



**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

# Traitements et améliorations des sols

QUAI JCV – RENFORCEMENT DE SOL PAR INCLUSIONS  
RIGIDES SOUS PLATEFORME DE TRANSFERT DE CHARGE –  
DÉFINITION ET EXPLOITATION DE LA PLANCHE D'ESSAI

JST DU 05/04/2023

LE COR Thomas – LEGRAND Philippe

**INGE  
FONDATIONS**

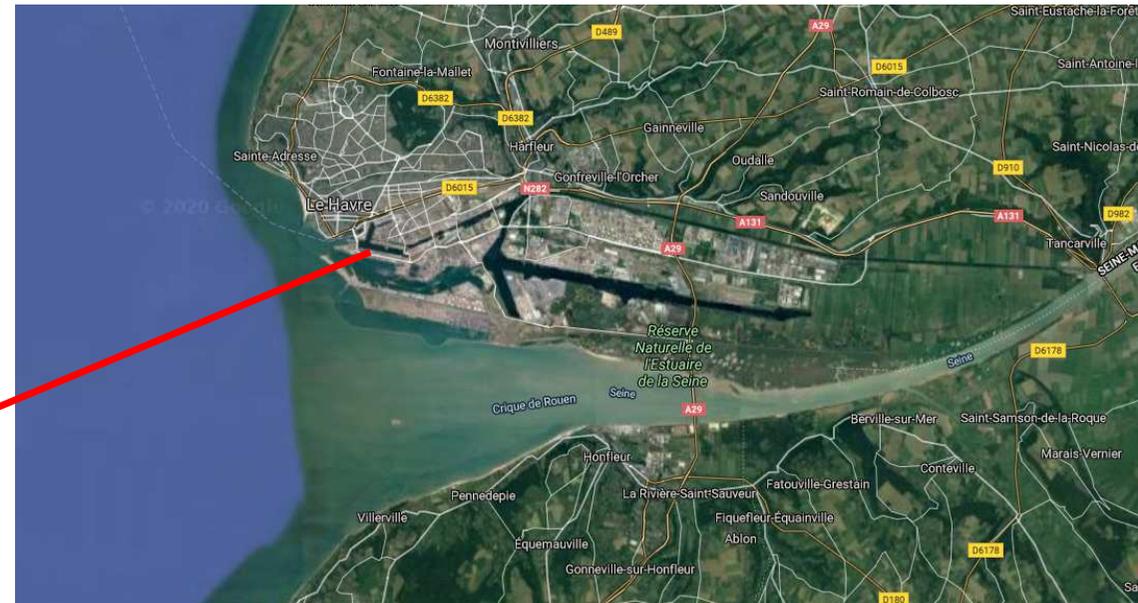
Journée parrainée par KELLER



# Introduction et présentation du projet

# Introduction et présentation du projet

Projet situé sur le port du Havre  
A proximité de l'usine d'éoliennes de SIEMENS



# Introduction et présentation du projet

## Le projet

Travaux de renforcement du quai Joannès Couvert dans le cadre d'accueil d'activités en lien avec l'installation de parcs éoliens offshore

### Groupement d'entreprises :



### MOA-MOE :



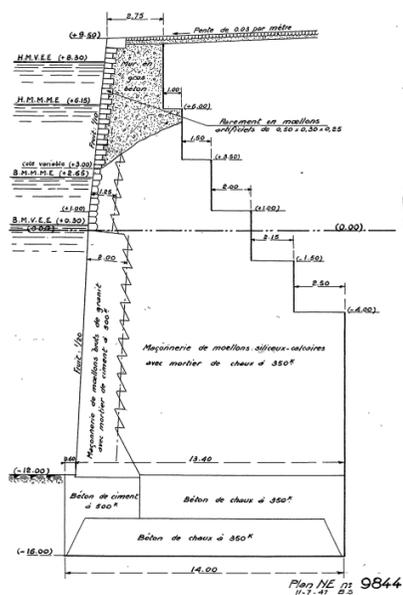
### AMO :



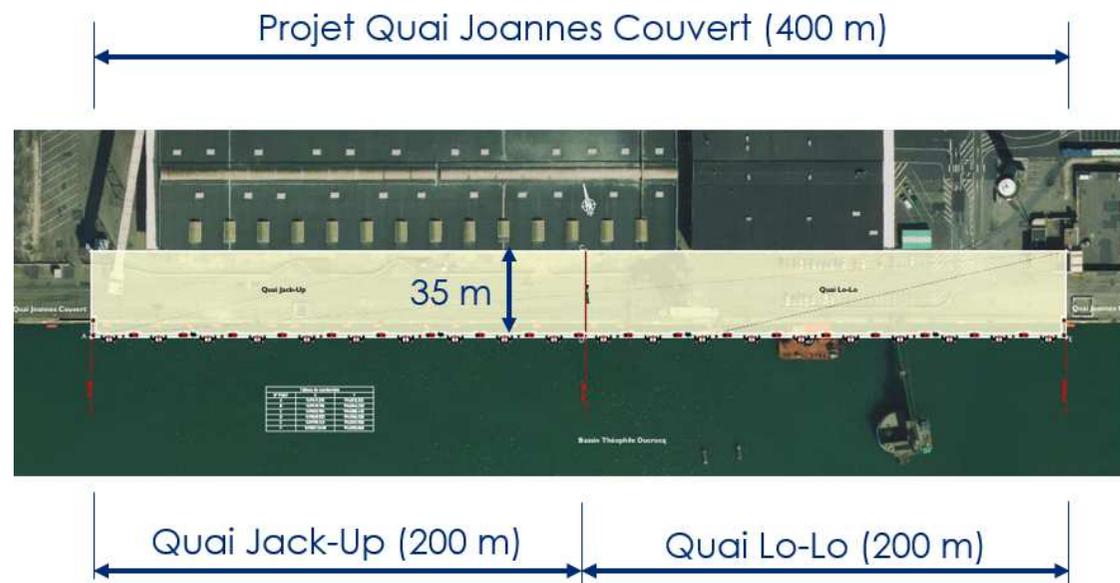
# Introduction et présentation du projet

## Les Travaux

Renforcement de 400m de quai existant et dans un état de conservation variable.



Coupe sur quai existant



Vue en plan

# Introduction et présentation du projet

## Objet des Travaux

Rendre compatible le quai avec les opérations de chargement et déchargement des colis.



**Quai Jack-up**

Accostage de plateformes  
élevatrices

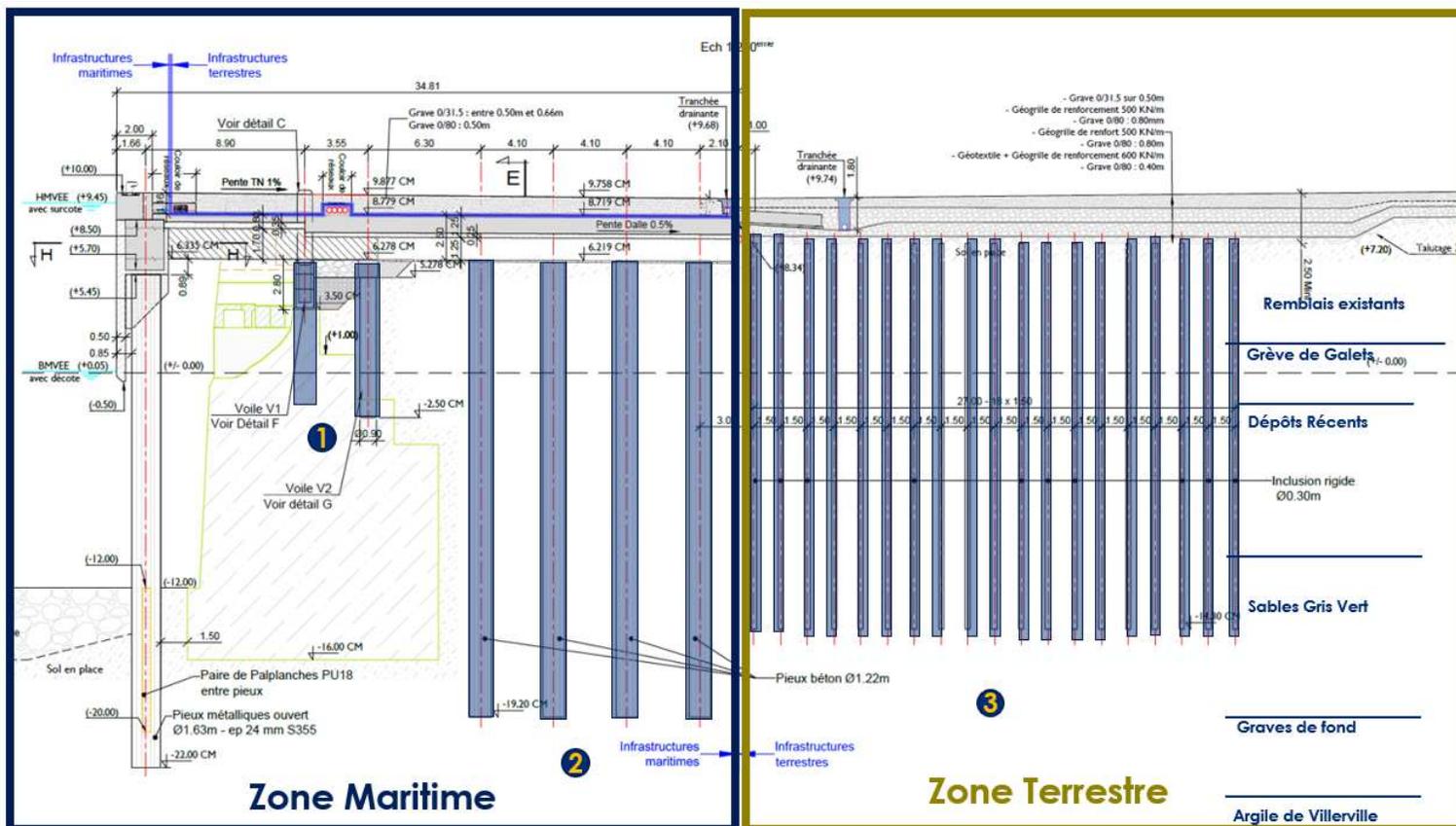


**Quai Lo-Lo (Lift on - Lift off)**

Levage des colis par grue

# Introduction et présentation du projet

## Focus Quai Jack Up



### Les travaux réalisés par NGE FONDATIONS

- 1** Réalisation des voiles porteurs V1 et V2  
pieux forés tubés ancrés dans maçonnerie existante pour la fondation du quai  
diam. 900 mm /  $L_{moy} = 11$  m
- 2** Pieux de fondation à terre  
250 pieux tarière creuse  
diam. 1220 mm /  $L_{moy} = 27$  m
- 3** Amélioration de sols au droit des infrastructures terrestres  
3400 inclusions rigides  
diam. 300-400 mm /  $L_{moy} = 20$  m

# Introduction et présentation du projet

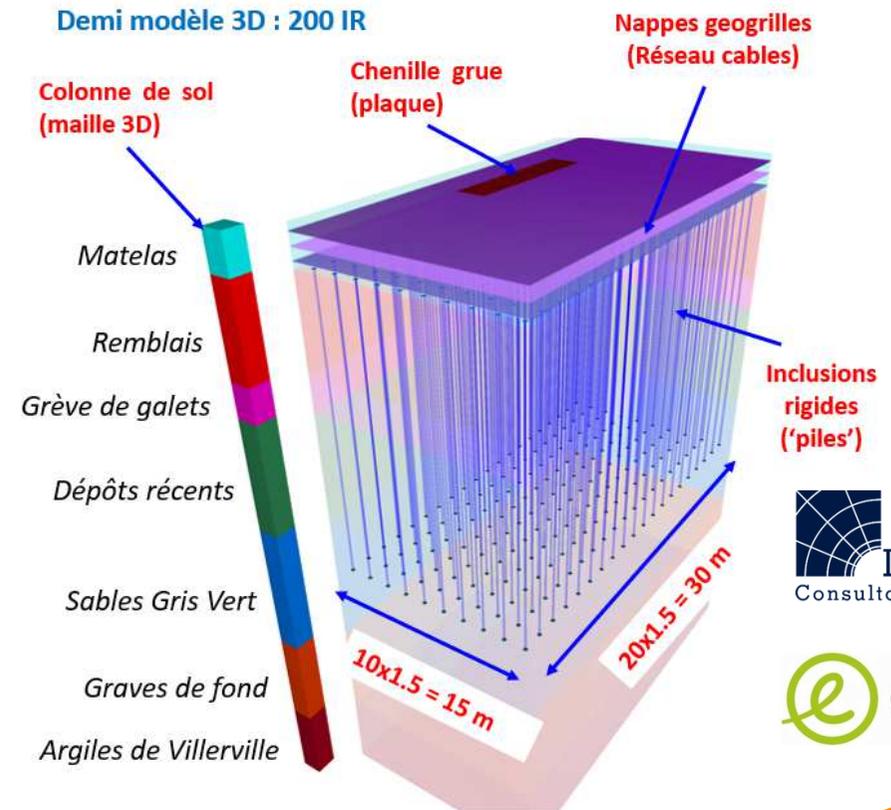
## Les Etudes

Réalisation, pour le compte de NGE FONDATIONS, des études d'exécution des inclusions rigides par **EGIS GÉOTECHNIQUE & ITASCA Consultants**

### Problématiques :

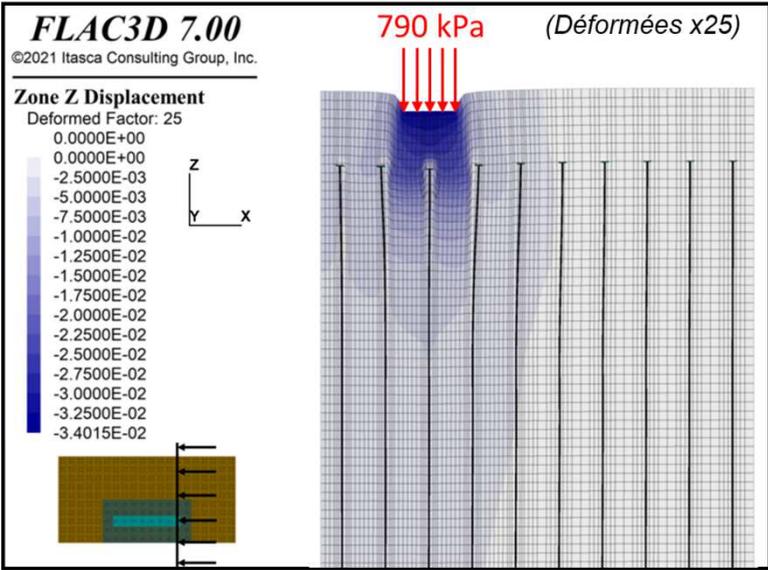
- Niveau de contrainte très élevé sous les chenilles des grues d'exploitation circulant sur la PFTC (très supérieur aux niveaux usuels des projets de renforcement de sol)
- Critère de tassement différentiel strict de 3cm sous chenille fixé au CCTP du marché

Modélisation numérique avec le logiciel FLAC 3DTM pour appréhender les mécanismes de transfert de charge et évaluation des tassements

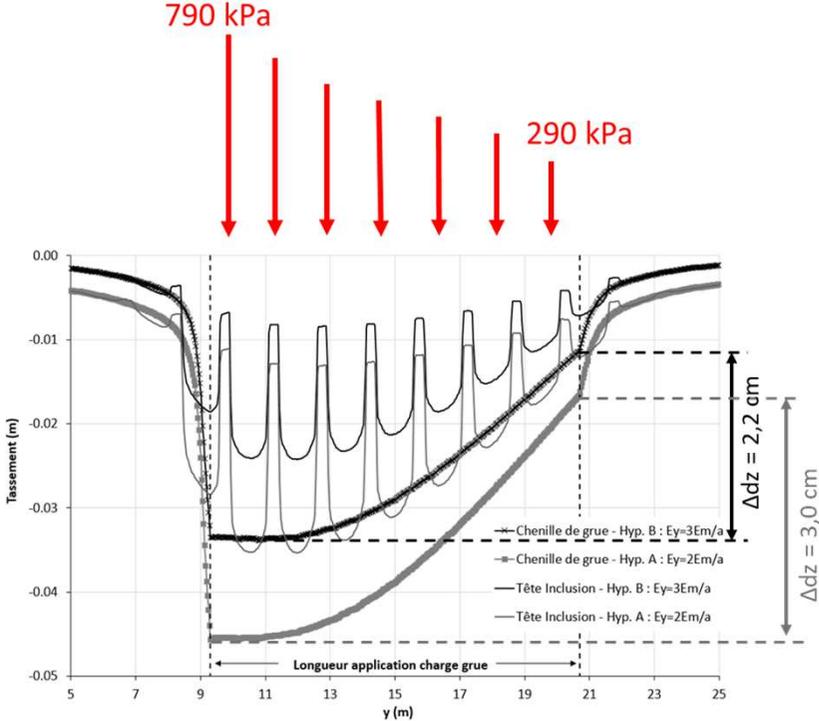


# Introduction et présentation du projet

## Quelques résultats



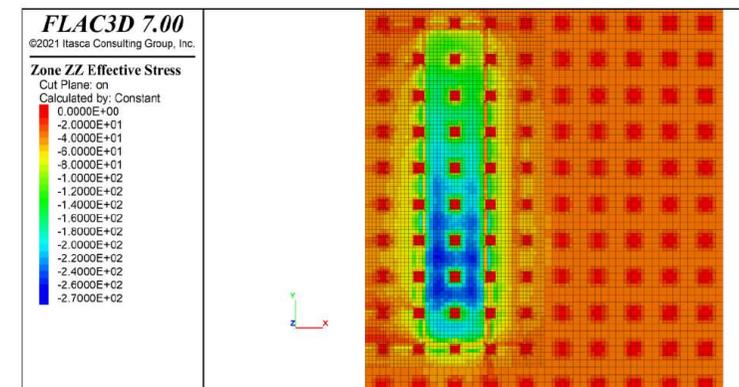
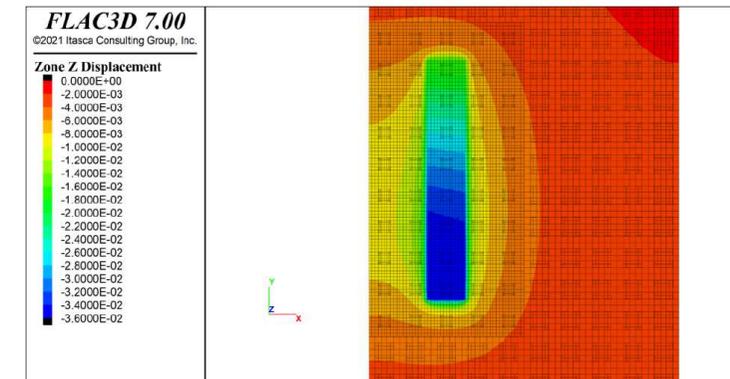
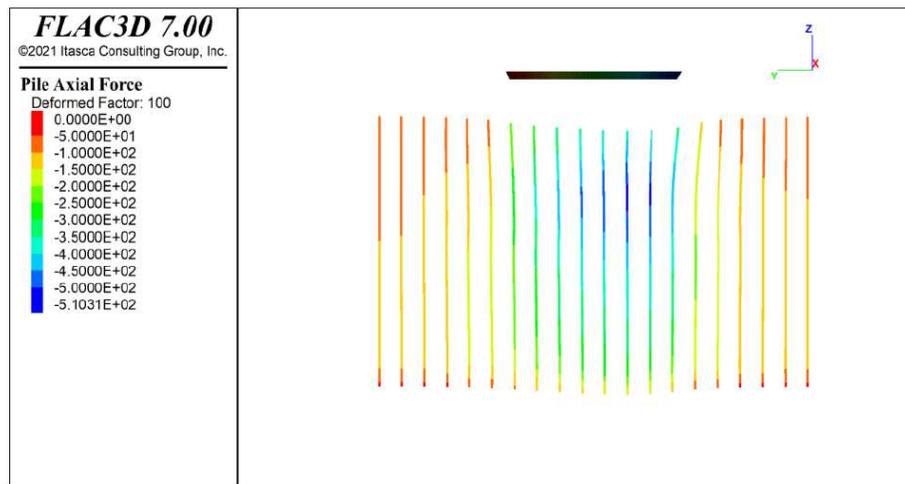
Tassement et déformée du modèle



# Introduction et présentation du projet

## Quelques résultats

- Tassement différentiel sous chenilles de 2,2cm (absolu : 3,6cm)
- Contrainte effective en base de PFTC : 265kPa
- Tassement maxi entre inclusions en base de PFTC : 2,8cm
- Effort maxi en tête d'inclusion : 400 kN
- Traction maximale géo-grilles : 44kN/ml



# Introduction et présentation du projet

## Les Travaux



# Définition de la planche d'essai

# Définition de la planche d'essai

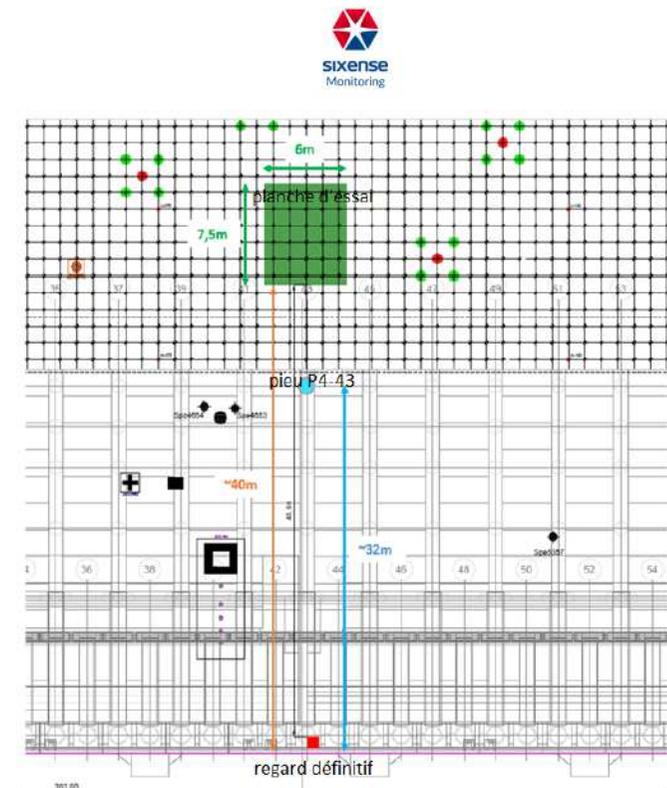
## Implantation

La planche d'essai de dimensions 6m x 7.5m est positionnée sur le quai Jack Up axé sur la file de pieux 43 et à environ 8m de la file P4.

- Positionnement contraint par l'exploitation future du quai et les historiques de chargements

Au droit de la planche d'essai, des sondages de reconnaissances ont été réalisés :

- JCV-PR11
- JCV-SC8
- JCV-CPTu14



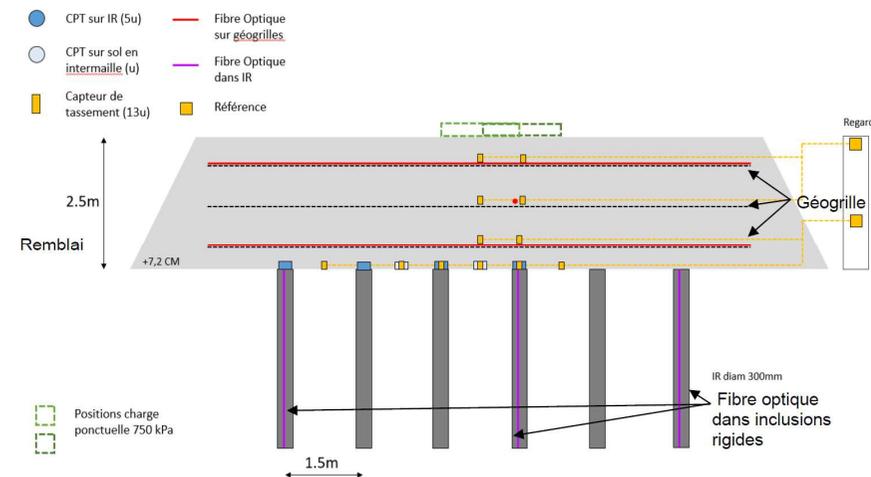
# Définition de la planche d'essai

## Principe

L'instrumentation de la planche d'essais est composée de :

- 1 Fibre Optique (FO) Rayleigh dans 3 IR
- 1 Fibre Optique (FO) Rayleigh parcourant les 3 niveaux de géogrilles
- 5 Cellules de Pression Totale (CPT) positionnées en tête d'IR
- 2 Cellules de Pression Totale (CPT) positionnées sur le sol en inter-maille
- 13 capteurs de tassements répartis à différents niveaux :
  - 7 capteurs au niveau IR (côte 7,2 CM)
  - 2 capteurs par niveau de géogrille

Des mesures topographiques ont également été réalisées en relevant les cibles positionnées sur le camarteau de répartition.



# Définition de la planche d'essai

## Principe

Les cellules de Pression Totale (CPT) positionnées en tête d'IR ont une gamme de mesure de 0-1000 kPa.

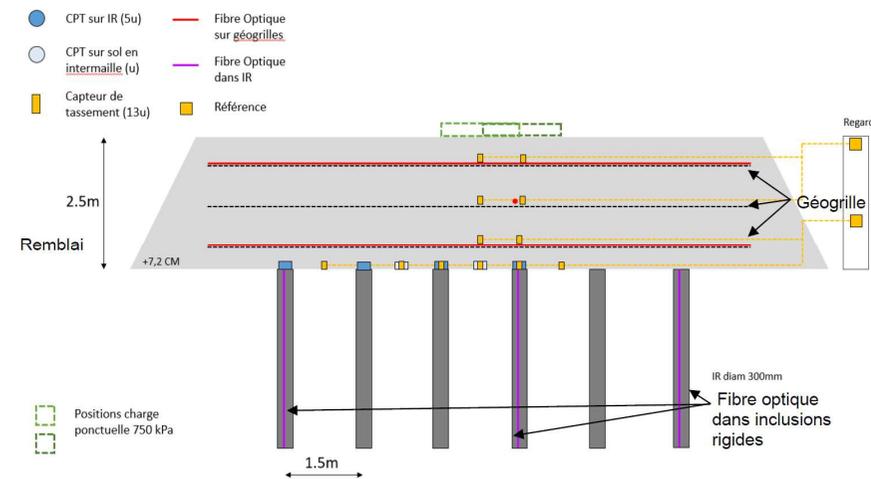
Les cellules de Pression Totale (CPT) positionnées en intermaille ont une gamme de mesure de 0-800 kPa.

Les tassomètres hydrauliques avec une gamme de mesure de 0,2bar.

La longueur des 4 fibres optiques sont de ~105ml.

Interrogations :

- Toutes les 5minutes
- Toutes les 30 minutes pour les fibres optiques



# Définition de la planche d'essai

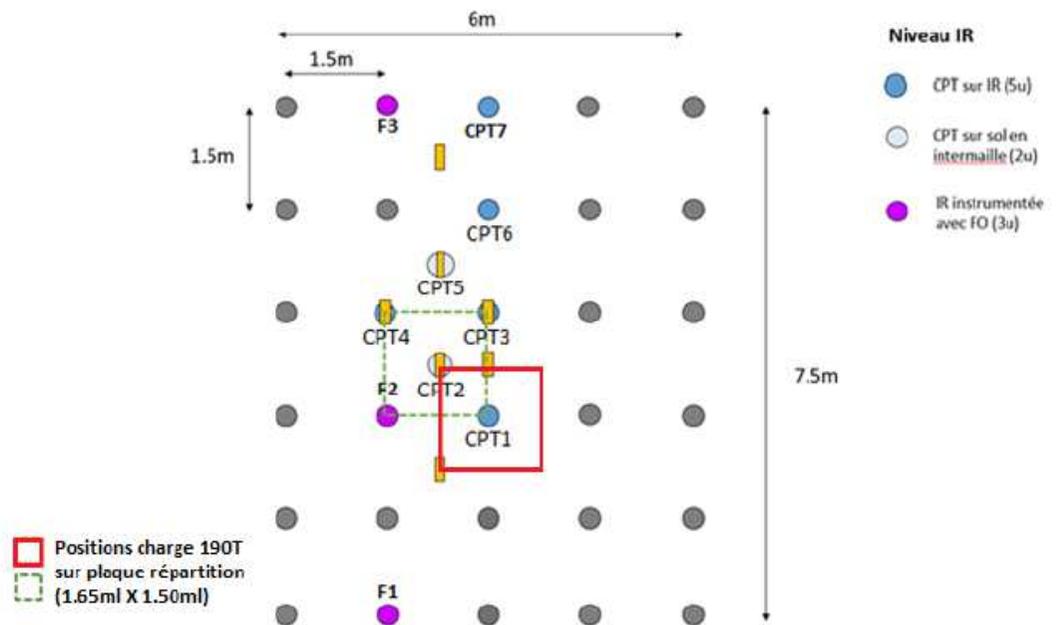
## Cas de charges

Deux cas de charge ont été étudiés :

- ▶ Plaque 1,65\*1,5 chargée à 190t  
> Charge équivalente de 750kPa
- ▶ Cas 1 : charge axée sur une inclusion
- ▶ Cas 2 : charge axée sur l'intermaille

Un cas de charge surfacique de 110kPa avait été proposé mais non retenu au regard de la durée limitée de l'essai pendant les travaux

- ▶ Suivi de l'instrumentation maintenu pour la phase Exploitation



# Définition de la planche d'essai

## Cas de charges

Initialement projeté via une grue Liebherr LTM 1650-8,1 de 700t.

In fine réalisé via un camarteau lesté.

L'application des surcharges ponctuelles est prévue sur une durée courte selon le phasage suivant :

- Chargement à 750kPa pendant 3h puis déchargement
- Chargement à 750kPa pendant 1h puis déchargement
- Chargement à 750kPa pendant 1h

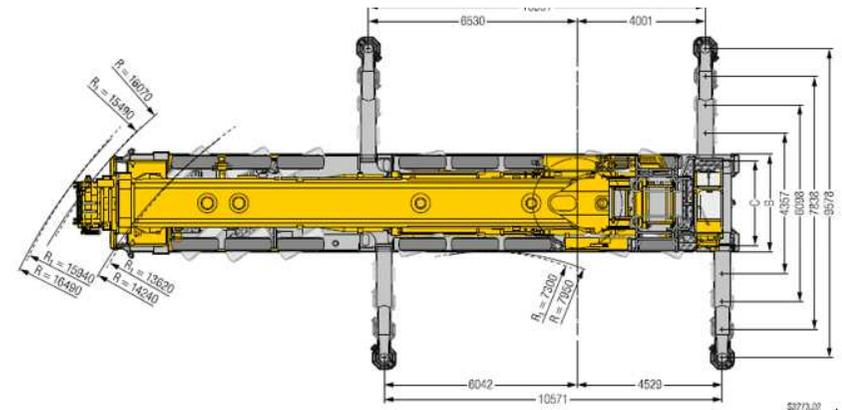
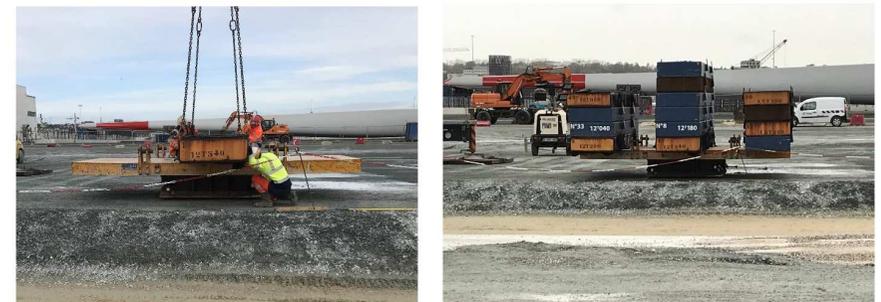


Figure 3 : vue en plan et élévation d'une grue Liebherr LTM 1650-8.1 de 700 T (site Liebherr)

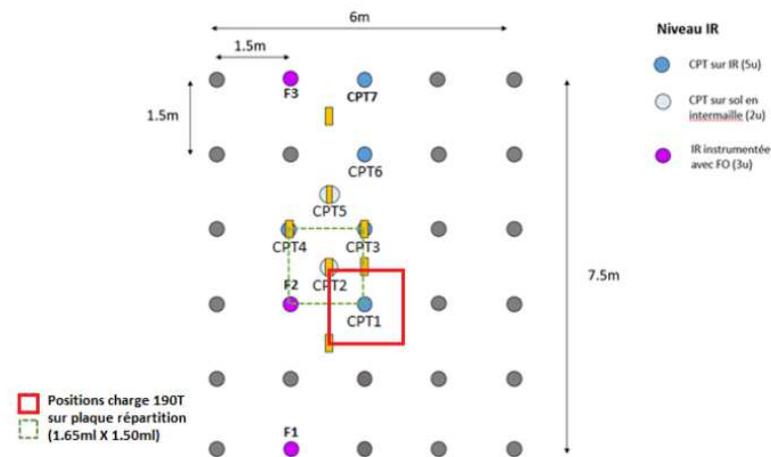


Figures 24 et 25 : Photos prises durant le chargement des 190 Tonnes

# Résultats de la planche d'essai

# Résultats de la planche d'essai

1<sup>er</sup> essai = charge centrée sur une inclusion



# Résultats de la planche d'essai

## Suivi topographiques

Lors de la première phase de l'essai (190t pendant 3h) :

- tassement moyen mesuré de 15mm
- tassement stable pendant toute la durée du palier
- tassement résiduel de 7mm

1<sup>er</sup> cycle de chargement :

Position N°1 – 1 <sup>ère</sup> phase - 20/10/22	date	heure	Cibles topo Camarteau				Moyenne
			C1	C2	C3	C4	
			Z (en mm)	Z (en mm)	Z (en mm)	Z (en mm)	
Pose cibles sur plaque de répartition	20/10/22	11h05					
Pose cibles sur camarteau	20/10/22	11h05	0	0	0	-	
Début mise en place de la charge	20/10/22	12h00	-0.6	-0.7	-1.6	-	-1.0
Charge complète 190T	20/10/22	14h00	-14.4	-11	-17	-	-14.1
Charge complète 190T +1h	20/10/22	15h00	-15.1	-11.5	-18	-	-14.9
Charge complète 190T +2h	20/10/22	16h00	-15.2	-11.5	-18.3	-	-15.0
Charge complète 190T +3h	20/10/22	17h00	-15.1	-11.5	-18.3	-	-15.0
Début déchargement	20/10/22	17h30	-15	-11.3	-18.2	-	-14.8
Fin déchargement (sauf camarteau)	20/10/22	18h55	-6.1	-8.3	-7.2	-	-7.2
Déchargement + 1h	20/10/22	19h55	-5.8	-8.1	-6.9	-	-6.9

Tableau 1. Tassements mesurés au niveau du Camarteau – Essai 1 – Cycle 1

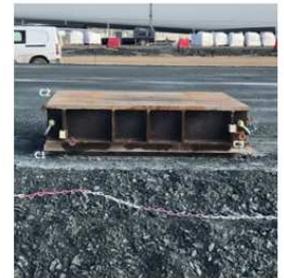
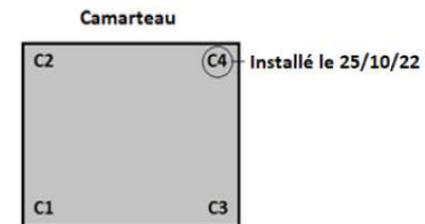


Figure 3. Positions des cibles sur le Camarteau

# Résultats de la planche d'essai

## Suivi topographiques

Lors de la seconde phase de l'essai (190t pendant 1h) :

- tassement moyen mesuré de 10mm
- tassement stable pendant toute la durée du palier
- tassement résiduel de 2mm

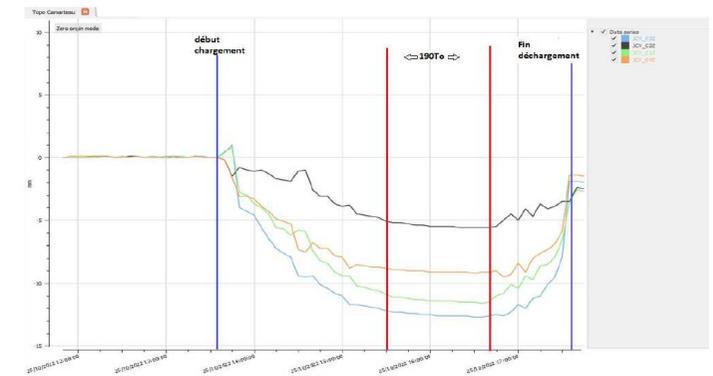
Ces valeurs de tassements sont comparables à celles obtenues via une modélisation TASSELDO avec un module équivalent :

- Module de la PFTC de 120MPa
- Module du sol renforcé de 200MPa

2<sup>ème</sup> cycle de chargement :

Position N°1 – 2nd phase - 25/10/22	date	heure	Cibles topo Camarteau				Moyenne
			C1 Z (en mm)	C2 Z (en mm)	C3 Z (en mm)	C4 Z (en mm)	
Début mise en place de la charge	25/10/22	13h35	0	0	0	0	0.0
Charge complète 190T	25/10/22	15h27	-10.2	-5	-12.1	-8.8	-9.0
Charge complète 190T +1h	25/10/22	16h30	-11.5	-5.6	-12.7	-9.2	-9.8
Début déchargement	25/10/22	16h40	-11	-5.6	-12.6	-9	-9.6
Fin déchargement (sauf camarteau)	25/10/22	17H35	-2.6	-2.4	-1.9	-1.4	-2.1
Fin déchargement (yc camarteau)	25/10/22	17H40					
Déchargement + 1h	25/10/22	18H40					

Tableau 2. Tassements mesurés au niveau du Camarteau – Essai 1 – Cycle 2



Graphique-temps des mesures en Z sur camarteau lors de l'essai de chargement sur la position N°1 (Seconde phase)

# Résultats de la planche d'essai

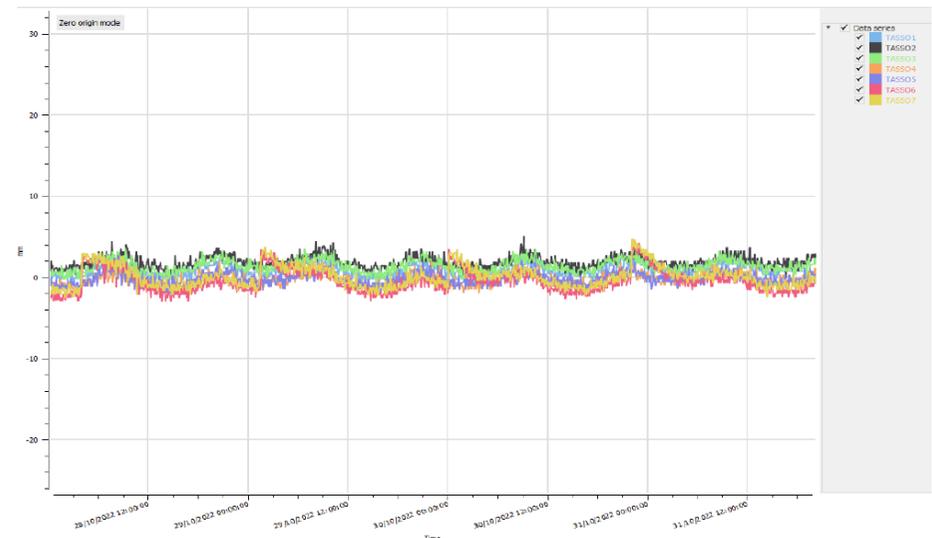
## Tassomètres

En base de la plateforme PFTC :

➡ Effet cyclique des marées

Pas de tassement significatifs mesurés lors de 1<sup>er</sup> chargement

Mesures en tête de PFTC perturbées par la présence de bulles dans le circuit hydraulique



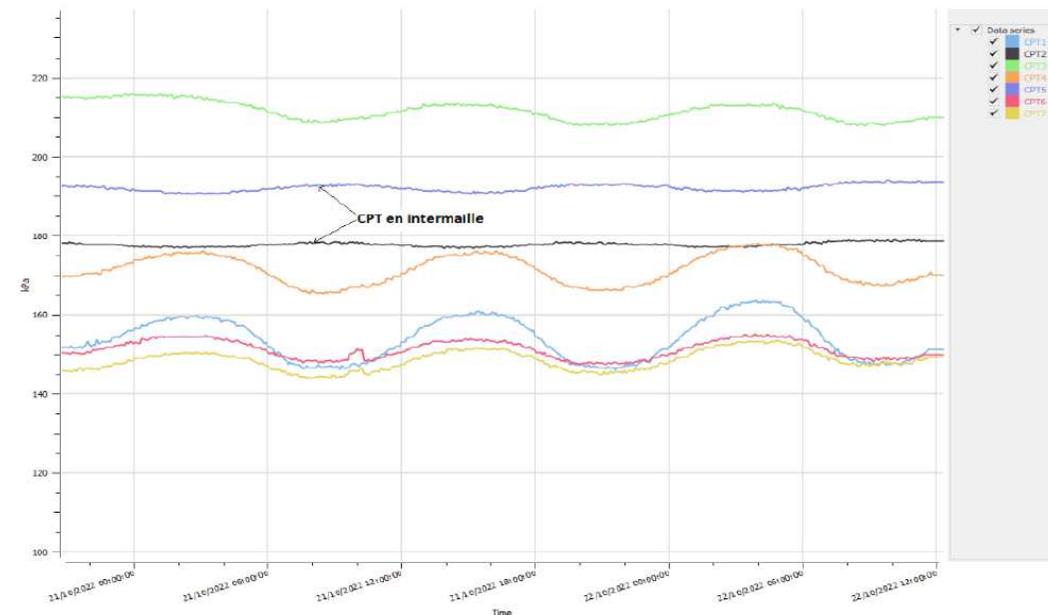
Graphe-temps – Tassomètres 1 à 7 – Influence de la marée en Z

# Résultats de la planche d'essai

## CPT

Au droit des inclusions, mesure de l'impact des marées :

➔ Effet cyclique des marées ~10kPa



Graphe-temps – CPT 1 à 7 – Influence cyclique de la marée (en kPa)

# Résultats de la planche d'essai

## CPT sur inclusions et intermaille

1<sup>er</sup> chargement : charge centrée sur l'inclusion

- Contrainte dans l'inclusion = 80% de la contrainte appliquée
- Contrainte sur le terrain en place = 12% de la contrainte appliquée

2<sup>nd</sup> chargement : charge centrée sur l'inclusion

- Contrainte dans l'inclusion = 90% de la contrainte appliquée
- Contrainte sur le terrain en place = 14% de la contrainte appliquée

Tableau de synthèse des pressions relatives mesurées lors de l'essai de chargement sur la position 1 (phase 1)

Position N°1 – 1 <sup>ère</sup> phase 20/10/22	date		CPT sur inclusions					CPT intermaille	
			CPT1	CPT3	CPT4	CPT6	CPT7	CPT2	CPT5
			Delta Pression en kPa						
Pose cibles sur plaque de répartition	20/10/22	11h05	0	0	0	0	0	0	0
Pose cibles sur camarteau	20/10/22	11h05	0	0	0	0	0	0	0
Début mise en place de la charge	20/10/22	12h00	0	0	0	0	0	0	0
Charge complète 190T	20/10/22	14h00	583	279	165	12	54	97	13
Charge complète 190T +1h	20/10/22	15h00	588	281	170	-17	49	97	13
Charge complète 190T +2h	20/10/22	16h00	587	281	170	-20	48	97	13
Charge complète 190T +3h	20/10/22	17h00	581	280	168	-23	48	97	13
Début déchargement	20/10/22	17h30	580	279	167	-24	47	97	13
Fin déchargement (sauf camarteau)	20/10/22	18h55	-25	24	5	-37	-10	-2	-3
Déchargement + 1h	20/10/22	19h55	-31	19	4	-38	-10	-3	-3

Tableau de synthèse des pressions relatives mesurées lors de l'essai de chargement sur la position 1 (phase 2)

Position N°1 – Seconde phase 25/10/22	date		CPT1	CPT3	CPT4	CPT6	CPT7	CPT2	CPT5
			Delta Pression en kPa						
			Delta Pression en kPa						
Pose cibles sur camarteau	25/10/22	11h00	0	0	0	0	0	0	0
Début mise en place de la charge	25/10/22	13h35	0	0	0	0	0	0	0
Charge complète 190T	25/10/22	15h27	646	277	184	17	63	101	14
Charge complète 190T +1h	25/10/22	16h30	664	287	191	19	65	104	13
Début déchargement	25/10/22	16h40	664	287	191	19	65	104	13
Fin déchargement (yc camarteau)	25/10/22	17H40	15	20	22	7	12	-4	-3
Déchargement + 1h	25/10/22	18H40	7	15	19	8	10	-4	-3

# Résultats de la planche d'essai

## Exploitation des fibres optiques

Dans les inclusions :

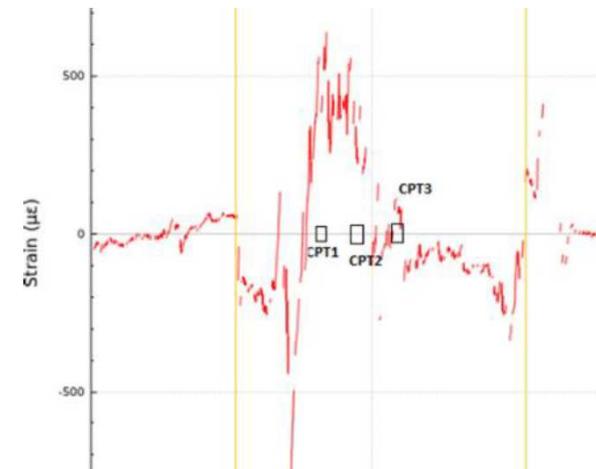
➤ Pas de mesure exploitable

Dans la PFTC :

➤ Absence de point fixe ne permettant pas mesurer les tassements

➤ Allure et courbure cohérentes avec les calculs 3D :

>> Poinçonnement sous la charge appliquée



# Résultats de la planche d'essai

## Exploitation des fibres optiques

Dans les inclusions :

➤ Pas de mesure exploitable

Dans la PFTC :

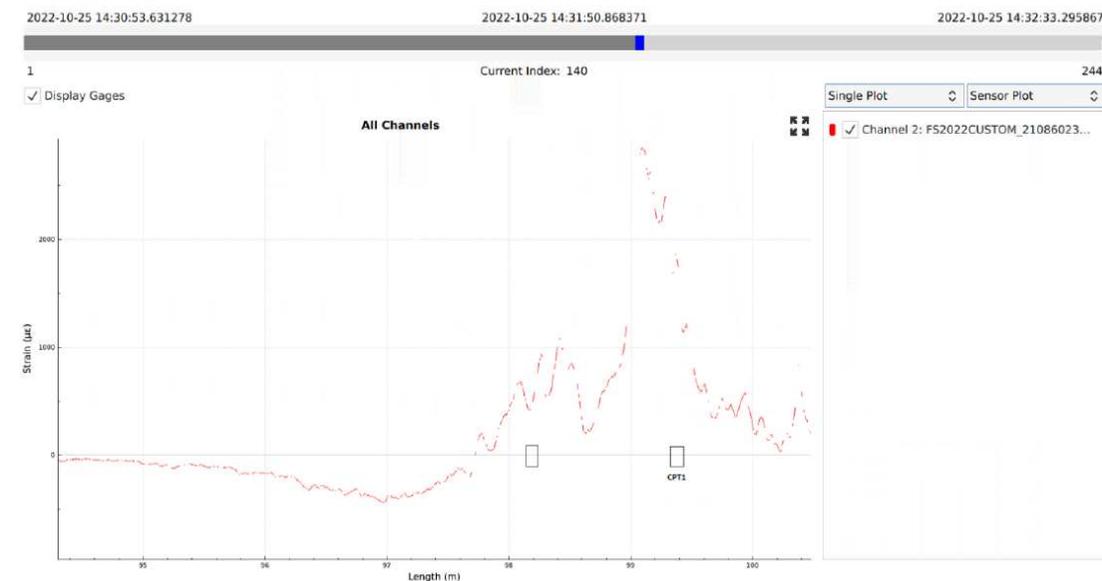
➤ Absence de point fixe ne permettant pas mesurer les tassements

➤ Allure et courbure cohérentes avec les calculs 3D :

>> Poinçonnement sous la charge appliquée

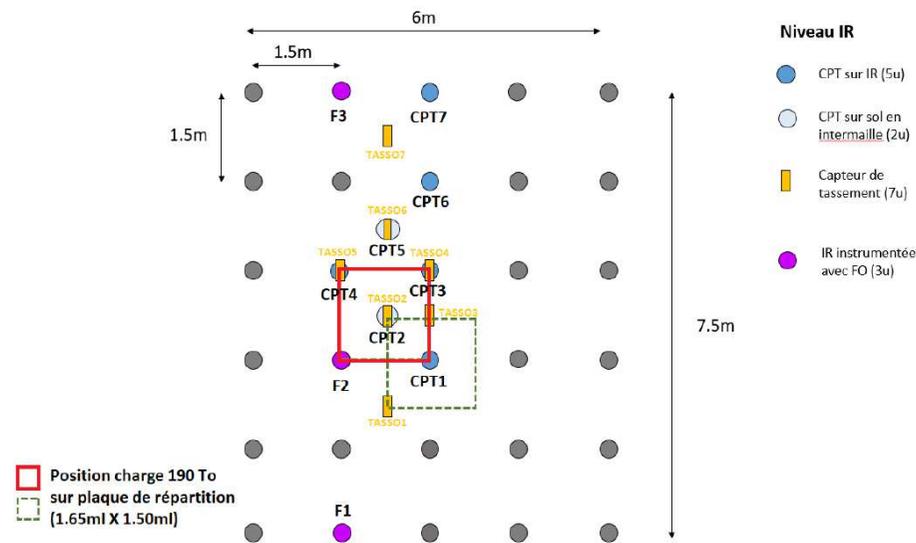
>> Effet point dur en tête d'inclusion

F5 - Position 1 – phase 2 – Charge 190 To – Zoom sur géogridde NIV IR+0.40



# Résultats de la planche d'essai

2<sup>nd</sup> essai = charge centrée sur une intermaille



# Résultats de la planche d'essai

## Suivi topographiques

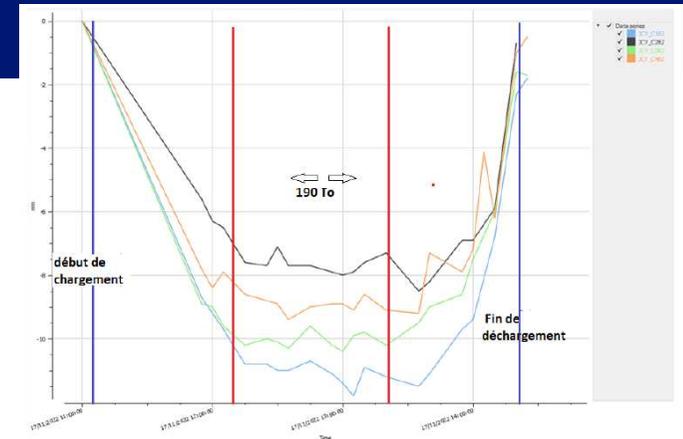
Lors de la première phase de l'essai (190t pendant 3h) :

- tassement moyen mesuré de 13mm
- tassement stable pendant toute la durée du palier
- tassement résiduel de 6mm

Lors de la seconde phase de l'essai (190t pendant 1h) :

- tassement moyen mesuré de 9mm
- tassement stable pendant toute la durée du palier
- tassement résiduel de 1-2mm

- Amplitude de tassement similaire au premier cas de chargement



Grphe-temps des mesures en Z sur camarteau lors de l'essai de chargement sur la position N°2 (Seconde phase)

Position N°2 – 2nd phase – 17/11/22	date	heure	Cibles topo Camarteau				Moyenne
			C1	C2	C3	C4	
Pose cibles sur camarteau	17/11/22	10H30	Z (en mm)	Z (en mm)	Z (en mm)	Z (en mm)	
Début mise en place de la charge	17/11/22	11H10	0	0	0	0	0.0
Charge complète 190T	17/11/22	12H10	-9.2	-6.7	-9.9	-8.4	-8.6
Charge complète 190T +1h	17/11/22	13H10	-10.9	-7.7	-9.8	-8.8	-9.3
Début déchargement	17/11/22	13H20	-11.2	-7.4	-10.2	-9.1	-9.5
Fin déchargement (sauf camarteau)	17/11/22	14H15	-2.2	-0.8	-1.6	-1	-1.4
Fin déchargement (yc camarteau)	17/11/22	14H20					
Déchargement + 1h	17/11/22	15H20					

Tableaux de synthèse des résultats topographiques de l'essai de chargement sur la position N°2

# Résultats de la planche d'essai

## CPT sur inclusions et intermaille

1<sup>er</sup> chargement : charge en intermaille

- Contrainte sur le terrain en place = 20% de la contrainte appliquée
- Contrainte sur les inclusions = 60% de la contrainte appliquée

2<sup>nd</sup> chargement : charge en intermaille

- Contrainte sur le terrain en place = 20% de la contrainte appliquée
- Contrainte sur les inclusions = 55% de la contrainte appliquée

Tableau de synthèse des pressions relatives mesurées lors de l'essai de chargement sur la position 2 (phase 1) :

Essai sur position N°2 - phase 1 16/11/2022	date	heure	CPT sur inclusions					CPT intermaille	
			CPT1	CPT3	CPT4	CPT6	CPT7	CPT2	CPT5
			Delta Pression en kPa						
Pose cibles sur plaque de répartition	16/11/22	11H42	0	0	0	0	0	0	0
Pose cibles sur camarteau	16/11/22	12H05	4	3	5	0	0	3	0
Début mise en place de la charge	16/11/22	12H20	4	3	5	0	0	3	0
Charge complète 190T	16/11/22	13H30	473	389	427	18	121	147	45
Charge complète 190T +1h	16/11/22	14H30	475	391	427	18	122	147	45
Charge complète 190T +2h	16/11/22	15H30	477	392	428	18	123	147	45
Charge complète 190T +3h	16/11/22	16H30	480	393	429	18	125	146	44
Début déchargement	16/11/22	16H46	467	386	420	18	110	143	39
Fin déchargement (sauf camarteau)	16/11/22	18H08	26	51	44	-4	13	10	1
Déchargement + 1h	16/11/22	19H08	25	48	40	-3	14	10	0

Tableau de synthèse des pressions relatives mesurées lors de l'essai de chargement sur la position 2 (phase 2) :

Essai sur position N°2 - phase 2 17/11/2022	date	heure	CPT1	CPT3	CPT4	CPT6	CPT7	CPT2	CPT5
			Delta Pression en kPa	Delta Pression en kPa	Delta Pression en kPa	Delta Pression en kPa	Delta Pression en kPa	Delta Pression en kPa	Delta Pression en kPa
			Pose cibles sur camarteau	17/11/22	10H30	0	0	0	0
Début mise en place de la charge	17/11/22	11H10	0	0	0	0	0	0	0
Charge complète 190T	17/11/22	12H10	468	389	412	22	117	136	44
Charge complète 190T +1h	17/11/22	13H10	468	370	412	20	119	135	44
Début déchargement	17/11/22	13H20	468	370	412	20	119	135	44
Fin déchargement (yc camarteau)	17/11/22	14H20	-3	6	0	-3	1	-3	0
Déchargement + 1h	17/11/22	15H20	-11	1	-10	-4	-3	-5	0

# Résultats de la planche d'essai

## Tassomètres

Pas de tassement significatifs mesurés

## Fibres optiques

Pas de mesures exploitables

# Conclusion

# Conclusions

Les deux essais de chargement conduisent à un comportement du renforcement de sol cohérent avec les résultats de modélisations FLAC 3D ou PLAXIS 3D. Les critères de dimensionnement associés sont respectés.

L'instrumentation complète et redondante permet de valider le comportement. Le suivi à long terme en phase exploitation et sous charge surfacique doit permettre de mieux appréhender les mécanismes :

- Mesures de contraintes via les CPT
- Tassement via les F.O. de type Rayleigh qui permettent d'avoir une bonne résolution (à traiter)

Faible impact des géogrilles dans le dimensionnement.

La planche d'essai n'a pas permis de vérifier le comportement des géogrilles du fait du niveau de sollicitation et des mesures de fibres optiques (à traiter).

Pour les grandes transitions d'aujourd'hui et demain : Pertinence de la planche d'essai pour valider la solution technique apportée par le Groupement en solution variante :

- Passage « inclusions phi1220 maille 3,6\*3,6 »  
à « inclusions phi300 maille 1,5\*1,5 »
- Optimisation des longueurs en EXE

Les solutions de renforcement de sol sont des bons compromis

Gains apportés par la VARIANTE	BASE	VARIANTE
Béton	27 350 m <sup>3</sup>	4 700 m <sup>3</sup>
Acier	450 t	110 t (40% armature de principe)
Production prévisionnelle	320 j	150 j