



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Webinaire Octobre 2022

Analyse des données d'auscultation des soutènements d'une station de métro à Copenhague et comparaison avec les méthodes de calculs



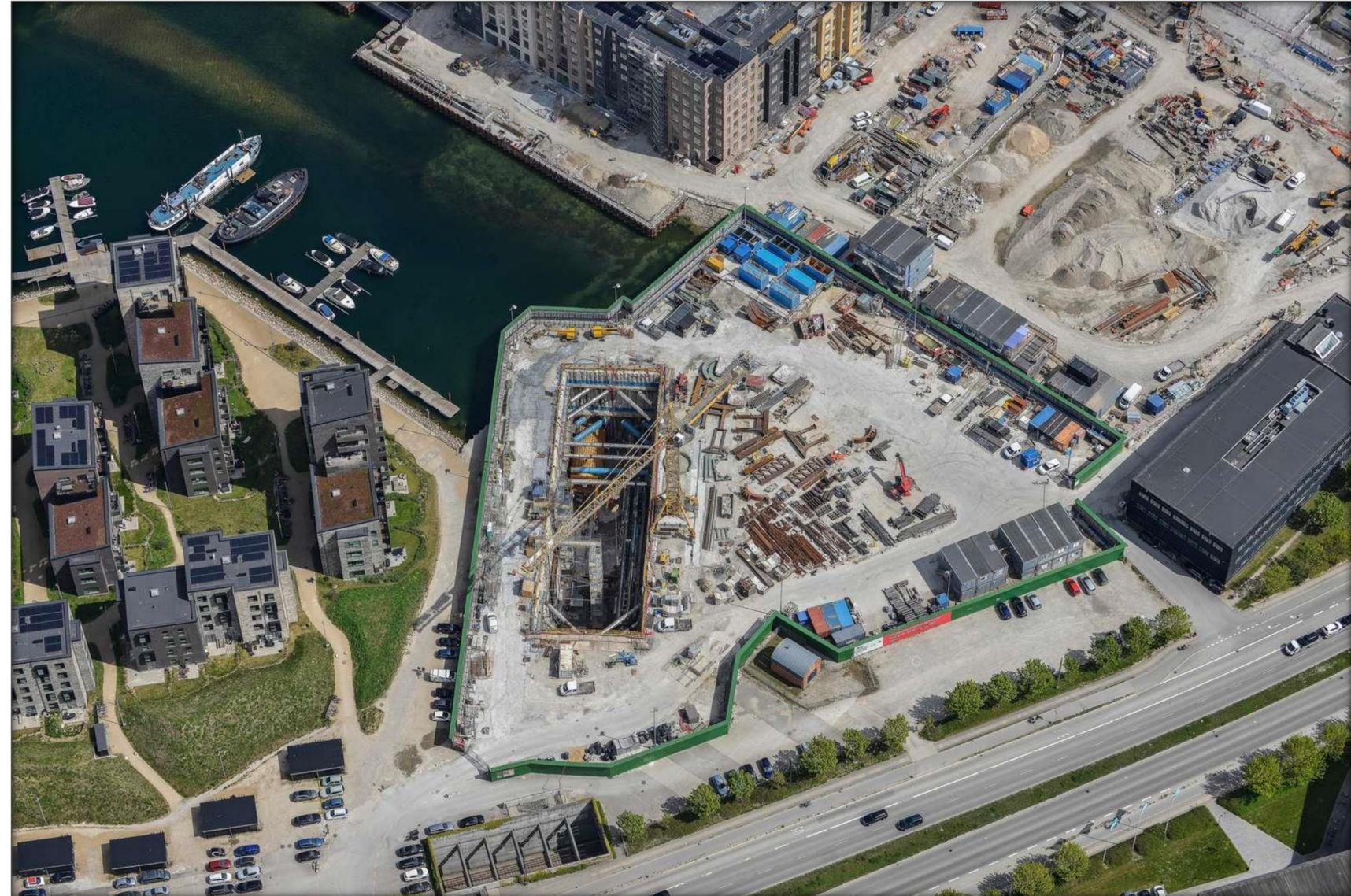
GRANDS PROJETS

NICOLAS WALBRECQ – nicolas.walbrecq@vinci-construction.com

MÉLANIE HOSTI – melanie.hosti@vinci-construction.com

Sommaire

1. Introduction
2. Conception de la Station SLU
3. Analyses des données Auscultations et identifications des écart
 - 3.1. Programme
 - 3.2. Inclinomètres
 - 3.3. Jauge de contrainte boutons/tirants
4. Retro-calculs et calages des paramètres
5. Comparaison avec un dimensionnement aux normes et pratiques françaises



1. Introduction

Projet

- Prolongement SUD de la ligne 4 du métro de Copenhague
- 6 gares et 8km de tunnel (bi-tube)
- Groupement VINCI Construction Grands Projets / HOCHTIEF
- Etude d'Exécution en 2018/2019
- Construction 2019/2023

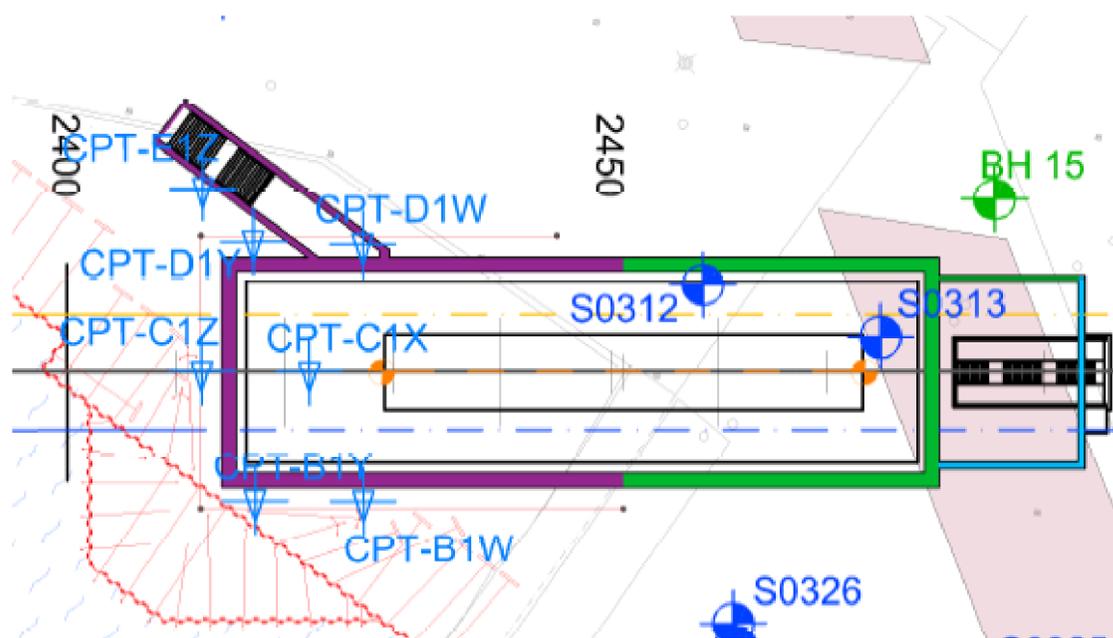
- Station SLUHOLMEN: 110m * 25m * 20m
- Plage d'étude auscultation 2019/2020

Dimensionnement

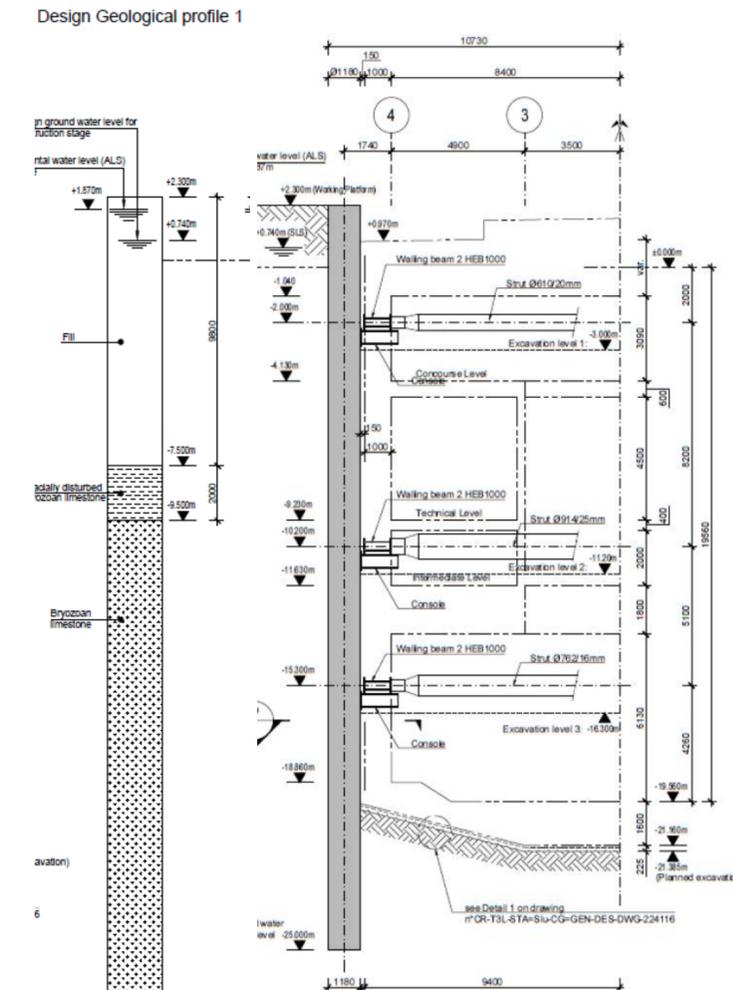
- Applications danoises des Eurocodes
- Calculs en approche 3
- Coefficient d'importance 1.1
- Calcul à ELS pour les déformations
- Cas de charge accidentel: Perte d'un bouton/tirant
- Calcul EF 2D demandé par le client

2. Conception de la station SLU

- Terrain naturel : +2.3m
- Niveau d'eau design: +0.74m service et +1.05m travaux et dimensionnement ELU
- 2 stratigraphies:



Soil	Design profile 1 (violet)	Design profile 2 (vert)
Fill	+2.3m	+2.3m
Lower Clay Till	-	-4.8
Glacially disturbed Limestone	-7.5m	-7.0
Bryozoan Limestone	-9.5m	-9.0



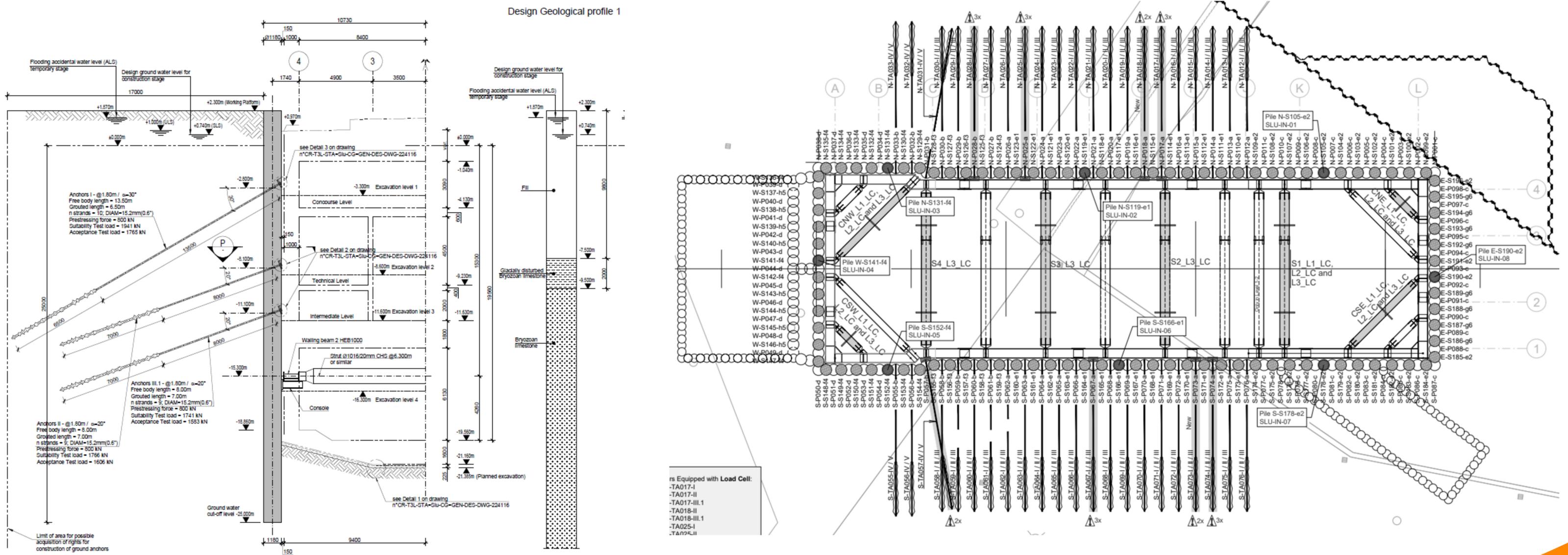
2. Conception de la station SLU

- Paramètres mécaniques :
Mohr-Coulomb

	Abbreviation	Bulk unit weight	Poisson's ratio	E'	c'	ϕ'	k_0	q_s^*
		(kN/m ³)	(-)	(MPa)	(kPa)	(°)	(-)	(kPa)
Fill	FY	18.0	0.2	8	0	30	0.5	
Lower clay till	ML2	21.5	0.2	65	10	33	2.5	
Glacially disturbed limestone	BL	21.0	0.2	1 000	110	46	1.0	400
Bryozoan limestone	BL	22.0	0.2	1 000	130	47	1.0	550

Table 2: Geotechnical design parameters and stratigraphy (from REF 2 and REF 9 for q_s^*)

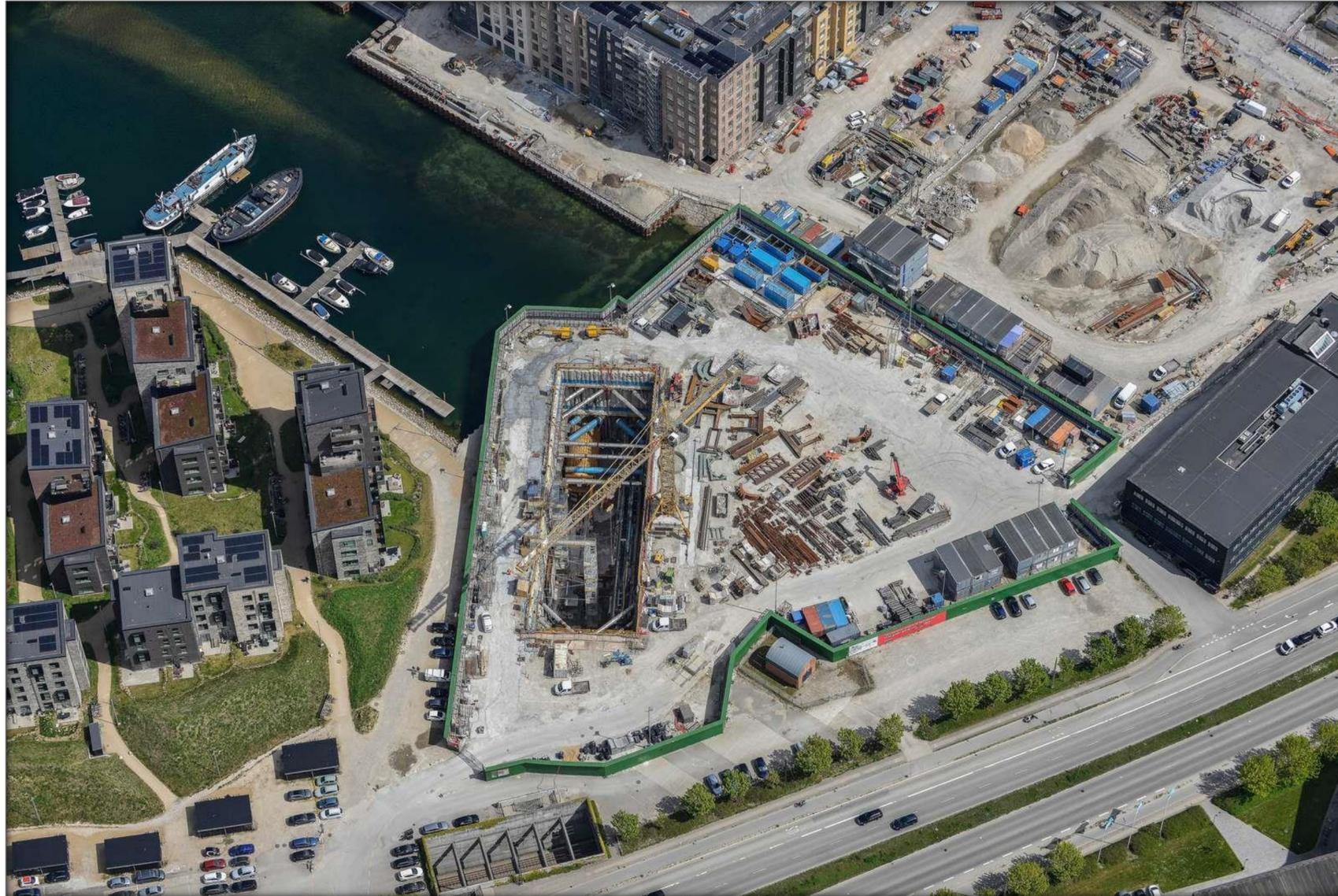
2. Conception de la station SLU



2. Conception de la station SLU

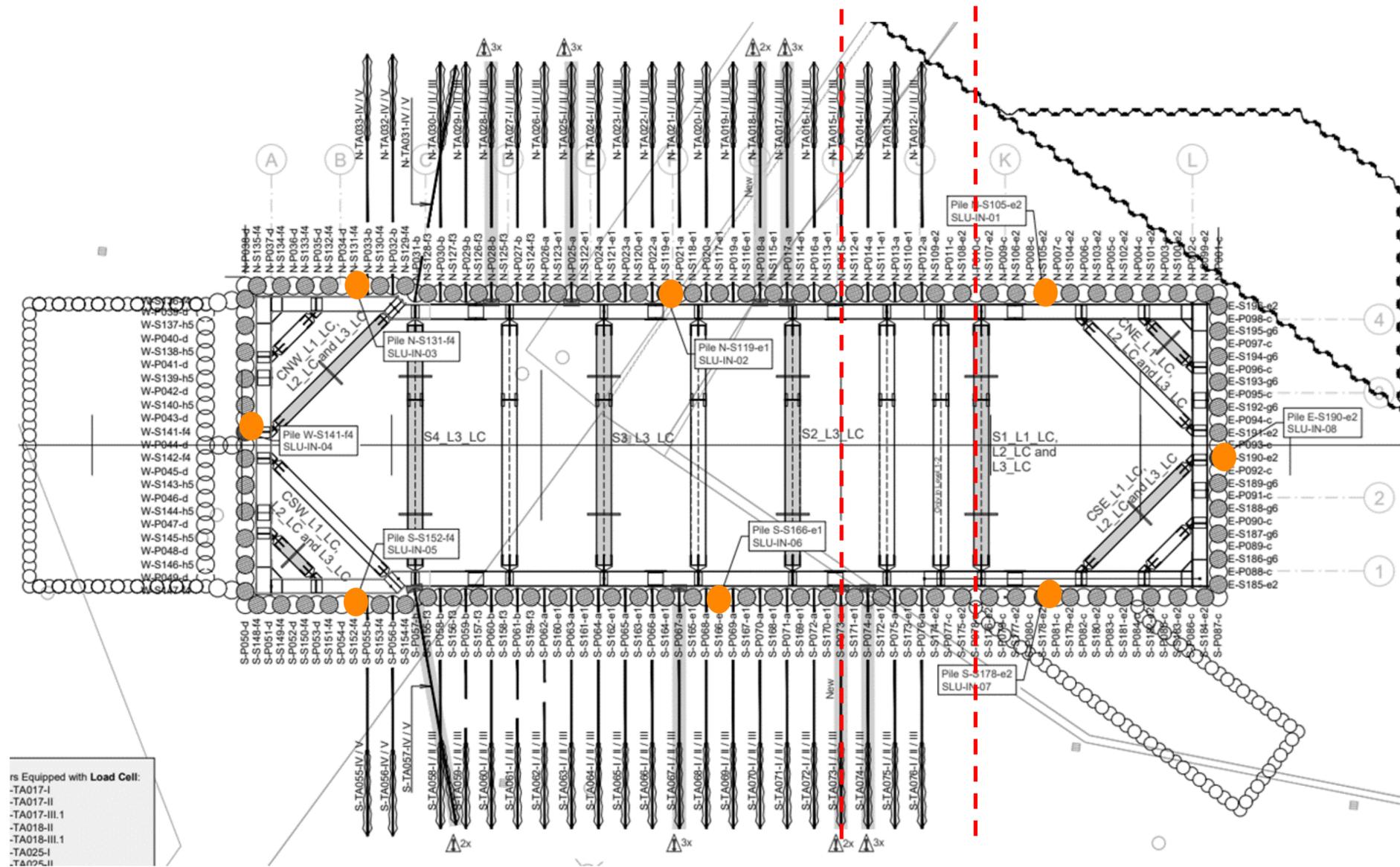


2. Conception de la station SLU



3.1 Programme d'auscultation (Automatique)

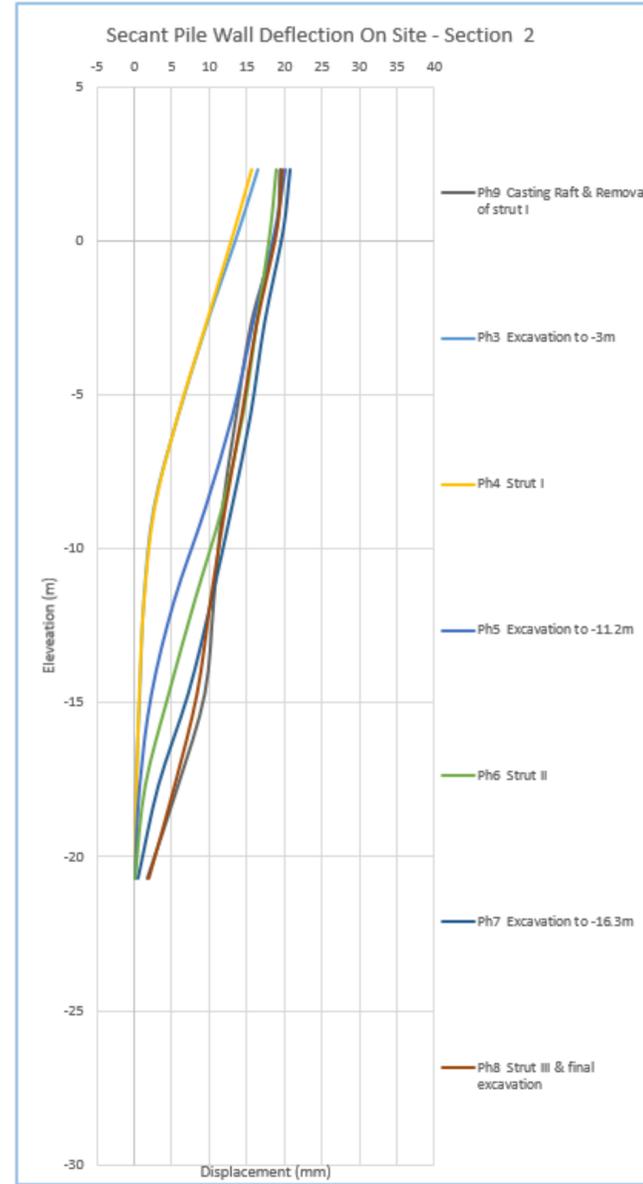
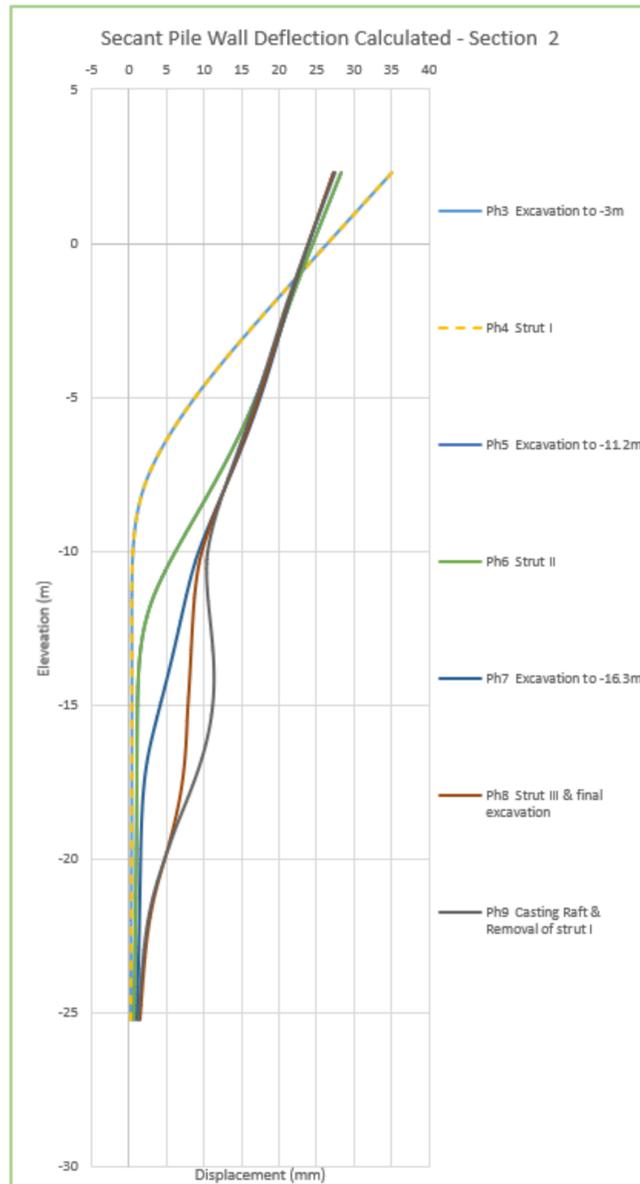
NOTA: pas d'avoisinant



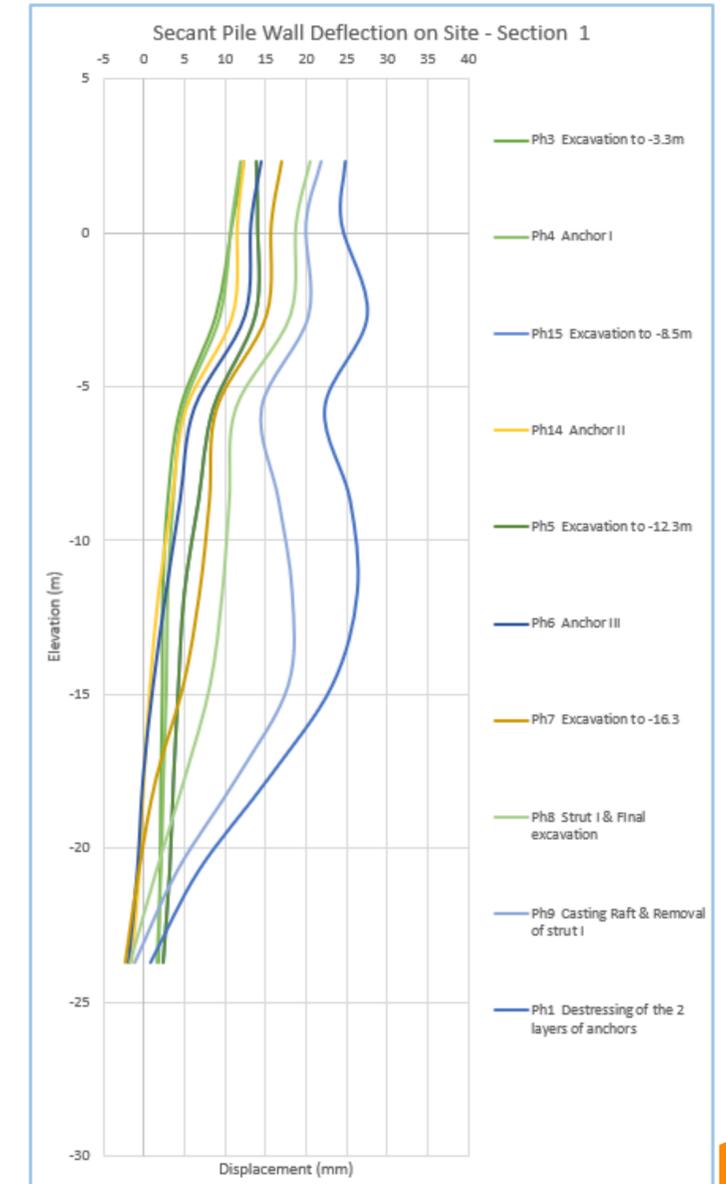
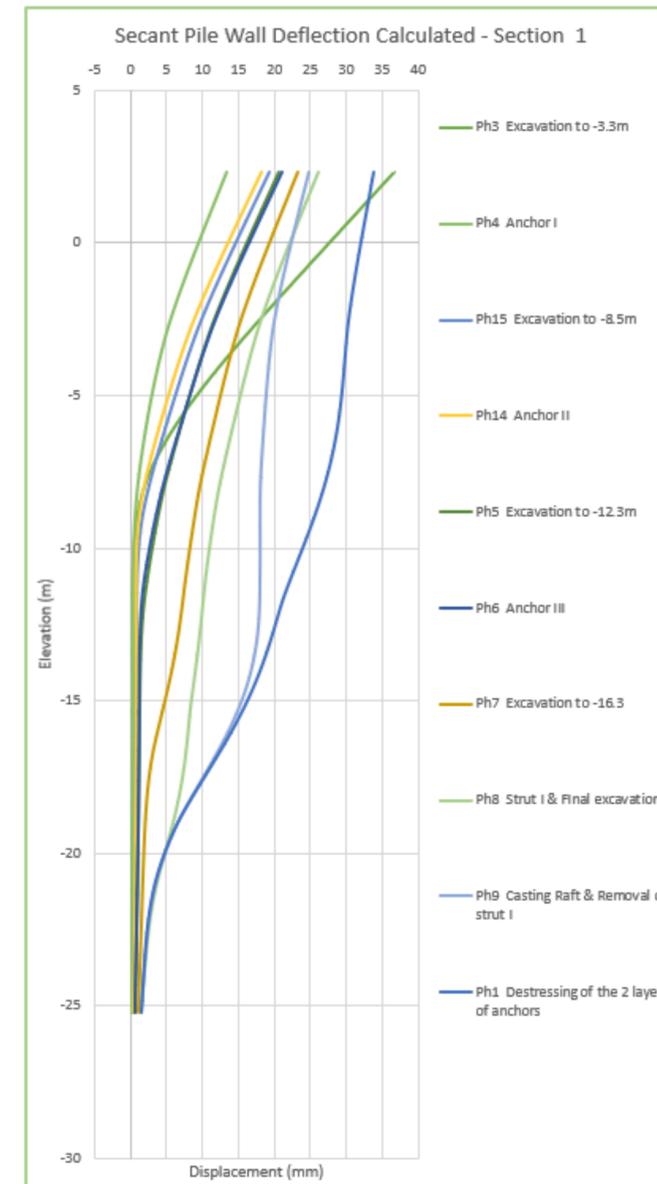
- • 8 inclinomètres, mesures tous les 2m
- 50% des boutons (20 boutons): strain gage
- 10% des tirants (21 tirants): strain gage
- 2 Piezomètres

3.2. Données inclinométriques

Section butons



Section tirants

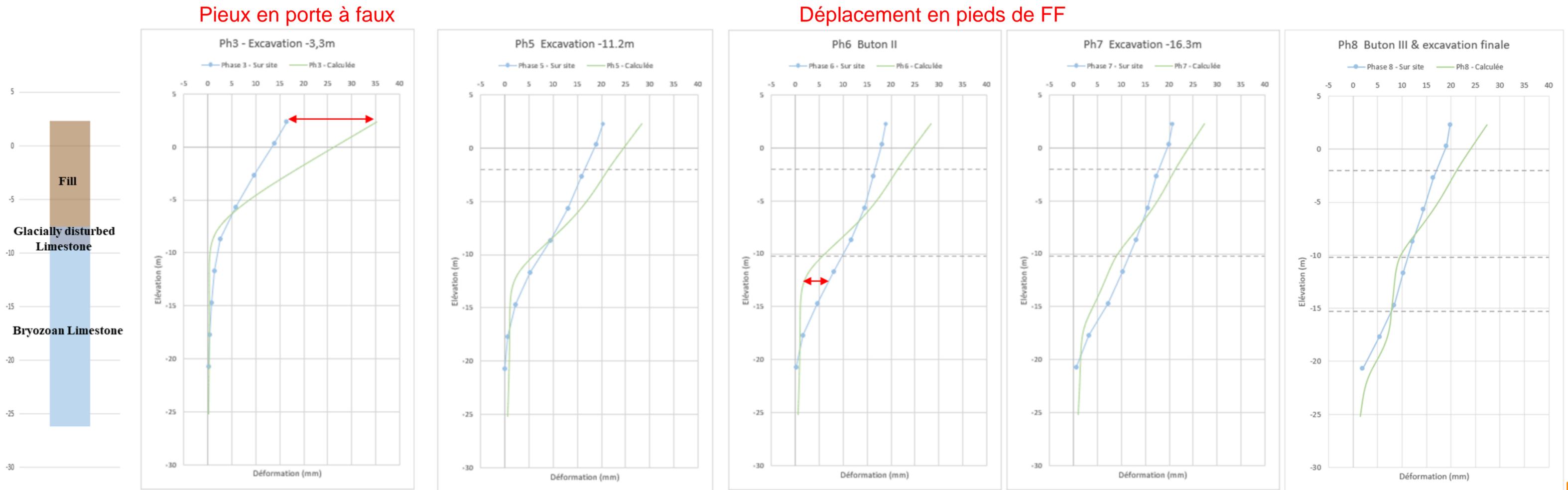


NOTA: Pieds inclinomètres au-dessus de la fiche des pieux

ANALYSE DES DONNÉES D'AUSCULTATION DES SOUTÈNEMENTS D'UNE STATION DE MÉTRO À COPENHAGUE ET COMPARAISON AVEC LES MÉTHODES DE CALCULS

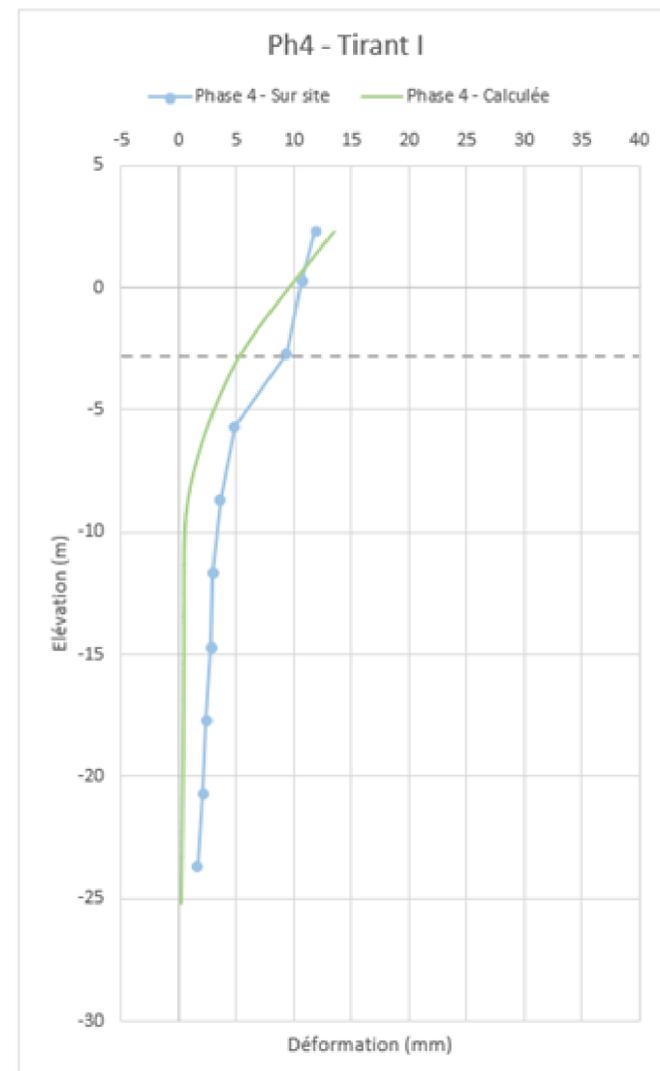
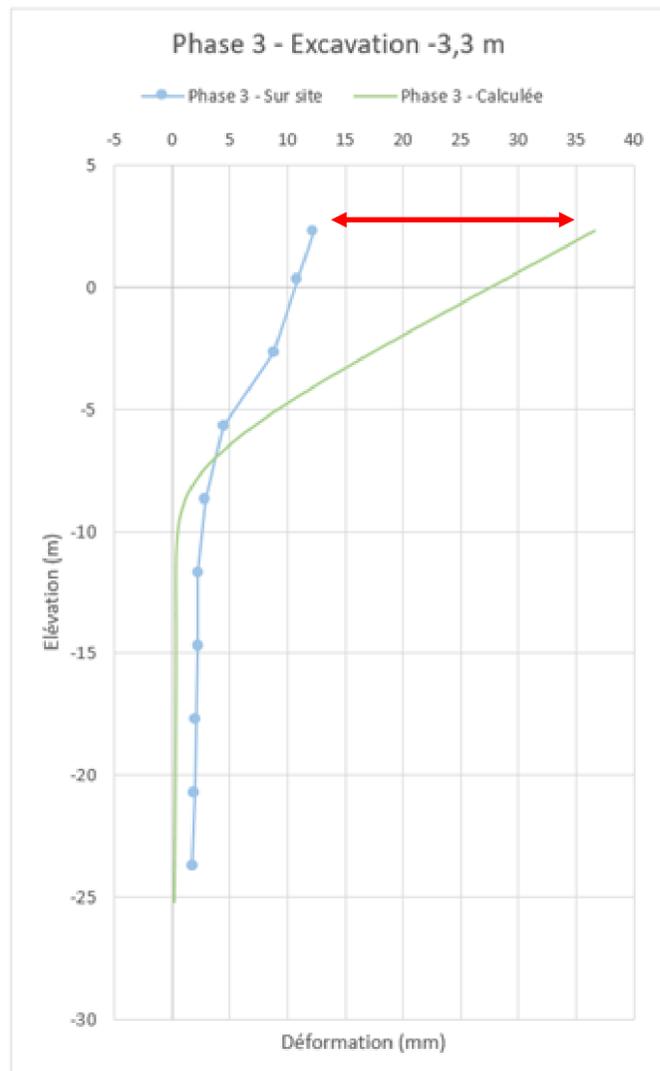
3.2. Données inclinométriques

Identifications des écarts de déformation – section butonnée



3.2. Données inclinométriques

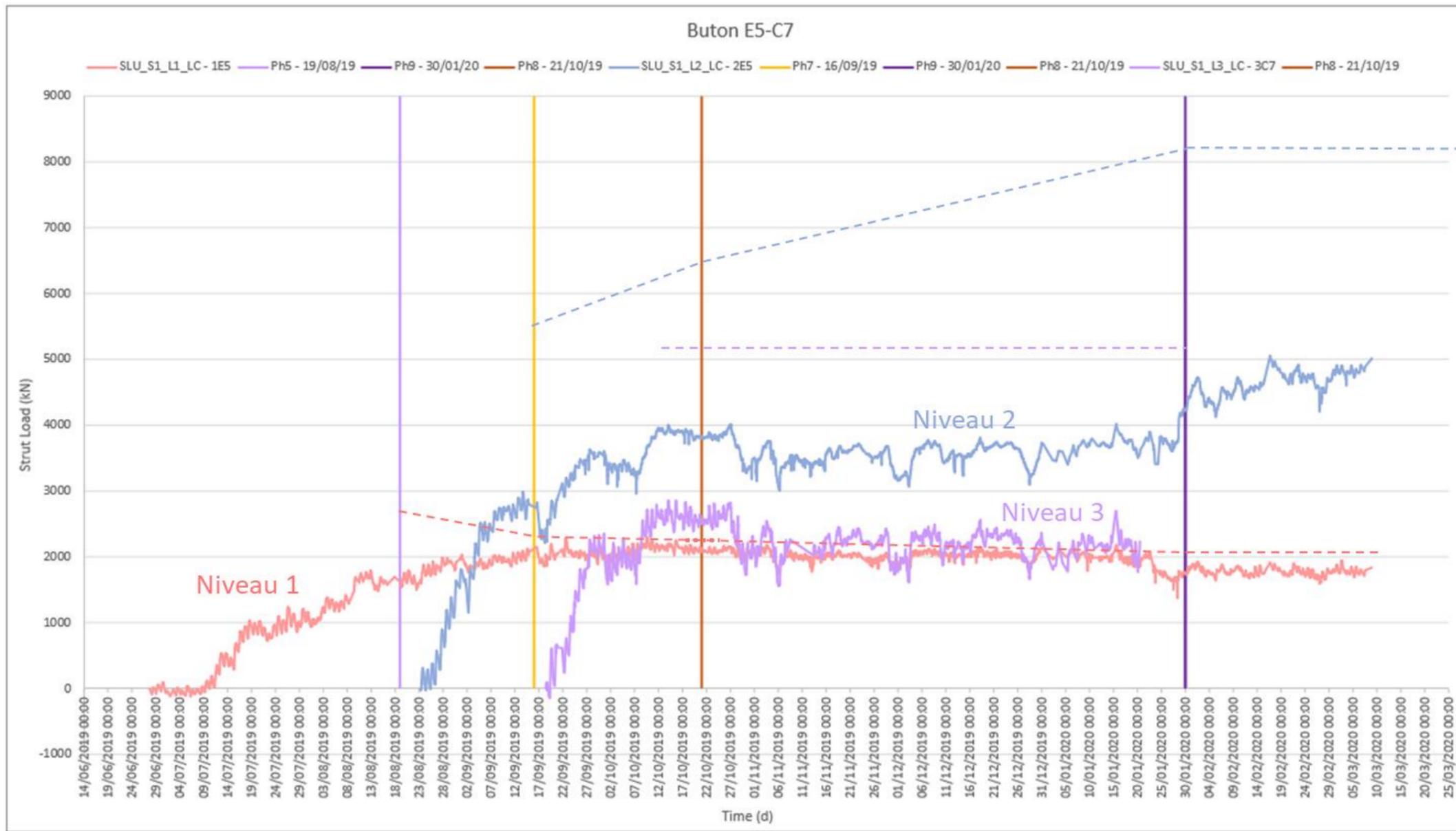
Identifications des écarts de déformation – section tirantée



Effet de la mise en tension des tirants non mesurée sur site



3.3. Auscultation des Butons

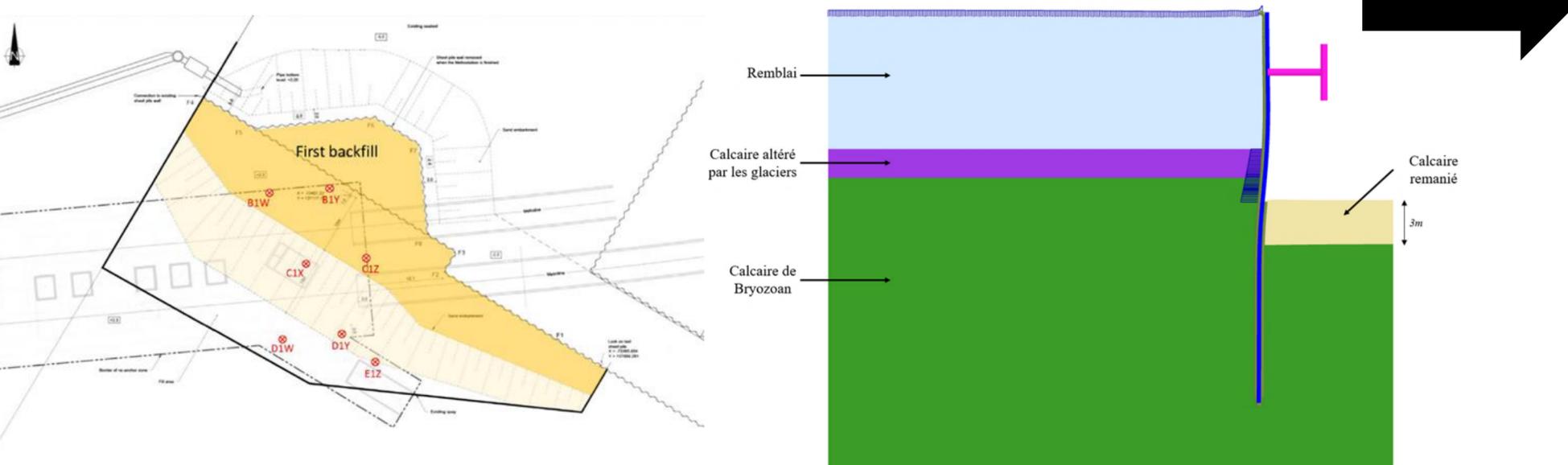


- Niveau sup : OK
- Niveau moy/inf : 20 à 100% d'effort en moins

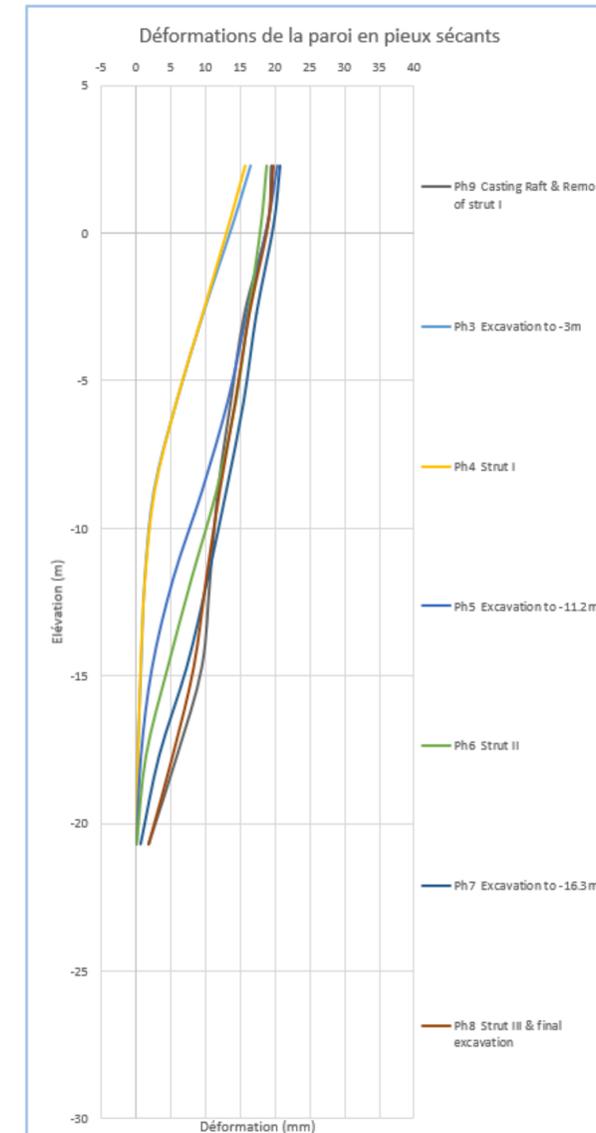
4. Rétro-calcul

Correction / calage du modèle de calcul:

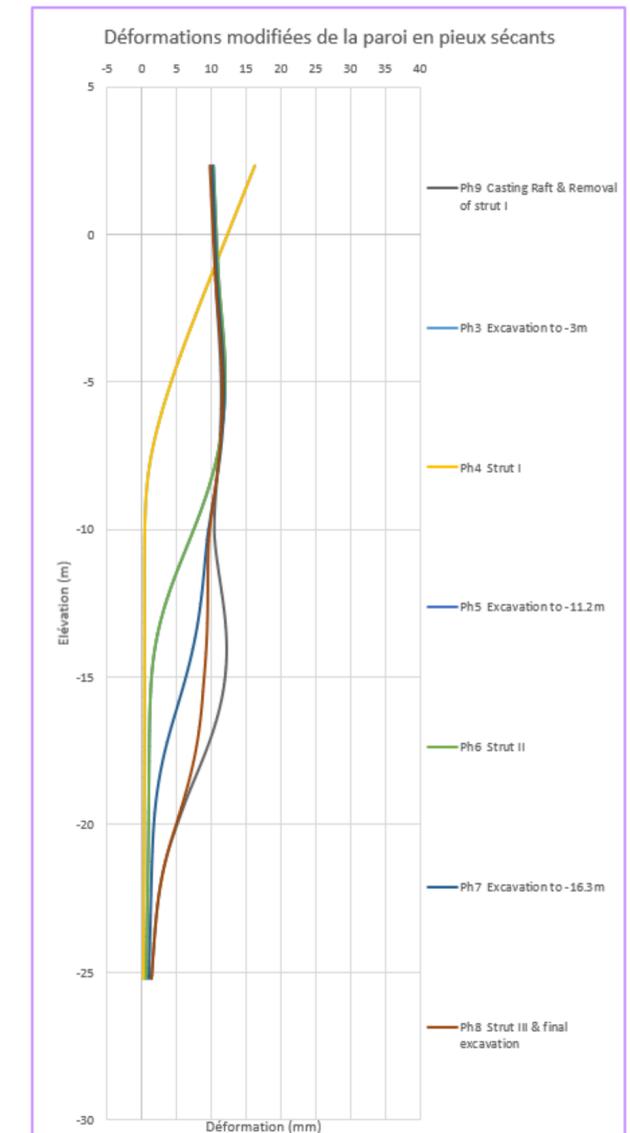
- Qualité du remblai en surface
- Annulation déformation lors de la mise en tension des tirants
- Endommagement du Calcaire en fond de fouille



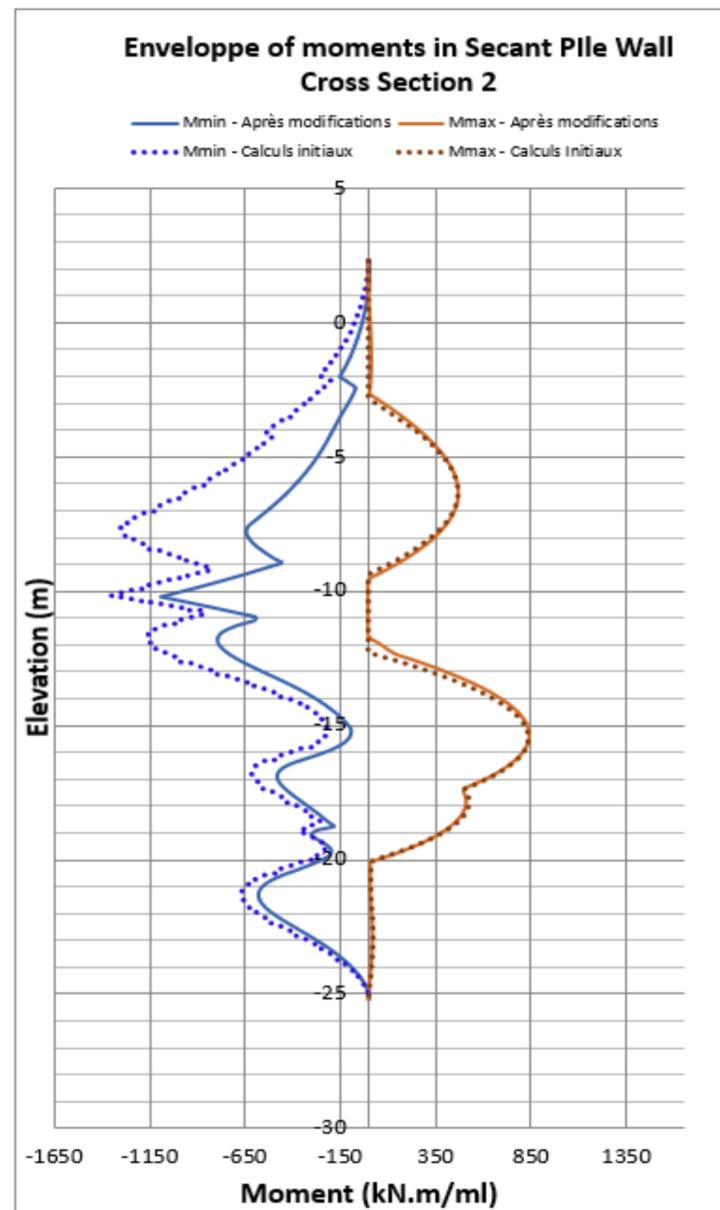
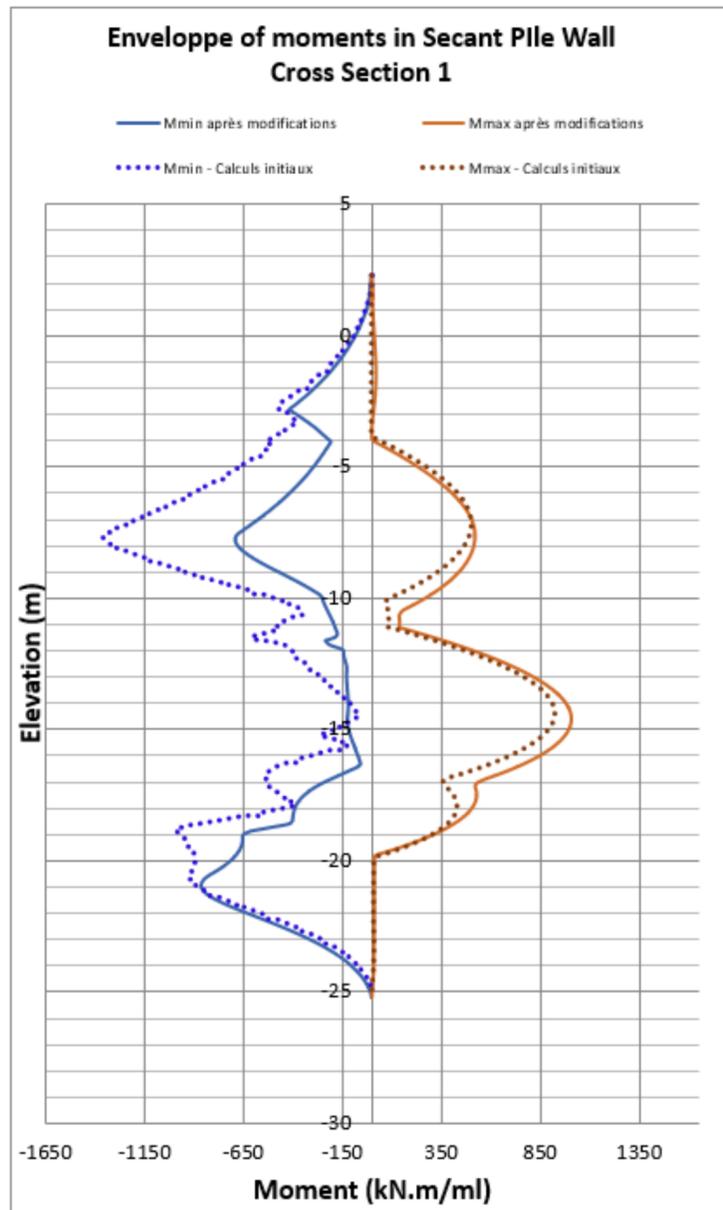
Mesures



Calage



4. Rétro-calculé – Comparaison des Efforts ELU



Calculé	19/08/2019	16/09/2019	21/10/2019	30/01/2020
Strut no.	ULS Ph5	ULS Ph7	ULS Ph8	ULS Ph9
1E5	2 699 kN	2 304 kN	2 252 kN	2 046 kN
2E5		5 574 kN	6 531 kN	8 110 kN
3C7			5 103 kN	

Modifié	19/08/2019	16/09/2019	21/10/2019	30/01/2020
Strut no.	ULS Ph5	ULS Ph7	ULS Ph8	ULS Ph9
1E5	1495 kN	1364 kN	1189 kN	1132 kN
2E5		3821 kN	4 377 kN	5 675 kN
3C7			2995 kN	

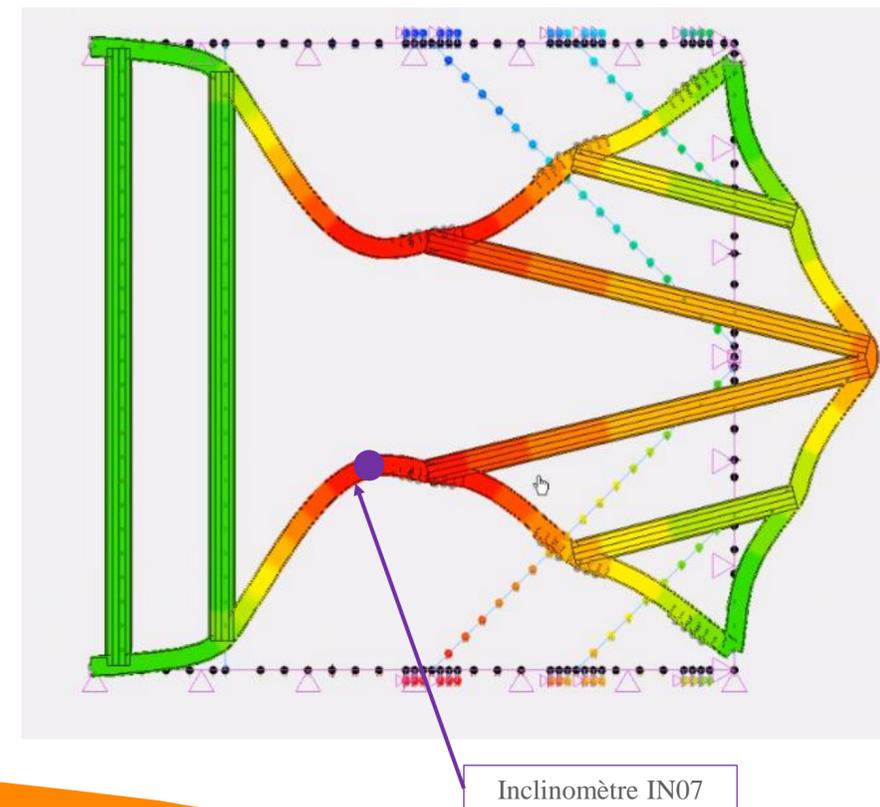
Sur-estimation d'un facteur 2 pieux/supports

- Réduction moment max de 40%

- Réduction compression butons inf/moy de 50%

4. Conclusions Retrocalcul

- Ordres de grandeur des mesures en accord avec estimations déplacement/effort
- Ecart local / ponctuels significatifs: simple au double
- Rétro-calcul basés sur deux modifications majeures
- Limitation forte sur l'appréhension des phénomènes 3D



5. Comparaison DS 1997 et NF P 94-282

- DS 1997-1 : Approche 3
- 5 cas ELU => 2 pour notre ouvrage
- $K_{fi} = 1.1$



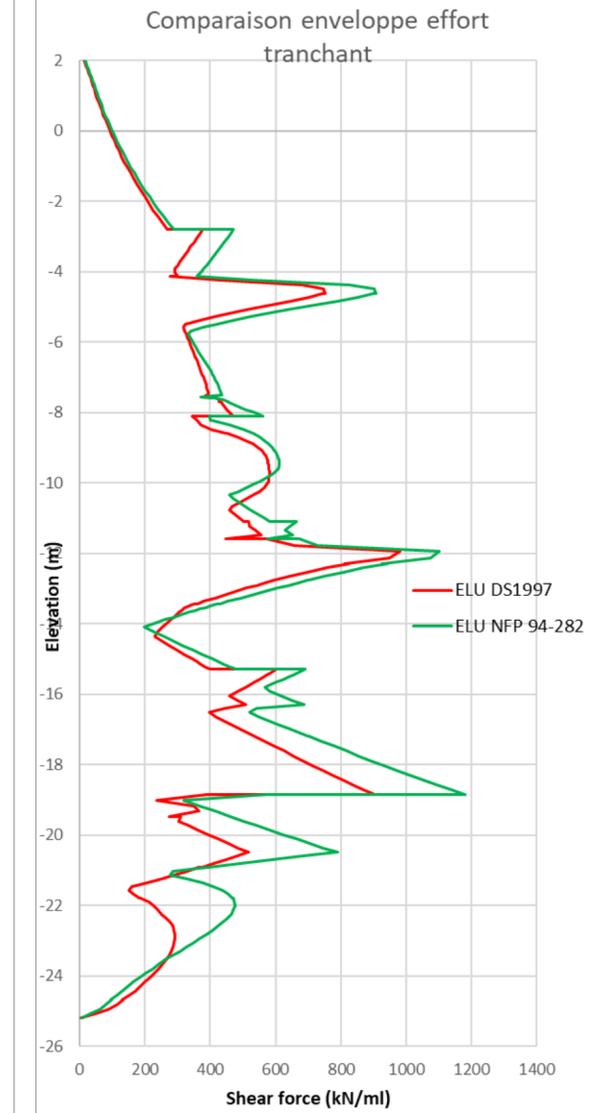
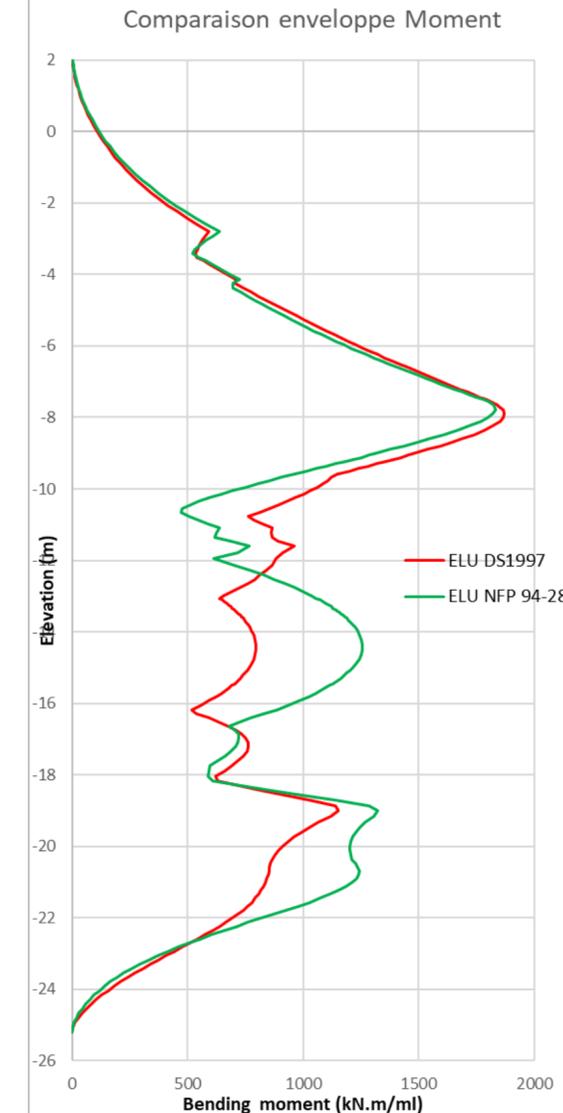
- Governing load combinations

ULS 4 for pile reinforcement
ULS 5 for steel structures

Table A. 3-1 NA - Partial factors for STR/GEO design: Spread foundations, earth pressure and stability

Design approach			3					
Limit state			STR/GEO			STR		
Load combination			1	2	3	4	5	
Partial factors on actions see equation (2.6a) 8)			γ^*	A1* or A2'				
Permanent action ⁶⁾	Self-weight, in general ¹⁾	Unfavourable	$\gamma_{G,sup}$	$1,2 \cdot K_{FI}^{4)}$	$1,0 \cdot K_{FI}$	$1,2^{4)}$	1,0	1,0
		Favourable	$\gamma_{G,inf}$	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0
	Self-weight of soil and (ground) water, geotechnical structures ²⁾	Unfavourable	$\gamma_{G,sup}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
		Favourable	$\gamma_{G,inf}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Variable action, Buildings ³⁾	Leading	Unfavourable	$\gamma_{Q,1}$	0	$1,5 \cdot K_{FI}$	0	1,5	0
	Accompanying	Unfavourable	$\gamma_{Q,i}$	0	$1,5 \cdot \psi_0 \cdot K_{FI}$	0	$1,5 \cdot \psi_0$	0
Variable action, Bridges ³⁾	Leading	Unfavourable	$\gamma_{Q,1}$	0	$1,4 \cdot K_{FI}^{5)}$	0	$1,4^{5)}$	0
	Accompanying	Unfavourable	$\gamma_{Q,i}$	0	$1,5 \cdot \psi_0 \cdot K_{FI}$	0	$1,5 \cdot \psi_0$	0
Partial factors for soil parameters see equation (2.7a)			γ^{M}	M2				
Angle of shearing resistance ⁷⁾			γ_{ϕ}	1,2	$1,2 K_{FI}$		1,0	
Effective cohesion			γ_c	1,2	$1,2 K_{FI}$		1,0	
Undrained shear strength			γ_{cu}	1,8	$1,8 K_{FI}$		1,0	
Unconfined strength			γ_q	1,8	$1,8 K_{FI}$		1,0	
Weight density			γ_s	1,0	1,0		1,0	
Partial factors for ground resistances see equation (2.7b)			γ^{R}	R3				
Spread foundations			γ_b	-	-	-	-	-
Earth pressure and stability			$\gamma_{R,e}$	-	-	-	-	-
Factor to partial factor to strength parameters and bearing capacity for structural materials, cf DS/EN 1992 - DS/EN 1996 and DS/EN 1999			γ_0	1,0	1,0	K_{FI}	K_{FI}	$1,2 \cdot K_{FI}^{4)}$

DS/EN 1997-1 DK NA:2015



6. Habitudes locales

Tirants actifs dans les pieux primaires sans lierne:

Pratique courante au Danemark et Allemagne du nord

⇒ Justification complexe de la distribution des efforts de compression via les pieux non-armés

⇒ Plaque d'ancrage diamètre 540mm

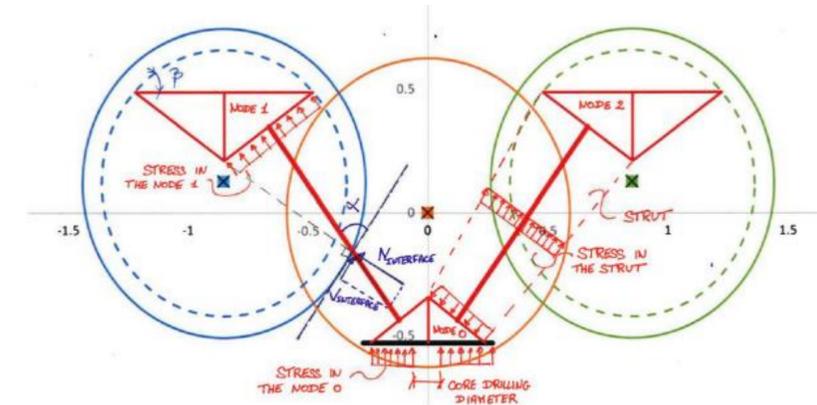


Figure 2 - Strut and tie model

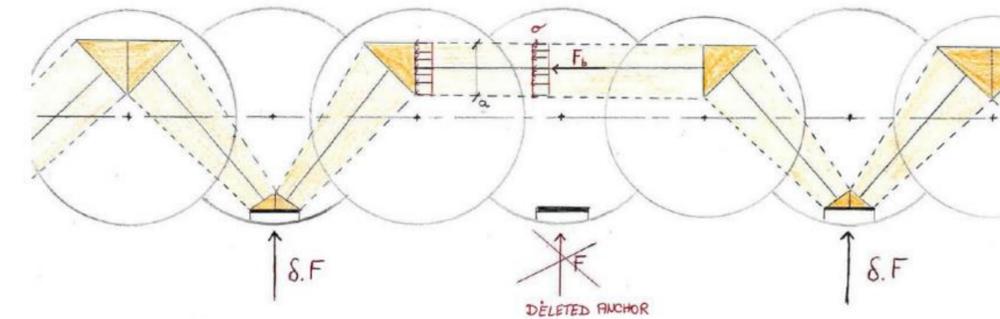


Figure 3 - Strut and tie model - Accidental Load Case

