



# Apport d'essais de pieux – amélioration de la performance

**Journée Scientifique et Technique du CFMS**

**Charlotte COCHEZ (ARCADIS) & Fabien SZYMKIEWICZ (Université Gustave Eiffel - IFSTTAR)**

07/04/2022

# Sommaire

## 1 **Projet de 3<sup>ème</sup> ligne de métro toulousain**

La 3<sup>ème</sup> ligne de métro toulousain et la connexion avec la ligne B existante

## 2 **Intérêt des essais de chargement**

Apports de ce type d'essais pour le projet

## 3 **Présentation du plot d'essai réalisé**

Caractéristiques des pieux et des équipements mis en place

## 4 **Conclusions**

Paramètres finalement retenus pour le projet et optimisations des dimensionnements géotechniques

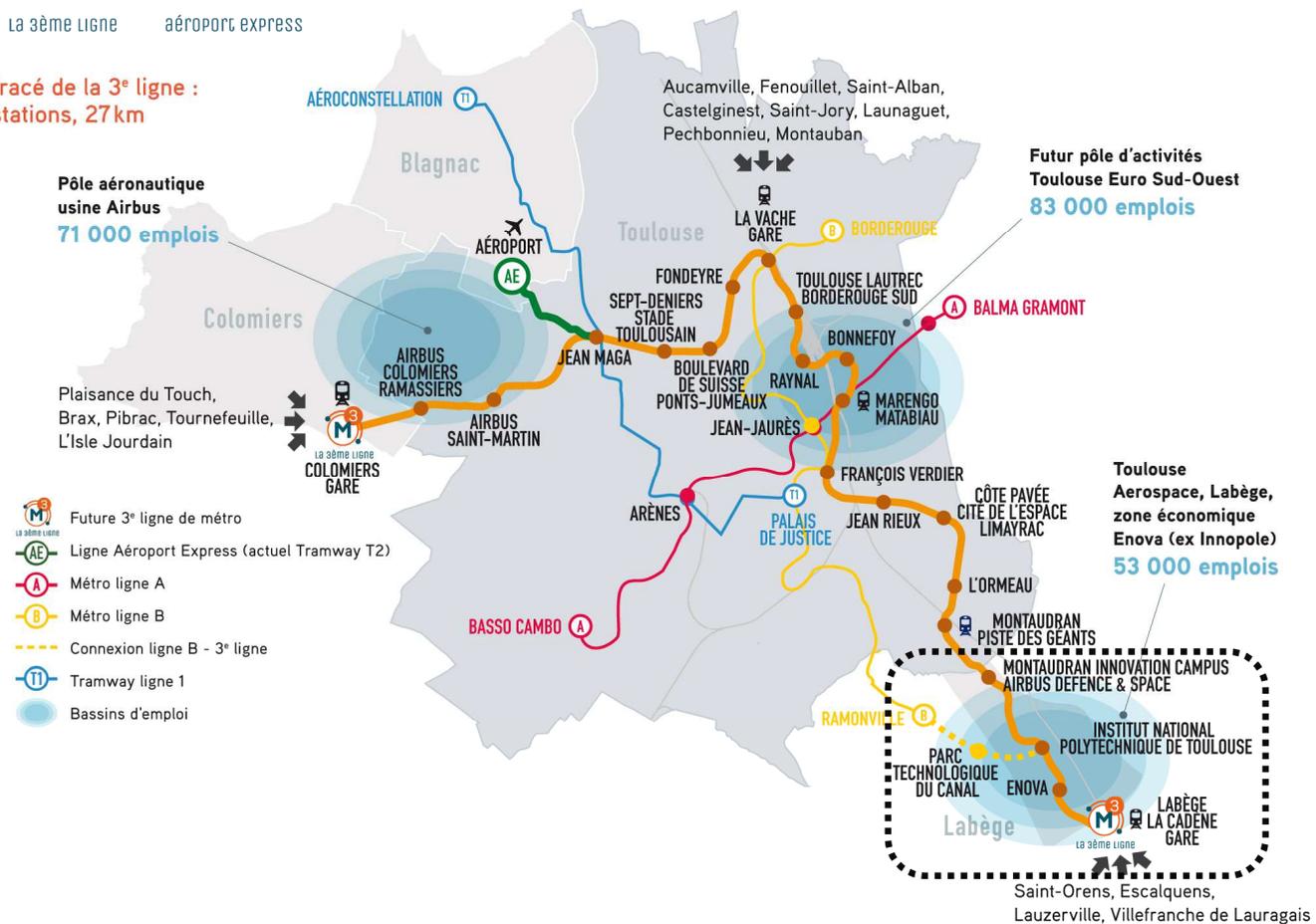
# Projet de 3<sup>ème</sup> ligne de métro toulousain



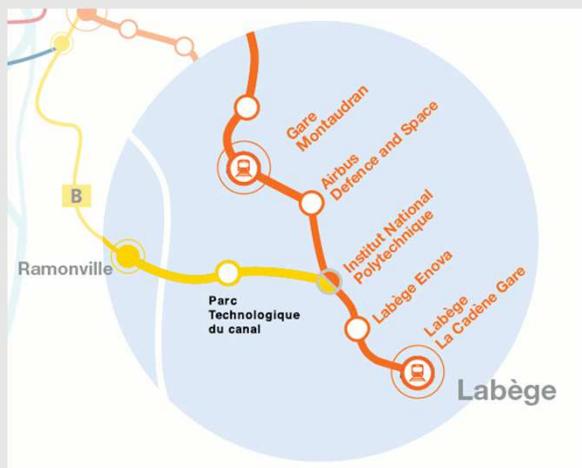
## Le projet de métro toulousain, c'est :

- Une 3<sup>ème</sup> ligne de 27 km :
  - 22 km tunnel / 5 km viaduc
  - 21 stations
  - 5 stations en correspondance avec l'existant
  - 5 gares SNCF/TER connectées
- Une nouvelle liaison express entre Toulouse (depuis Jean Maga) et l'aéroport (T2)
- Une connexion à la ligne B de 2,7 km : 2 nouvelles stations

Le tracé de la 3<sup>e</sup> ligne :  
21 stations, 27 km



## Les deux viaducs étudiés en quelques chiffres



© Arcadis 2021

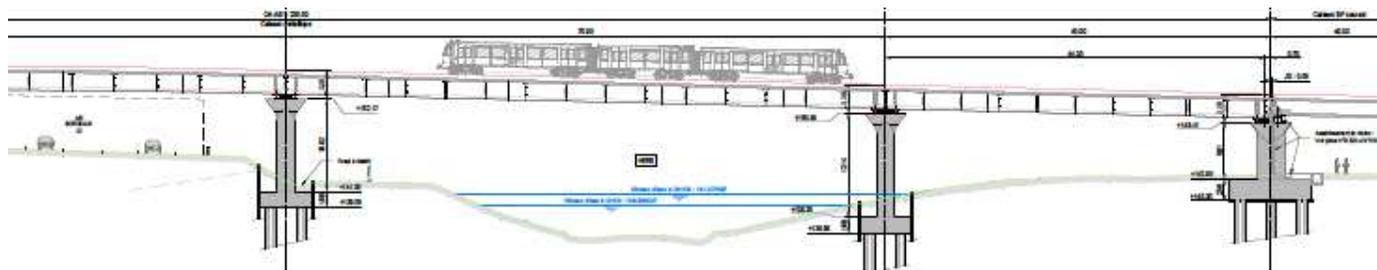
### Tracé Sud-Est de la 3ème ligne "M3SE"

- 80 m de rampe (cadre ouvert en BA)
- 5 km de viaduc dont 92% d'ouvrages d'art courants aériens à travées de 40 m et 8% d'ouvrages particuliers de franchissement (A61, SNCF),
- 4 gares aériennes :
  - Montaudran Innovation Campus
  - Institut IPT Toulouse
  - Labège Enova
  - Labège La Cadène
- 131 appuis composés d'un fût de pile unique sur une semelle portée par 4 pieux (ponctuellement 6 et 9)
- 585 pieux
- 221 sondages géotechniques

### Connexion à la ligne B existante "CLB"

- 500 m de tunnel (canal du Midi)
- 56 m de rampe (cadre ouvert en BA)
- 2,2 km de viaduc dont 89% d'ouvrages d'art courants aériens à travées de 40 m et 11% d'ouvrages particuliers de franchissement (A61/A620 + RD916),
- 2 gares aériennes :
  - Parc Technologique du Canal
  - Institut IPT Toulouse
- 59 appuis composés d'un fût de pile unique sur une semelle portée par 4 pieux (ponctuellement 6)
- 234 pieux
- 138 sondages géotechniques

### 819 pieux d'ouvrage d'art



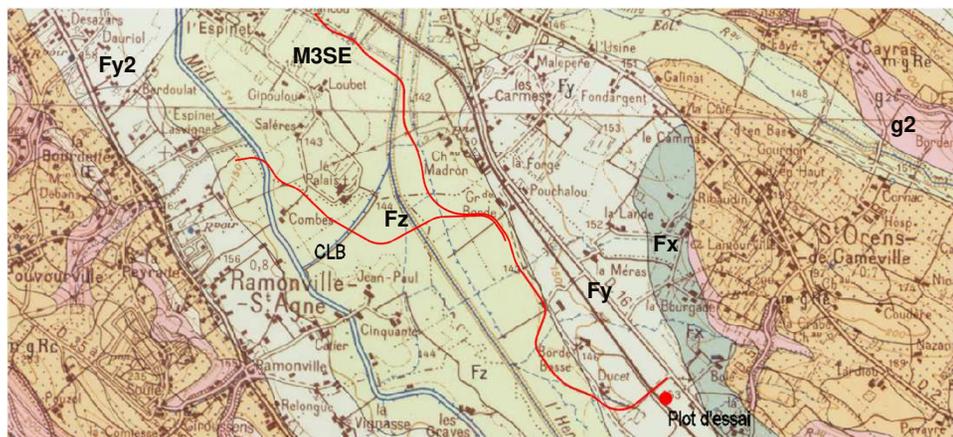
# Intérêt des essais de chargement

## Contexte géologique

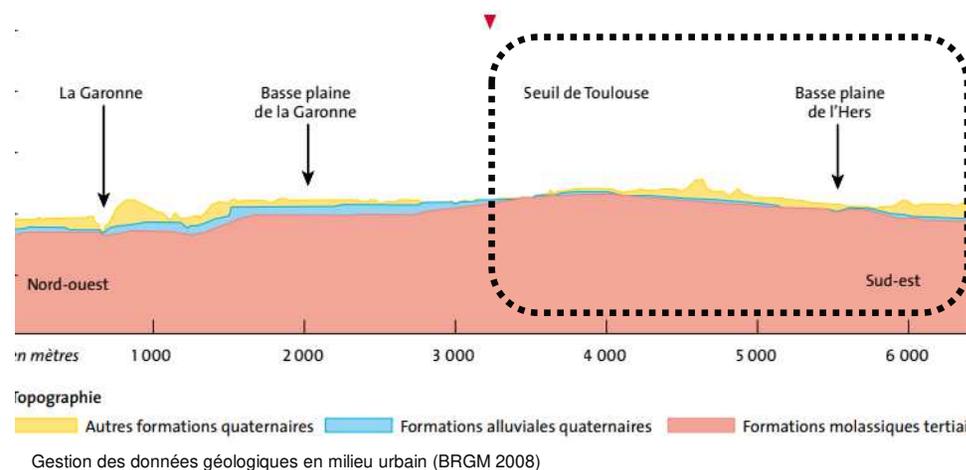
- Remblais ponctuels
- Terrasses alluviales :
  - **Fz** : Alluvions modernes des basses terrasses de l'Hers
  - **Fy** : Alluvions des basses terrasses de l'Hers
  - **Fy2** : Alluvions du seuil de Toulouse (ou « seuil de Montaudran »)
  - **Fx** : Alluvions des moyennes terrasses de l'Hers
- Substratum général (g2)

*Un contexte assez homogène tout au long des deux tracés avec des variations d'épaisseur et de nature des recouvrements quaternaires.*

*Un substratum continu d'épaisseur importante avec la présence d'une frange altérée à l'interface.*



Extraits cartes géologiques de Toulouse Est et Villefranche-de-Lauragais





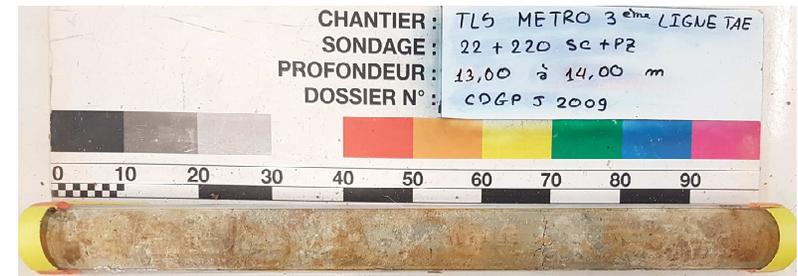
Lit Ariège - Lacroix Falgarde



Vieille-Toulouse



Coteaux de Pech David

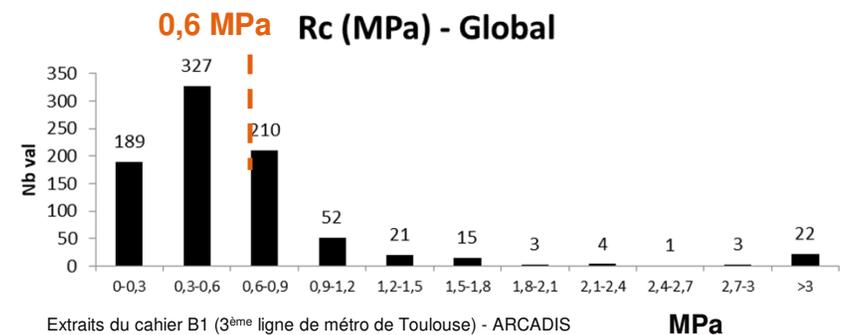


## Caractéristiques du substratum molassique toulousain

Description géologique : roche tendre

VS

Description géotechnique : sol



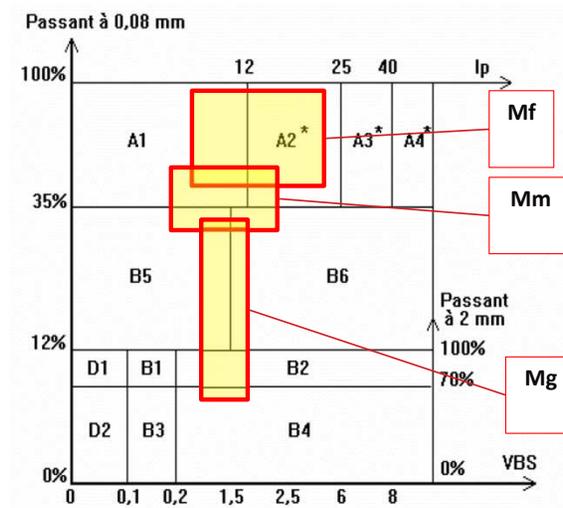
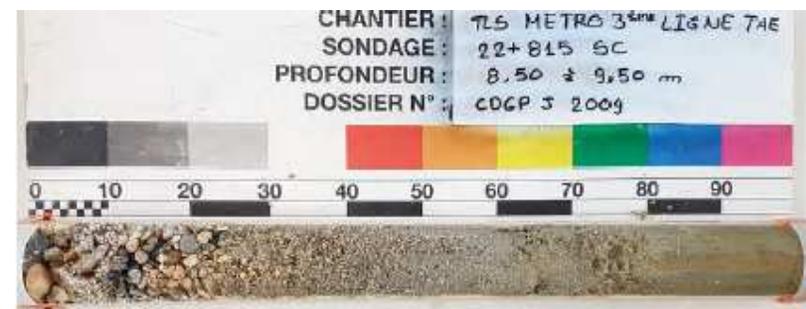


Coteau de Pech David - Vieille-Toulouse

## Caractéristiques du substratum molassique toulousain

En réalité, 4 principaux faciès de molasse « M » :

- « Mf » : Limon (fraction argileuse faible), parfois sableux
- « Mm » : Sable fin à moyen (fraction limoneuse > 30%)
- « Mg » : Sable propre et graveleux (fraction limoneuse < 20%)
- « Mr » : Bancs marneux, calcaires et gréseux (3% de la formation)



Extraits du cahier B1 (3<sup>ème</sup> ligne de métro de Toulouse) - ARCADIS

# Choix de la classe de sol et usages

## Marne ou ?

- Matériau de bonne compacité :  $PI^*$  de l'ordre de 7 à 8 MPa
- Essais clous et micropieux :  $q_s$  de l'ordre de 200 à 350 kPa
- Calcite < 10 %

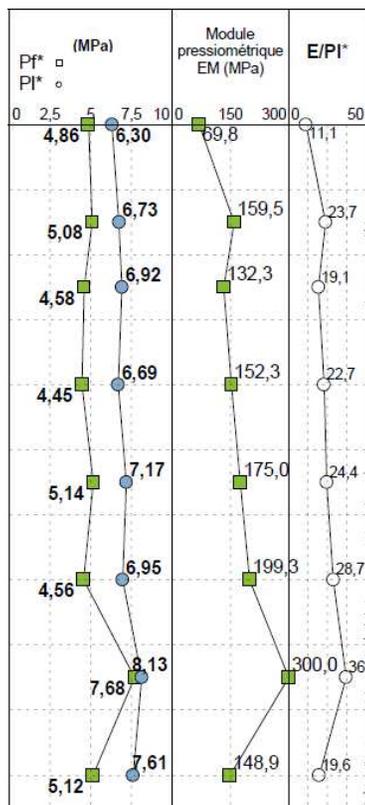
**g2. Stampien.** Tout le substratum de la région est exclusivement d'âge stampien. On a souvent insisté sur la monotonie de ces dépôts marno-molassiques.

Extraits de la notice de la carte géologique de Toulouse Est

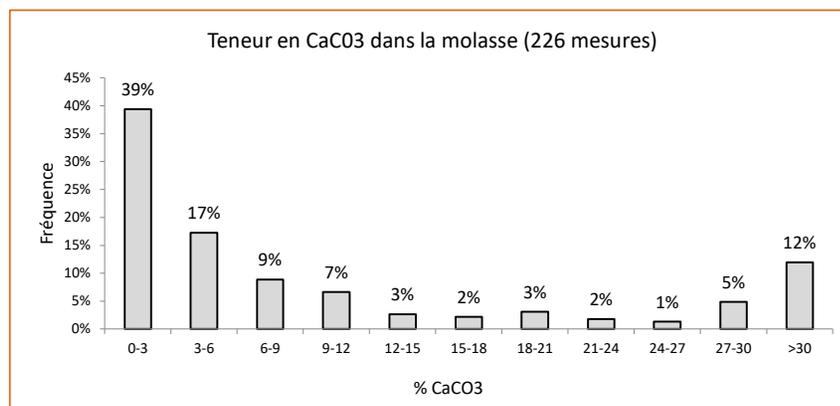
Le calcul de capacité portante pourra être effectué sur la base des "règles de justification des fondations sur pieux" du S.E.T.R.A. et du L.C.P.C. (document d'octobre 1985) adaptées aux sols régionaux après un essai de chargement de pieux effectué à TOULOUSE dans des formations similaires pour lesquelles il a été mesuré :

- dans les molasses à faciès argilo-marneux  
 $k_p = 1,2$  et  $q_s = 20 \text{ t/m}^2$

Extraits de la note géotechnique AVP du viaduc sur le Tarn RN20 (1986)



23+940 SP réalisé par GINGER (M3SE)



Extraits du cahier B1 (3<sup>ème</sup> ligne de métro de Toulouse) - ARCADIS

| Classe de sol  | $q_s \text{ max FTC}$ (kPa) | $k_p \text{ max FTC}$ (-) |
|--|-----------------------------|---------------------------|
| Argile %CaCO <sub>3</sub> <30% Limon – Sols intermédiaires | 87                          | 1,3                       |
| Marne et calcaire marneux                                  | 200                         | 1,6                       |
| Différences  | 57%                         | 19%                       |

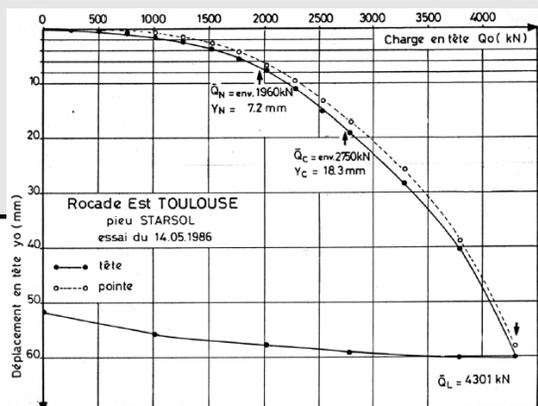
Analyse des valeurs issues de la norme NF P 94-262

## Résultats du plot d'essais de 1986

### Essais de chargement - Chantier de la rocade Est de Toulouse

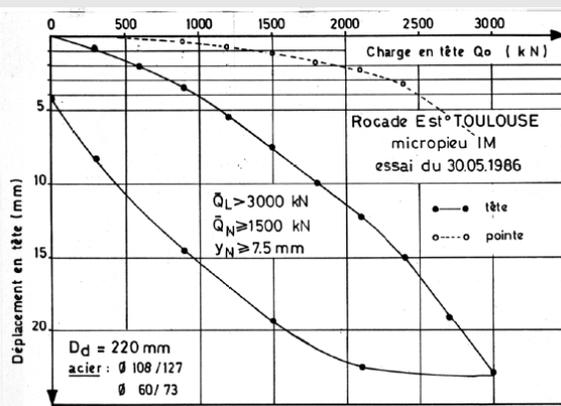
#### Pieu STARSOL

- TC Ø 500 mm – 11,30 m
- Charge max : 4 301 kN
- Effort pointe : 1 514 kN
- $PI^* : 5,4 \text{ MPa} > k_p : 1,2$
- $q_s \text{ molasse} = 290 \text{ kPa}$

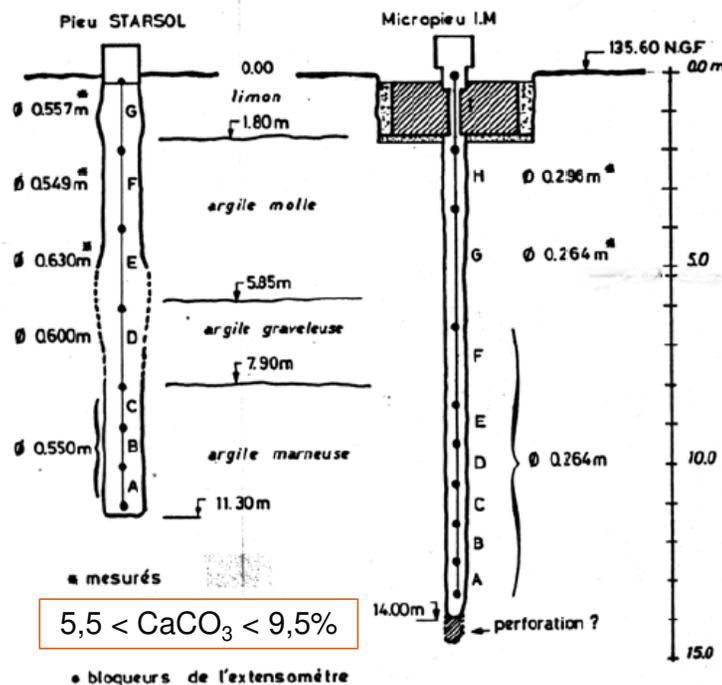


#### Micropieu IM

- IRS Ø 220 mm – 14 m
- Charge limite non atteinte (3 000 kN)
- Fluage non atteint
- $q_s \text{ molasse} = 450 \text{ kPa}$



#### Rocade Est de TOULOUSE



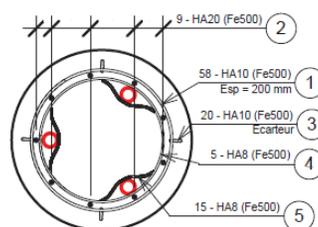
# Présentation du plot d'essai réalisé



## Caractéristiques des pieux

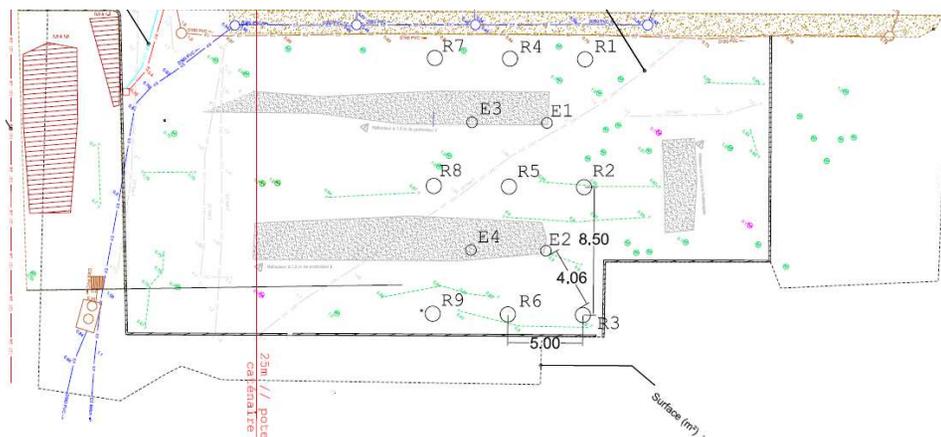
Pieux à la tarière creuse FTC (NF EN 1536) – catégorie 6 (NF P 94-262) :

- 4 pieux d'essais Ø 720 mm – 11,30 m
- 9 pieux de réaction Ø 1020 mm – 20 m
- XC1 C45/55 S4 G3 CEM II
- Ferrailage minimum NF P 94-262
- 3 tubes d'auscultation sonique 50/60 mm



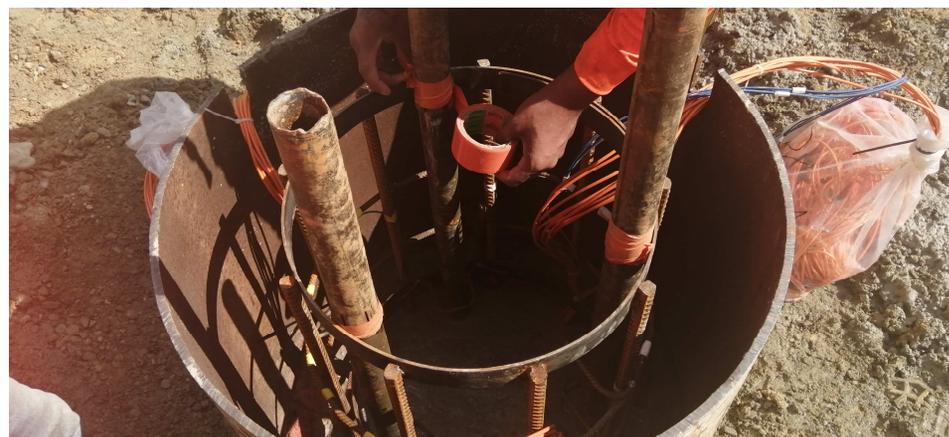
*Longueur de pieu déterminée avec des hypothèses dans la molasse :*

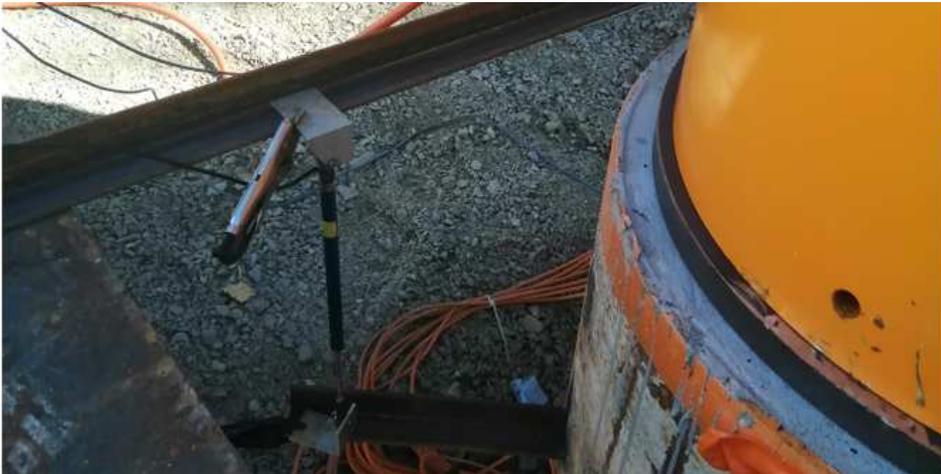
- $q_s = 300 \text{ kPa}$  (essai de 1986)
- $k_p = 1,6$  (marne – NF P 94-262)



Plan d'implantation des pieux (FRANKI 2021)

© Arcadis 2021





## Equipement des pieux

- 4 capteurs de déplacement sur la tête du pieu à 90° reposant sur des supports fixes
- 108 capteurs de déformation à cordes vibrantes (Geosense) : 27 par cage par triplettes de 9 à 120°
- 2 boucles de fibre optique remontant sur un filant et redescendant sur un autre



## Programme de chargement

- Incréments de charge modifiés d'un pieu à l'autre

| Palier | Charge en tête (kN) |      |       |       |
|--------|---------------------|------|-------|-------|
|        | E1                  | E2   | E3    | E4    |
| 1      | 500                 | 400  | 400   | 400   |
| 2      | 1000                | 800  | 850   | 850   |
| 3      | 2000                | 1600 | 1700  | 1700  |
| 4      | 3000                | 2400 | 2550  | 2550  |
| 5      | 4000                | 3200 | 3400  | 3400  |
| 6      | 5000                | 4000 | 4250  | 4250  |
| 7      | 6000                | 4800 | 5100  | 5100  |
| 8      | 7000                | 5600 | 5950  | 5950  |
| 9      | 8000                | 6400 | 6800  | 6800  |
| 10     | 8950**              | 7200 | 7650  | 7650  |
| 11     |                     | 8000 | 8500  | 8300* |
| 12     |                     | 8800 | 9350  |       |
| 13     |                     |      | 10200 |       |
| 14     |                     |      | 11050 |       |
| 15     |                     |      | 11900 |       |

\*palier arrêté au bout de 5 minutes.

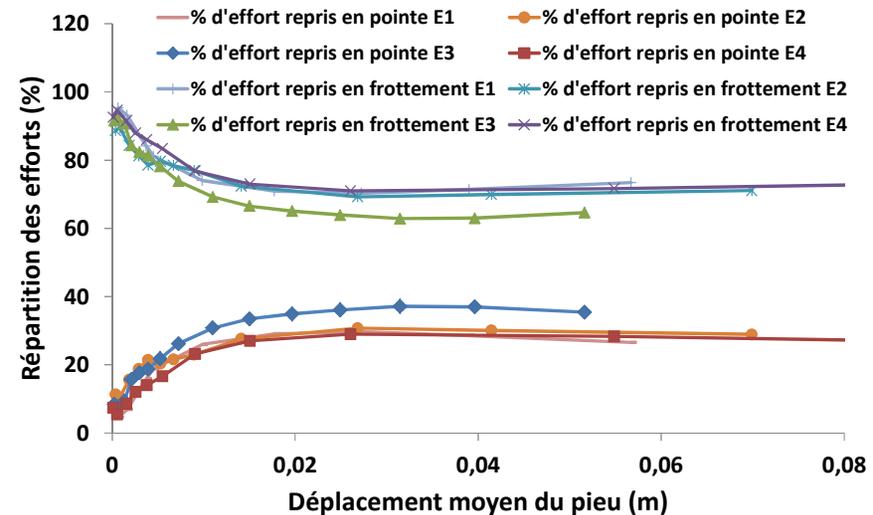
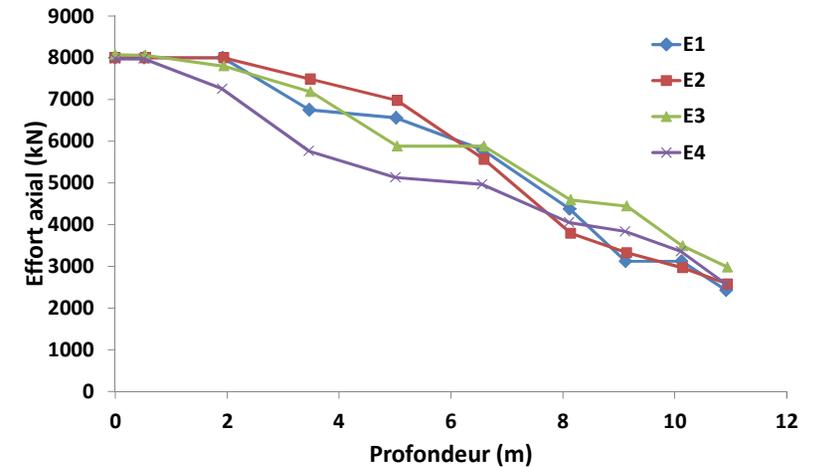
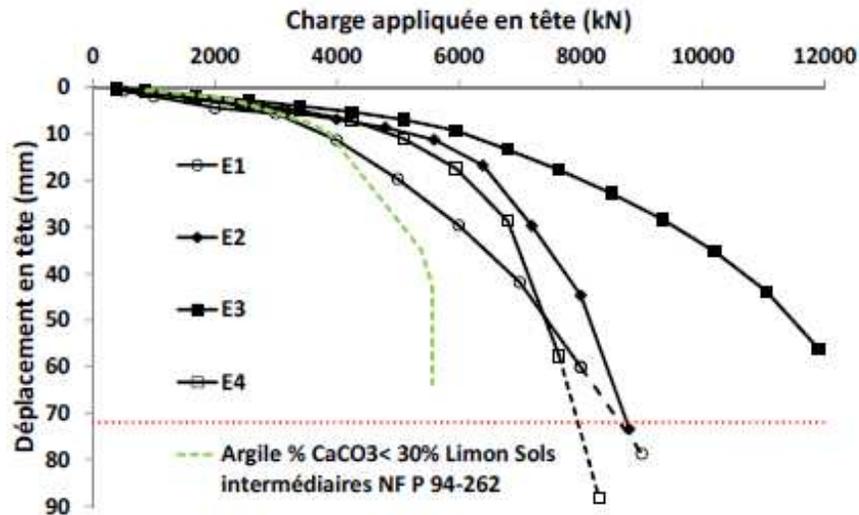
\*\*impossibilité de maintenir la charge pendant une heure : déplacement trop rapide de la tête de pieu, palier maintenu moins de 5 minutes



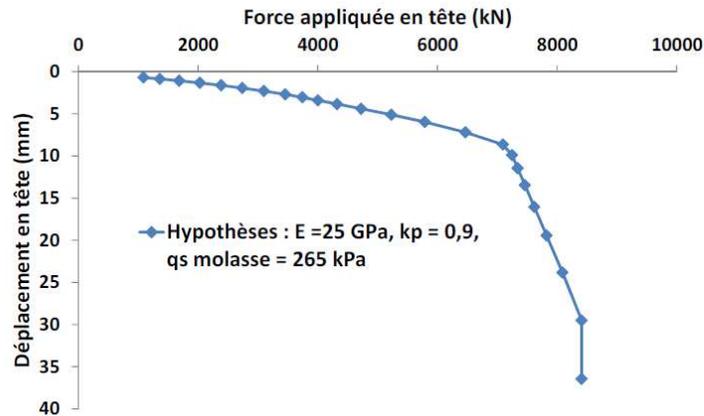
# Conclusions du plot d'essais

## Résistance limite des 4 pieux

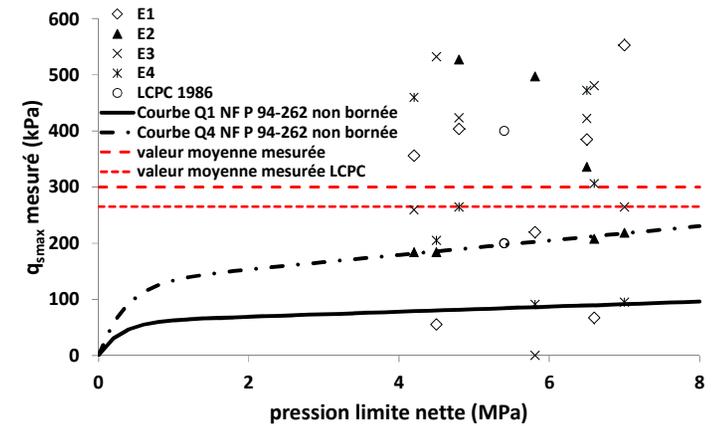
- Comportement identique sur la partie “élastique”
- Critère rupture : enfoncement de  $B/10$  (72 mm)
- Résistances limites E1, E2 et E4 assez proches (8000 – 9000 kN)
- Résistance limite E3 >>



# Résultats retenus pour le projet



Sans distinction entre la frange altérée et le substratum sain



Extraits article JNGG 2022 – Université Gustave Eiffel / ARCADIS / TISSEO

- Paramètres retenus pour la molasse toulousaine sur le projet
  - $q_s$  de 265 kPa
  - $k_p$  réduit à 0,9
- Aux ELS QP – Pieu FTC  $\varnothing$  700 mm de 11 m :
  - Argile : 210 t
  - Argile / Marne : 275 t
  - Paramètres essais : 359 t

| $z$ (m) | $q_s$ (kPa) |
|---------|-------------|
| 0-1,85  | 60          |
| 1,85-8  | 265         |
| 8-13,5  | 265         |

$k_p = 0,9$

## Autres intérêts pour le projet

- Validation de la technique de forage pour des pieux d'ouvrage d'art de diamètre important et de grande profondeur
- Fiabilisation de l'augmentation des hypothèses de frottement axial par rapport à la norme NF P 94-262
- Fiabilisation du planning travaux et du budget
- Nouvelle contribution à la base de données globale de résultats d'essais de chargement statique de pieux



**Merci pour votre attention,**

**Et merci aux différents acteurs de ce plot d'essais :**



**A votre disposition, si vous avez des questions ?**