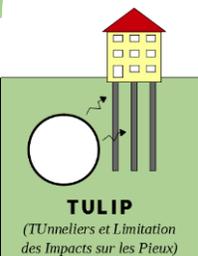
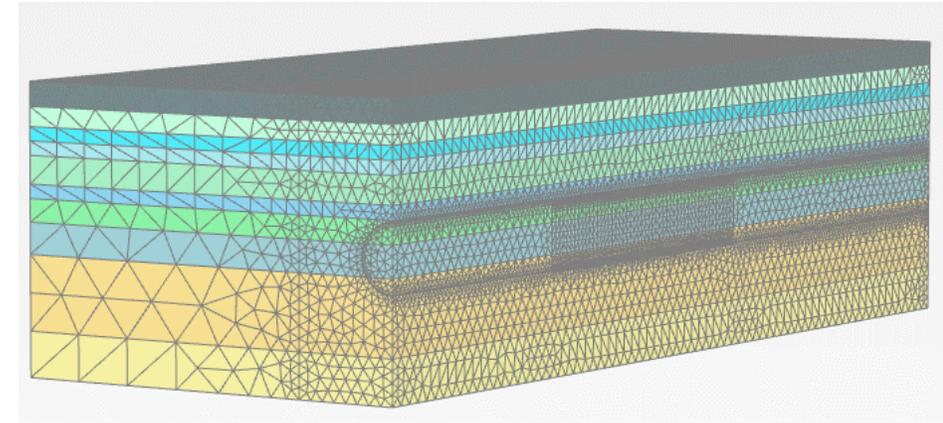
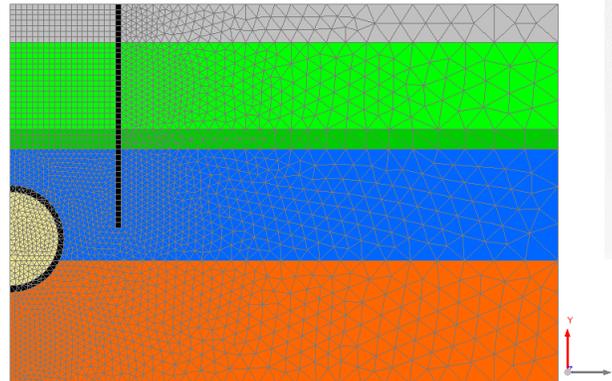
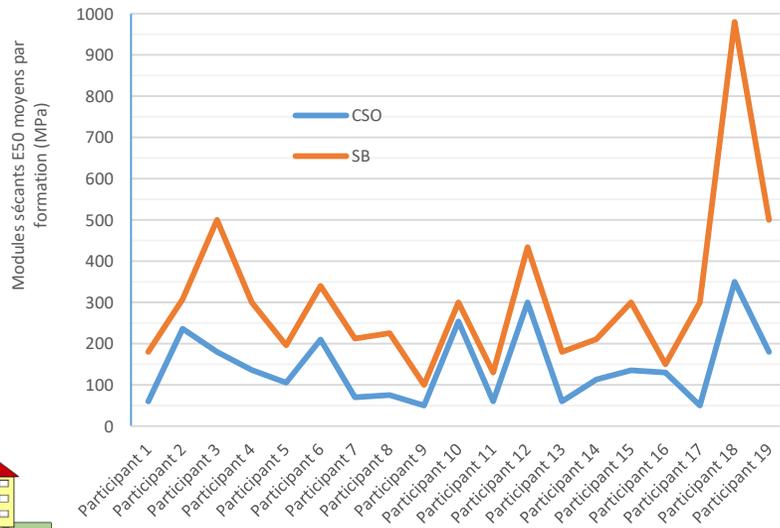


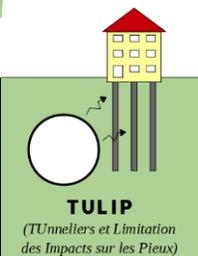
# Synthèse des hypothèses effectuées par les participants à l'exercice de prévision TULIP

*Nicolas BERTHOZ (CETU)*



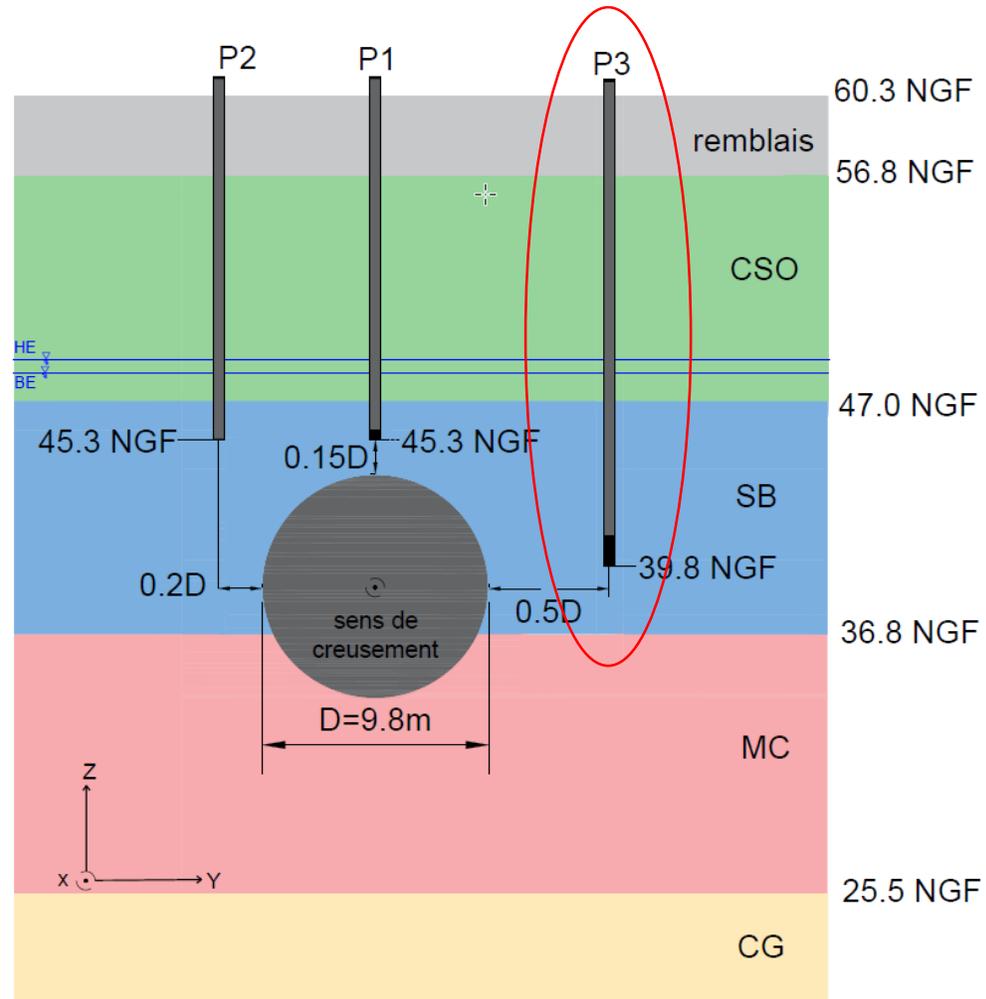
# SOMMAIRE

- ❖ Rappel du sujet de l'exercice
- ❖ Bilan des participants
- ❖ Types généraux de modèles
- ❖ Lois de comportement du terrain
- ❖ Principes de modélisation du creusement au tunnelier
- ❖ Principes de modélisation du pieu



# Rappel du sujet de l'exercice de prévision

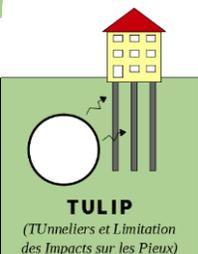
## Impact du tunnelier sur le pieu P3



### A estimer :

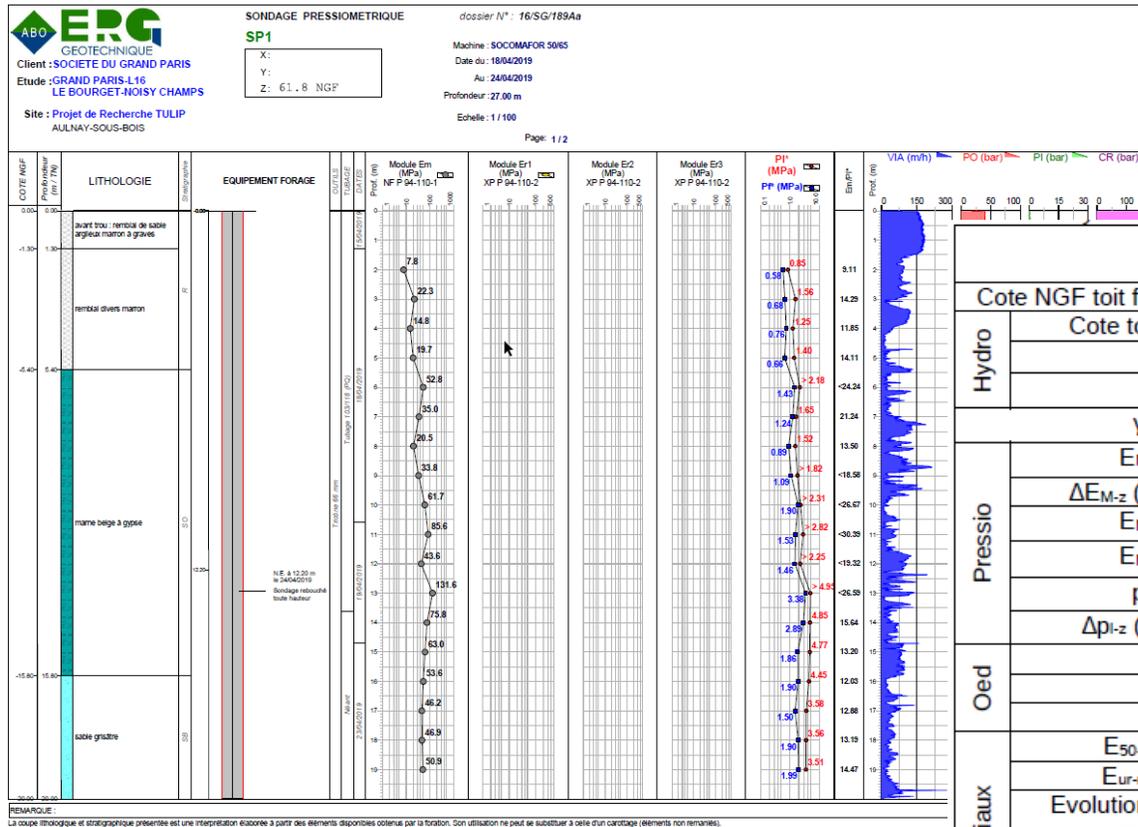
<b>Etat initial (après chargement)</b>	<b>Effort normal <math>N_{ini}</math></b> à différentes profondeurs ?
<b>Etat final (loin à l'arrière du front)</b>	<b>Tassement maximal en surface</b> du terrain « en champ libre » (à 10 m du pieu P3) $u_{zmax-terrain}$ ?
	<b>Distances transversales <math>Y</math></b> pour lesquelles le tassement en surface vaut 60 % (= $i_y$ ) et 30 % du tassement maximal (dans l'axe) : $Y_{60\%-uzmax}$ , $Y_{30\%-uzmax}$ ?
	<b>Tassement maximal de la tête</b> du pieu P3 $u_{zmax-P3}$ ?
	<b>Effort normal <math>N_{fin}</math></b> dans le pieu P3 à différentes profondeurs ?
	<b>Moment fléchissant transversal <math>M_{x-fin}</math></b> dans le pieu P3 à différentes profondeurs ?

En option : déplacements horizontaux du terrain et du pieu, et moments longitudinaux dans le pieu



# Rappel des données d'entrée (phase 1)

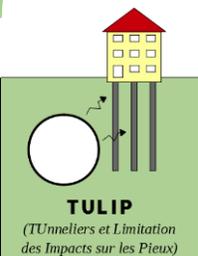
- **Données géotechniques** : modèle géologique, niveau piézométrique, coupe des sondages pressiométriques réalisés dans l'emprise, synthèse des essais de laboratoire.



## Synthèse des essais de laboratoire

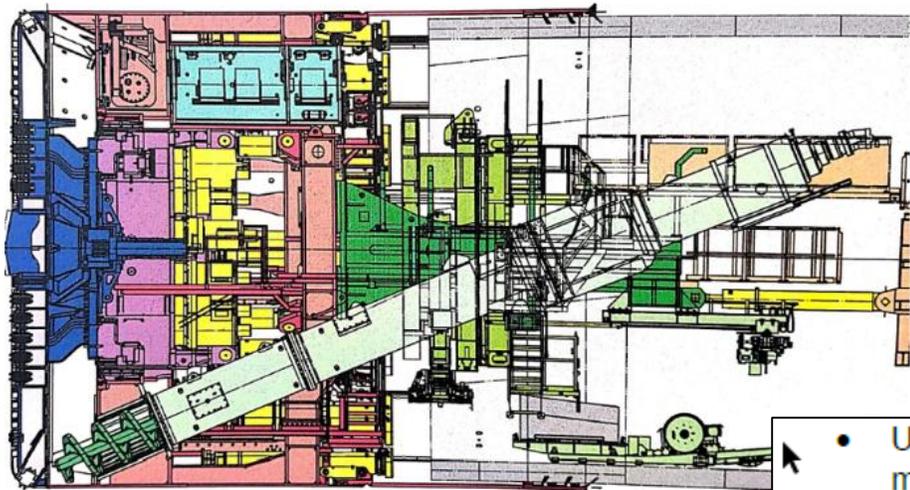
	Remblais (R)	Calcaires Saint-Ouen (SO)	Sables de Beauchamp (SB)	Marnes et Caillasses (MC)
<b>Hydro</b>				
Cote NGF toit formation	60.3	56.8	47	36.8
Cote toit nappe		48.8		
$k_v$ (m/s)	-	$10^{-5}$ à $10^{-3}$	$10^{-5}$ à $10^{-4}$	$10^{-5}$ à $10^{-4}$
$k_h$ (m/s)	-	$10^{-6}$ à $10^{-4}$	$10^{-6}$ à $10^{-5}$	$10^{-6}$ à $10^{-5}$
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	19	18	21	20
<b>Pressio</b>				
$E_{M-a}$ (MPa)	34	60	126	263
$\Delta E_{M-z}$ (MPa/m)	-	10	28	-
$E_{M-g}$ (MPa)	24	44	92	220
$E_{M-h}$ (MPa)	18	34	75	187
$p_{l-a}$ (MPa)	1.9	2.8	3.8	-
$\Delta p_{l-z}$ (MPa/m)	-	0.41	-	-
<b>Oed</b>				
$C_c$ (-)	0.010	0.036	0.009	0.0195
$C_s$ (-)	0.138	0.291	0.069	0.1585
$\sigma'_p$ (kPa)	90	530 à 550	200 à 510	48 à 580
<b>Triaxiaux</b>				
$E_{50-ref}$ (MPa)	20	40 à 60	18 à 180	40 à 360
$E_{ur-ref} / E_{50-ref}$	2.5	2.5 à 4	2.5 à 3	3
Evolution avec la profondeur	Pas d'information	Pas d'information	$E_{oed} = 43 (\sigma_{zz})^{0.605}$ à $61 (\sigma_{zz})^{0.414}$	Pas d'information
$\nu$ (-)	0.3	0.3	0.37	0.3
$[c'$ (kPa), $\phi'$ (°)]	(0 ; 28)	(10 ; 33) à (31 ; 42)	(10 ; 33) à (0 ; 41)	(186 ; 27) à (15;38)
$\Psi$ (°)	-	-	3	-

Coupe du sondage pressiométrique SP1



# Rappel des données d'entrée (phase 1)

- **Données géotechniques** : modèle géologique, niveau piézométrique, coupe des sondages pressiométriques réalisés dans l'emprise, synthèse des essais de laboratoire.
- **Caractéristiques géométriques du tunnelier** : diamètre excavé, épaisseur des voussoirs, surcoupe & conicité.



Coupe du tunnelier

- Une roue de coupe mixte de diamètre **9.87 m**. Celle-ci a un taux d'ouverture de 30%, et comporte 26 molettes de 18 pouces et 200 couteaux ;
- Un bouclier avant de 9.83 m de diamètre extérieur et 3.5 m de longueur ;
- Un bouclier central de 9.815 m de diamètre extérieur et 3.5 m de longueur ;
- Une jupe de 9.80 m de diamètre et 4.0 m de longueur.

*Extrait du sujet relatif à la géométrie du bouclier*

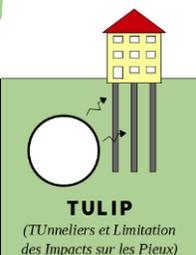
# Rappel des données d'entrée (phase 1)

- **Données géotechniques** : modèle géologique, niveau piézométrique, coupe des sondages pressiométriques réalisés dans l'emprise, synthèse des essais de laboratoire.
- **Caractéristiques géométriques du tunnelier** : diamètre excavé, épaisseur des voussoirs, surcoupe & conicité.
- **Conditions de pilotage du tunnelier** : pression dans la chambre, effort dans l'arbre de la roue de coupe, pressions d'injection du mortier.

Les valeurs suivantes des paramètres de pilotage du tunnelier peuvent être considérées comme représentatives du passage sous l'expérimentation :

- Pression mesurée dans la chambre d'abattage : **130 kPa** en clé, **220 kPa** en radier ;
- Effort complémentaire exercé par les parties métalliques de la roue de coupe sur le front de taille (« soutènement mécanique ») : **7000 kN** ;
- Injections de bentonite le long du bouclier : **néant** ;
- Pression d'injection du mortier de bourrage (à proximité de la clé) : **175 kPa**.

*Extrait du sujet relatif aux conditions de pilotage du tunnelier*



# Rappel des données d'entrée (phase 1)

- **Données géotechniques** : modèle géologique, niveau piézométrique, coupe des sondages pressiométriques réalisés dans l'emprise, synthèse des essais de laboratoire.
- **Caractéristiques géométriques du tunnelier** : diamètre excavé, épaisseur des voussoirs, surcoupe & conicité.
- **Conditions de pilotage du tunnelier** : pression dans la chambre, effort dans l'arbre de la roue de coupe, pressions d'injection du mortier.
- **Caractéristiques du pieu et charge en tête** : diamètre, mode de réalisation, charge en tête, module d'Young mesuré.

La charge exercée en tête du pieu pendant toute la durée de l'expérimentation est égale à 2060 kN (210 t). Celle-ci est appliquée grâce à un vérin prenant appui sur un massif poids en acier (Figure 2b). Une rotule assure la liaison vérin / massif de réaction afin d'empêcher l'apparition de moments parasites en tête.

Le pieu peut être considéré comme homogène, de comportement élastique linéaire isotrope avec un module d'Young croissant avec la profondeur : 38 GPa en tête à 48 GPa en pointe. Afin de faciliter le calage du modèle, noter que la tête du pieu a tassé de 1.9 mm au cours du chargement (de 0 à 2060 kN).

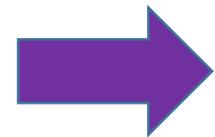
*Extrait du sujet relatif au pieu.*



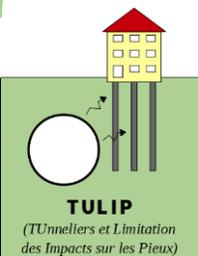
*Forage à la tarière*

# Rappel des données d'entrée (phase 1)

- **Données géotechniques** : modèle géologique, niveau piézométrique, coupe des sondages pressiométriques réalisés dans l'emprise, synthèse des essais de laboratoire.
- **Caractéristiques géométriques du tunnelier** : diamètre excavé, épaisseur des voussoirs, surcoupe & conicité.
- **Conditions de pilotage du tunnelier** : pression dans la chambre, effort dans l'arbre de la roue de coupe, pressions d'injection du mortier.
- **Caractéristiques du pieu et charge en tête** : diamètre, mode de réalisation, charge en tête, module d'Young mesuré.

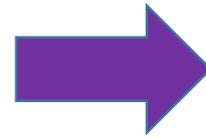


## Réponses n°1



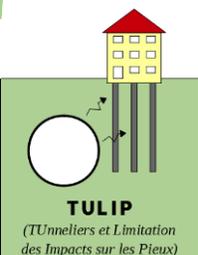
# Données complémentaires (phase 2)

- Résultats expérimentaux



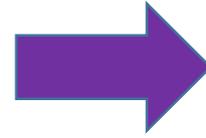
## Réponses n°2

Etat initial (avant creusement)	Effort normal dans le pieu P3 à différentes profondeurs par rapport à la surface du terrain	N <sub>ini_-16m</sub>	≈ 0	kN
		N <sub>ini_-19m</sub>	≈ 0	kN
Etat final (loin à l'arrière du front)	Tassement maximal en surface du terrain	U <sub>zmax-terrain</sub>	-10,0	mm
	Distance transversale où le tassement vaut 60% de U <sub>zmax-terrain</sub>	Y <sub>60%-uzmax</sub>	8,0	m
	Distance transversale où le tassement vaut 30% de U <sub>zmax-terrain</sub>	Y <sub>30%-uzmax</sub>	12,5	m



# Données complémentaires (phase 2)

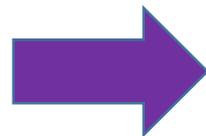
- Résultats expérimentaux



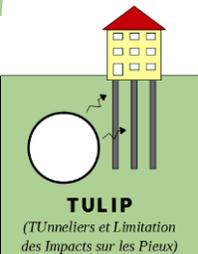
## Réponses n°2

- Modèle géotechnique (de calcul) imposé

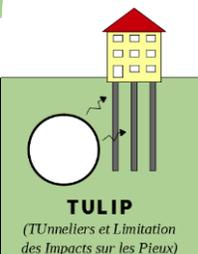
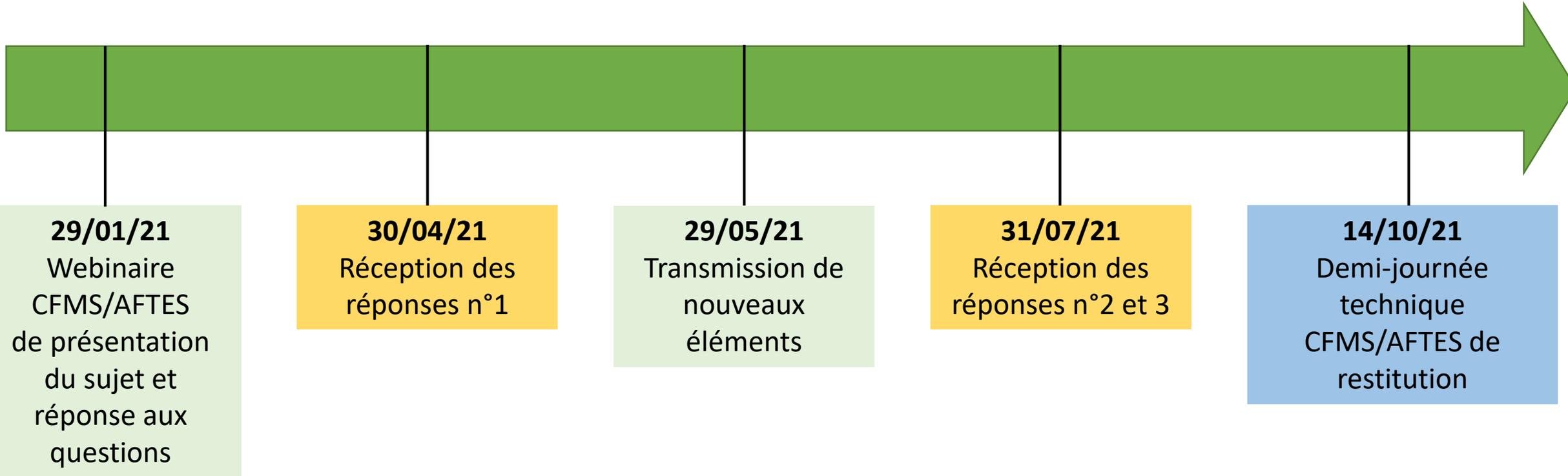
Paramètre	Description	Remblai	Calcaires de Saint-Ouen	Sables de Beauchamp	Marnes et Caillasses
Ep.	Epaisseur (m)	3,5	9,8	10,2	11,3
L.C.	Modèle de comportement	Hardening Soil Model (HSM)			
$\gamma$ ou $\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	Poids volumique humide hors nappe ou déjaugé sous nappe	19	18	11	10
K <sub>0</sub>	Coefficient de pression des terres au repos	0,5			
E <sub>50ref</sub> (MPa)	Module sécant à 50% du déviateur ultime pour la contrainte de confinement p <sub>ref</sub>	100	180	500	800
E <sub>urref</sub> (MPa)	Module de déchargement / rechargement pour la contrainte de confinement p <sub>ref</sub>	300	540	1500	2400
p <sub>ref</sub> (kPa)	Contrainte de confinement de référence (celle-ci correspond à la contrainte horizontale effective à mi-épaisseur de chaque couche)	17	77	150	206
$\nu$ (-)	Coefficient de Poisson	0,3			
c' (kPa)	Cohésion effective	0	10	5	15
$\varphi'$ (°)	Angle de frottement interne	28	33	35	38
$\psi$ (°)	Angle de dilatance à la rupture	0	3	5	8
R <sub>f</sub> (-)	Coefficient minorateur de la résistance au cisaillement	0,95			
m (-)	Exposant d'évolution des modules avec la contrainte de confinement	0,5			



## Réponses n°3



# Rappel du calendrier



# 19 participants

## 11 bureaux d'ingénierie



\* Uniquement à la phase 2



## 4 entreprises de travaux

spie batignolles



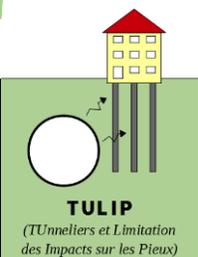
DIRECTION TECHNIQUE

## 2 universités



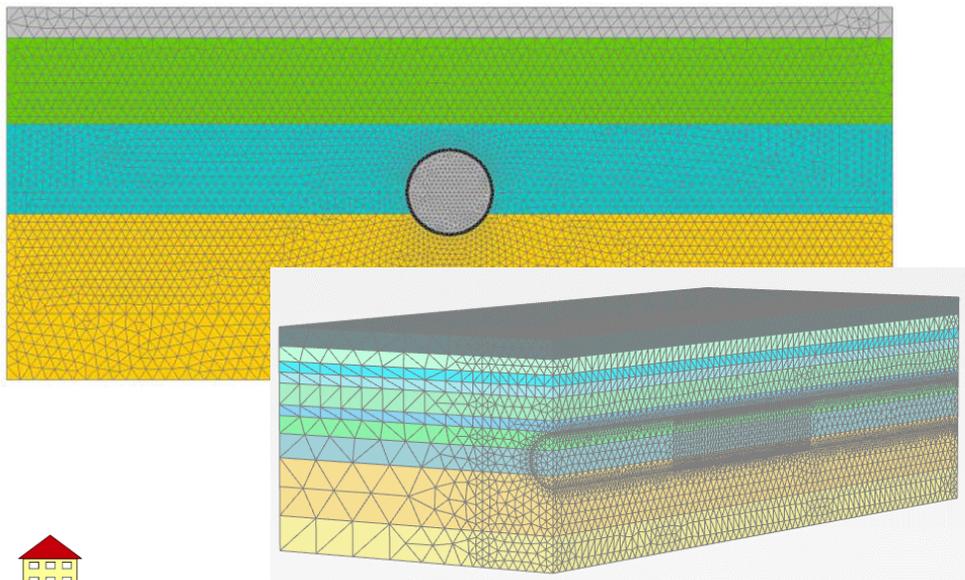
\* Uniquement à la phase 1

## 2 concepteurs de logiciels de calcul



# Types de modèles

- Modèle numérique TBM/terrain pour évaluer les déplacements induits, puis calcul de la réponse du pieu via un calcul au coefficient de réaction :
  - Éléments finis 2D déformations planes + Foxta : **2** participants
  - Éléments finis 3D + Foxta : **1** participant

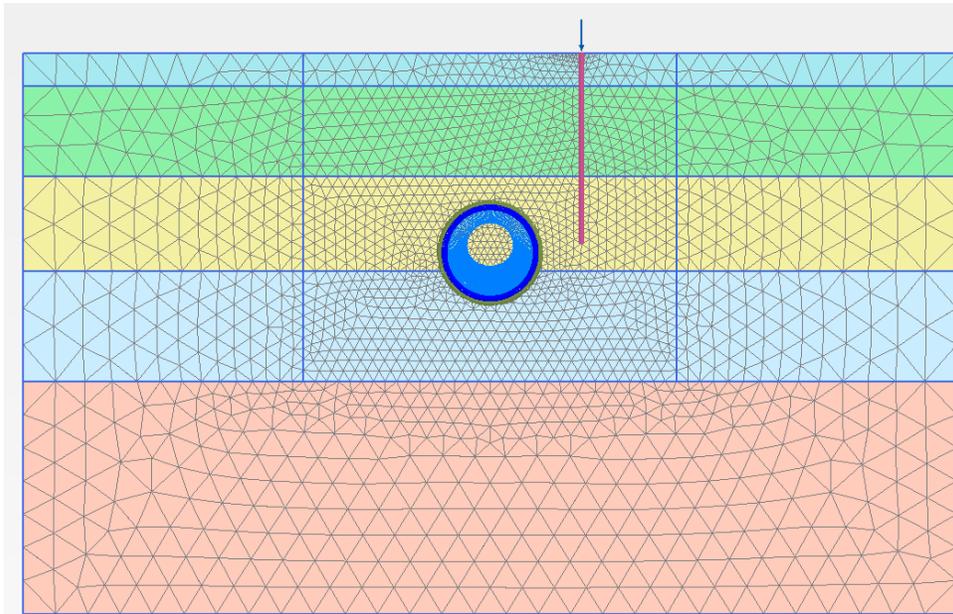


Modèles numériques TBM/terrain

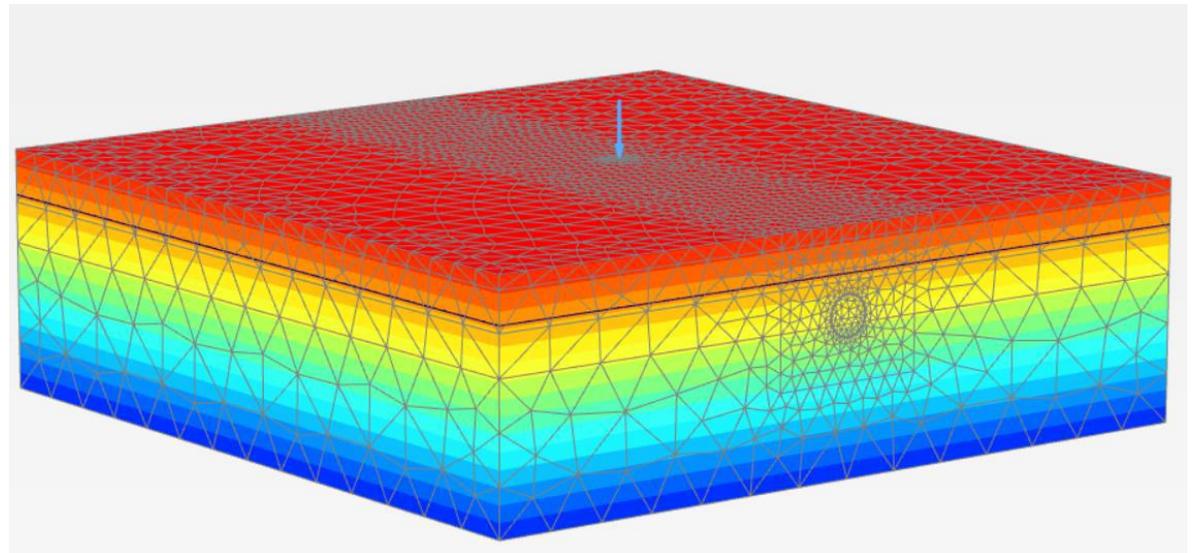
 <p>TASPIE+</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Taspie+</b> : calcul de pieux sous chargement axial (modèle t-z), et de groupes d'inclusions rigides (sous dallages ou remblais) selon les recommandations ASIRI.</li> </ul>
 <p>PIEcoef+</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Piecoef+</b> : pieu isolé ou groupe de pieux soumis à des sollicitations latérales (modèle p-y généralisé), avec prise en compte d'une réaction élastoplastique du sol, des courbes g(z), des déformations d'effort tranchant et des déformations du 2<sup>nd</sup> ordre.</li> </ul> <p>Ce module permet les calculs de type monolithe que nécessitent les projets d'inclusions rigides.</p>

Modules du logiciel Foxta utilisés pour le calcul de la réponse du pieu

- Modèle numérique complet TBM/terrain/pieu :
  - Éléments finis 2D déformations planes : **8** participants
  - Éléments finis 3D : **6** participants
  - Différences finies 3D : **2** participants

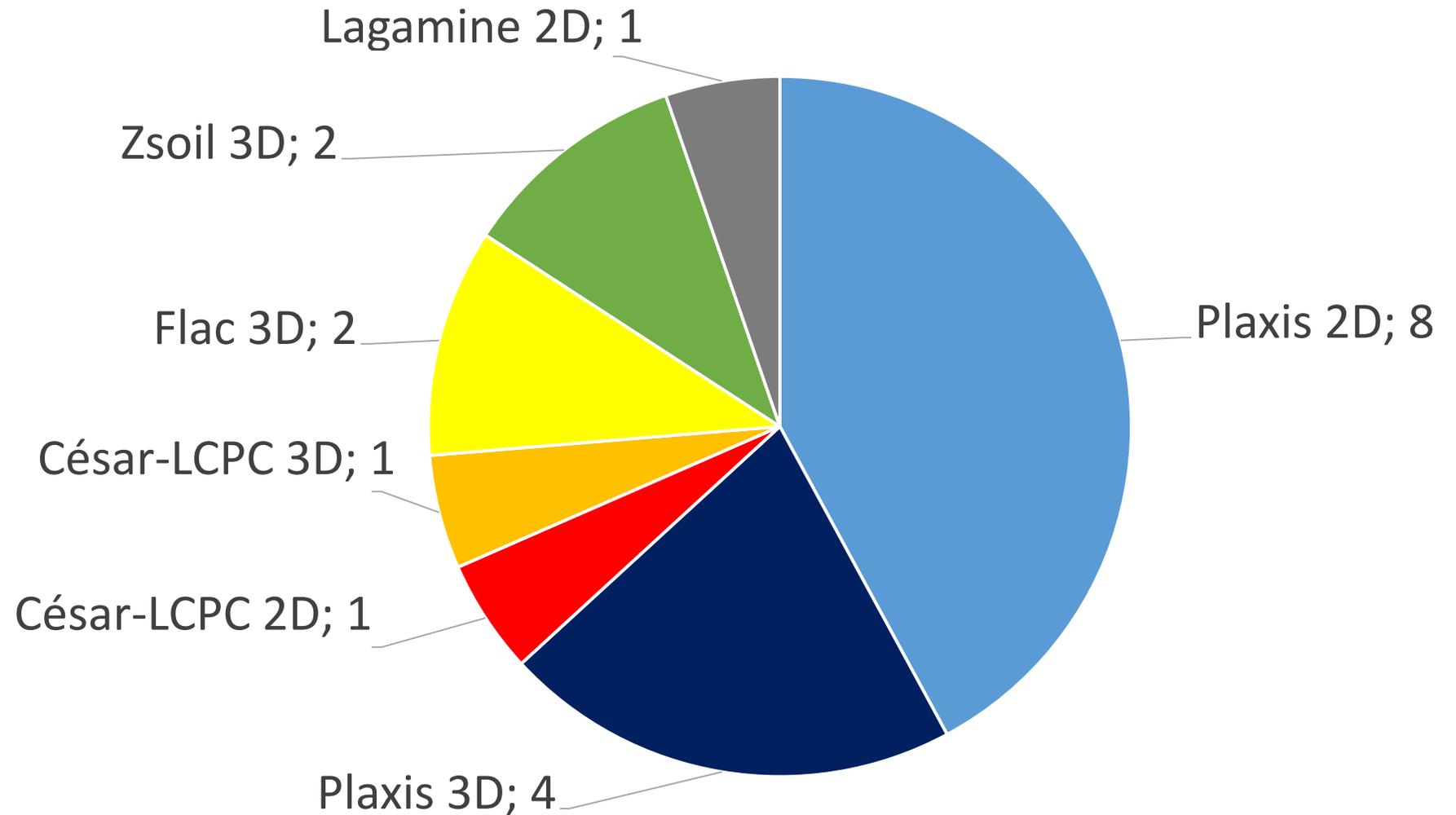


Modèle complet 2D



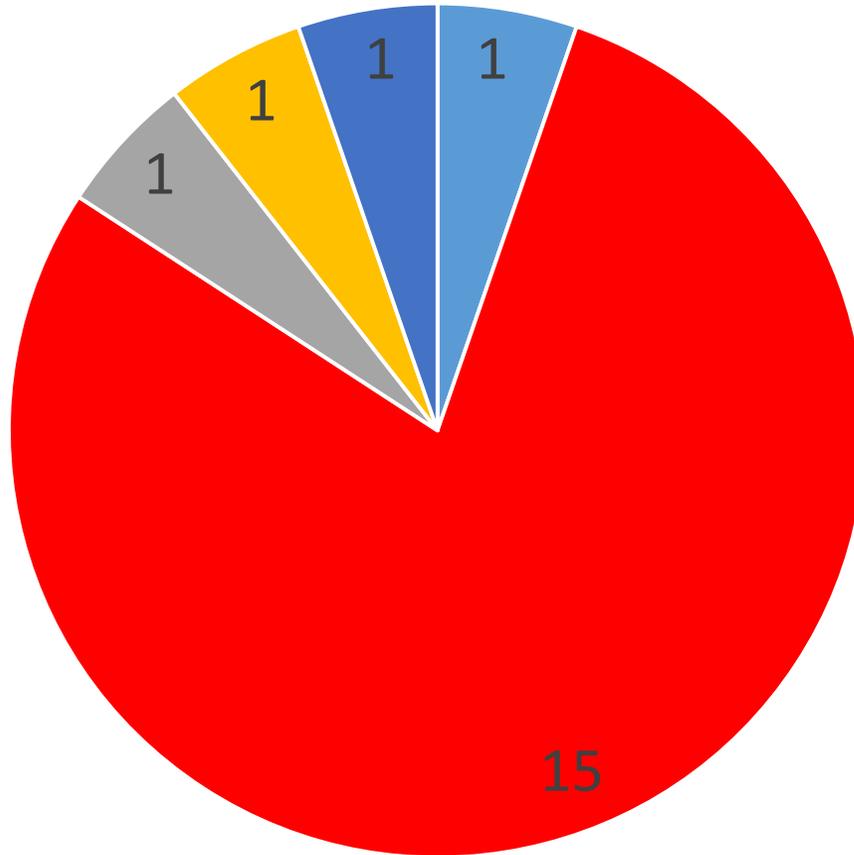
Modèle complet 3D

- Codes de calcul utilisés



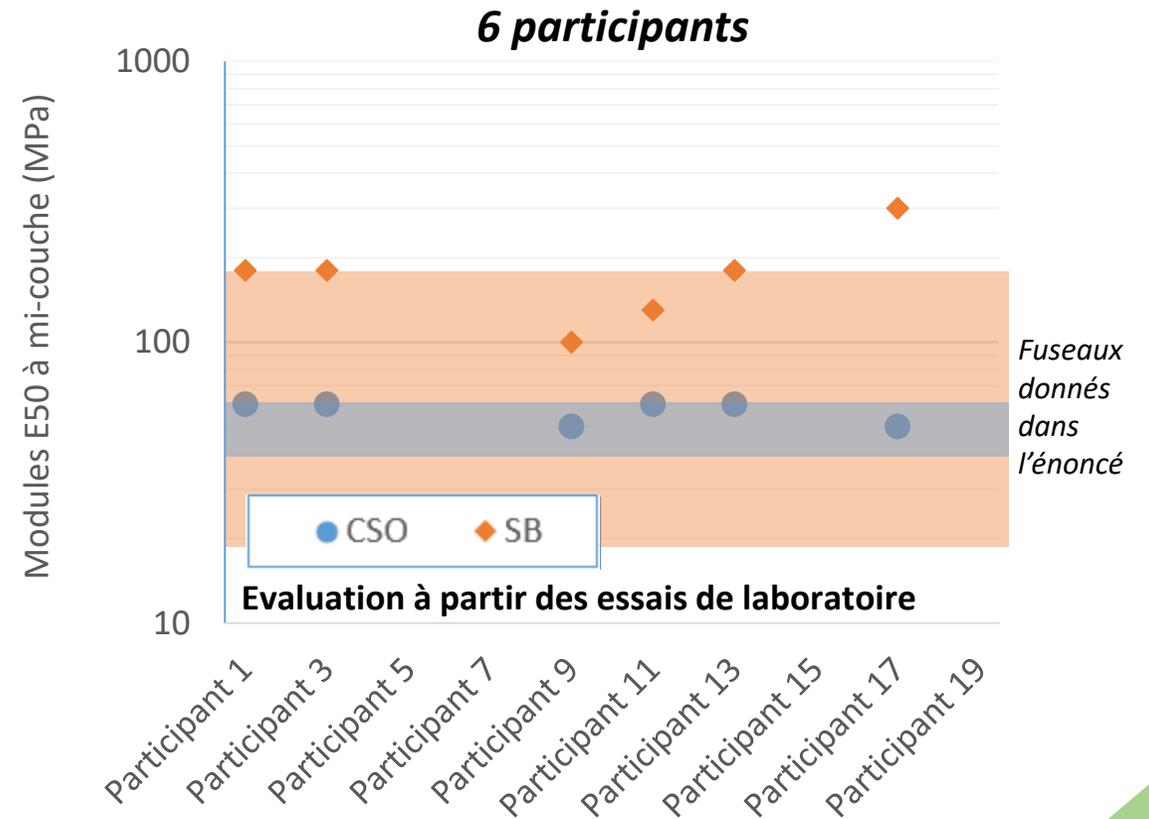
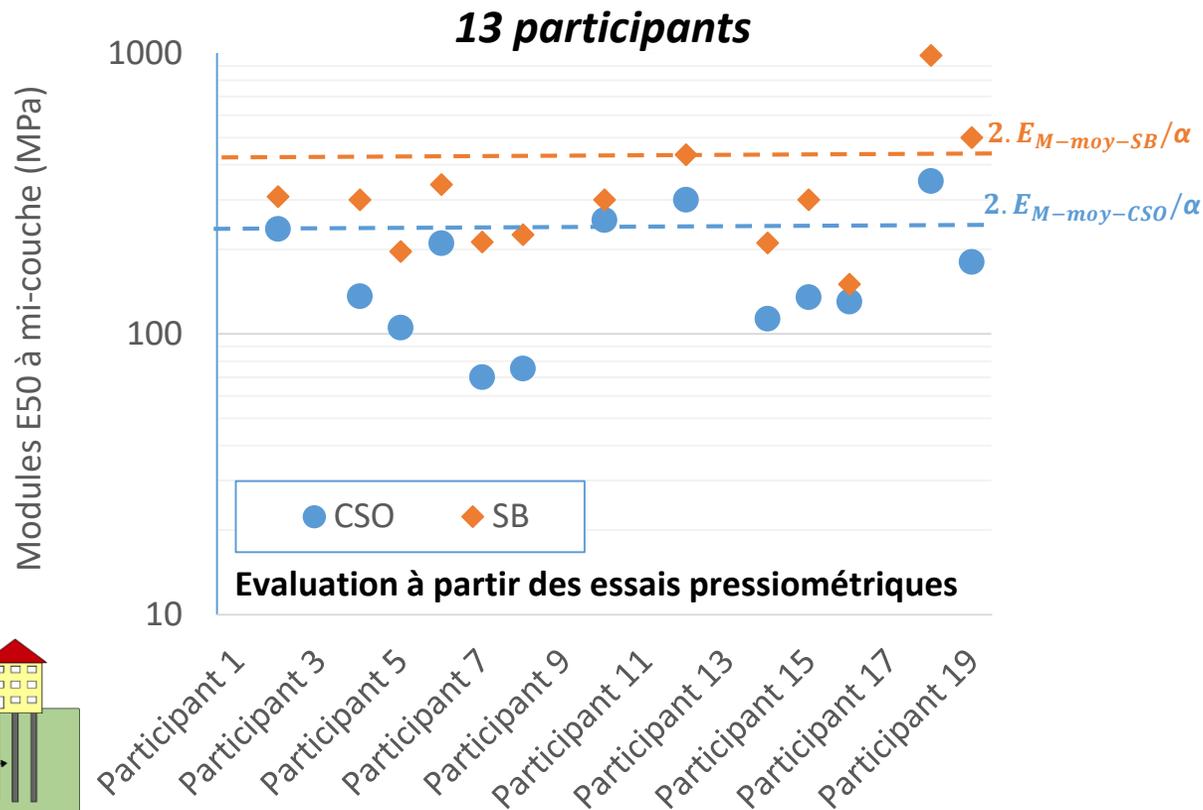
# Loi de comportement du terrain

- Type de loi : principalement HSM

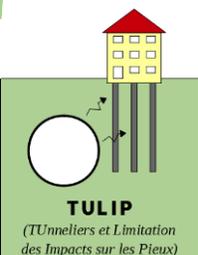
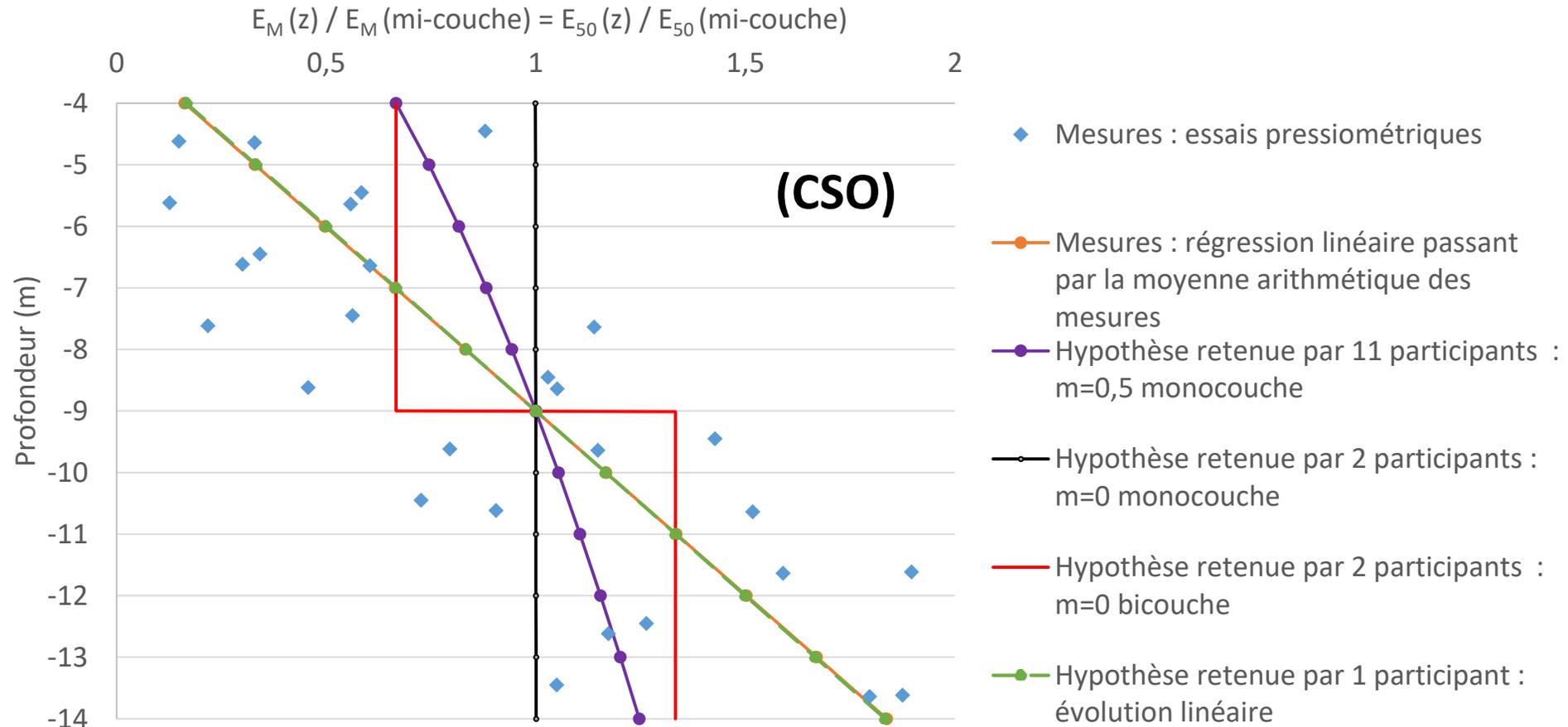


- Elastique linéaire parfaitement plastique avec critère de Mohr-Coulomb (MC classique)
- Elasto-plastique avec écouvissage (HSM)
- Elasto-plastique avec écouvissage et rigidité accrue en petites déformations (HSSM)
- Elastique non linéaire parfaitement plastique avec critère de Mohr-Coulomb et anisotropie transverse (ANL)
- Elasto-plastique avec un critère de Mohr-Coulomb et une évolution de l'angle de frottement avec la déformation

- Modules sécants  $E_{50}$  (ou  $E$ ) à mi-couche des CSO et SB :
  - *Déduction des modules pressiométriques (a) : facteur 6 entre les min / max*
  - *Déduction des essais de laboratoire (b) : facteur 2 à 3 entre les min/max*
  - *Des modules 2 à 3 fois plus faibles en moyenne si (b) plutôt que (a)*

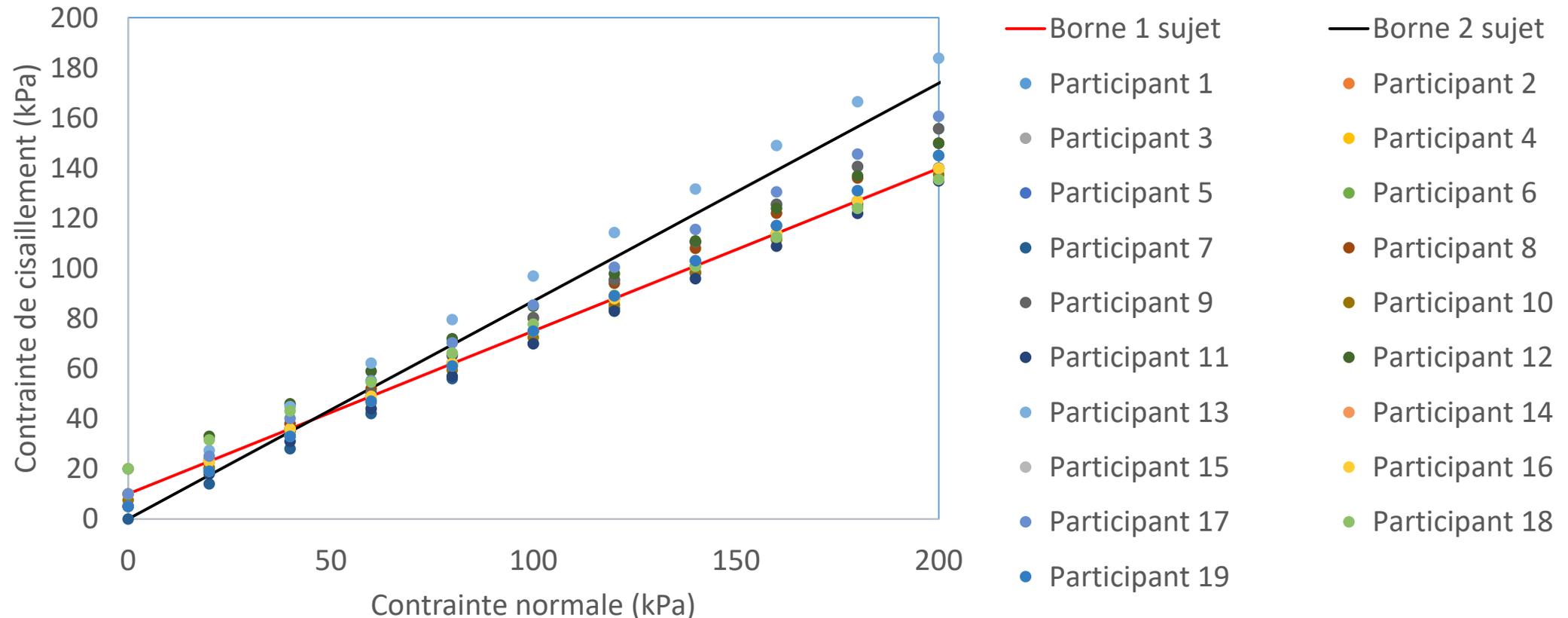


- Prise en compte de l'augmentation des modules avec la profondeur dans CSO et SB :



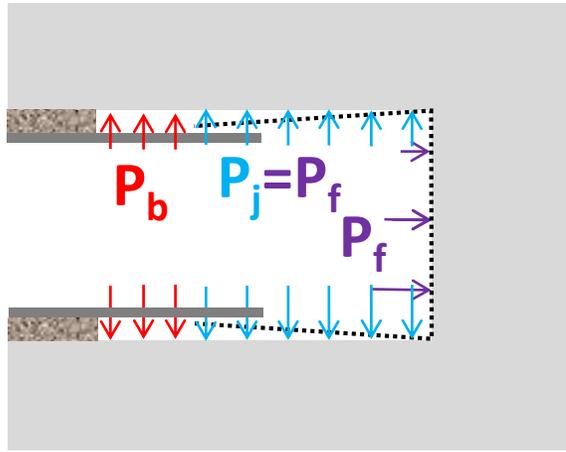
- Résistance au cisaillement des SB :

- *Donné dans l'énoncé :  $[c = 10 \text{ kPa} ; \varphi = 33^\circ]$  à  $[0 \text{ kPa} ; 41^\circ]$*
- *Retenu en majorité :  $[c = 10 \text{ kPa} ; \varphi = 33^\circ]$*
- *Valeurs extrêmes retenues :  $[c = 0 \text{ kPa} ; \varphi = 35^\circ]$  et  $[10 \text{ kPa} ; 41^\circ]$*

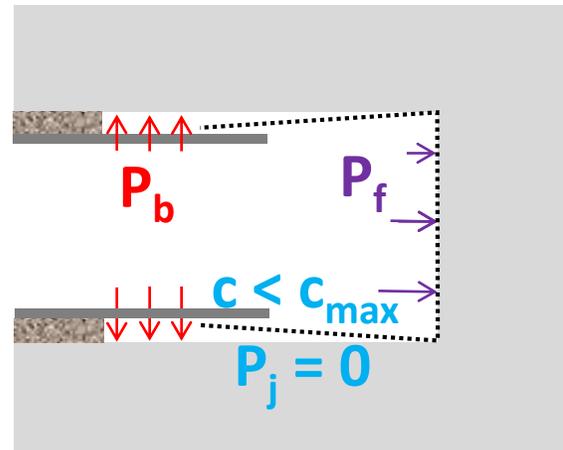


# Modélisation du processus de creusement : modèles 3D

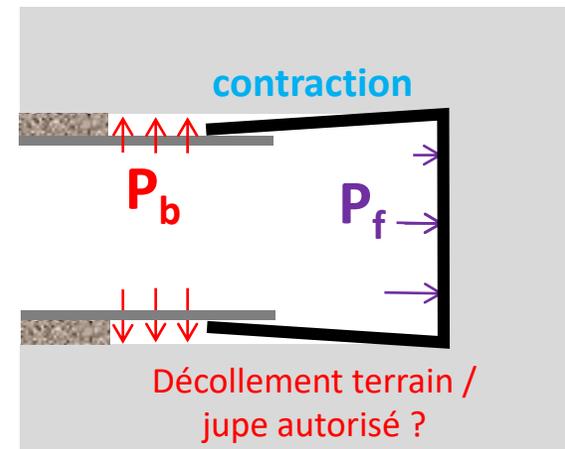
## 1 participant



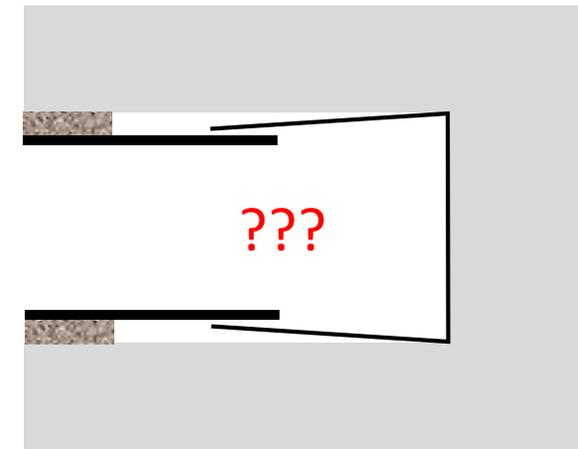
## 3 participants



## 4 participants



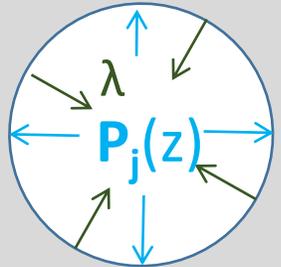
## 1 participant



# Modélisation du processus de creusement : modèles 2D

## Chargements en sortie de jupe

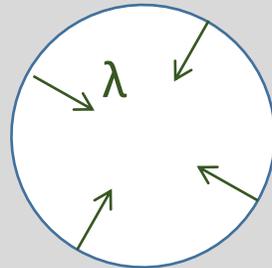
7 participants



$$0,9 < \lambda < 1,0$$

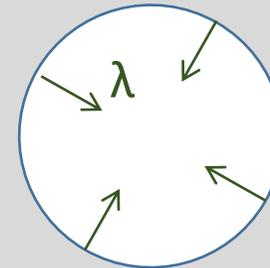
$$0 < P_{j_{clé}} < 130 \text{ kPa}$$

1 participant

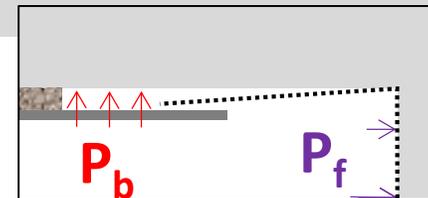


$$\lambda = \lambda_{\text{Corbetta}} \cdot (1 - P_{f\text{-axe}} / \sigma_{h0})$$

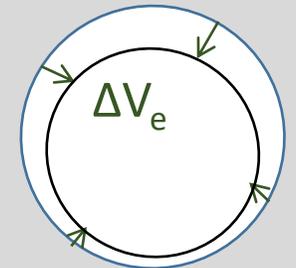
1 participant



$\lambda$  déduit de calcul  
axisymétrique



1 participant



# Principe de modélisation du pieu

**Calculs 3D  
TBM/terrain/pieu :  
8 participants**

Modélisation du pieu sous  
forme d'éléments **volumiques**  
par 6 participants

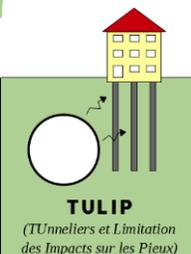
Modélisation du pieu sous  
forme d'éléments **linéiques**  
par 2 participants

**Calculs 2D  
TBM/terrain/pieu :  
8 participants**

Prise en compte du caractère  
cylindrique du pieu ( $\neq$  plaque  
infinie) via un « espacement  
fictif » variant entre 1 et 10 m.

**Calculs aux coefficient  
de réaction (Foxta) :  
3 participants**

(avec déplacements imposés  
déduits de calcul EF  
TBM/terrain)



# Loi d'interface terrain / pieu

Adhérence parfaite :  
3 participants

Frottement latéral  
constant (Tresca) ( $q_s$ ) :  
9 participants

$$110 \text{ kPa} < q_{s\_CSO} < 170 \text{ kPa}$$

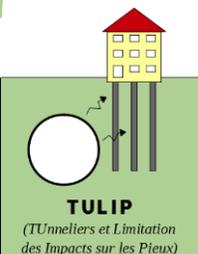
$$80 \text{ kPa} < q_{s\_SB} < 170 \text{ kPa}$$

Frottement latéral  
fonction de la contrainte  
normale (Coulomb) :  
7 participants

2 participants multipliant  
les paramètres du sol par  
0,8 ( $R_{inter}$ )

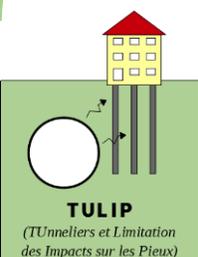
1 participant prenant  
 $\varphi_{interf} = 2/3 \cdot \varphi_{sol}$  et  $c = 0 \text{ kPa}$

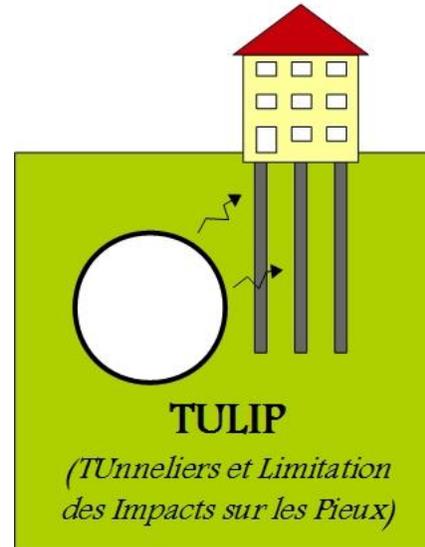
4 participants ne précisant  
pas leurs hypothèses



# Conclusions

- Un investissement important de la profession à l'égard de cet exercice : 19 réponses (de qualité !),
- Un recours systématique à des modèles numériques (MEF, MDF),
- **Une grande variété :**
  - De type de modèles : 3D complet, 2D complet, 2D + Coef réaction
  - De caractéristiques géotechniques : E variant d'un facteur 6 environ,
  - De manière de modéliser le creusement au tunnelier : 8 approches différentes,
  - De procédé de modélisation du pieu (3D, 2D, « espacement fictif », loi d'interface).





**Merci de votre  
attention**

