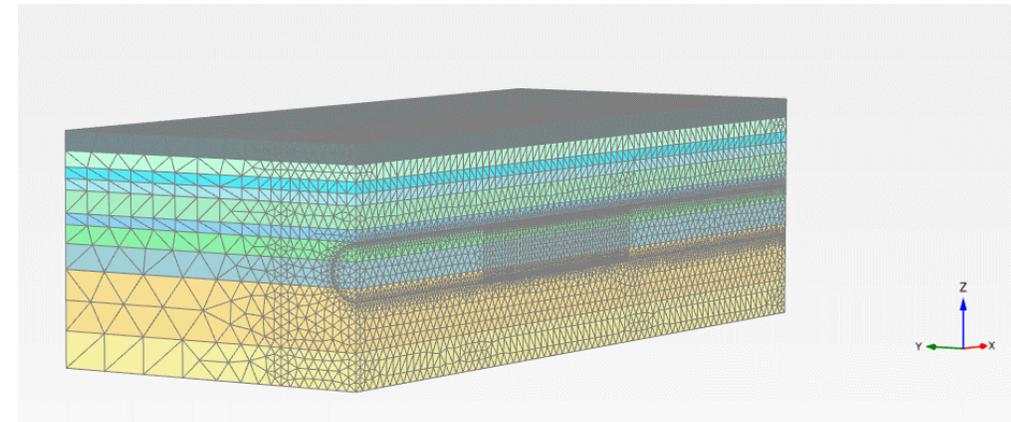
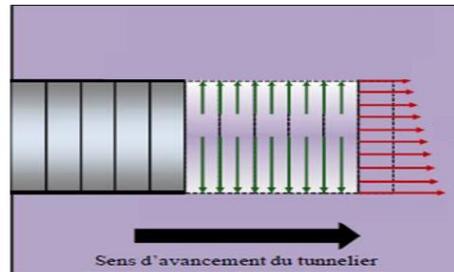
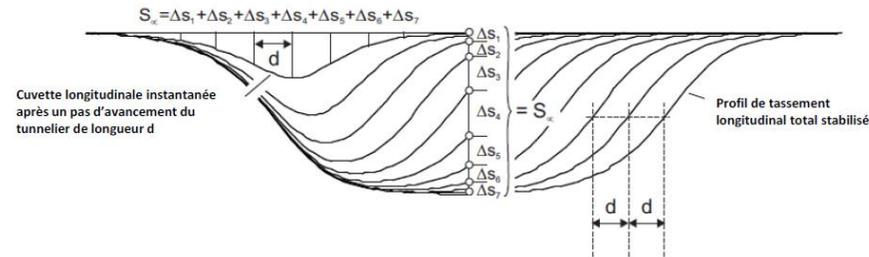
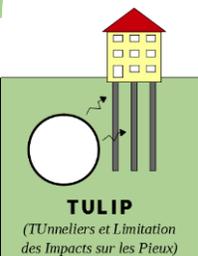


## Exercice de prévision de l'impact d'un tunnelier sur une fondation profonde

Combinaison d'une approche simplifiée aux éléments finis 3D et de modèles de courbes de transfert « t-z » et « p-y »



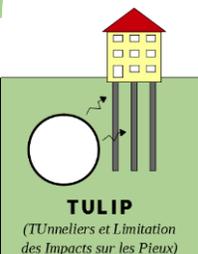
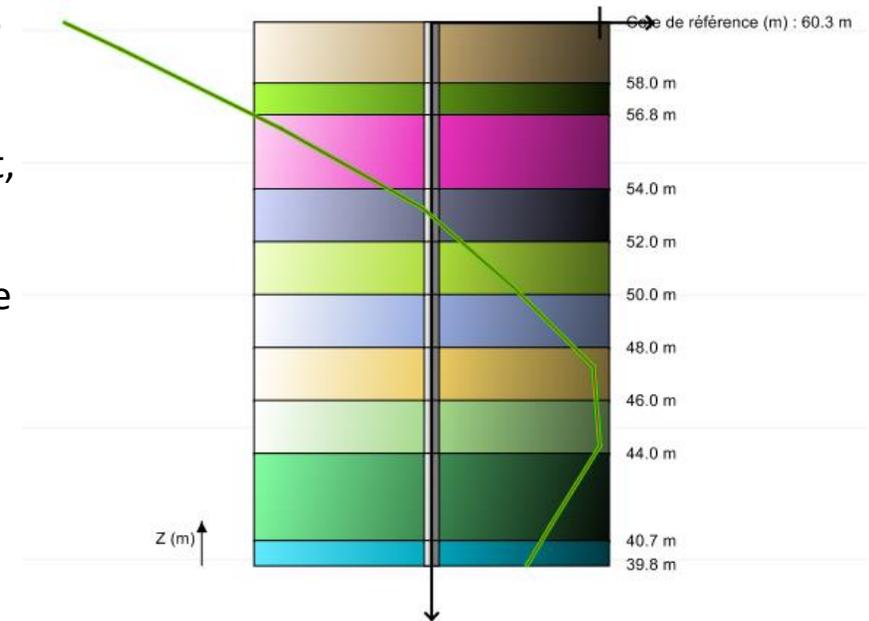
Jean-Pierre Janin & Martin Cahn (TERRASOL)



# Principes de la méthodologie adoptée

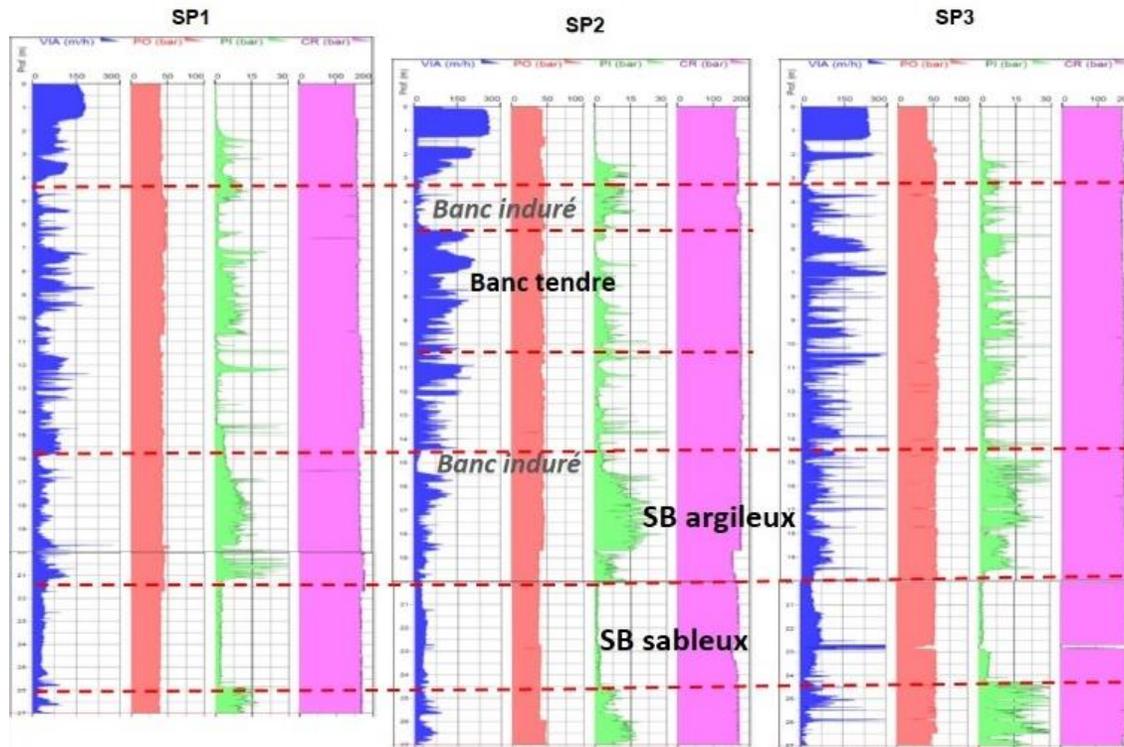
- Le pieu est **isolé, souple** (par rapport au sol), **libre** en tête → pas de modification de la réponse du terrain par rapport au champ libre
- Les **déplacements** au droit du pieu peuvent être estimés en **champ libre** et imposés au sol dans un modèle aux coefficients de réaction t-z et p-y implémenté dans le logiciel FOXTA (le déplacement est imposé « au support des ressorts »).
- La modélisation aux **éléments finis 3D d'un tunnel au tunnelier** permet:
  - Prise en compte directe des phénomènes tridimensionnels (**pas d'hypothèse sur les taux de déconfinement ou sur la « pression de calcul 2D »!**)
  - Simulation **explicite des différents « facteurs »** du creusement (pression au front, roue de coupe, pression radiale autour de la jupe, pression du mortier...)
  - Simulation précise de la **réponse du terrain le long du bouclier** (source principale de tassement) et vérification aisée de l'éventuel **contact avec la jupe**
  - Évaluation des déplacements dans **toutes les directions au droit du pieu** et pour **différentes distances au front**

...Mais couteux en temps de modélisation et de calcul...

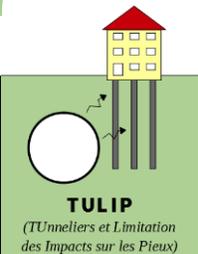
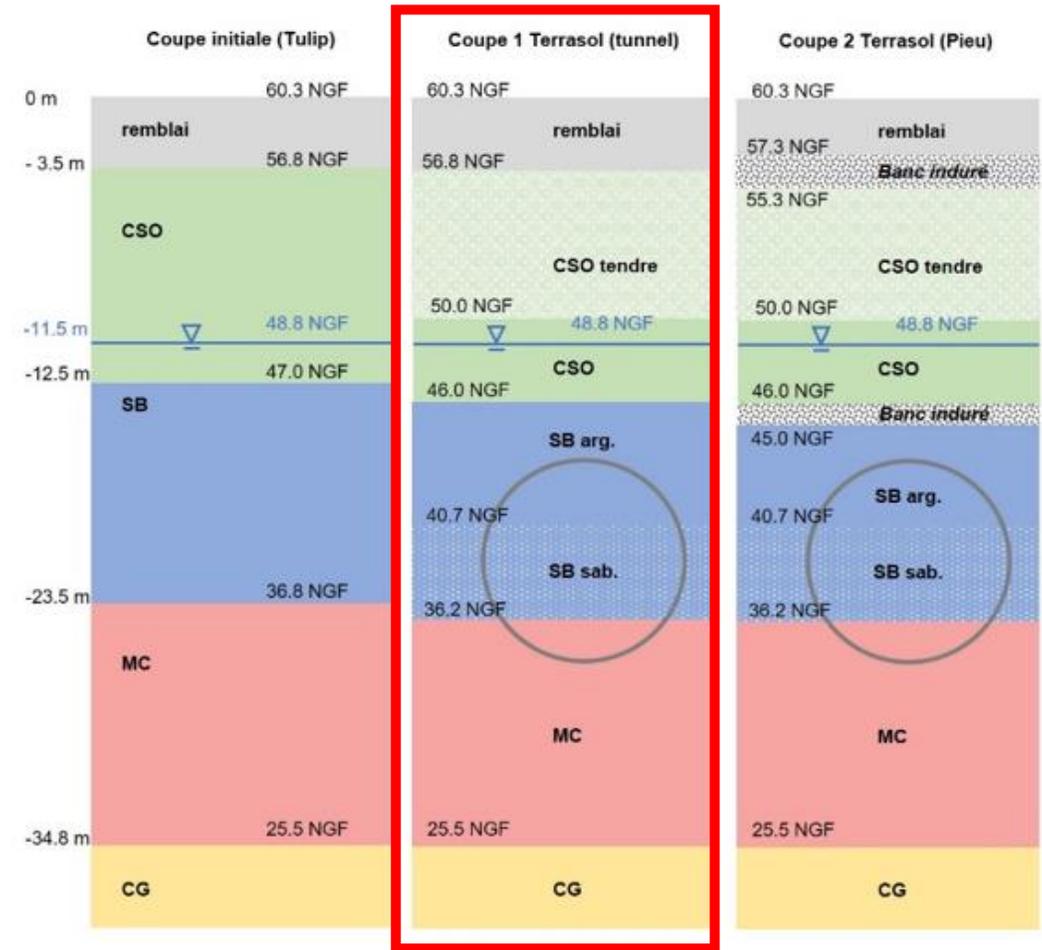


# Modèle géologique - géotechnique

Stratigraphie affinée à l'aide de l'analyse des paramètres de forage

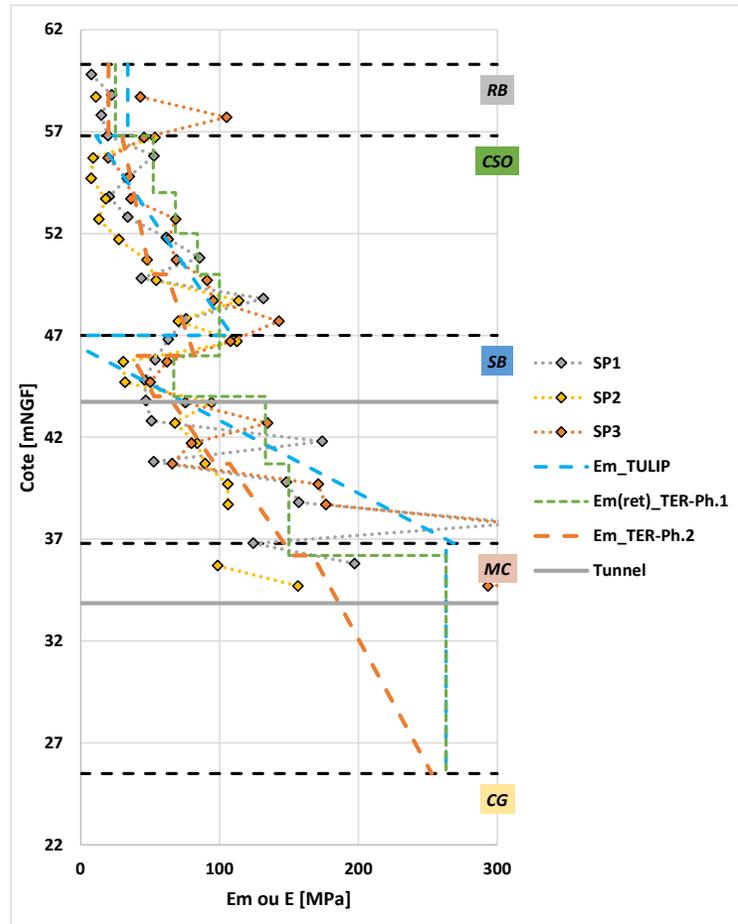


→ Distinction de deux niveaux dans les Sables de Beauchamps et plusieurs bancs indurés identifiés dans le Calcaire de Saint Ouen



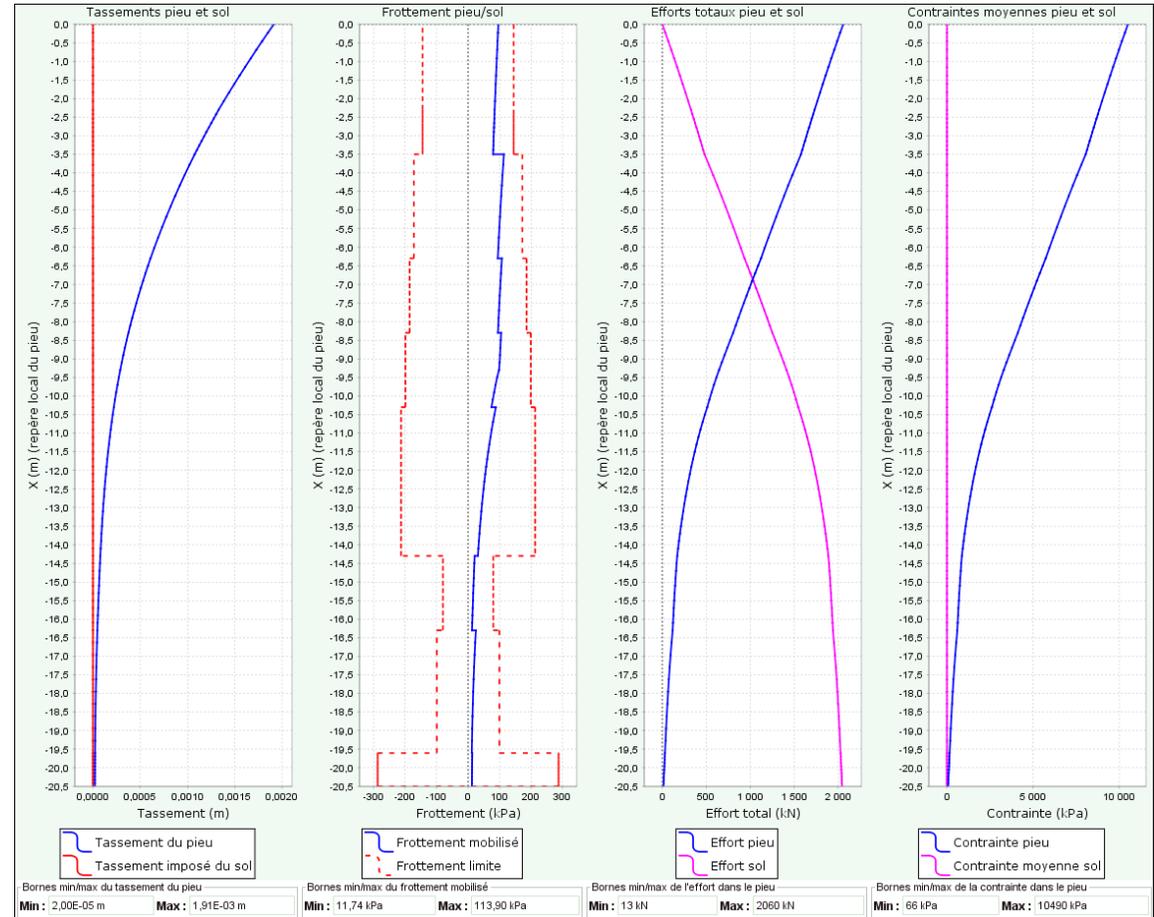
# Modèle géologique - géotechnique

Analyse des sondages pressiométriques...



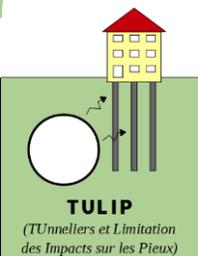
Définition d'un module pressiométrique moyen dépendant de la profondeur

...Permettant le recalage de l'essai de chargement du pieu



$q_s$  non engagé et la pointe ne travaille pas.

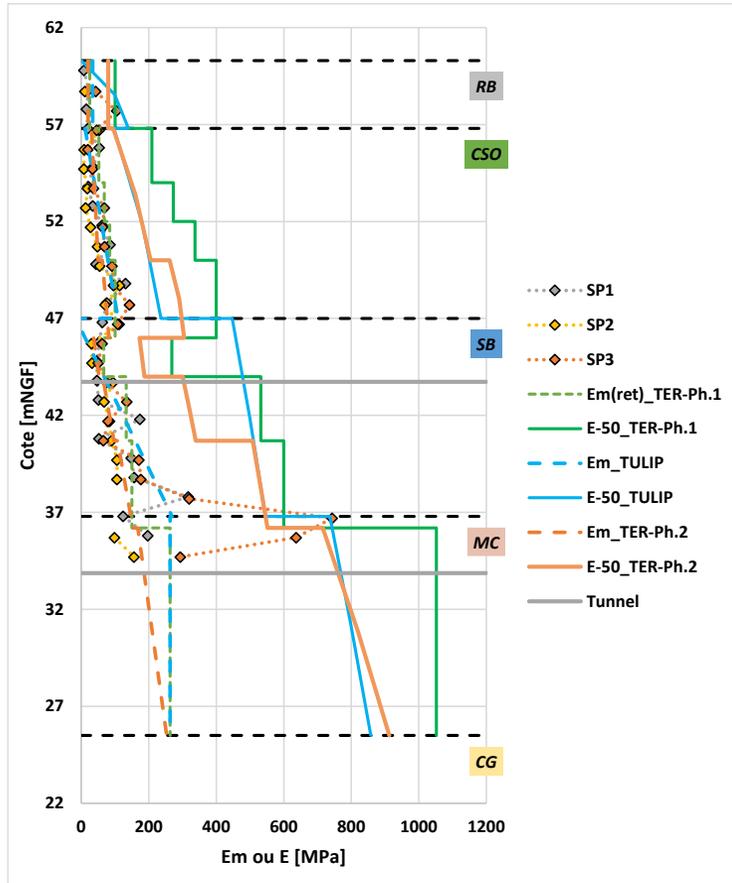
Raccourcissement élastique prépondérant dans le tassement du pieu



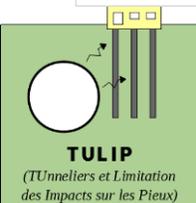
# Modèle géologique - géotechnique

## Hypothèses géotechniques

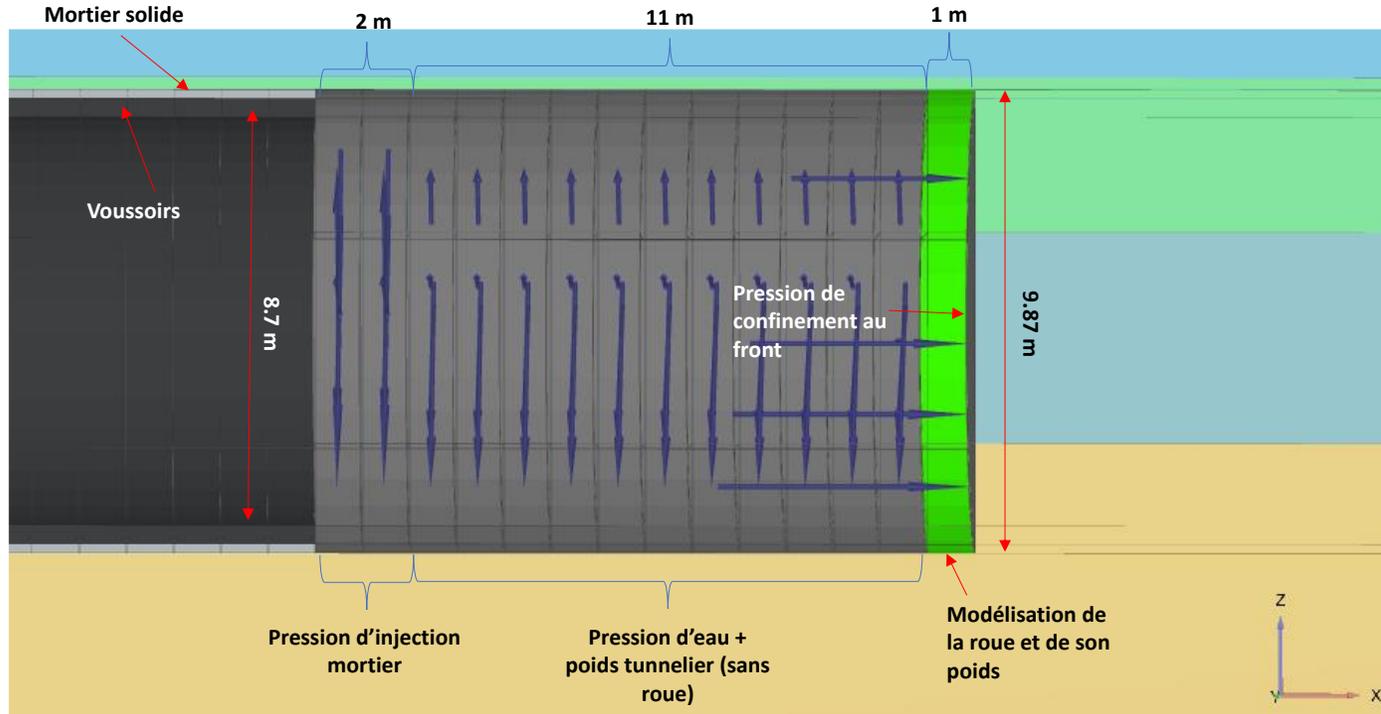
- Loi de comportement HSM ;
- $E_{50} = 4 E_M$  et  $E_{ur} = 3 \times E_{50}$ ;
- Paramètres de résistance fixés a priori et ajustés en phase 2;
- Comportement du sol considéré drainé au vu des plages de perméabilité et de modules fournis, des distances de drainage réduites et des vitesses d'avancement classiques des tunneliers importantes.



CAS 2b- Modèle sol TER Ph2 (modules réévalués)		Cote toit	Yh [kN/m <sup>3</sup> ]	Em [MPa]	Δem [MPa/m]	α [-]	k [-]	E50réf [MPa]	Euréf [MPa]	préf [kPa]	m	c' [kPa]	φ' [°]	ψ [°]	K0 [-]	Rf [-]
	RB	60.3	19	20	0	0.5	2	80	240	17.6	0	0	28	0	0.53	0.95
	CSO t1	56.8	18	40	3	0.5	2	160	480	58.1	0.5	10	33	3	0.46	0.95
	CSO t2	54	18	40	3	0.5	2	160	480	58.1	0.5	10	33	3	0.46	0.95
	CSO t3	52	18	40	3	0.5	2	160	480	58.1	0.5	10	33	3	0.46	0.95
	CSO	50	18	72	5	0.5	2	290	870	92.5	0.5	20	35	5	0.43	0.95
	SB ARG 1	46	21	45	8	0.5	2	180	540	122	0.8	10	30	0	0.50	0.95
	SB ARG 2	44	21	80	10	0.5	2	320	960	136.5	0.8	10	30	0	0.50	0.95
	SB SAB	40.7	21	130	10	0.5	2	530	1590	134.7	0.5	5	35	5	0.43	0.95
	MC	36.2	20	210	8	0.5	2	820	2460	185.3	0.5	50	32	2	0.47	0.95
	CG	25.5	21	-	-	-	-	E = 2000		-	-	-	-	-	-	-

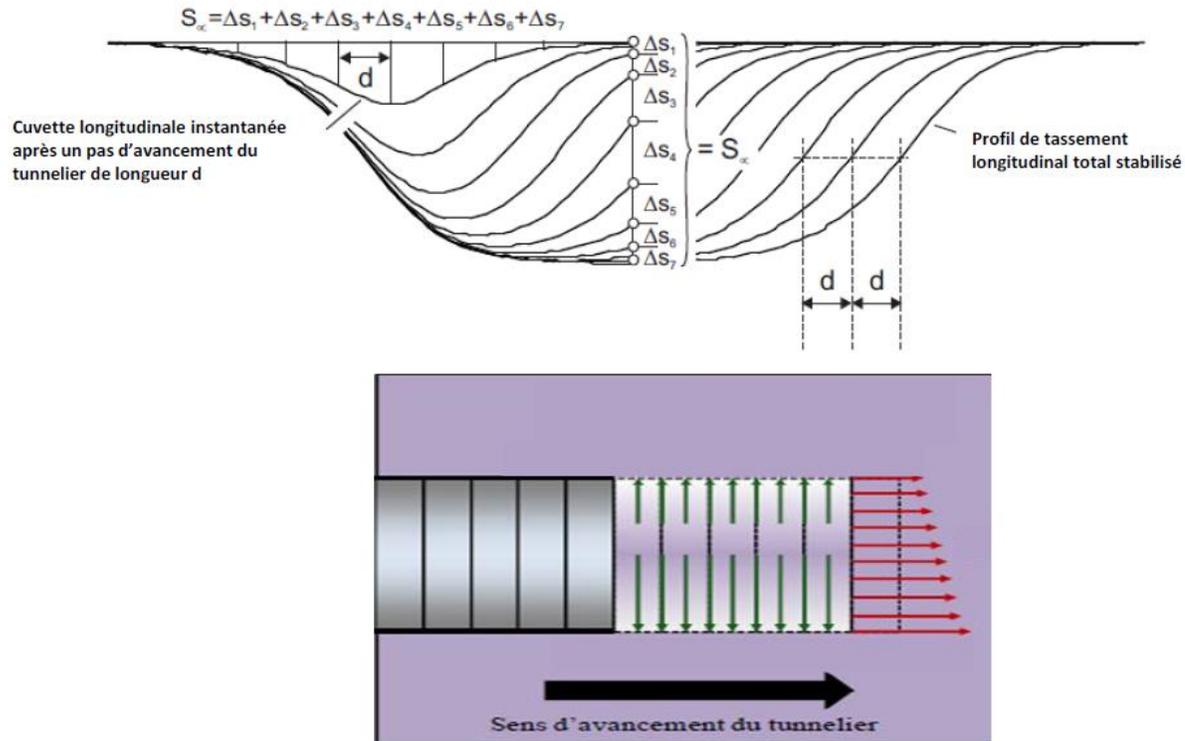


# Simulation du tunnelier



- **Pression au front (chambre pleine):** 130 kPa en clé – 220 kPa en radier
- **Pression mécanique sur la roue de coupe (éventuelle):** 91 kPa
- **Effet confinement mécanique radial de la roue de coupe:** 1 m avec plaque indéformable
- **Contre pression d'eau autour de la jupe:** 51 kPa en clé (gradient = 10 kPa/m)
- **Poids tunnelier :** 120 kPa en radier (angle de 60°)
- **Pression mortier (phase liquide) :** 175 kPa en clé (gradient = 23 kPa/m)
- **Mortier solide (vide annulaire complètement rempli):**  
 $E = 5 \text{ GPa}$ ,  $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$
- **Voussoir:**  $E = 30 \text{ GPa}$ ,  $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$

# Principe de la méthode 3D « simplifiée » (One-step)



## Hypothèses :

- le creusement est une **succession d'opérations identiques**, où les paramètres de creusement restent constants;
- l'étude peut être menée uniquement en **champ libre**;



La simulation 3D peut être simplifiée en ne modélisant qu'un **pas de creusement**.

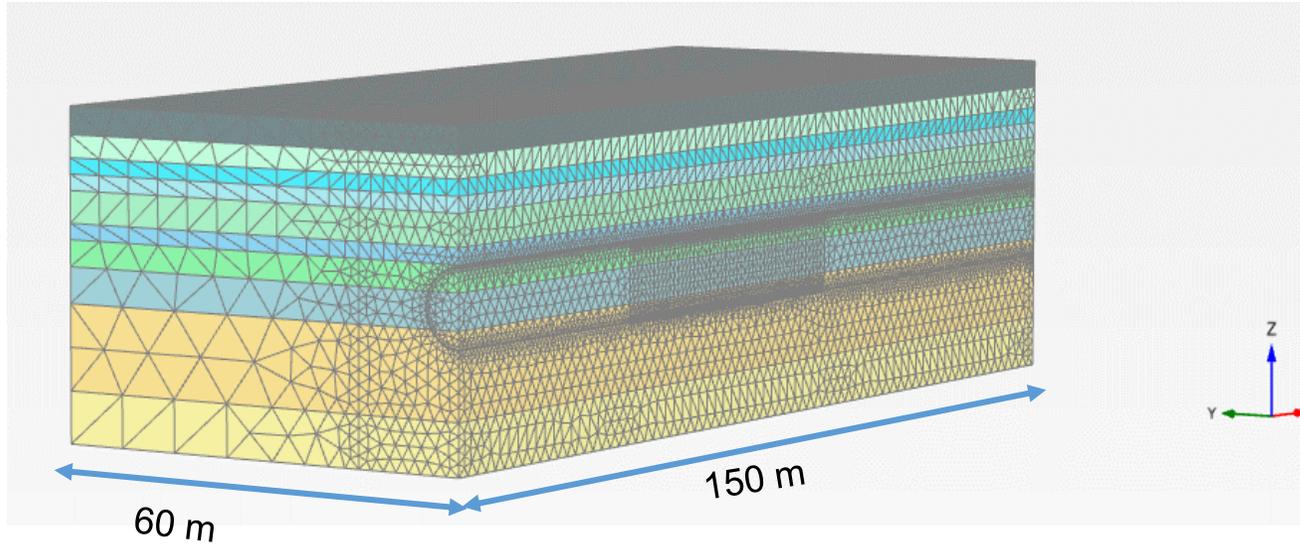


À partir des déplacements d'une seule phase, on peut ainsi déduire **l'évolution complète des déplacements** et leur valeur finale.

## Avantages par rapport modélisation 3D complète:

- **Gain de temps de calcul** considérable (environ/5)
- Possibilité de faire rapidement des **calculs paramétriques**

# Principe de la méthode 3D « simplifiée » (One-step)



## Phasage:

- 1) Initialisation des contraintes (procédure  $K_0$ )
- 2) Simulation du creusement sur 70 m pour s'éloigner des effets de bords;
- 3) Simulation d'un pas de creusement de 2 m. Cette phase est répétée jusqu'à atteindre une stationnarité de la cuvette instantanée

## Hypothèses :

- le creusement est une **succession d'opérations identiques**, où les paramètres de creusement restent constants;
- l'étude peut être menée uniquement en **champ libre**;



La simulation 3D peut être simplifiée en ne modélisant qu'un **pas de creusement**.



À partir des déplacements d'une seule phase, on peut ainsi déduire **l'évolution complète des déplacements** et leur valeur finale.

## Avantages par rapport modélisation 3D complète:

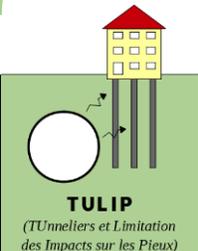
- **Gain de temps de calcul** considérable (environ/5)  
→ Possibilité de faire rapidement des **calculs paramétriques**

# Etudes paramétriques pour la simulation du creusement du tunnel

## Étude paramétrique portant sur:

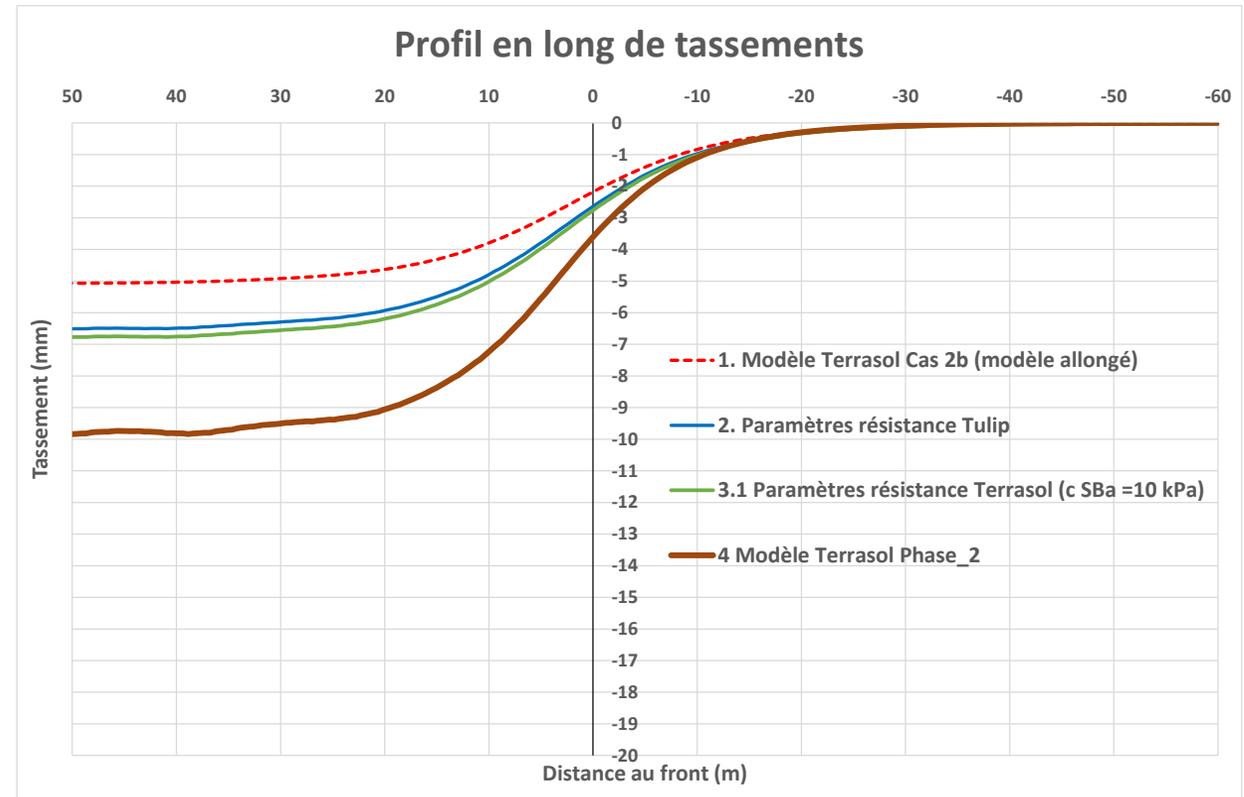
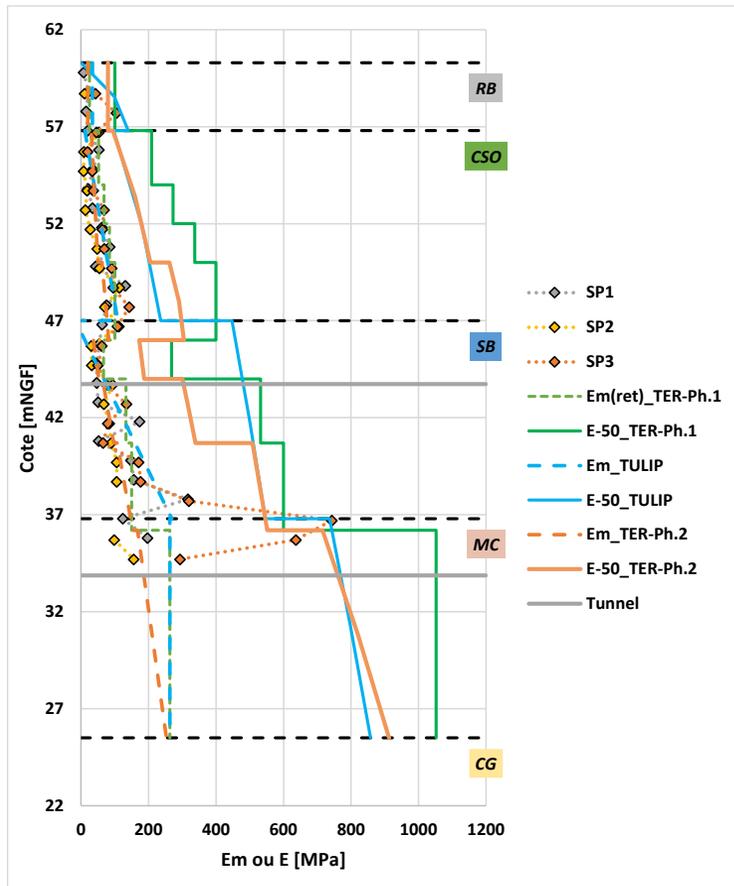
- Les hypothèses de modélisation du tunnelier;
- Les hypothèses géotechniques et le modèle de comportement;

	Facteur étudié	Impact
<b>Modélisation TBM</b>	Pression au front: pression dans la chambre avec/sans poussée mécanique	Effet significatif sur extrusion Effet limité sur les tassements
	Confinement mécanique radial de la roue de coupe	Effet sur tassements et rapport $S_{\text{front}} / S_{\text{max}}$
	Temps de prise du mortier (6h, 12h, 24h...)	Effet négligeable sur les tassements
<b>Simulation comportement massif</b>	Paramètres de résistance du massif	Influence limitée, faible niveau de déformations et plasticité limitée
	Paramètres de déformabilité du massif	Influence significative sur les tassements
	Influence du paramètre « m » de HSM	Influence faible si couche discrétisée
	Modèle de comportement (HSM vs HSS)	Influence significative sur les tassements, faible réduction de la largeur de la cuvette

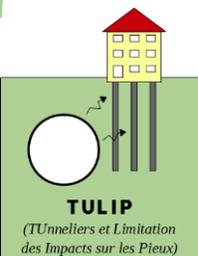


# Prévision (Phase 1) vs rétro-analyse (Phase 2)

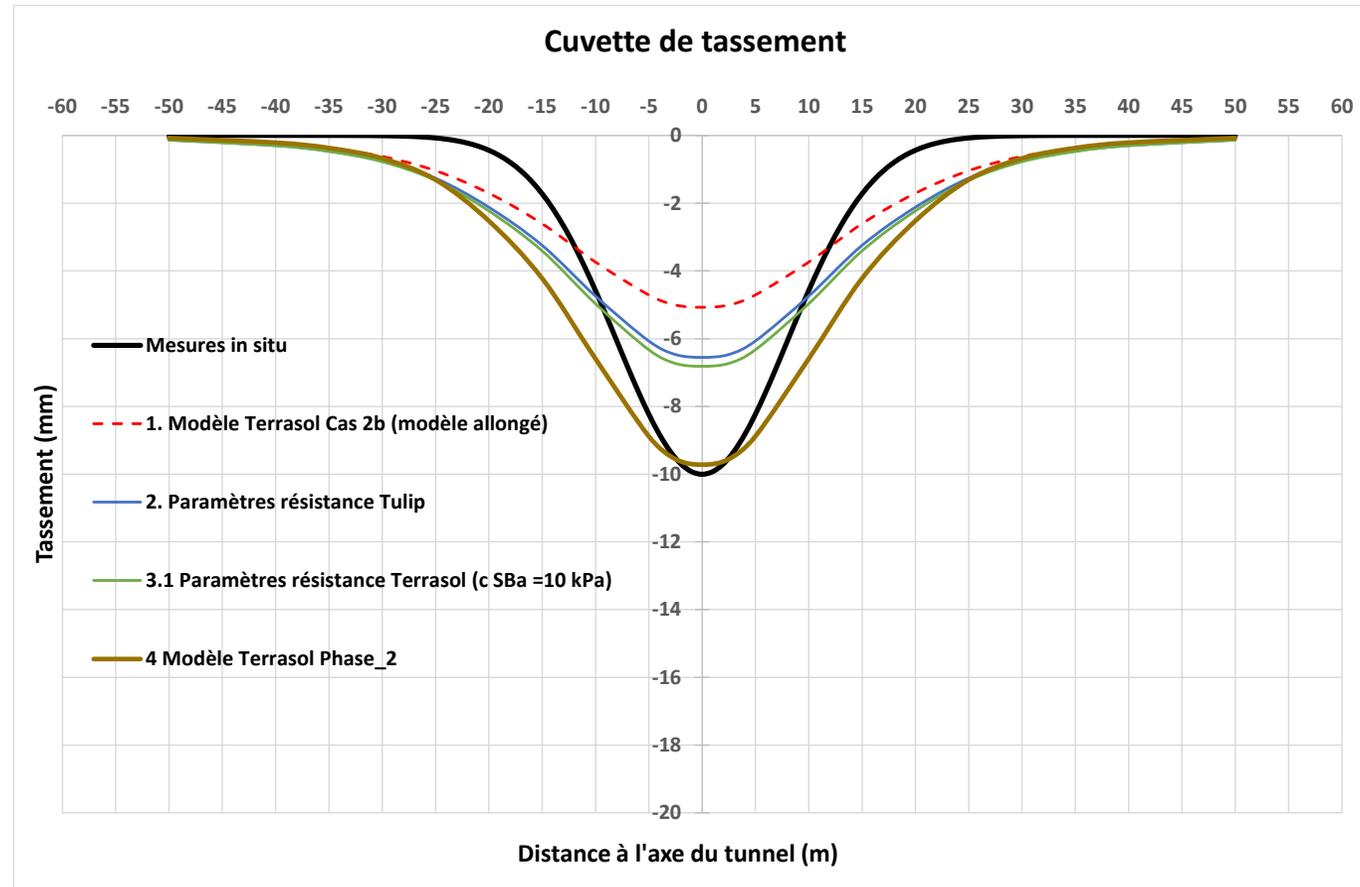
Rétro-analyse (Phase 2): réévaluation des paramètres de résistance et de déformabilité



- Influence importante des modules de déformation
- Amorce du tassement à 20 m à l'avant du front,  $S_{\text{front}} / S_{\text{max}} = 35\%$  environ
- Stabilisation du tassement à plus de trois diamètres du front



# Prévision (Phase 1) vs rétro-analyse (Phase 2)

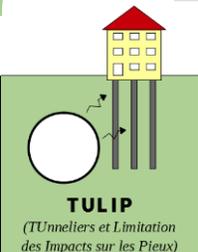
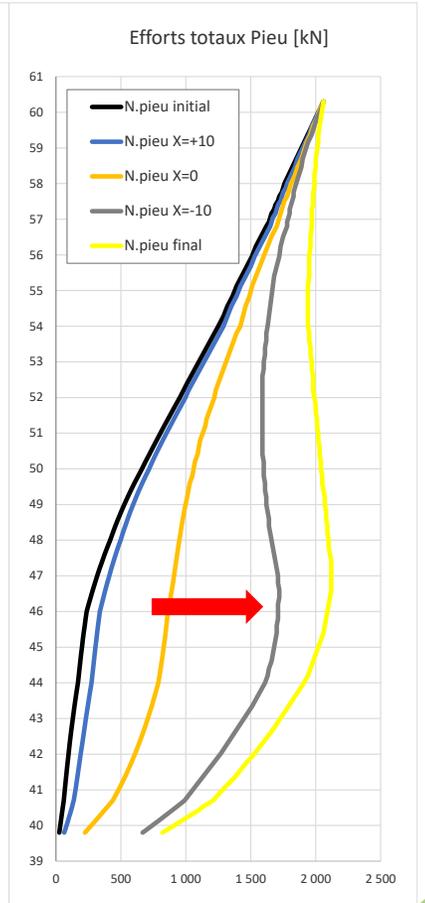
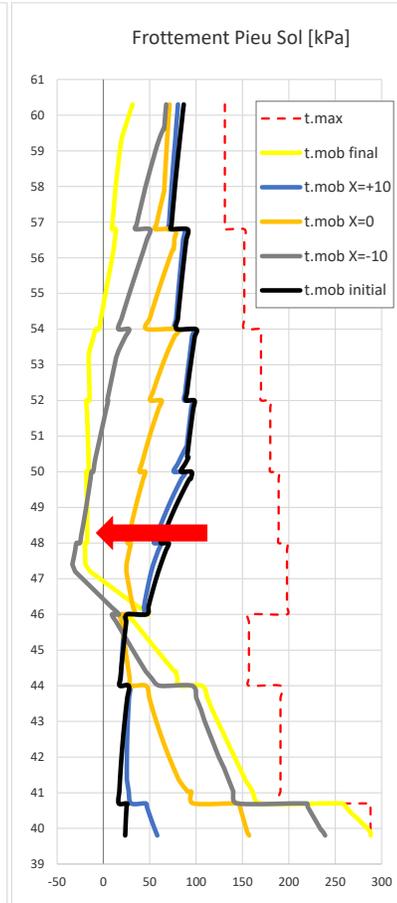
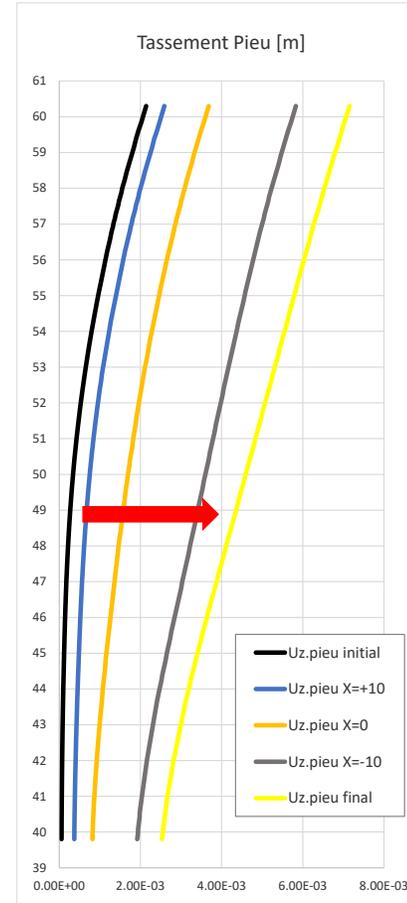
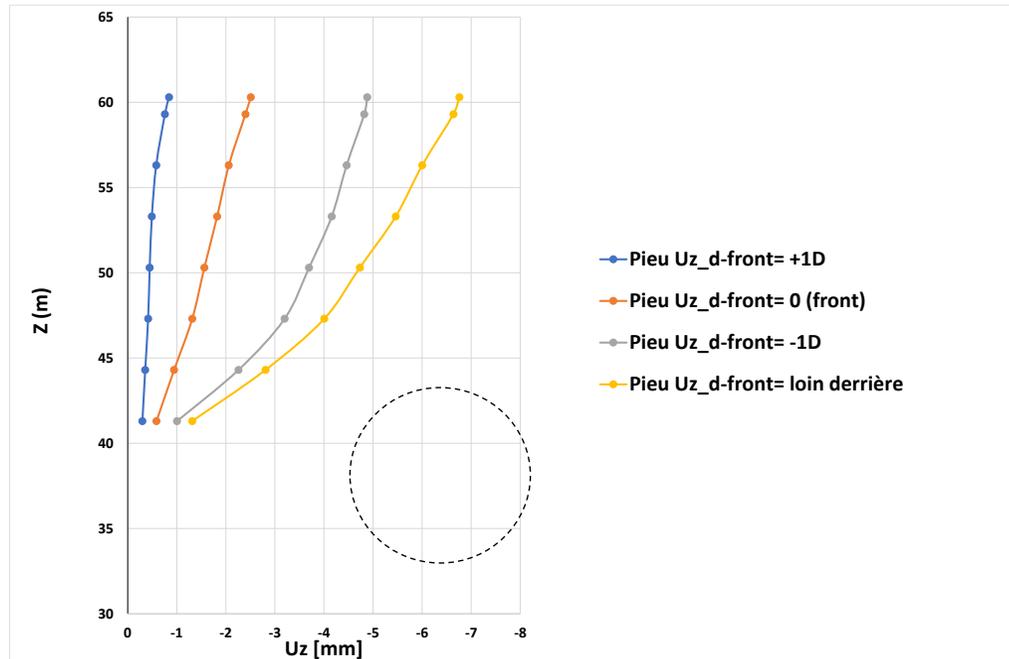


→ Tassement maximal mesuré recalé, mais largeur de la cuvette surestimée

# Evaluation des déplacements et des efforts dans le pieu

## Principes :

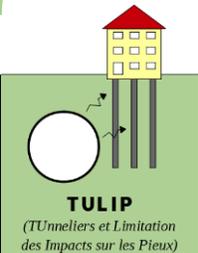
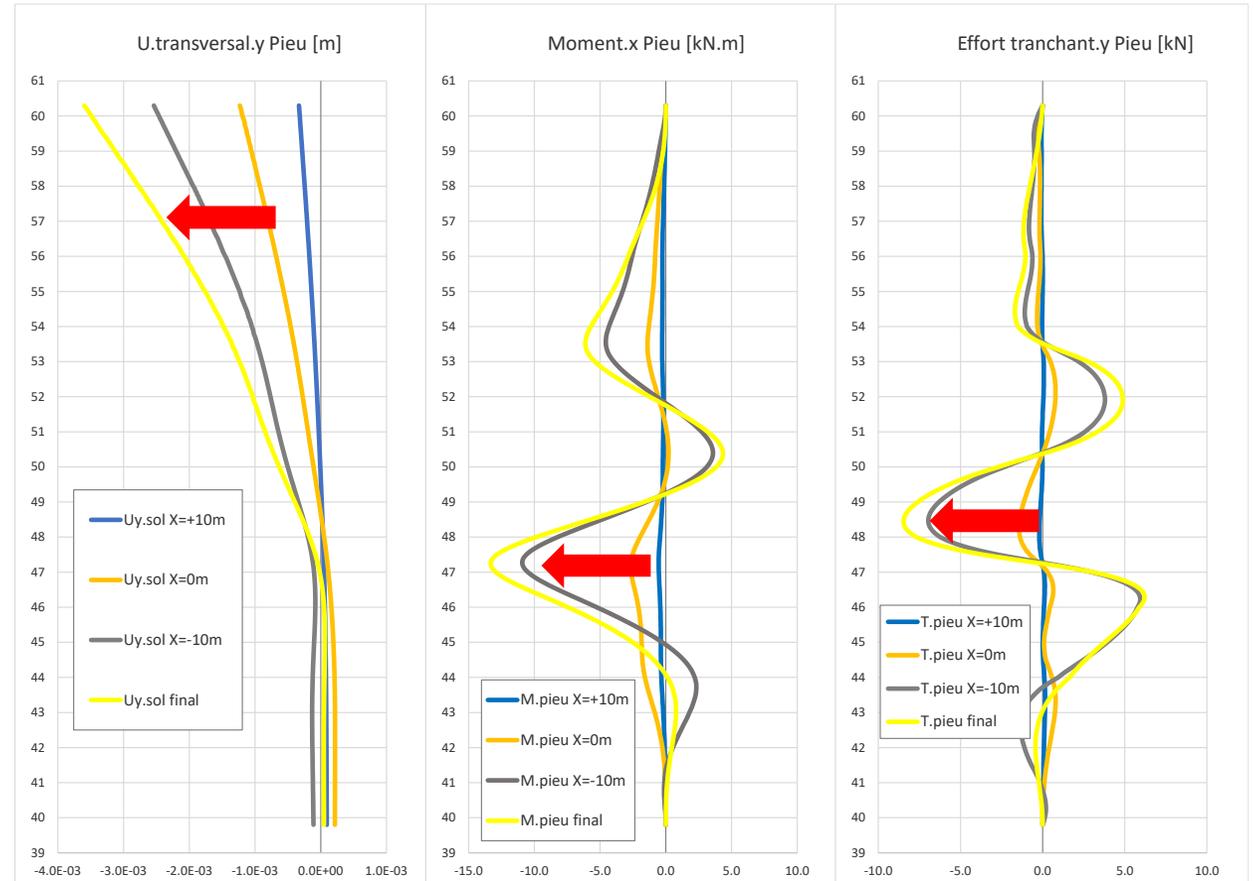
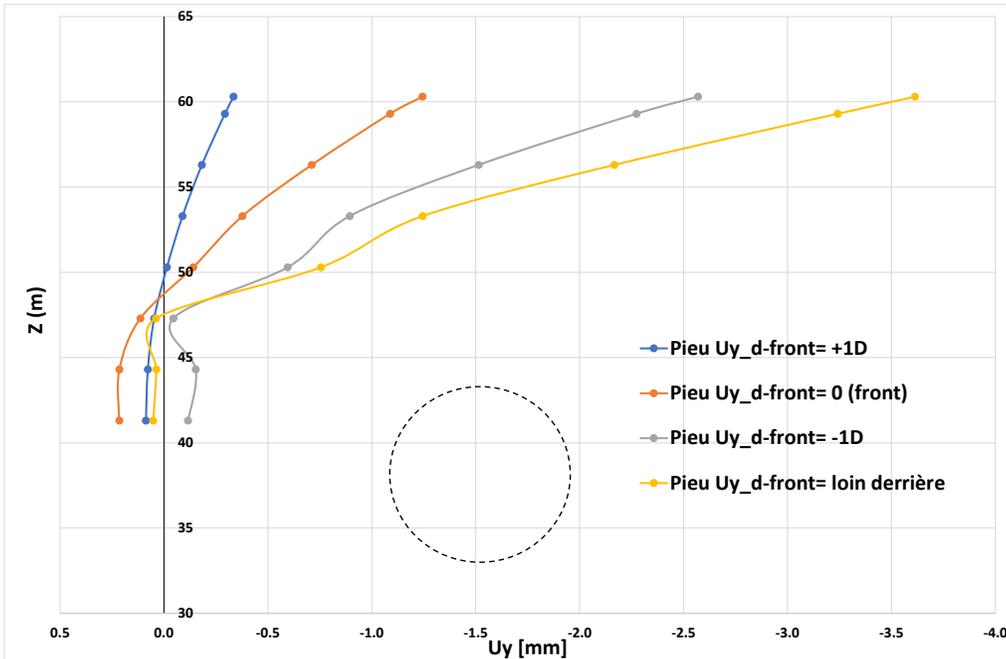
1. Modèle 3D → déplacements dans le pieu en X, Y et Z pour différentes profondeurs et distances au front
2. Déplacements introduits (comme déplacement libre du sol) dans les modèles « t-z » et « p-y » (logiciel FOXTA)



# Evaluation des déplacements et des efforts dans le pieu

## Principes :

1. Modèle 3D → déplacements dans le pieu en X, Y et Z pour différentes profondeurs et distances au front
2. Déplacements introduits (comme déplacement libre du sol) dans les modèles « t-z » et « p-y » (logiciel FOXTA)

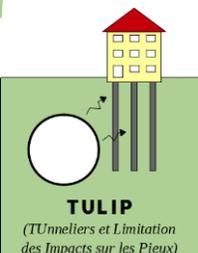


# Conclusions

## Simulation du tunnelier et réponse du terrain

Étude paramétrique permise par la **rapidité des one-step** a mis en évidence:

- La **pertinence des principes de simulation** du creusement du tunnelier retenus avec:
  - ✓ pression de confinement au front égale à celle de la chambre;
  - ✓ prise en compte de la roue de coupe assurant un confinement mécanique « radial » sur sa largeur;
  - ✓ contre pression d'eau autour de la jupe;
  - ✓ introduction du poids du tunnelier;
  - ✓ simulation de la pression de mortier sur un anneau;
- L'influence prépondérante **des modules** par rapport aux paramètres de résistance.
  - ***Gamme de déformation en jeu (0,1% en moyenne dans le massif) nécessiterait des moyens d'investigation exceptionnels pour atteindre des précisions d'ordre millimétrique dans la prédiction.***
- Des cuvettes, dans tous les cas traités, **plus larges que celles mesurées** à amplitude égale.



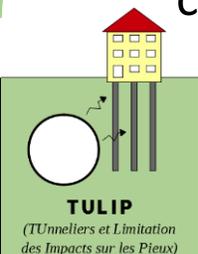
# Conclusions

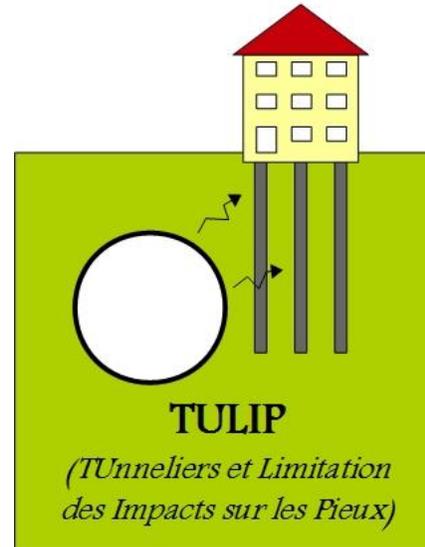
## Pour le comportement du pieu

- Le cas traité correspond à un **pieu souple** qui suit parfaitement la déformée libre du sol. Le tassement et la flèche horizontale en tête sont celles du terrain en champ libre. Le constat aurait été différent en présence d'un pieu plus raide, plus chargé (vis-à-vis de la capacité portante) et fixé en tête ;
- Validité des sollicitations déterminées directement liée à celle des déplacements du terrain utilisés en donnée d'entrée !
- Pieu situé au delà du point d'inflexion de la cuvette expérimentale, zone où le modèle 3D surestime le tassement → sollicitations additionnelles calculées **vraisemblablement excédantes**.

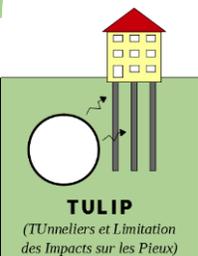
## Perspectives

- **Lois de comportement** : meilleure simulation du comportement du terrain (en très petite déformation permettant de réduire les largeurs de cuvettes, comportement anisotrope, écrouissage contractant...);
- Introduction de **coefficients minorateurs** sur les déplacements imposés basés sur le rapport entre cuvette numérique et Gaussienne de Peck.

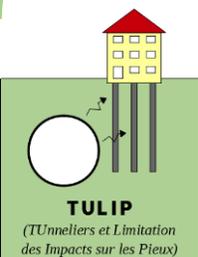




**Merci de votre  
attention**



# Annexes



# Comportement drainé/non drainé

*Suggestion de Vermeer et Meier excavations profondes 1998*

$T < 0.10$  ( $U < 10\%$ ) → analyse non drainée

$T > 0.40$  ( $U > 70\%$ ) → analyse drainée

$$T = \frac{kE_{oed}}{\gamma_w D^2} t$$

$k$  = perméabilité

$E_{oed}$  = module œdométrique

$\gamma_w$  = poids volumique de l'eau

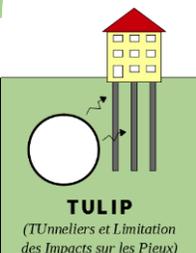
$D$  = distance de drainage

$t$  = durée de construction

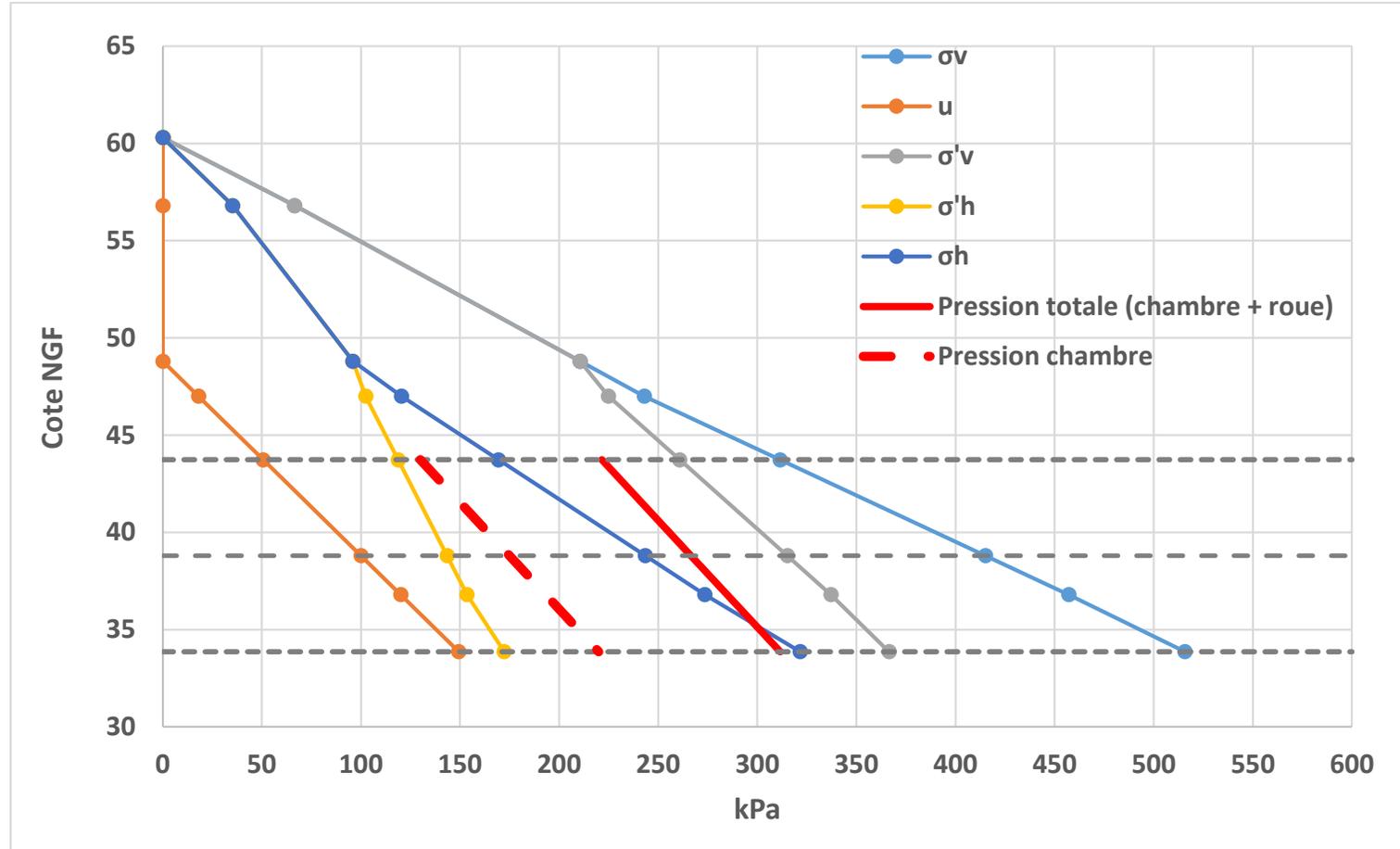
$T$  = facteur de temps sans dimension

$U$  = degré de consolidation

	Borne inférieure	Borne supérieure
<b>K (m/s)</b>	1.00E-06	1.00E-05
<b>EOedo (KPa)</b>	18000	180000
<b>D (m)</b>	7.5	7.5
<b>t (s)</b>	17280	86400
<b>Gamma (kN/m3)</b>	10	10
<b>T</b>	0.55	276



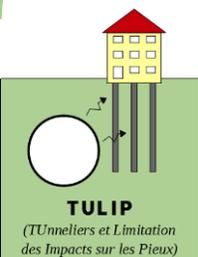
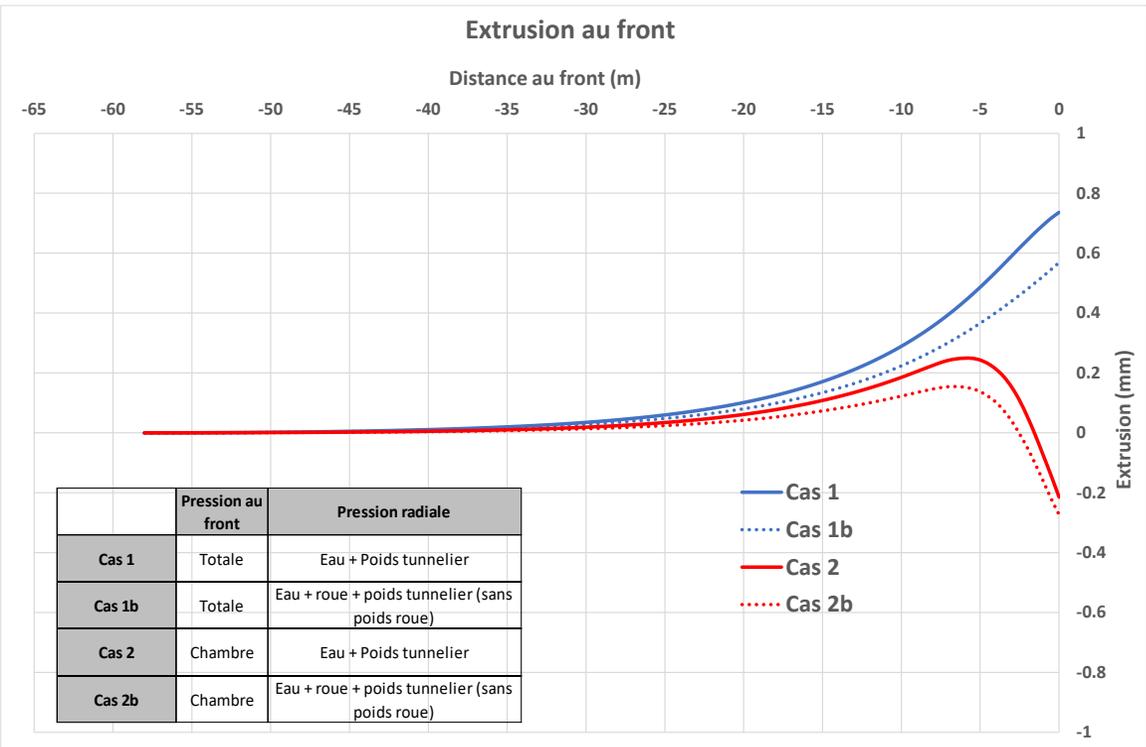
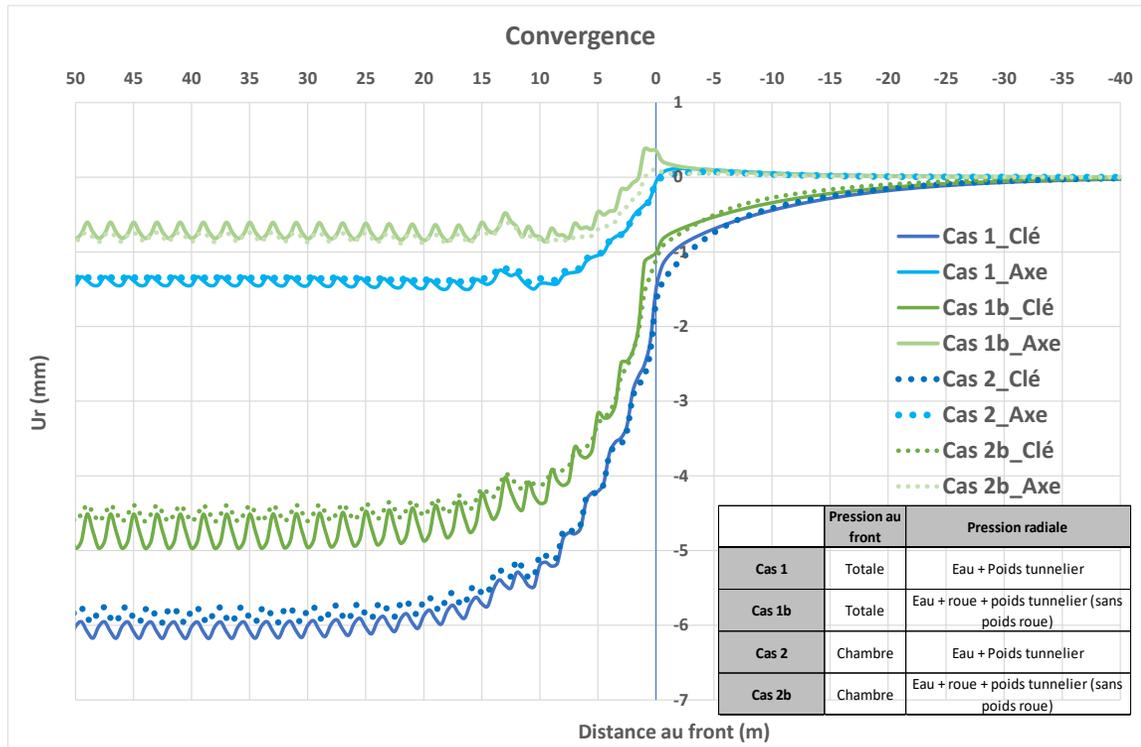
## Contraintes initiales et pression au front



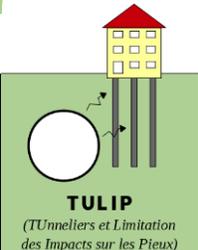
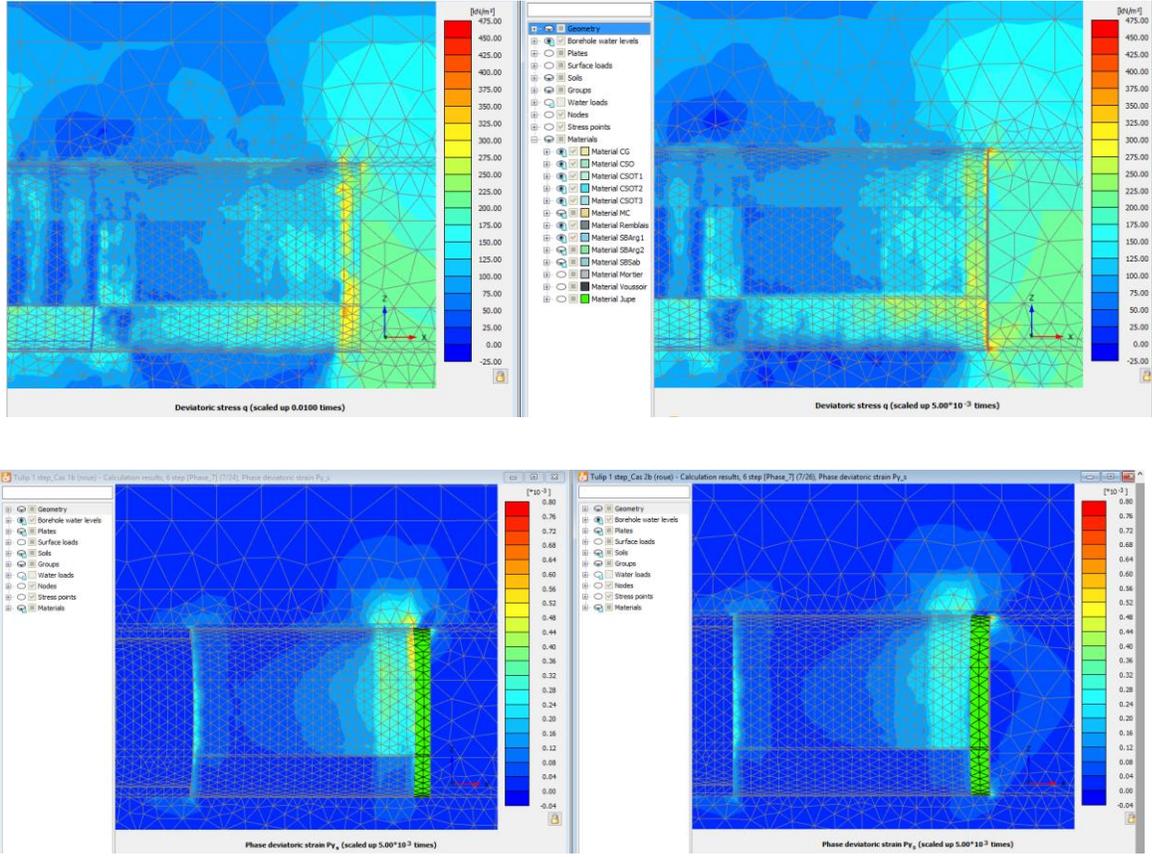
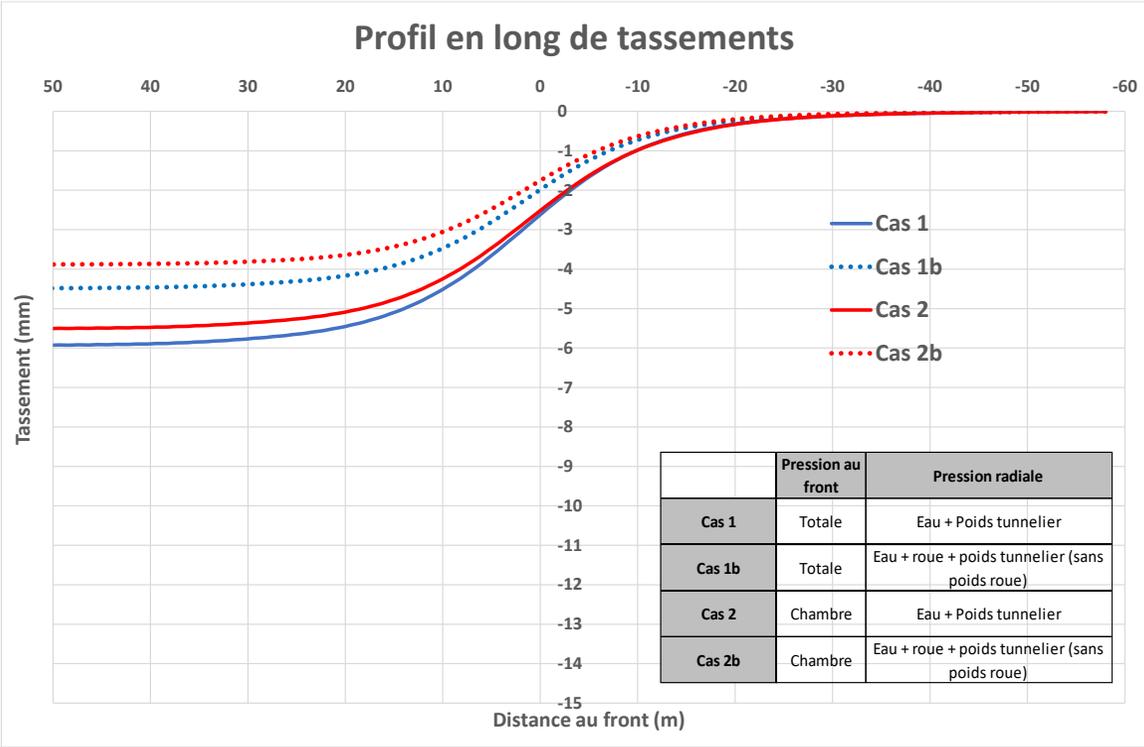
## Etude paramétrique (Phase 1)

	Pression au front	Pression radiale
Cas 1	Totale	Eau + Poids tunnelier
Cas 1b	Totale	Eau + roue + poids tunnelier (sans poids roue)
Cas 2	Chambre	Eau + Poids tunnelier
Cas 2b	Chambre	Eau + roue + poids tunnelier (sans poids roue)

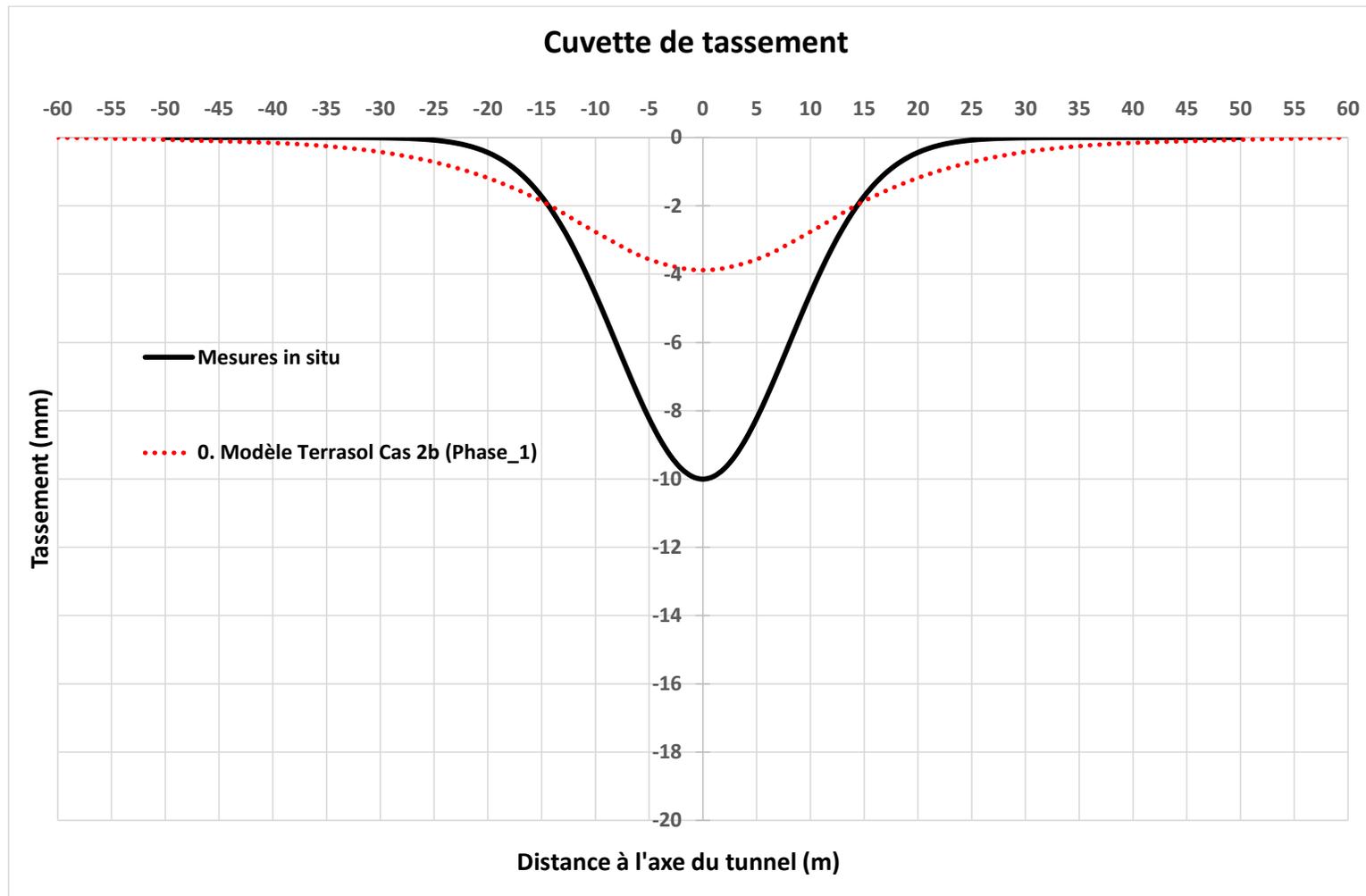
Nom	Pression de confinement							Pression d'eau			Poids tunnelier			Pression de mortier			
	Totale simulée		Chambre		Pression mécanique sur roue			Autour boucliers + jupe			Autour boucliers + jupe			Radiale			
	Clé [kPa]	Gradient [kPa]	Clé [kPa]	Gradient [kPa]	Fefficace [kN]	S [m <sup>2</sup> ]	P [kPa]	Hypothèse	Clé [kPa]	Gradient [kPa]	Angle [°]	z application	q [kPa]	Nb voussoirs application	Diagramme	Clé [kPa]	Gradient [kPa]
Cas 1	221	9.1	130	9.1	7000	76.5	91	Eau remplie vide	50.7	10	120	36.33	110	1	rect.	175	23
Cas 1b*	221	9.1	130	9.1	7000	76.5	91	Eau remplie vide	50.7	10	120	36.33	90	1	rect.	175	23
Cas 2	130	9.1	130	9.1	-	-	-	Eau remplie vide	50.7	10	120	36.33	110	1	rect.	175	23
Cas 2b*	130	9.1	130	9.1	-	-	-	Eau remplie vide	50.7	10	120	36.33	90	1	rect.	175	23



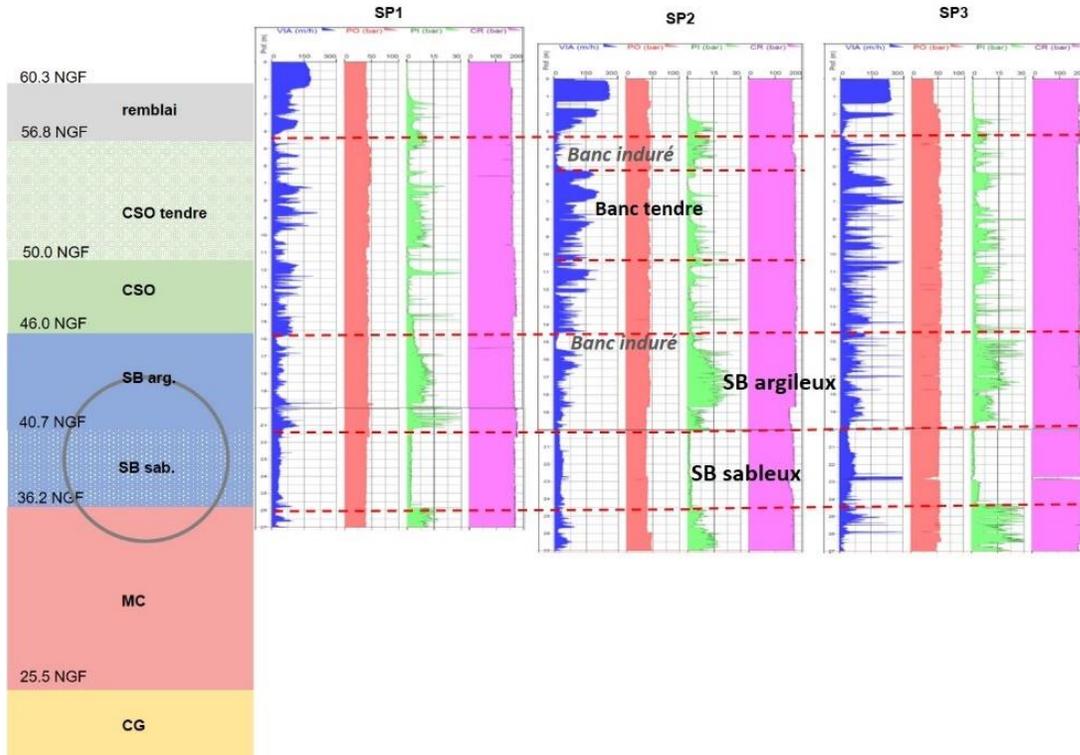
Pression chambre + mécanique (à gauche), Pression chambre uniquement (à droite)



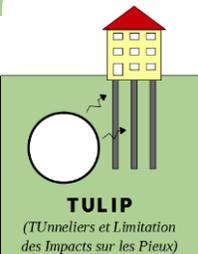
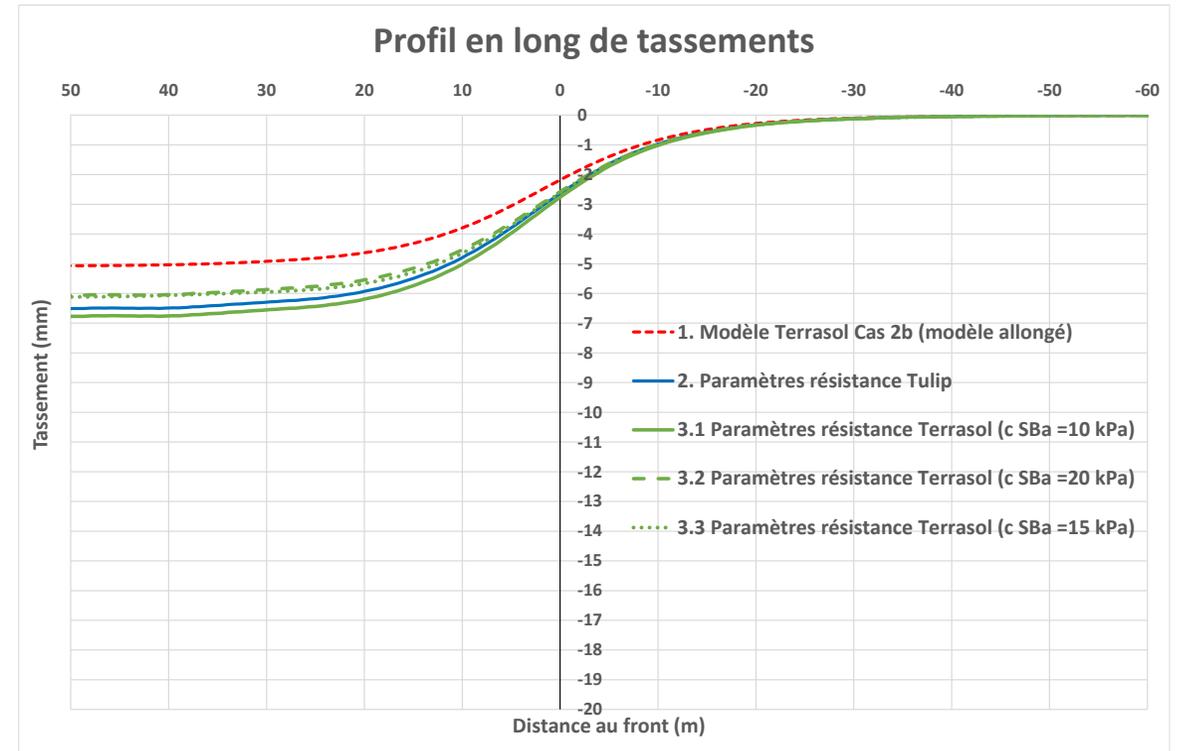
## Prévision phase 1 vs mesure



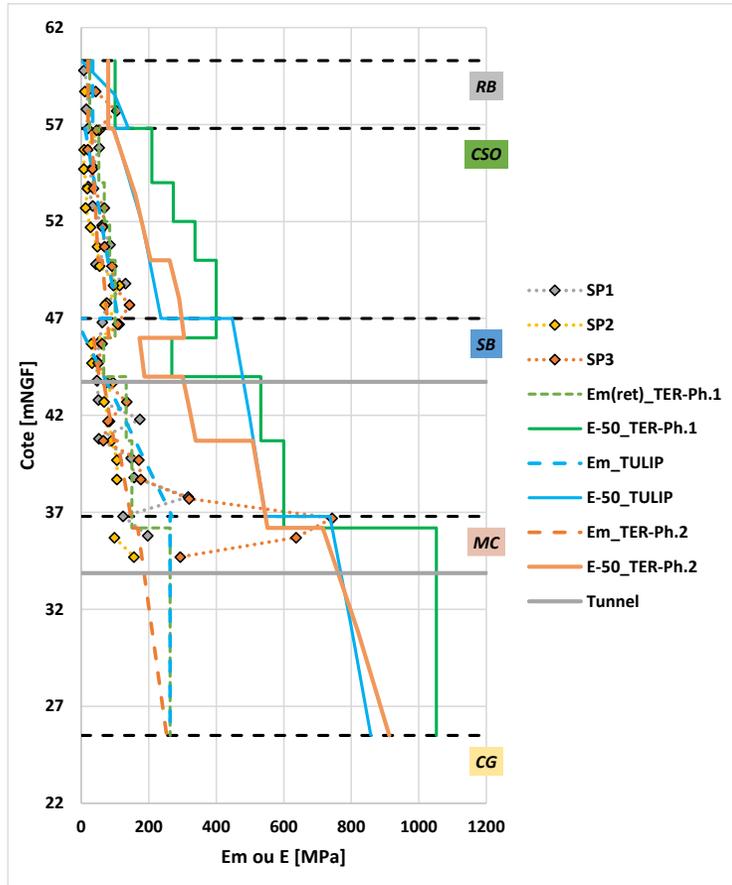
# Effets paramètres de résistance



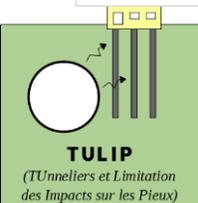
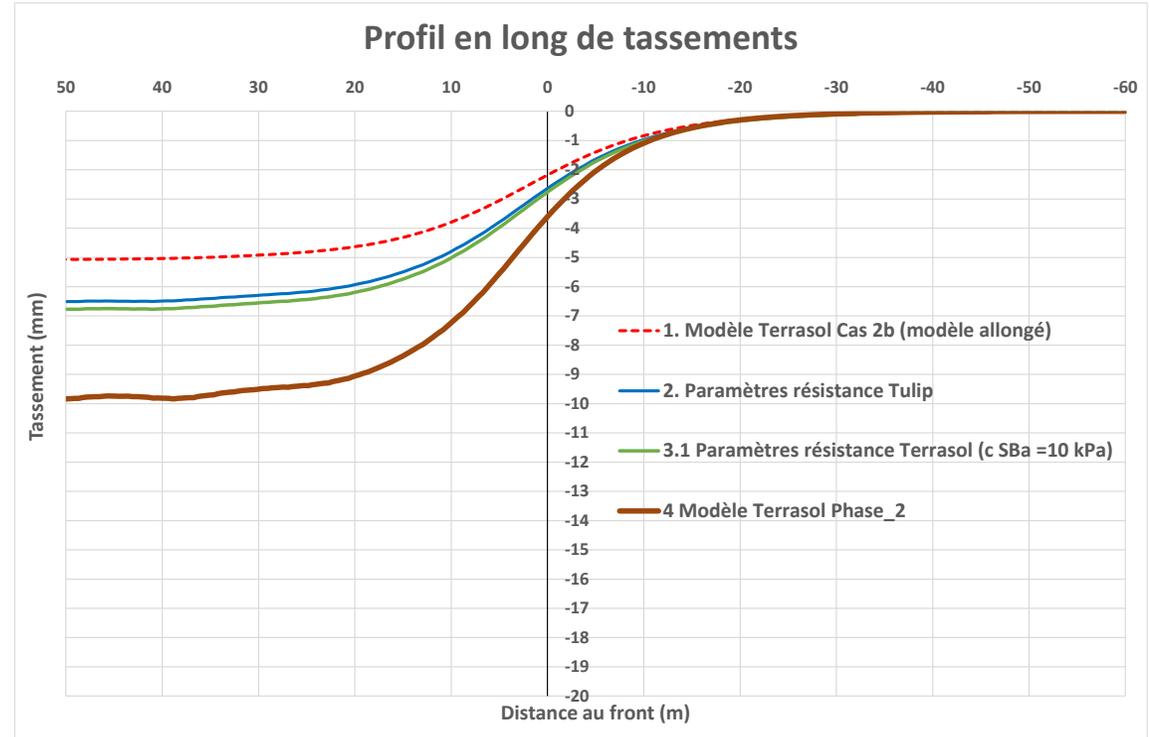
		Cote toit	Yh [kN/m²]	Em [MPa]	Δem [MPa/m]	α [-]	k [-]	Eso <sub>réf</sub> [MPa]	Eu <sub>réf</sub> [MPa]	préf [kPa]	m [-]	c' [kPa]	φ' [°]	ψ [°]	K0 [-]	Rf [-]	
3.1	CAS 2b- Paramètres résistance	RB	60.3	19	25	0	0.5	2	100	300	-	0	0	28	0	0.53	0.95
		CSO t1	56.8	18	52.2	0	0.5	2	209	626	-	0	10	33	3	0.46	0.95
		CSO t2	54	18	68.2	0	0.5	2	273	818	-	0	10	33	3	0.46	0.95
3.2	résistance	CSO t3	52	18	84.2	0	0.5	2	337	1010	-	0	10	33	3	0.46	0.95
		CSO	50	18	100	0	0.5	2	400	1200	-	0	20	35	5	0.43	0.95
3.3	TULIP réévalués	SB ARG 1	46	21	67	0	0.5	2	268	804	-	0	10 / 15 / 20	30	0	0.50	0.95
		SB ARG 2	44	21	133	0	0.5	2	532	1596	-	0	10 / 15 / 20	30	0	0.50	0.95
		SB SAB	40.7	21	150	0	0.5	2	600	1800	-	0	5	35	5	0.43	0.95
		MC	36.2	20	263	0	0.5	2	1052	3156	-	0	50	32	2	0.47	0.95
		CG	25.5	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



# Effets paramètres de déformabilité



4	CAS 2b- Modèle sol TER Ph2 (modules réévalués)	Cote toit	Yh [kN/m <sup>3</sup> ]	Em [MPa]	Δem [MPa/m]	α [-]	k [-]	E50réf [MPa]	Eu <sub>réf</sub> [MPa]	préf [kPa]	m	c' [kPa]	φ' [°]	Ψ [°]	K0 [-]	Rf [-]
		RB	CSO t1	CSO t2	CSO t3	CSO	SB ARG 1	SB ARG 2	SB SAB	MC	CG	E = 2000				
		60.3	19	20	0	0.5	2	80	240	17.6	0	0	28	0	0.53	0.95
		56.8	18	40	3	0.5	2	160	480	58.1	0.5	10	33	3	0.46	0.95
		54	18	40	3	0.5	2	160	480	58.1	0.5	10	33	3	0.46	0.95
		52	18	40	3	0.5	2	160	480	58.1	0.5	10	33	3	0.46	0.95
		50	18	72	5	0.5	2	290	870	92.5	0.5	20	35	5	0.43	0.95
		46	21	45	8	0.5	2	180	540	122	0.8	10	30	0	0.50	0.95
		44	21	80	10	0.5	2	320	960	136.5	0.8	10	30	0	0.50	0.95
		40.7	21	130	10	0.5	2	530	1590	134.7	0.5	5	35	5	0.43	0.95
		36.2	20	210	8	0.5	2	820	2460	185.3	0.5	50	32	2	0.47	0.95
		25.5	21	-	-	-	-	E = 2000						-	-	



# HSS

