bonne exécution des travaux pour la remise en exploitation du quai.

MOTS CLEFS : Dunkerque, Port, Réhabilitation, Confortement, Injection solide, Géotechnique (3 à 6 mots clefs)

ABSTRACT (en anglais) : Texte du résumé (100 à 250 mots) en anglais (utilisez le style Résumé).

During the storms of February 2022, the moorings of a ferry calling at Quai Freycinet 13 in Dock VI in the Port of Dunkirk gave way. Tugs were mobilised to assist for hours. The turbulence generated by their propellers created a scour 4 to 5 m deep along a 60 m stretch of the opposite Freycinet 12 quay. This scouring is the cause of a number of disorders observed on the structure, in particular a subsidence of the platform over an area of 3,000 m². As the damage was mainly located in the middle of the quay, the operation of the quay and the platform was severely impacted, necessitating reinforcement work using solid injections prior to returning to service. Penetrometric test pits were used to assess the situation and define the appropriate technical solution. The solid injection reinforcement work was carried out over a 100 m long area, using 428 boreholes and almost 1,600 m³ of mortar. The control surveys

and the G5 geotechnical mission concluded that the work was well executed so that the quay could be put back into operation.

KEYWORDS: Dunkirk, Port, Rehabilitation, Reinforcement, Solid injection, Geotechnics (3 à 6 mots clefs)

1. Contexte d'intervention

1.1. Historique de l'évènement à l'origine des désordres

Lors des deux tempêtes qui ont balayé le Nord de l'Europe du 19/02 au 20/02/2022, un ferry, amarré au quai Freycinet 13 (quai situé face au Freycinet 12), a été exposé à des vents décostants et a rompu ses amarres. Il a dû faire appel à l'assistance des remorqueurs pour réussir à se maintenir à quai pendant près de 24 h en continu.

1.2. Détail de la structure du quai

Le « Freycinet 12 » accueille un trafic régulier de navires de marchandises diverses et également la réception de tankers. Il est constitué d'une juxtaposition de caissons circulaires en béton armé. Ces caissons ont été foncés jusqu'à la cote -13 CM et sont arasés en tête à la cote +5 CM. Ils sont « chaînés » entre eux en tête par une poutre de couronnement massive.

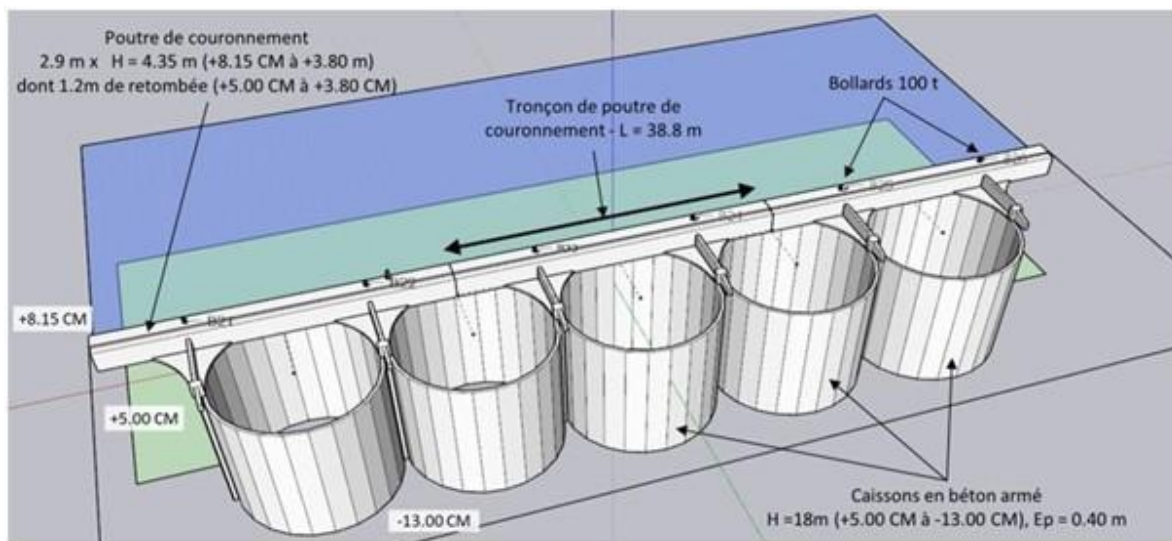


Figure 1. Modélisation 3D de la structure du quai

1.3. Analyse des désordres

Ces désordres localisés au niveau de la zone exposée aux jets des hélices des remorqueurs consistent, d'une part en un affouillement des fonds jusqu'à 5 m, et d'autre part en des affaissements du terre-plein. La zone d'affouillement et d'affaissement de terre-plein représentait une longueur de quai endommagé d'environ 60 m au droit des caissons C21, C22, C23 et une surface de 3000 m² de terre-plein affaissé.

Les affouillements constatés en pied de quai ont entraîné un défaut de compacité dès suite du siphonnage des matériaux sableux de remplissage des caissons par la zone ouverte en pied. En conséquence, un mouvement général du quai s'est produit, précisément un basculement de l'ordre de 7 cm vers le bassin et un tassement de 7 cm de la magistrale du quai. Concernant la stabilité générale de l'ouvrage, la zone d'influence des désordres s'étend aux caissons adjacents et encadrants à savoir les caissons C20 et C24.

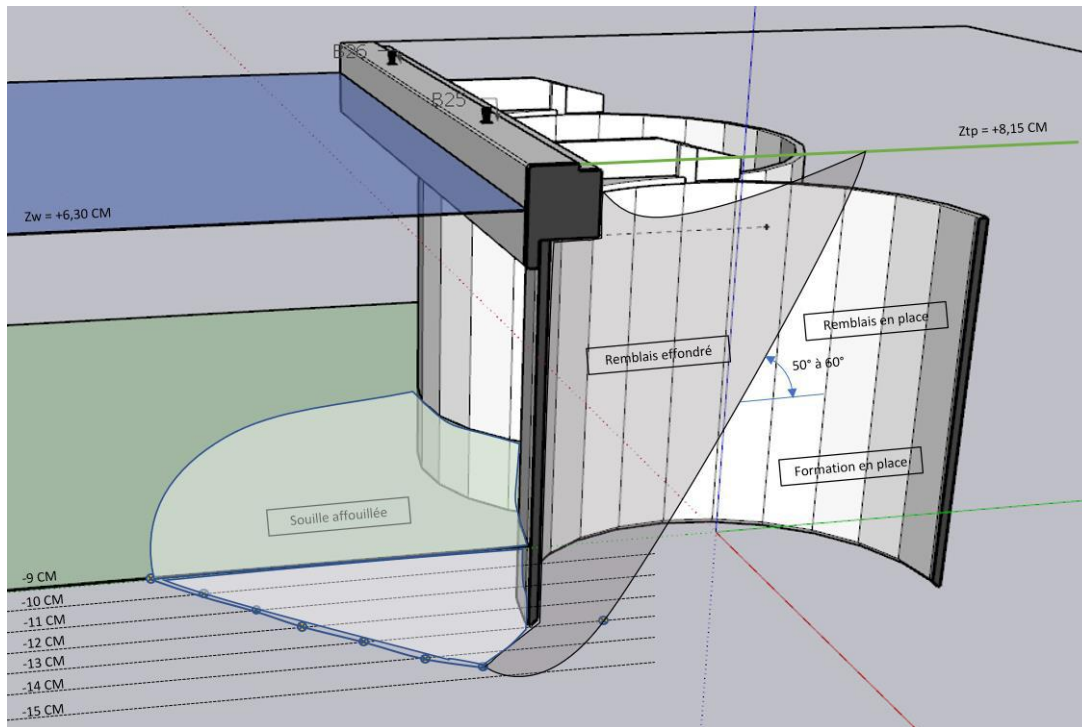


Figure 2. Modélisation 3D du phénomène d'affouillement en pied de caisson

1.4. Caractérisation géotechnique et définition de la solution technique

Caractérisation de la compacité du sol. La qualification de l'état de compacité des remblais intérieurs et du sol d'assise des caissons est une étape déterminante pour affiner la solution technique et les paramètres d'exécution. En ce sens, une campagne de reconnaissance par des sondages avec essais de pénétration au cône (appelés essais CPT) a été menée avec 46 sondages répartis sur 7 caissons (C19 à C25). Cette campagne de reconnaissance détermine un « état zéro » au droit des caissons à traiter et estime un volume prévisionnel de matériaux à incorporer.

L'analyse des sondages CPT montre des variations de valeur de résistance de pointe (nommée q_c) selon la position et la profondeur du sondage dans le caisson. Les principales conclusions sont les suivantes :

- Dans les remblais intérieurs des caissons :
 - Dans la moitié supérieure des caissons, il y a une forte réduction de valeur entre l'avant et le centre, ainsi qu'entre les caissons accidentés et les caissons sains ($q_c = [4 ; 8]$ MPa au lieu de $q_c = [18 ; 24]$ MPa) ;
 - Dans la moitié inférieure des caissons, il y a une résistance de pointe faible et homogène en tout point du caisson et comparable avec les valeurs des caissons sains ($q_c < 4$ MPa) ;
- Dans la couche d'assise des caissons : dans les 3 m sous l'arase du caisson, il y a une faible réduction de valeur entre les caissons accidentés et les caissons sains mais qui restent de bonne qualité ($q_c > 15$ MPa).

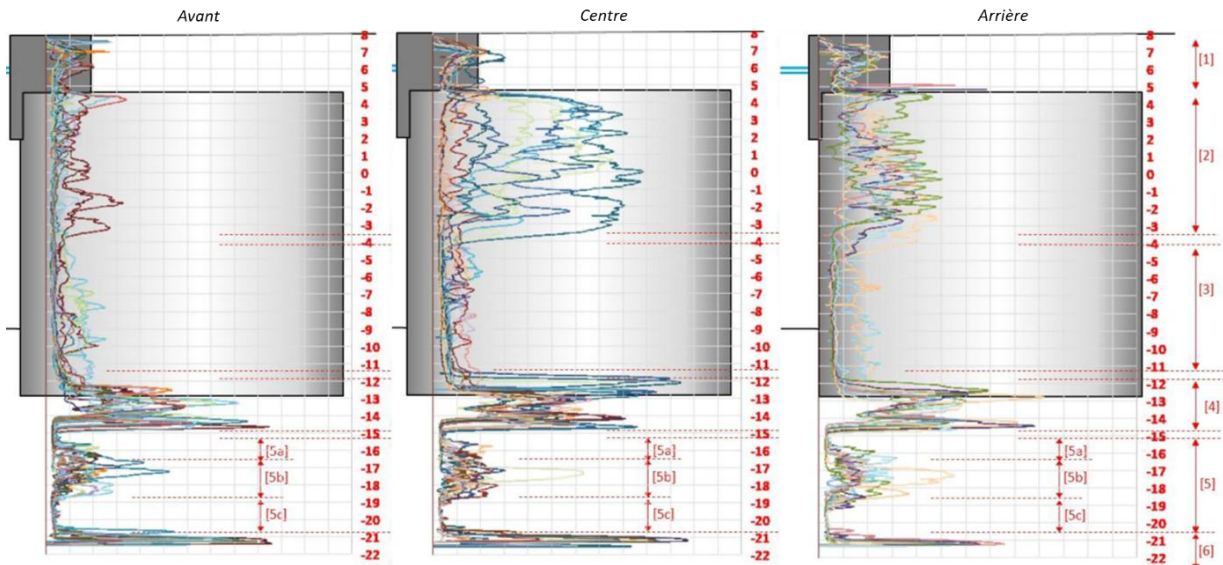


Figure 3. Etat zéro de la compacité du sol au droit des caissons

Caractérisation géologique des matériaux du site. Les mesures de résistance de pointe collectées sur toute la hauteur des sondages permettent une corrélation entre les valeurs obtenues et la nature de la couche de sol rencontrée. L'identification de la nature du sol à partir de la valeur q_c se détermine avec l'indice de Robertson (2009). 5 couches de sol ont ainsi été identifiées :

- Terrain au-dessus du caisson entre +8 et +5 CM, défini comme sable graveleux ;
- Remblai intérieur des caissons entre +5 et -13 CM, défini comme sable légèrement limoneux à limoneux, pouvant-être divisé en 2 sous-couches :
 - Partie supérieure entre +5 et -3 CM, définie comme sable légèrement limoneux, valeur de q_c bonne à très bonne ;
 - Partie inférieure entre -3 et -13 CM, définie sable limoneux, valeur de q_c faible à moyenne ;
- Terrain d'assise du caisson entre -13 et -15 CM, défini comme sable des Flandres, sable coquillé de granulométrie hétérogène à faible proportion de limon, valeur de q_c bonne à très bonne ;
- Couche de sol sous-jacente entre -15 et -20 CM, définie comme limon argileux, valeur de q_c très faible à faible, à l'exception d'un pic entre -17 et -19 CM avec une composante sableuse plus importante (limon sableux) ;
- Couche de sol finale à partir de -20 CM, définie comme l'argile des Flandres, valeur de q_c très bonne voir au refus.

Définition de la solution technique. La solution technique de confortement retenue, considérant la nature du terrain en place et la nature de la problématique, est la technique d'injection solide ou « compactage statique horizontal ».

Cette technique consiste à injecter un mortier par passes remontantes de 50 cm à 1 m le long du forage sur une hauteur déterminée. Elle permet de créer des inclusions verticales sous forme de bulbes superposés le long du forage tout en assurant un compactage du sol entre les points de forage. L'injection d'un mortier graveleux entraîne un déplacement latéral de matériau plutôt qu'une imprégnation entre les particules de sol par un coulis fluide.

2. Description des travaux d'injections solides

2.1. Objectifs et maillage du traitement

Objectifs du traitement. Les objectifs des travaux de confortement par injections solides ont été établis de manière distincte pour les remblais intérieurs et la couche d'assise des caissons. Les objectifs sont caractérisés par une valeur de résistance de pointe cible et un taux d'incorporation de mortier associé à une zone de traitement définie à savoir :

- Zone 1 : 9% d'incorporation ;
- Zone 2a : 2% d'incorporation ;
- Zone 2b : 8% d'incorporation ;
- Zone 3 : 6% d'incorporation ;
- Zone 4 : 4% d'incorporation.

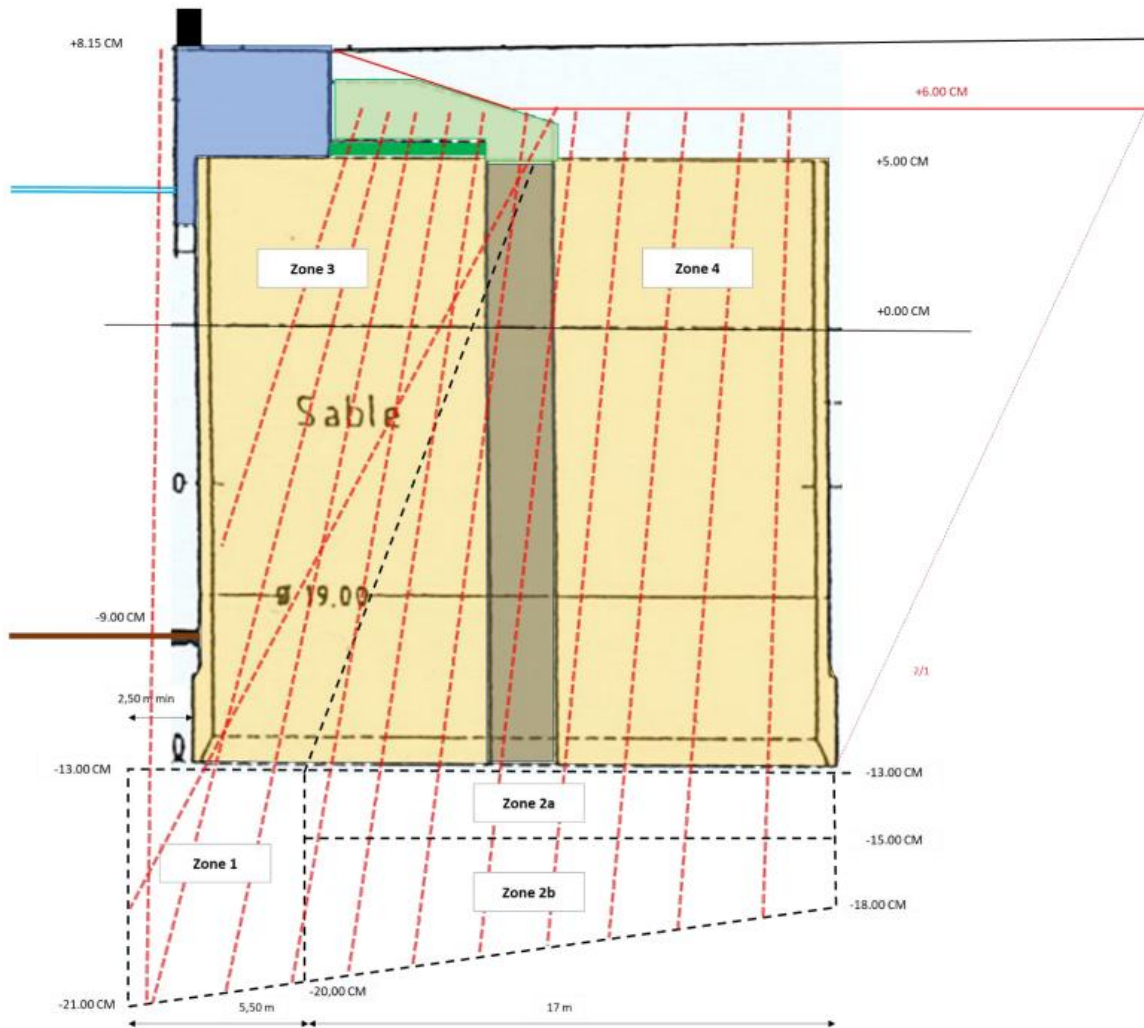


Figure 4. Zonage des injections solides au droit de chaque caisson

Maillage du traitement. Le maillage retenu en phase d'exécution est conforme au maillage proposé en prédimensionnement du projet, de l'ordre de 2,2 x 2,2 m. Par rapport aux dimensions de chaque caisson, ce maillage constitue un total d'environ 80 forages. Les forages sont répartis entre l'intérieur des caissons (60 unités), l'interconnexion entre les caissons (6

unités) et l'avant des caissons côté bassin, depuis la poutre de couronnement (14 unités). La profondeur des forages est de 26 m moyen, en considérant une amorce à la cote +6 CM, soit depuis la plateforme réalisée en fond de fouille et une arase basse à la cote -20 CM correspondant à la couche de l'argile des Flandres.

2.2. Moyens mobilisés en phase travaux

Deux foreuses à barillet ont été mobilisées en parallèle sur toute la phase de production. Chaque atelier de forage travaillait en double poste, avec un pic en trois postes sur plusieurs semaines. Les forages ont été réalisés à la tête vibrante avec un outil ouvert en diamètre 127 mm, cette solution étant la plus adaptée à la nature sableuse et décomprimée du terrain.

Des silos de stockage du mortier en poudre ont été mis en œuvre, répartis entre les deux extrémités de la zone d'intervention. Chaque silo est autonome pour la fabrication qui se fait dans la vis de malaxage. En sortie de vis, le mortier produit est directement versé dans une pompe à piston puis envoyé vers la foreuse.

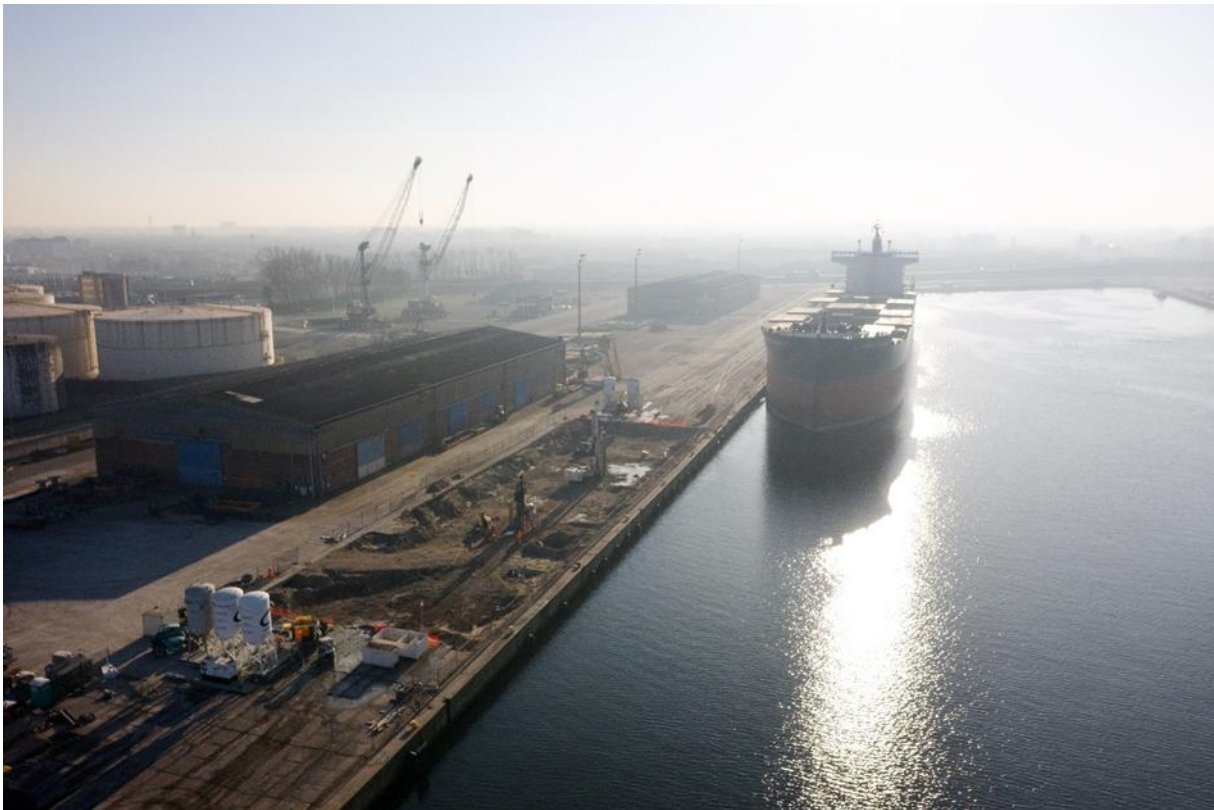
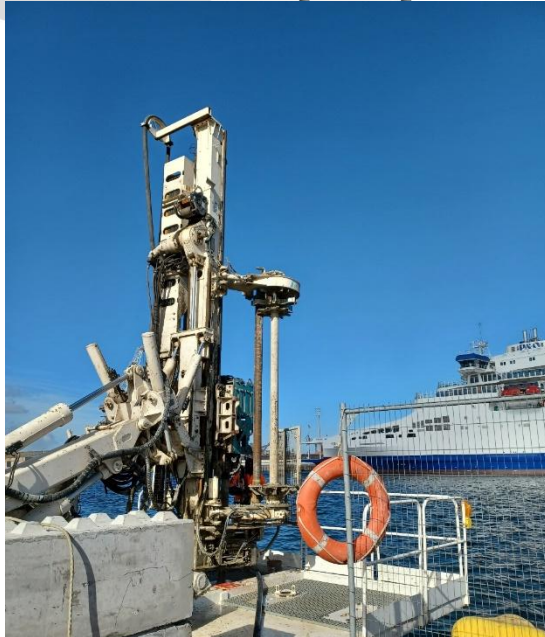
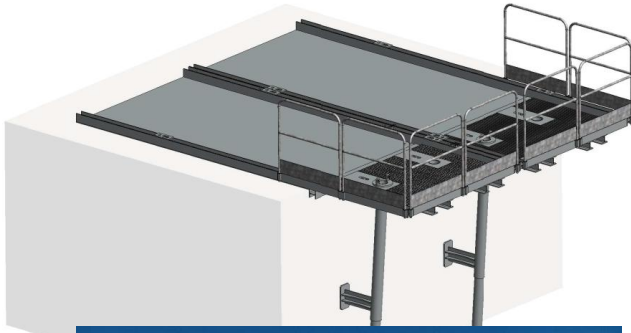


Figure 5. Vue aérienne de la zone d'intervention

Pour les forages à réaliser depuis la poutre de couronnement, un platelage spécifique a été développé sur le chantier. Ce platelage permet de stationner la foreuse en sécurité à l'avant de la poutre de couronnement et de guider l'inclinaison en dévers du forage sur la majeure partie hors sol.



Figures 6 & 7. Schéma de principe du platelage / Configuration d'intervention depuis le platelage sur le chantier

3. Résultats et conclusions

3.1. Taux d'incorporation

L'analyse des taux d'incorporation de volume de mortier, par zonage de traitement et par caisson, est un autre facteur déterminant dans la conclusion des travaux réalisés. Les résultats obtenus sont proches des hypothèses de prédimensionnement avec un volume global d'incorporation de 87% du volume théorique.

spie batignolles		Tableau des taux d'incorporation des injections solides par caisson et par zone					
/ fondations							
Caissons	Volume (m3)	zone 2b	zone 2a	zone 1	zone 3	zone 4	Total
C20	volume injecté	51,39	10,13	35,77	57,62	145,12	300,03
	volume théorique	61,14	10,96	35,52	86,96	192,28	386,86
	Taux d'incorporation	84%	92%	101%	66%	75%	
C21	volume injecté	74,75	9,98	33,7	61,83	151,45	331,71
	volume théorique	93,74	11,64	35,72	92,3	205,23	438,63
	Taux d'incorporation	80%	86%	94%	67%	74%	
C22	volume réel	67,52	10,673	36,03	67,4	172,83	354,453
	volume théorique	70,43	10,8	36,41	90,81	211	419,45
	Taux d'incorporation	96%	99%	99%	74%	82%	
C23	volume injecté	51,32	9,85	36,65	81,13	165,38	344,33
	volume théorique	62,69	11,25	35,79	101,86	191,28	402,87
	Taux d'incorporation	82%	88%	102%	80%	86%	
C24	volume injecté	59,66	10,16	37,15	63,03	166,39	336,39
	volume théorique	62,3	10,57	35,33	84,25	190	382,45
	Taux d'incorporation	96%	96%	105%	75%	88%	
		GLOBALE					
MOYENNE PAR ZONE		87%	92%	100%	72%	81%	87%

Figure 8. Tableau d'analyse des taux d'incorporation par zone et par caisson

3.2. Résistance de pointe q_c

Des sondages CPT ont été menés à l'avancement des travaux. Ces nouveaux sondages permettent de constater l'évolution progressive de l'amélioration de la compacité du sol, qui s'avère variable selon les terrains traversés. Des graphiques comparatifs ont été générés pour chaque caisson entre les valeurs q_c initiales et post-traitements, avec le rappel des valeurs cibles. Les différents graphiques générés ont mis en évidence des valeurs q_c améliorés, assez homogènes mais une atteinte non-systématique des valeurs cibles, notamment en partie inférieure des caissons.

Les résultats ont été également comparés avec des valeurs appartenant à des caissons sains et éloignés de la zone accidentée du quai Freycinet 12 (C30, C36 et C44). La comparaison montre que les valeurs q_c des caissons après travaux sont supérieures à celles des caissons sains, dans la partie inférieure des caissons.

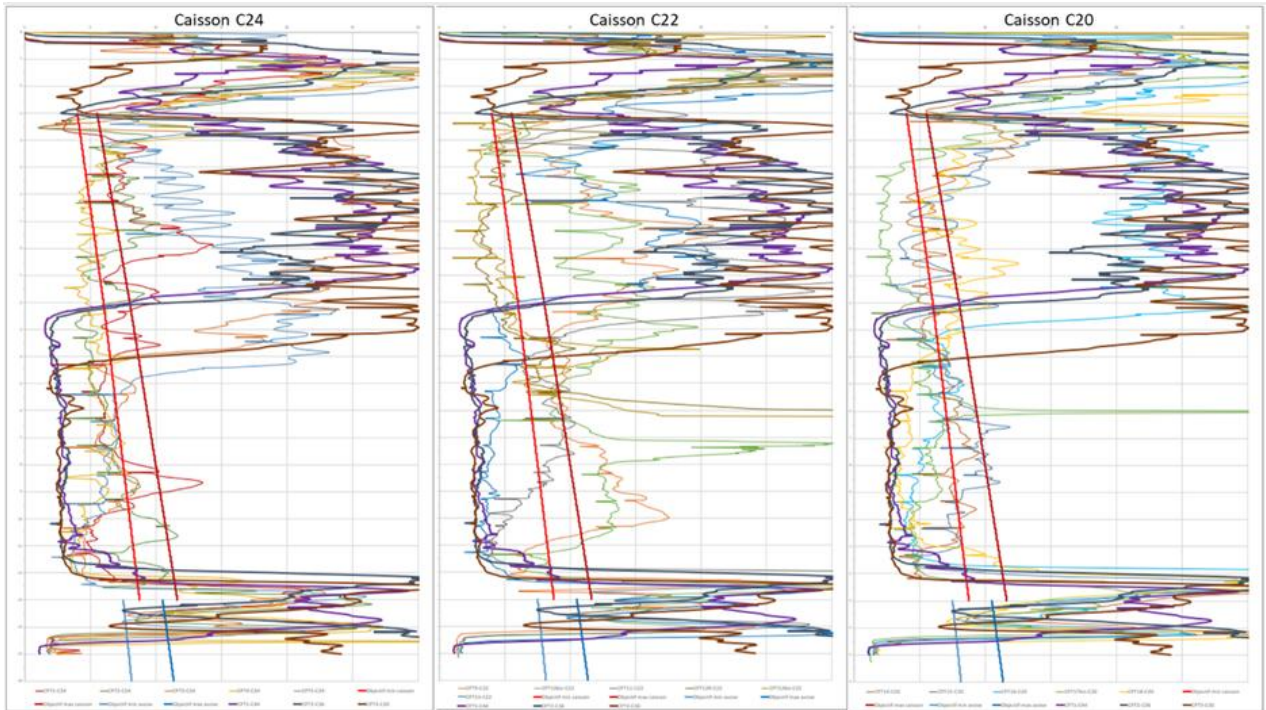


Figure 9. Courbes de superposition des résultats des sondages CPT

Cette comparaison rassure sur la pertinence des résultats obtenus et l'atteinte de l'objectif principal des travaux. La nature variable des couches de sol, et plus précisément la teneur en argile, est également corrélée avec les écarts de valeur de q_c avant et après injections solides.

3.3. Stabilité de l'ouvrage

En complément des sondages de contrôle, une mission géotechnique G5 a été menée pour statuer sur la stabilité de l'ouvrage d'après les valeurs q_c obtenues à la suite des travaux de confortement. La vérification s'articule autour de 3 critères que sont le poinçonnement, le renard solide et le tassement des sols d'assise. Les calculs de ces 3 critères ont tous confirmé la stabilité de l'ouvrage à la fin des travaux d'injection solides et l'autorisation de la remise en exploitation du quai.