

EXPÉRIMENTATION EN VRAIE GRANDEUR SUR LES EFFETS DU CREUSEMENT DES TUNNELS SUR LES PIEUX

CFMSj: INTERACTION ENTRE OUVRAGES ET TUNNELS

02/04/2021

Wassim Mohamad

Directeur de thèse:
Emmanuel Bourgeois

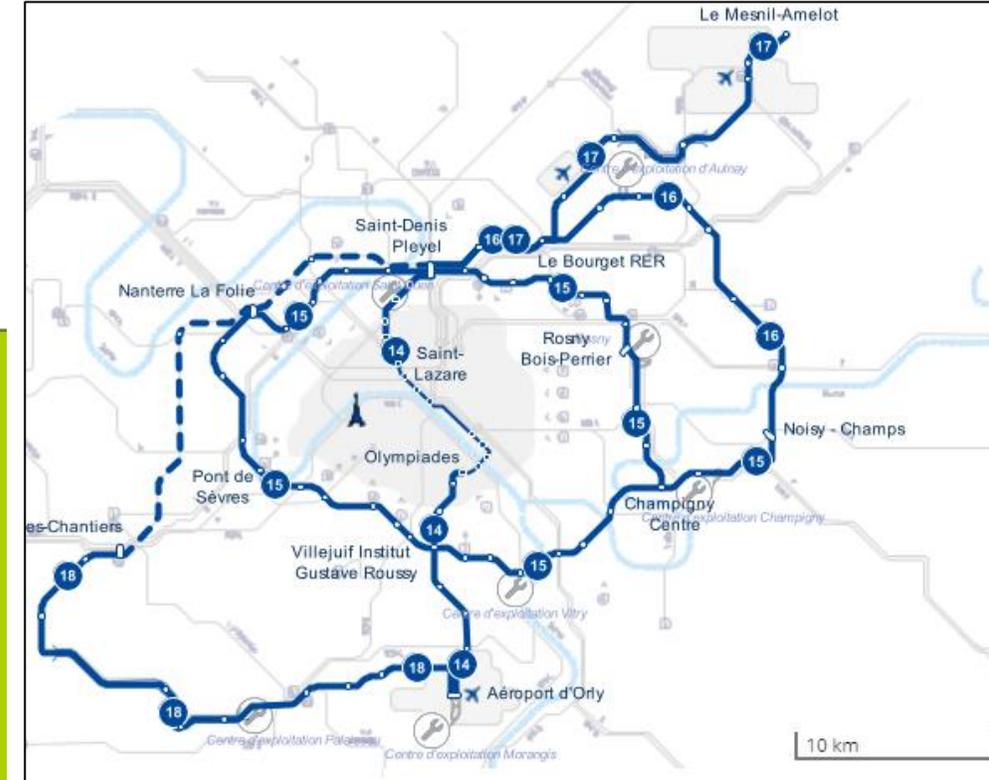
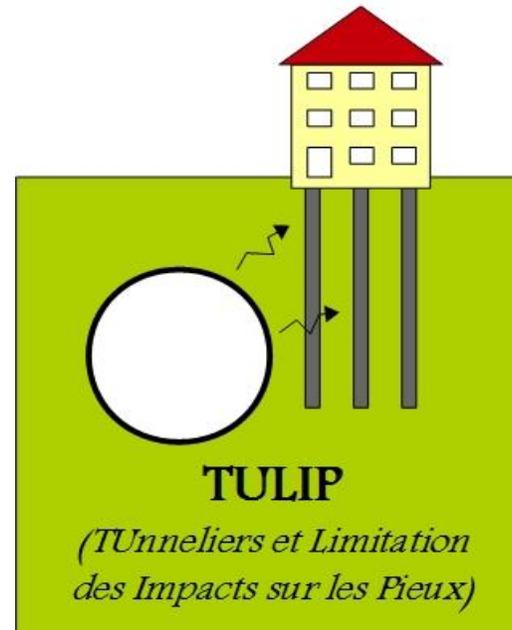
Encadrants:
Alain Le Kouby
Fabien Szymkiewicz

Sommaire

- Introduction
- Etat de l'art
- Instrumentation du sol
- Instrumentation des pieux
- Prédiction du comportement des pieux

Introduction

- Grand Paris Express
 - 200 km de lignes automatiques et 68 gares
 - quatre lignes 15, 16, 17 et 18 + prolongation de la ligne 14
 - Creusement à proximité des fondations profondes
- Projet TULIP: Tunneliers et Limitations des Impacts sur les pieux

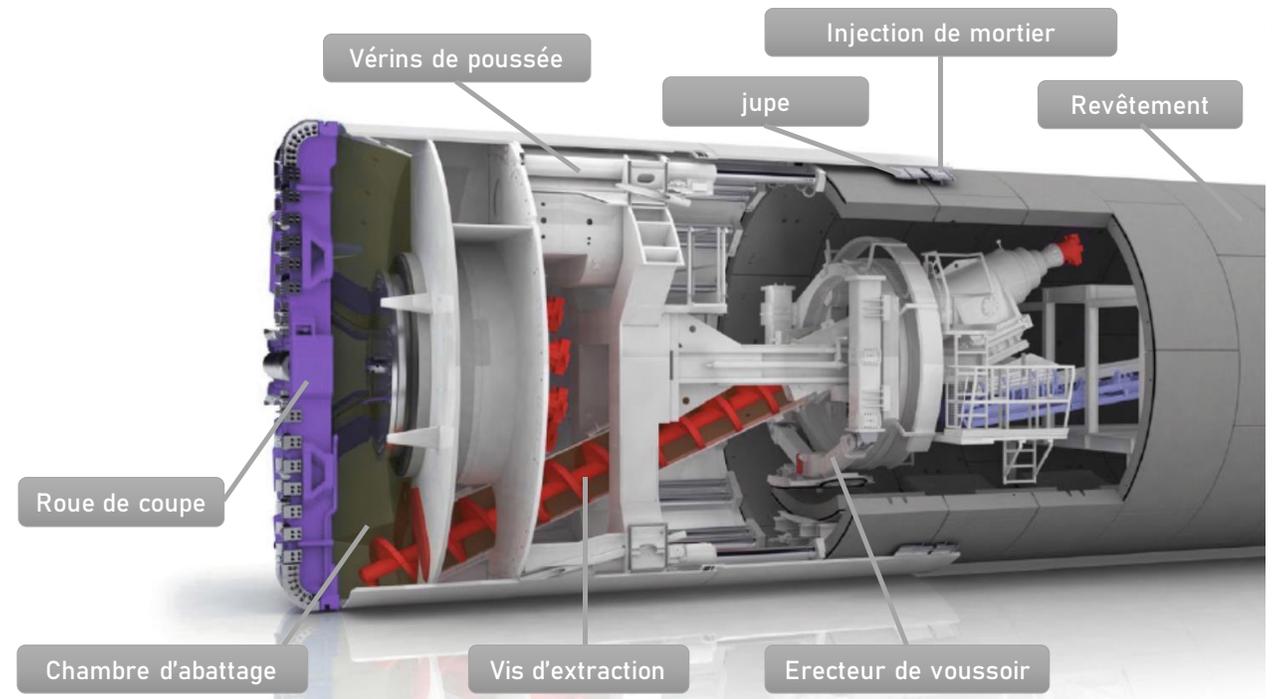


Plan des futures lignes de métro
<https://www.societedugrandparis.fr/gpe/carte>

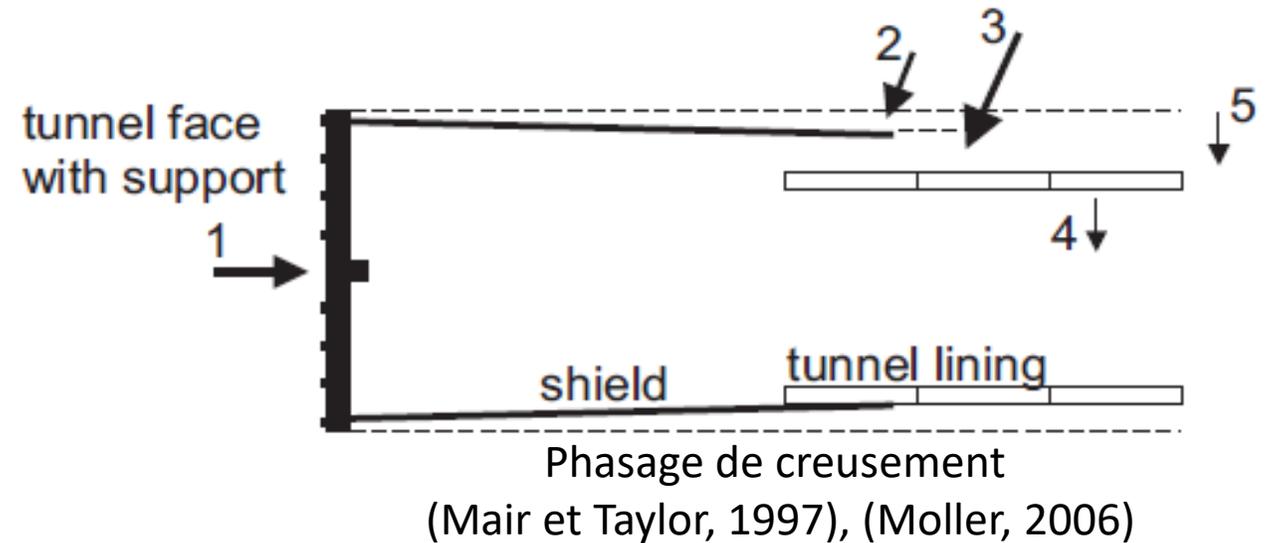
Etat de l'art

Composantes d'un tunnelier à pression de terre et phasage du creusement

- Tête d'abattage: roue de coupe
- Bouclier entre la roue de coupe et le système d'érection des voussoirs
- Système de marinage
- Erecteur de voussoirs (jupe)



éléments d'un tunnelier (<https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2016/01/Fiche-technique-tunneliers.pdf>)



Expérimentations en vraie grandeur

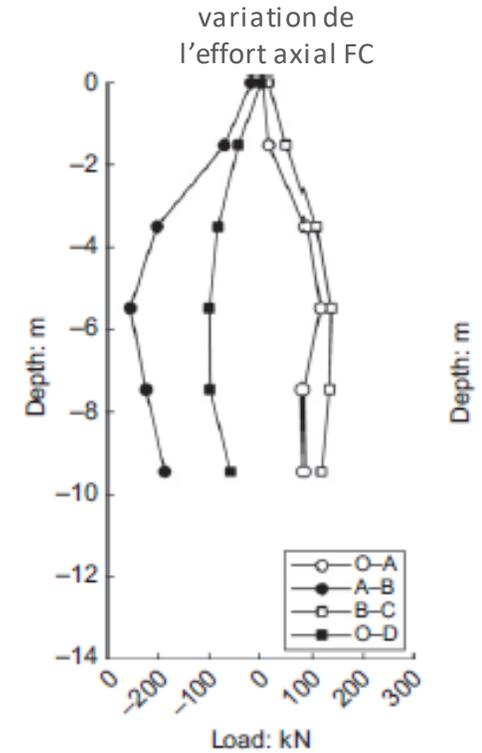
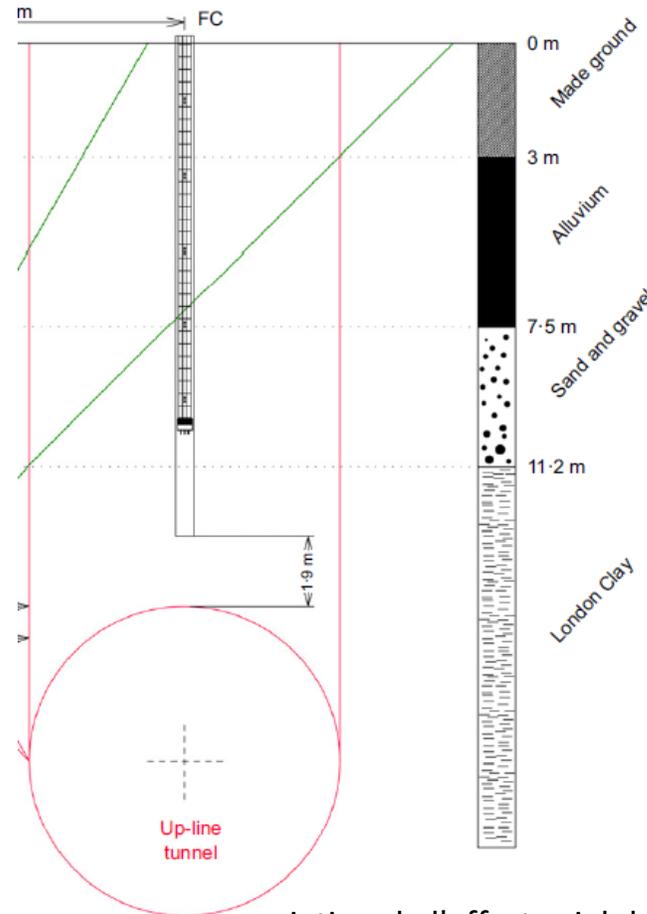
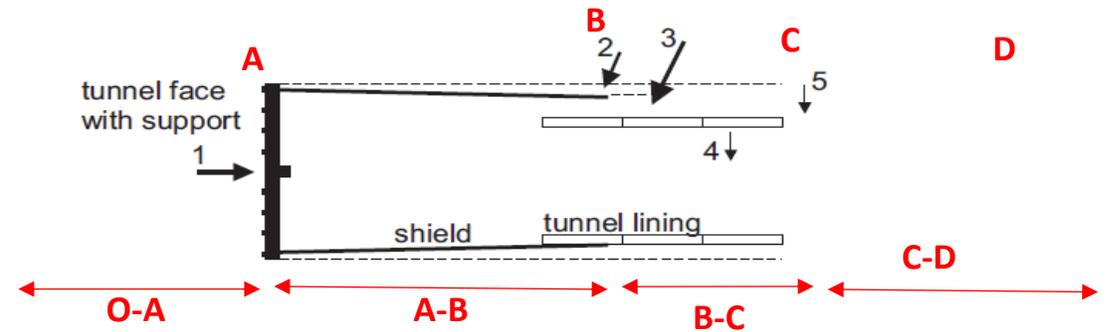
- **Projet CTRL à Londres**
 - Bien documentée
 - (Selemetas, 2005)
 - (Selemetas et al., 2005)
 - (Standing et Selemetas, 2013)
 - (Selemetas et Standing, 2017)
 - Creusement de deux tunnels à proximité des quatre pieux battus
 - Instrumentation du sol et des pieux
 - Pointe des pieux au dessus de l'axe du tunnel
- **Projet du tunnel de Heinenoord à Amsterdam**
 - (Kaalberg et al., 2005)
 - Creusement de deux tunnels à proximité de 38 pieux en bois et 18 pieux en béton
 - pointes à différentes positions
- **Projet de la ligne 3 à Shanghai**
 - (Liu et al., 2014)
 - Creusement aller-retour à proximité de groupes des pieux
 - Pointe des pieux au dessous de l'axe du tunnel
- **Projet MRT à Singapour**
 - (Pang et al., 2006)
 - Creusement de deux tunnels à proximité de groupes des pieux
 - Pointe des pieux au dessous de l'axe du tunnel

Etat de l'art

Expérimentations en vraie grandeur

- Synthèse des résultats

- Phasage de déformation en fonction de la position du front du tunnelier (Selemetas, 2005)



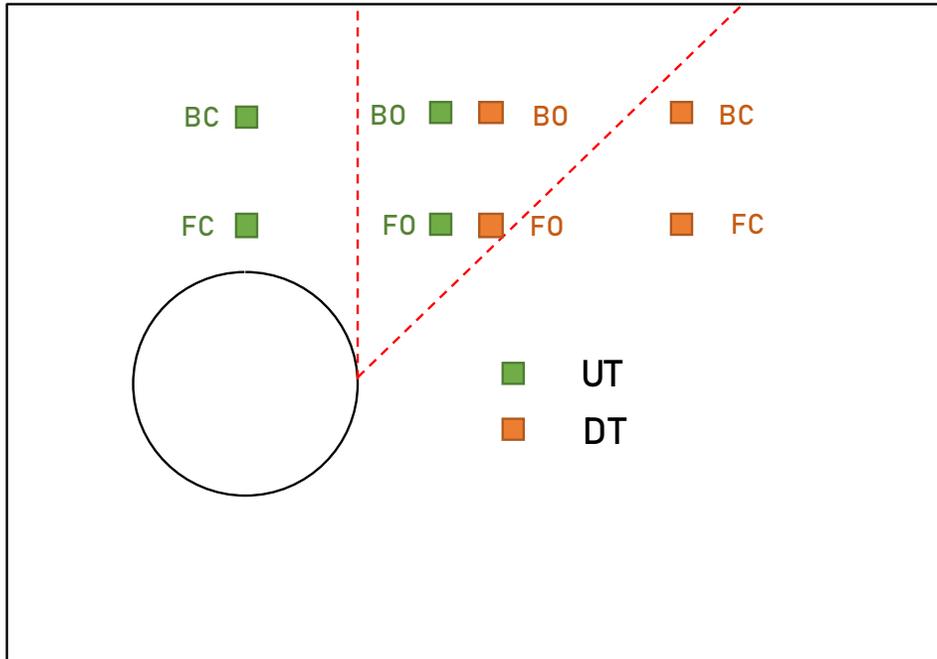
O-A : à l'avant du front	A-B: passage de la jupe
B-C: injection de mortier	C-D: consolidation

variation de l'effort axial des pieux FC pendant le creusement de tunnel UT (Selemetas et Standing, 2017)

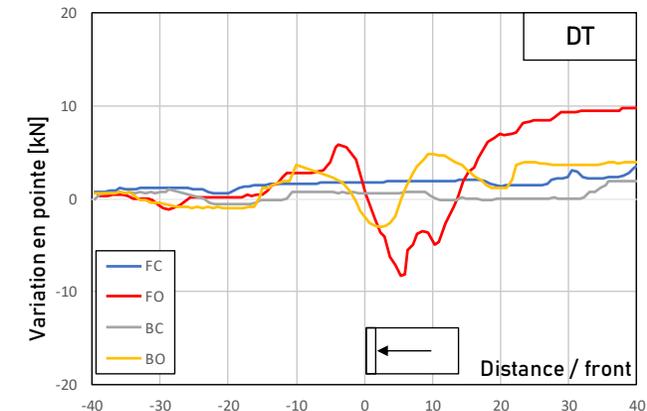
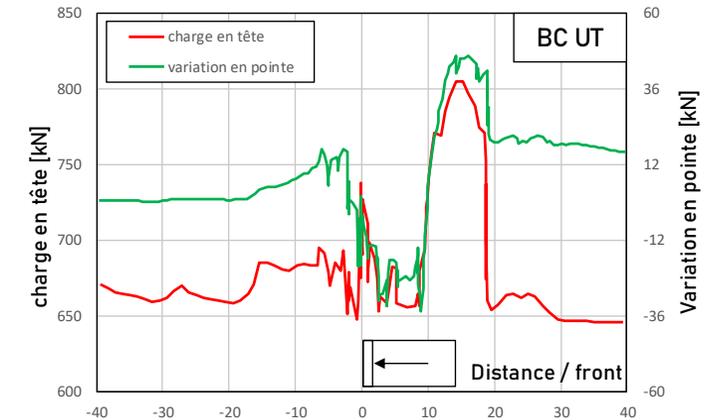
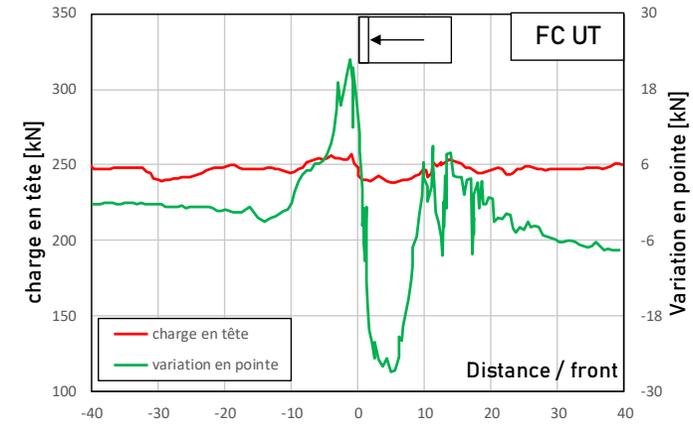
Etat de l'art

Expérimentations en vraie grandeur

- Synthèse des résultats
 - Charge en pointe



variation de la charge en pointe dans les pieux pendant les deux passages UT et DT (Selemetas et al., 2005)



Modélisations physiques

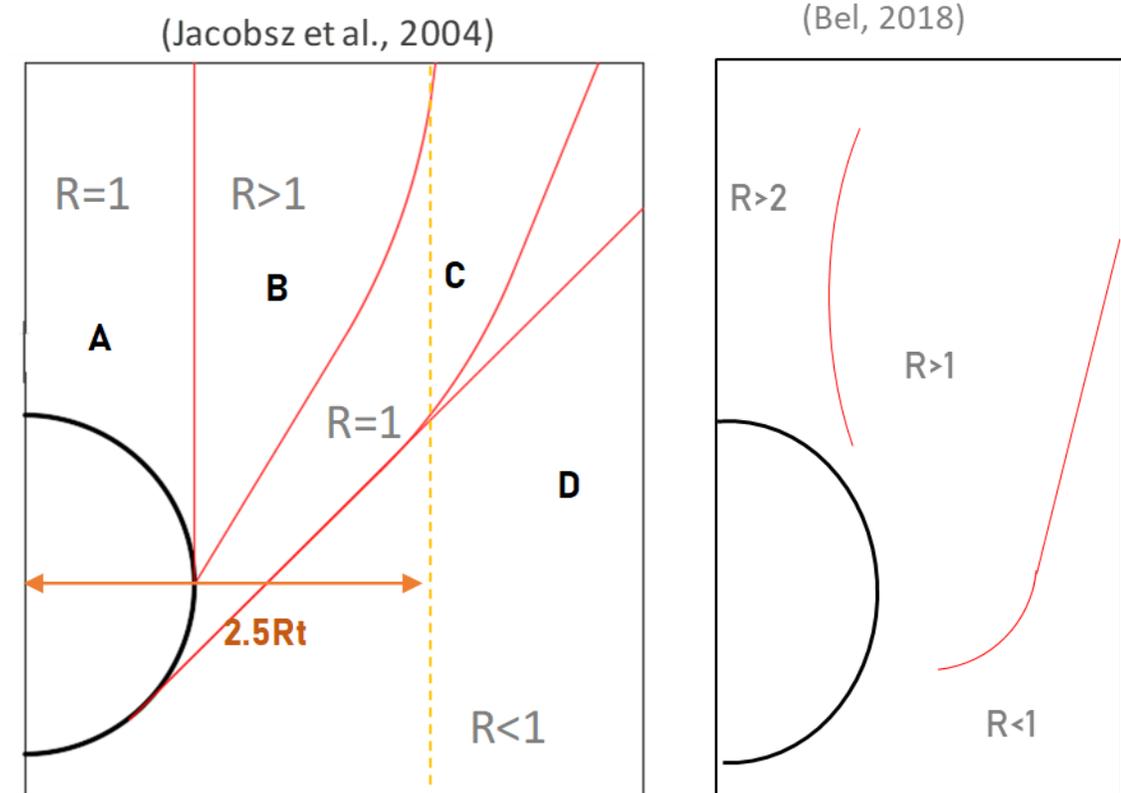
- **2D**
- Modélisation du creusement par réduction du diamètre d'un anneau
- Ne modélise pas les différentes étapes du creusement
- Essais en centrifugeuse
 - (Loganathan et al., 2000)
 - (Jacobsz et al., 2004)
 - (Lee et Chiang, 2006)
 - (Lee et Basset, 2007)
 - (Marshall et Mair, 2011)
 - (Boonsiri et Takemura, 2015)
 - (Franza, 2017)
- **3D**
- Modèle réduit d'un tunnelier à front pressurisé
- Susceptible de modéliser le phasage de creusement
 - (Berthoz, 2013) étude en champ libre
 - (Bel, 2018) étude sur des pieux

Modélisations physiques

• Synthèse des résultats

- Résultats dans (Bel,2018) plus comparables avec les mesures à échelle réelle
- Tassement des pieux (pas de refoulement)
- Déplacements horizontaux convergents
- Charge en pointe diminue dans les zones A, B et C mais plus forte dans A
- Charge en pointe augmente légèrement en zone D
- Loin du tunnel, les efforts axiaux augmentent
- Magnitude et allure du moment varie selon la position de la pointe du pieu par rapport au tunnel
- Plusieurs paramètres peuvent affecter les résultats comme la position relative pieu – tunnel, la charge appliquée et la perte de volume

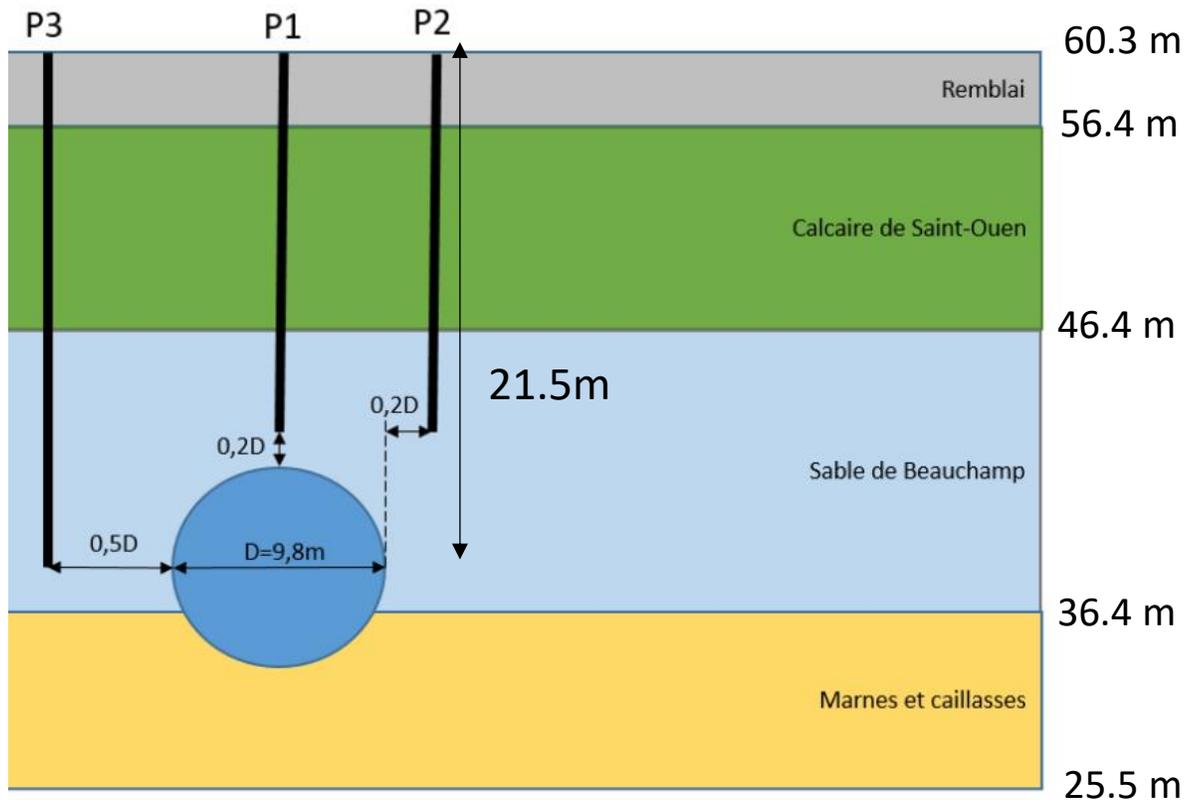
$R = \text{tassement de pieu} / \text{tassement du sol en surface}$



zones d'influence déduites de modélisations physiques

Projet TULIP

- Expérimentation en vraie grandeur
- Instrumentation du sol
- Instrumentation des pieux
- Installation à proximité du tunnel

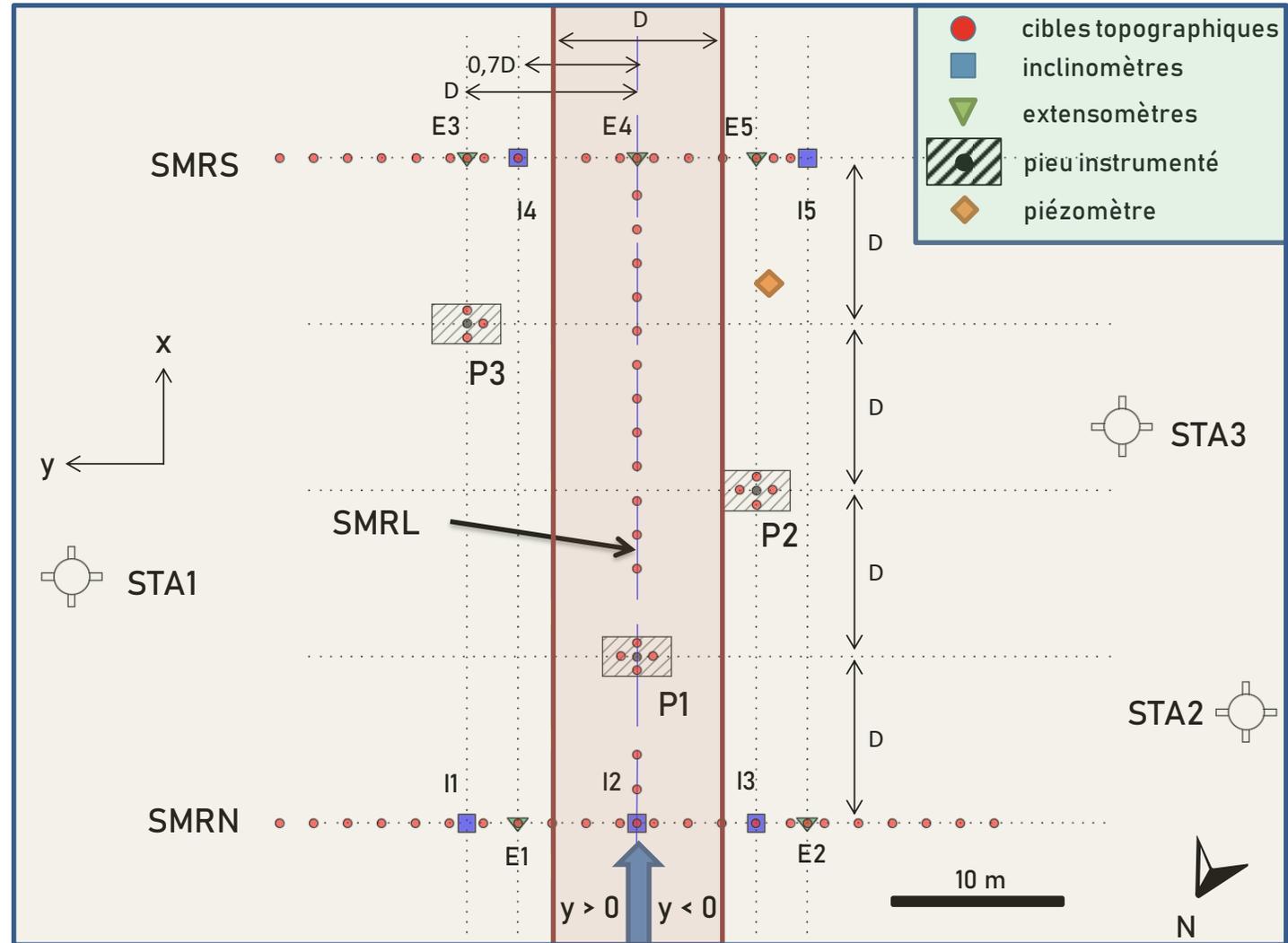


Positions prévues des pieux par rapport au tunnel



vue aérienne du plot d'essai

- Extensomètres
- Inclinomètres
- Accéléromètres
- Piézomètres
- Cibles topographiques
- Deux sections de mesures transversales SMRN et SMRS
- Une section longitudinale

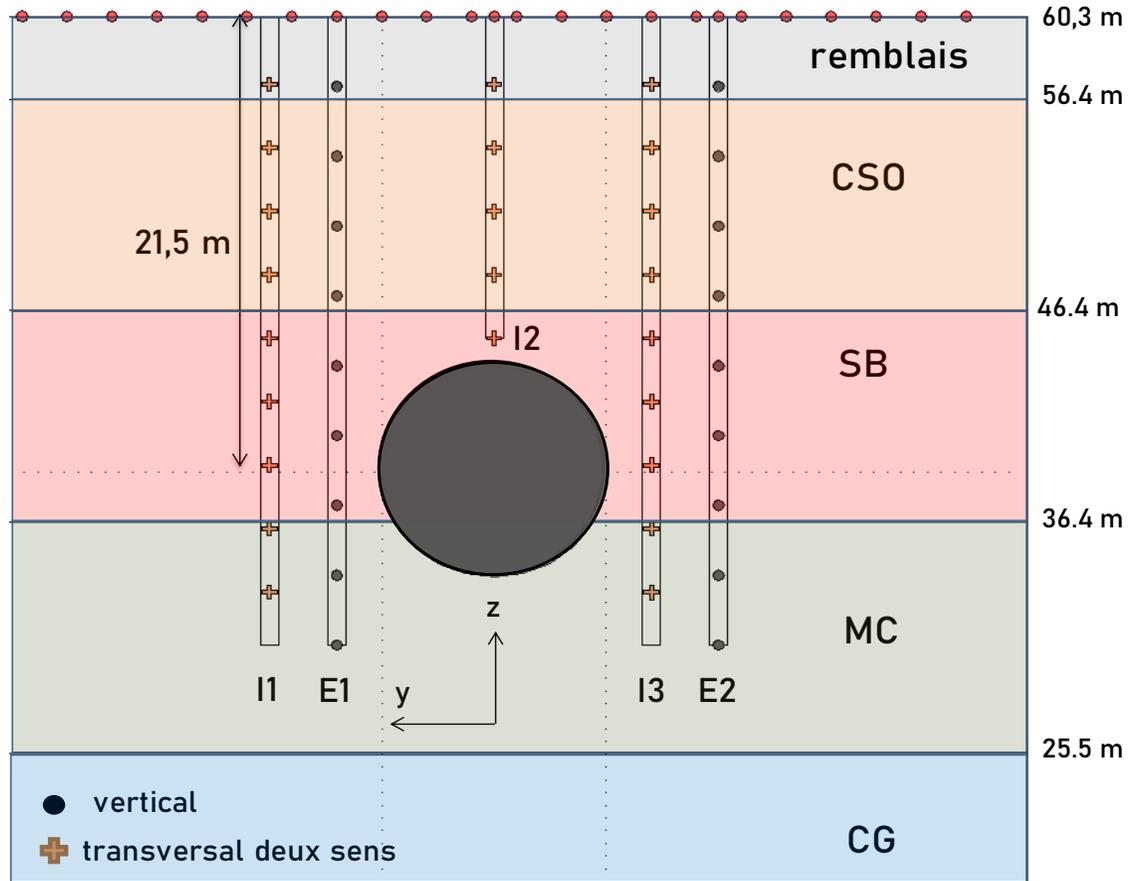


plan d'implantation des instruments de mesure montrant la position des pieux par rapport au tunnel

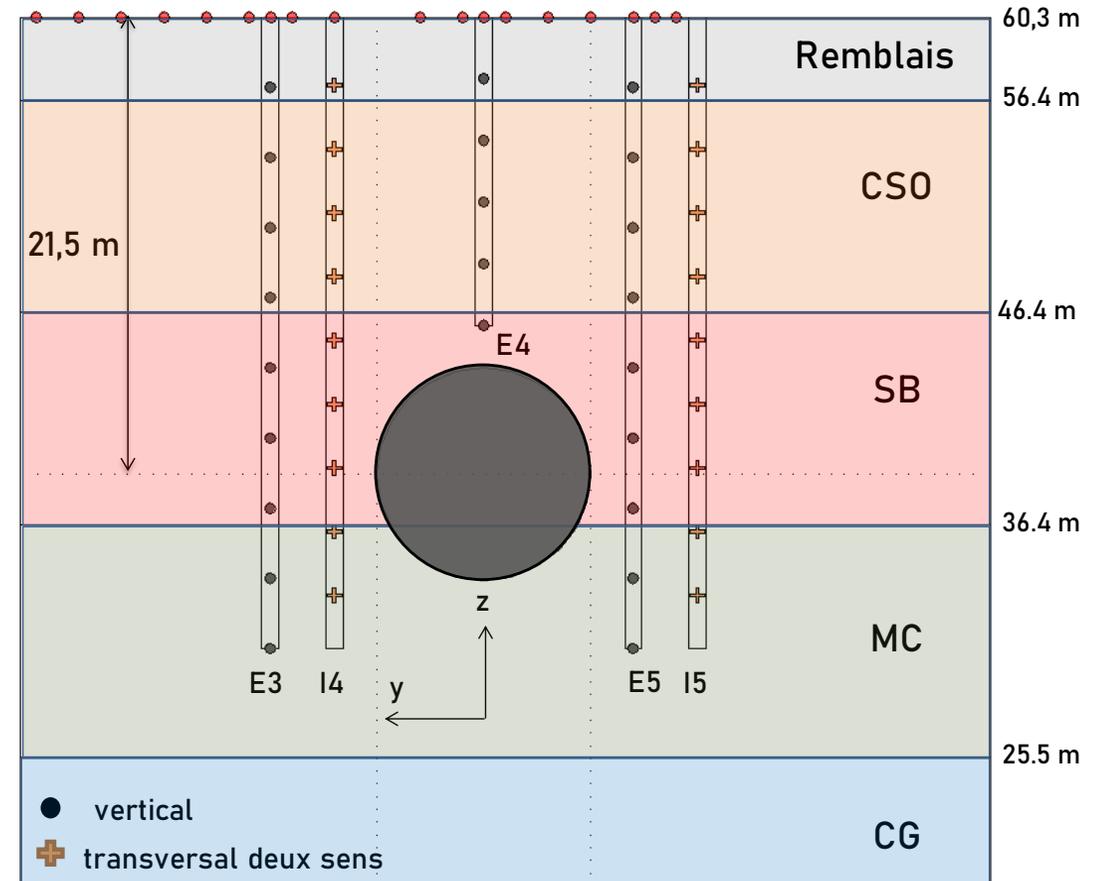
Instrumentation du sol

Sections transversales

- Extensomètres / Inclinomètres / Cibles topographiques en surface



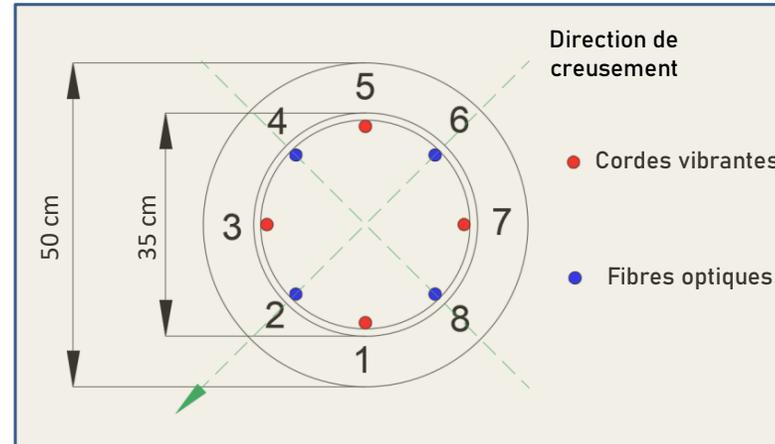
coupe transversale montrant les différents capteurs dans le plan SMRN



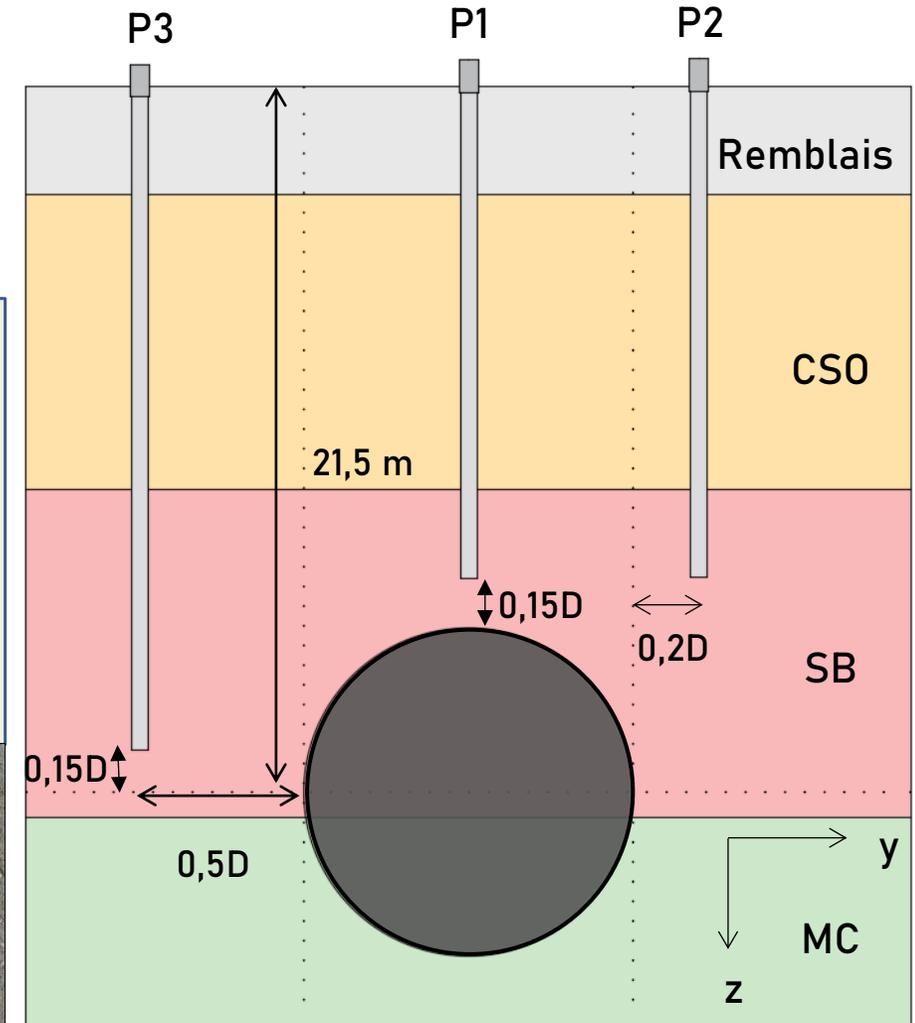
coupe transversale montrant les différents capteurs dans le plan SMRS

Instrumentation des pieux

- Pieux forés à la tarière creuse
- Diamètre = 0.5m
- Longueurs des pieux
 - P1 et P2: 15.8m
 - P3: 20.9m
- Cordes vibrantes
- Fibres optiques
- Accéléromètres dans P2
- Cibles topographiques
- Capteurs forces



Orientation des filants dans P1 et P2



positions des pieux par rapport au tunnel

Instrumentation des pieux

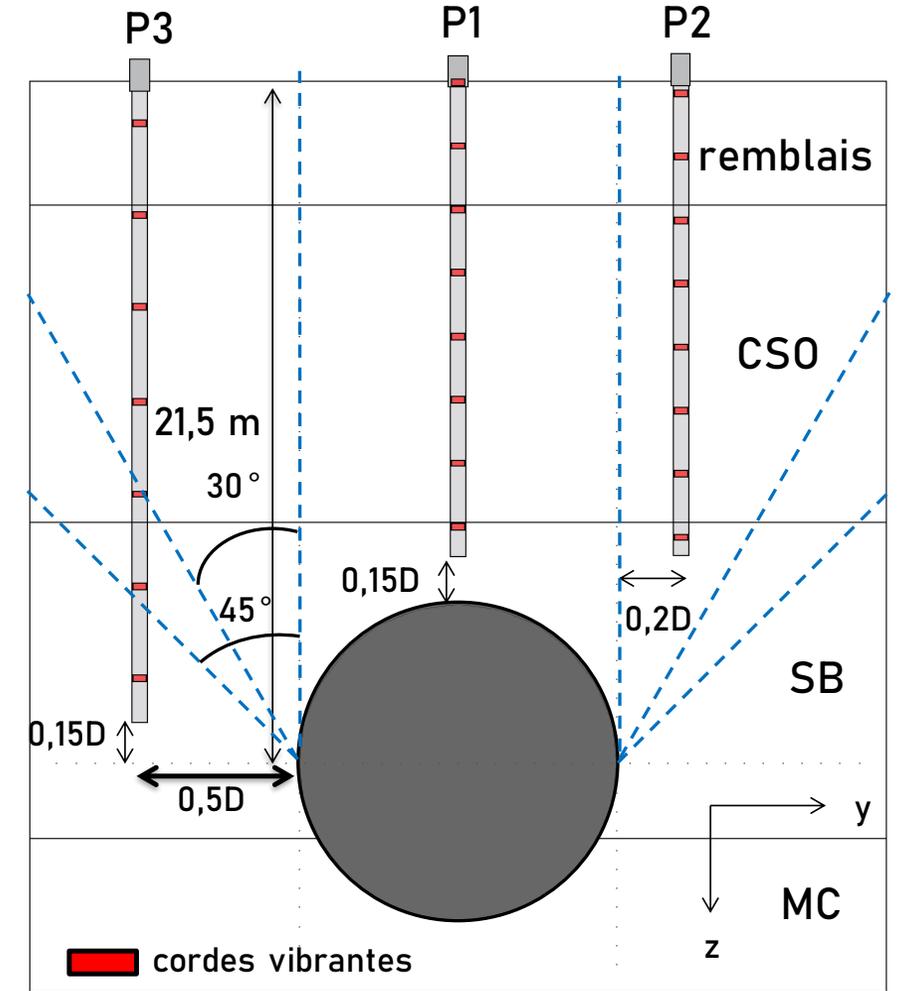
• Cordes vibrantes

- 8 niveaux de profondeur
- Groupe de 4 capteurs à chaque niveau

	profondeur [m]		
niveau	P1	P2	P3
H	0.05	0.39	-
G	2.05	2.39	1.33
F	4.05	4.39	4.23
E	6.05	6.39	7.13
D	8.05	8.39	10.13
C	10.05	10.39	13.03
B	12.05	12.39	15.93
A	14.05	14.39	18.83

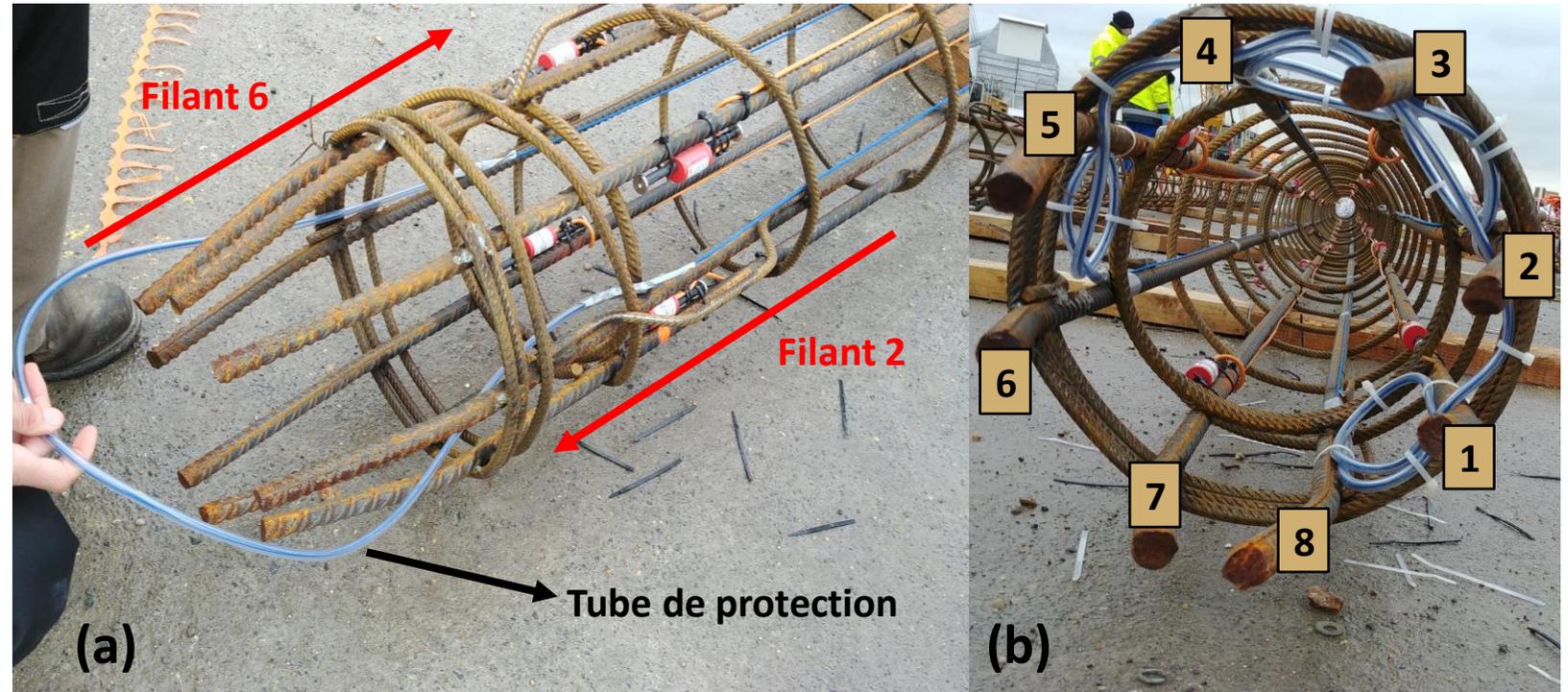


capteur à corde vibrante fixé sur un filant d'instrumentation par des colliers de serrage



- **Fibres optiques**

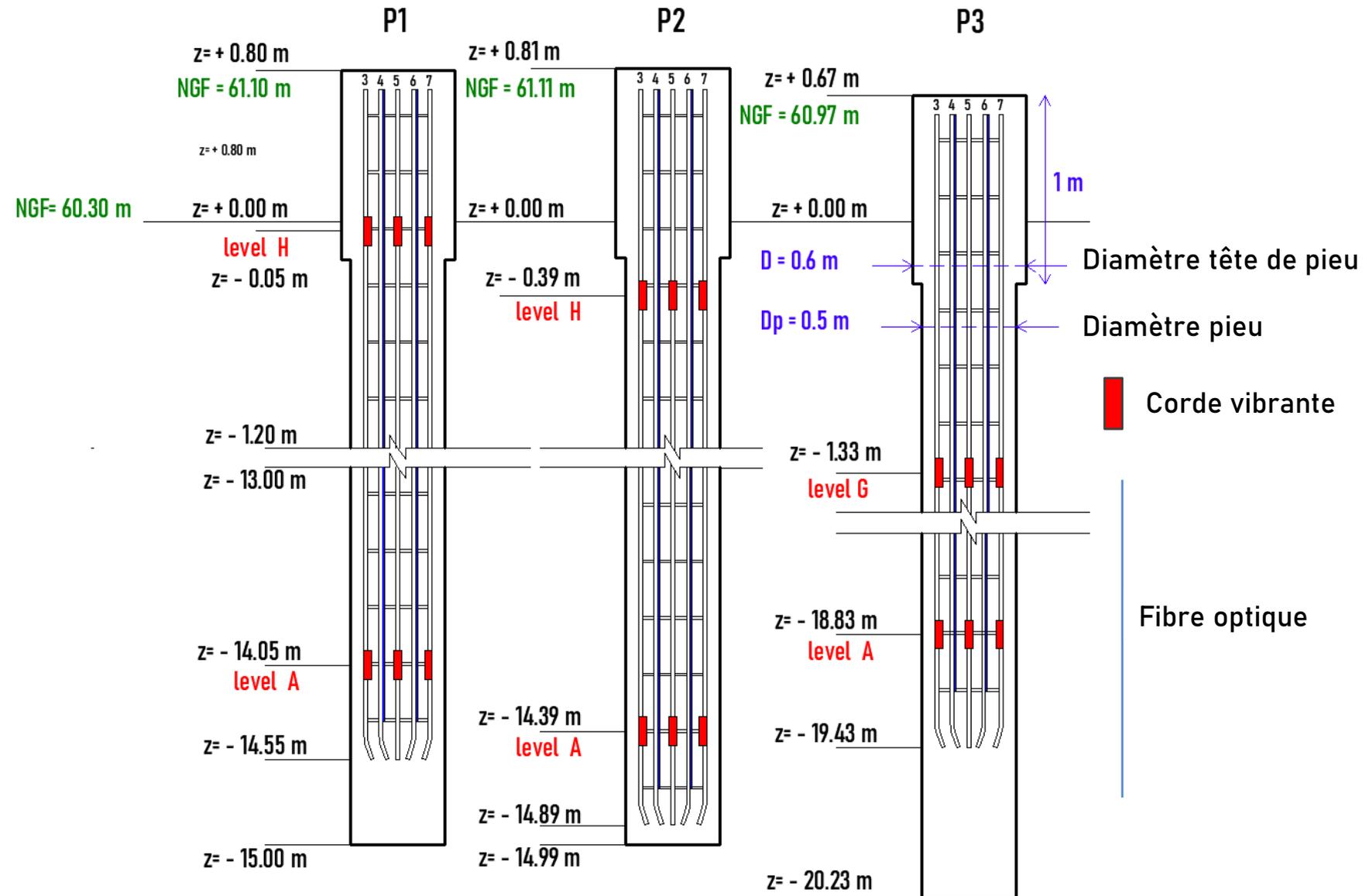
- Installées en deux boucles sur les filants pairs 6-2 et 8-4



disposition des fibres optiques dans les pieux

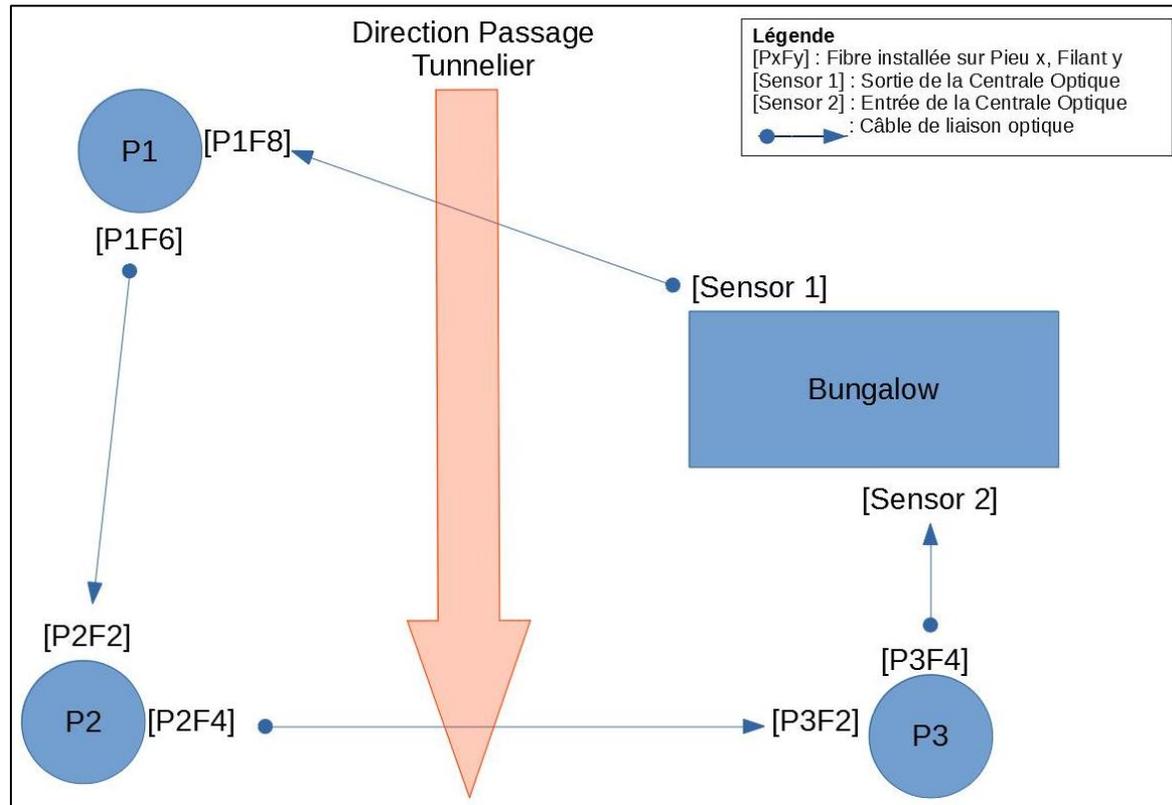
- **Fibres optiques**

- Positions des cages
- Positions du dernier groupe de cordes
- Positions du premier groupe de cordes

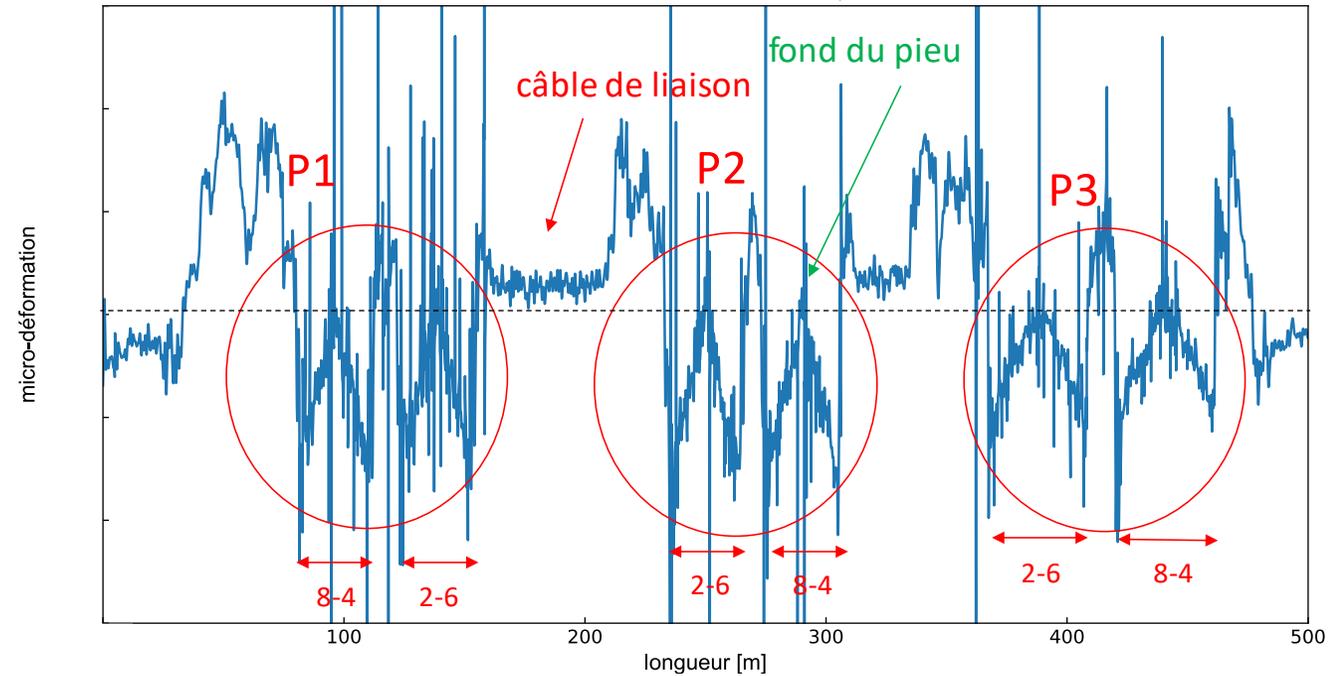


Instrumentation des pieux

- **Fibres optiques**
 - Branchement en série



branchement des fibres optiques au centre d'acquisition

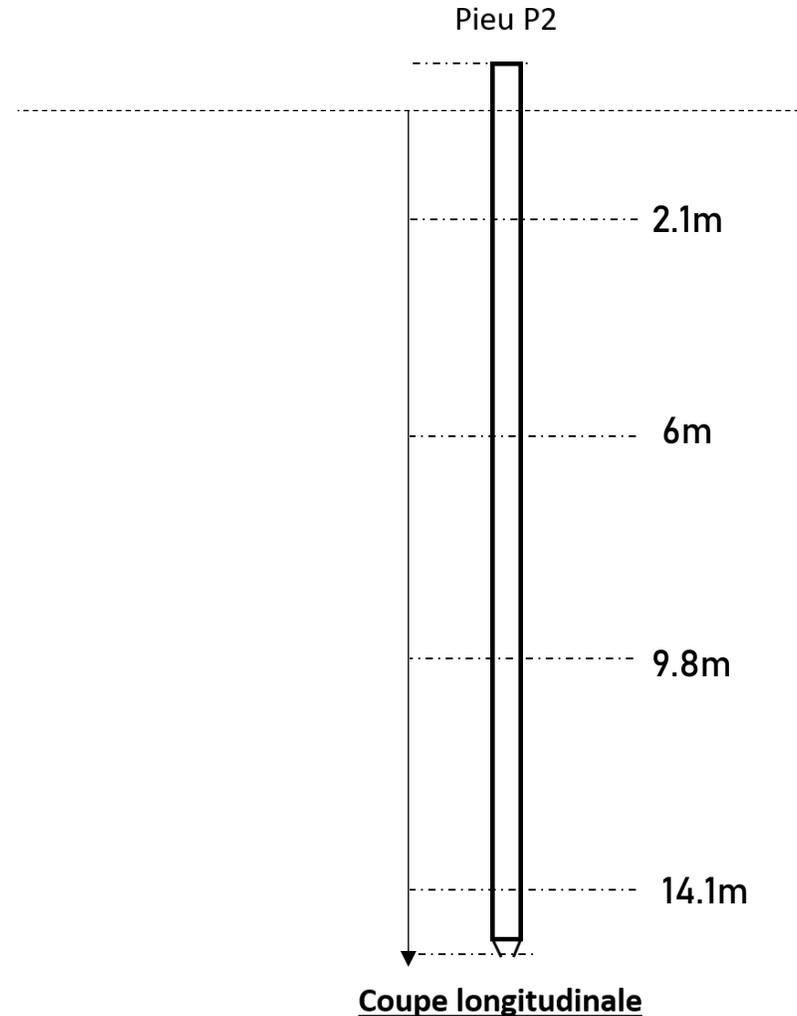


exemple de la courbe des déformations des trois pieux

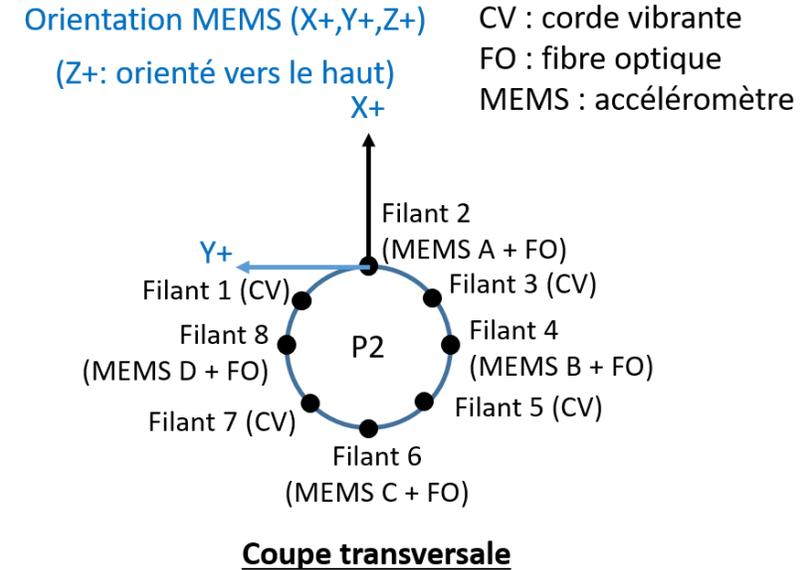
Instrumentation des pieux

- **Accéléromètres dans P2**

- 4 niveaux de profondeur
- Installés sur les filants pairs

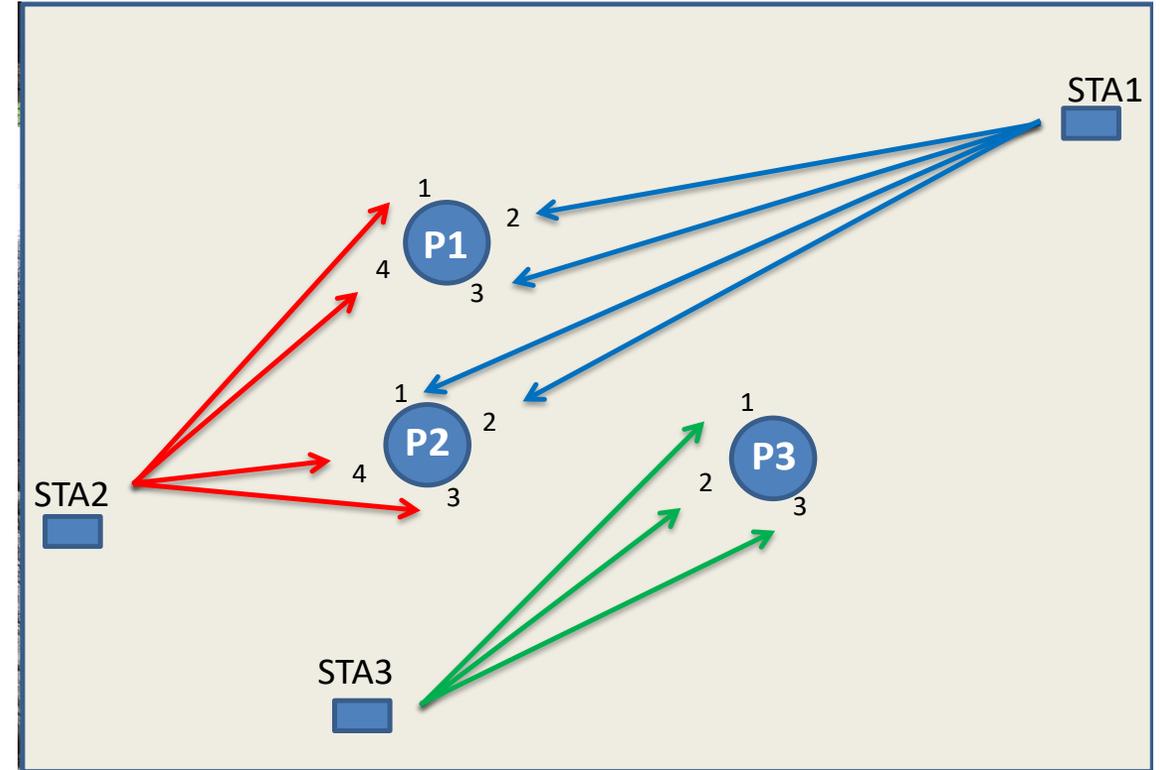
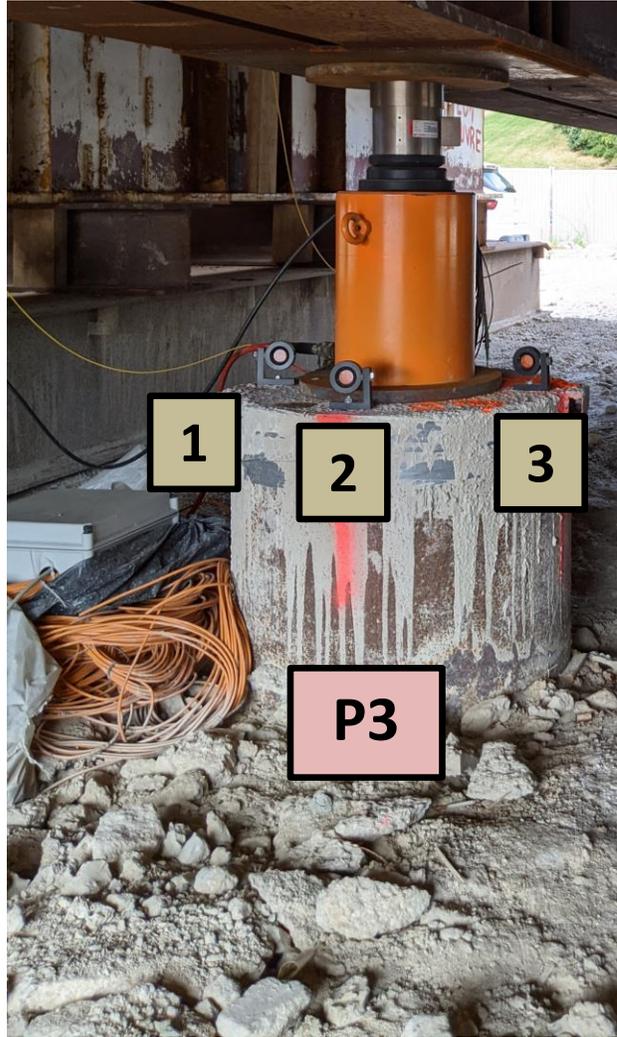


Cage de P2



Instrumentation des pieux

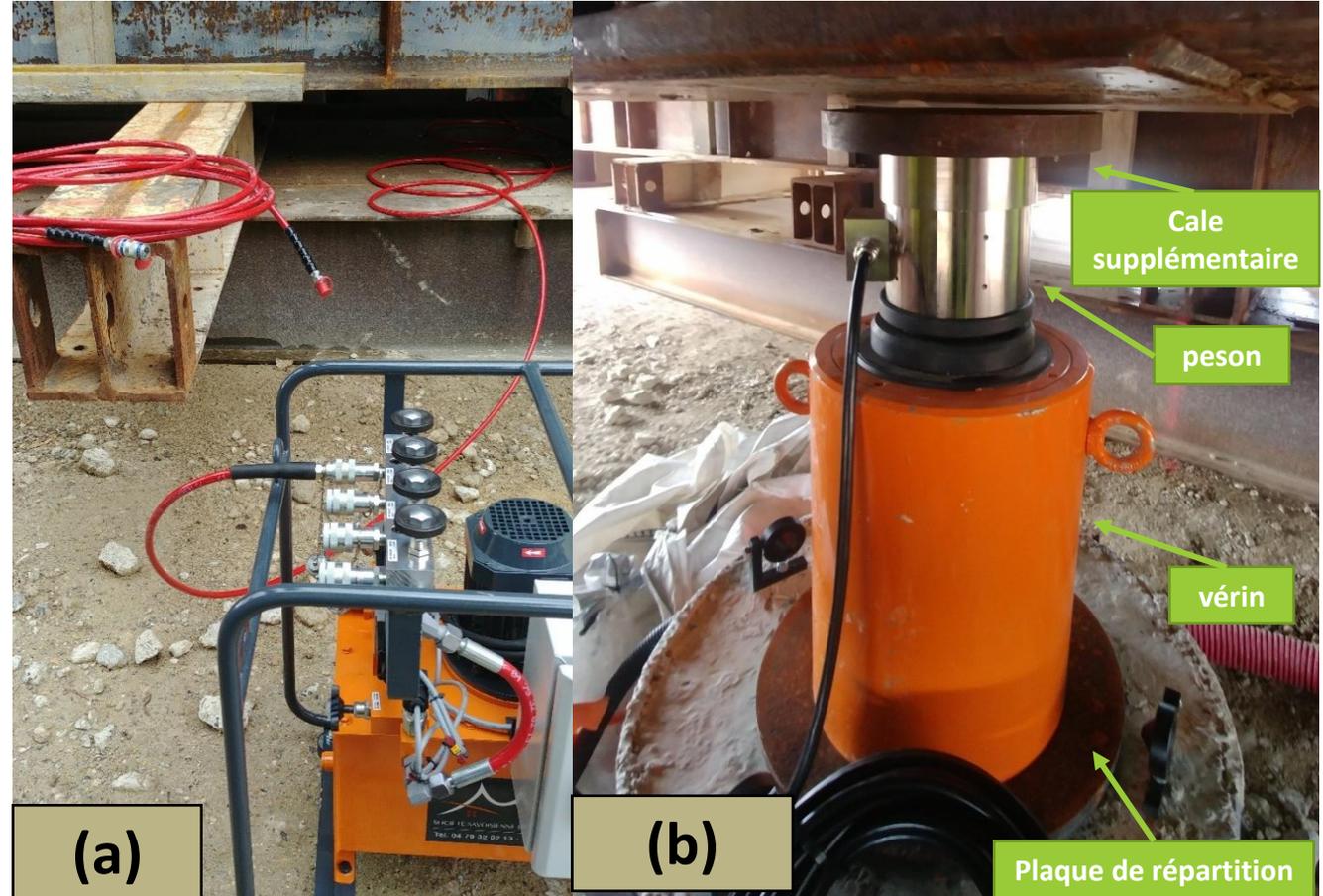
- Cibles topographiques



Cibles installées en tête des pieux

Instrumentation des pieux

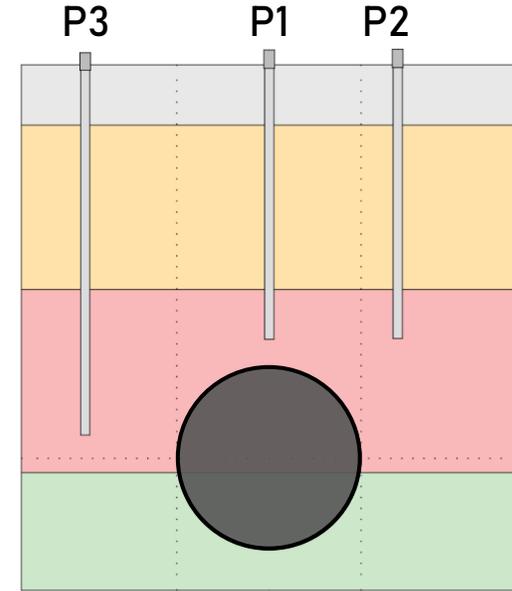
- **Chargement des pieux**
- trois vérins hydrauliques prenant appui sous des massifs de réaction
- Capacité de vérin : 250 tonnes
- Deux pompes, une pour P1 et P2 et autre pour P3
- 5 capteurs forces en tête de chaque pieu
- Charge appliquée: 210 tonnes
- Passage de tunnelier sous l'emprise TULIP en juillet 2020



système de chargement des pieux adopté dans le projet TULIP

Prédiction du comportement des pieux

- Prédiction du comportement final après passage du tunnelier
- Pour les expérimentations en vraie grandeur, un phasage peut être observé en fonction de la position du front du tunnelier



	P1		P2		P3	
	Expérimentation en vraie grandeur	modélisation physique	Expérimentation en vraie grandeur	modélisation physique	Expérimentation en vraie grandeur	modélisation physique
tassement relative avec le sol	R>1	R=1	R=1	R>1	R<1	R<1
déplacements horizontaux	divergent	convergent	divergent	convergent	divergent	convergent
effort axial	diminution	diminution	presque inchangé	diminution	augmentation	augmentation
charge en pointe	légère diminution	diminution	presque inchangée	diminution	augmentation	augmentation
moment	faible	dépendant*	faible	dépendant*	faible	dépendant*

* La magnitude du moment est dépendante de la perte de volume et la position du pointe de pieu

Pression frontale et pression d'injection du mortier de bourrage peuvent affecter les résultats

Conclusions

Données à traiter pour l'obtention de:

- Pour le sol
 - Déplacements du sol en surface et en profondeur
 - Pression interstitielle
- Pour les pieux
 - Déplacements
 - Efforts internes
 - Calcul avec cordes vibrantes
 - Calcul avec fibres optiques
 - Charge en pointe
 - Frottement latéral
- Modélisation numérique à faire
 - sol-tunnel: CETU
 - sol-pieu: UGE

Merci de votre attention