

Modélisation physique 1g du creusement de tunnels en terrain meuble par tunnelier à pression de terre

Denis BRANQUE¹, Nicolas Berthoz¹, Henry WONG¹, Didier SUBRIN²

¹ Université de Lyon, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Vaulx-en-Velin, France

² Centre d'Etude des Tunnels, Bron, France



Introduction
Dispositif expérimental

Classification des régimes de
creusement

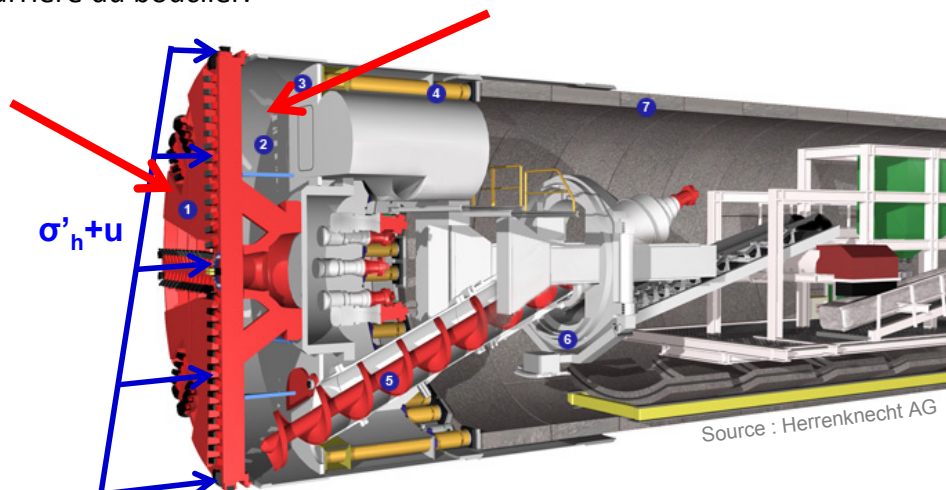
Creusement en régimes idéaux
Creusement en régimes extrêmes

Conclusion

Le creusement au tunnelier à pression de terre

• Principe théorique :

- Le terrain est abattu au moyen d'une roue de coupe en face avant du tunnelier,
- La poussée des terres et les pressions hydrostatiques au niveau du front de taille sont équilibrées par un confinement contrôlé du matériau abattu et contenu à l'arrière du bouclier.



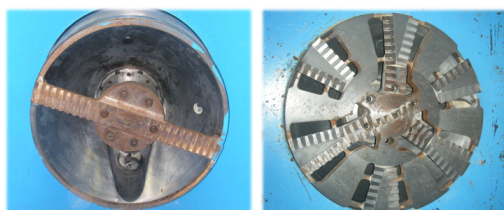
Objectifs des recherches

- **Analyser et comprendre** les mécanismes physiques mis en jeu.
 - Régimes idéaux / régimes extrêmes
 - Comportement d'interaction sol – machine
- **Apporter des réponses concrètes aux questions posées sur chantiers :**
 - Pertinence des paramètres de contrôle du pilotage
 - Aide au dimensionnement de la machine (rôle du bouclier, de la surcoupe,)
- **Contribuer au développement et à la validation d'outils de dimensionnement**
 - Calcul de stabilité du front de taille
 - Modélisation numérique du processus de creusement pressurisé des tunnels.

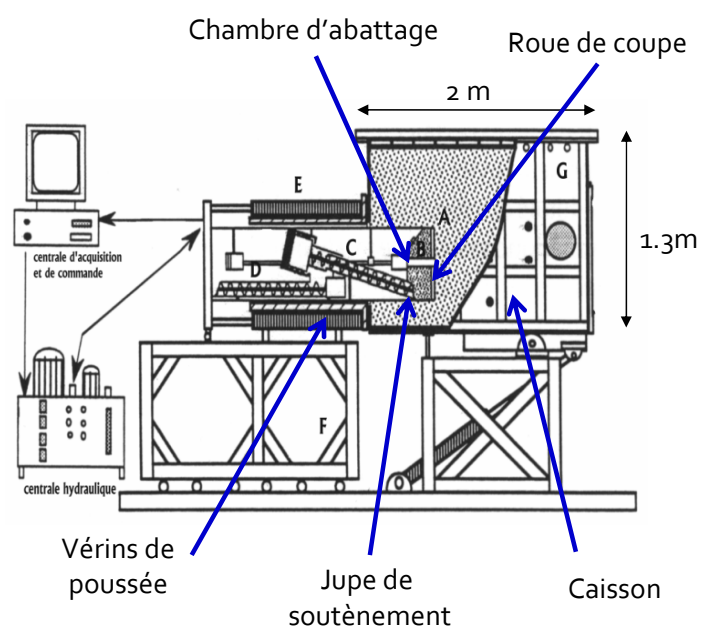
Deux approches complémentaires :

- Expérimentale : Essais sur modèle réduit de laboratoire, Retours de chantiers,
- Théorique : Calcul à la rupture, Méthodes Eléments Finis.

Le modèle réduit de tunnelier à pression de terre



Roues de coupe à fort (80%) et faible (35%)
taux d'ouverture ($D=0.55m$)



Instrumentation du modèle réduit

- Instrumentation embarquée sur la machine :

- Pressions dans chambre d'abattage
- Couple sur roue de coupe
- Couple sur vis d'extraction
- Effort de poussée horizontale
- Débit d'extraction
- Vitesse d'avancement,...

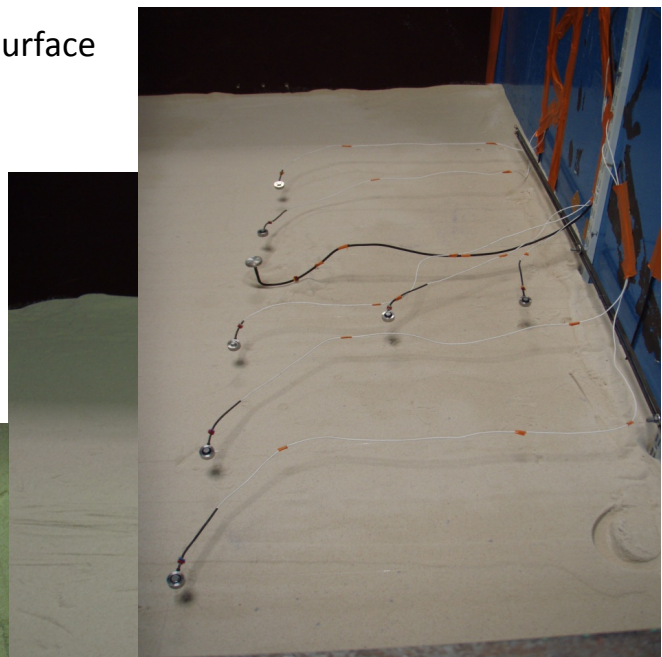


Arbre de coupe

Vis d'extraction

- Instrumentation du massif de sol

- Déplacements verticaux de surface
- Déplacements internes
- Contraintes internes



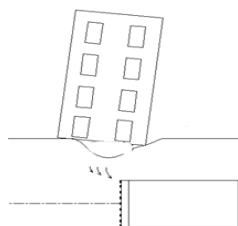
Matériau modèle et caractéristiques des essais

- Un matériau devant respecter les lois de similitude
- Une similitude partielle privilégiant les notions de rigidité (E^*) et de résistance mécanique (c^*, ϕ^*)
- Le choix du sable Hostun S28 sec ou faiblement humide ($w < 3\%$)
- Un matériau mis en place dans un état lâche
- Essais en massifs homogènes ou massifs stratifiés

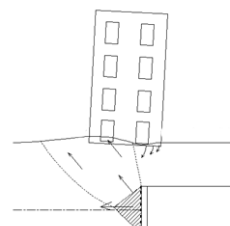
	Nom	γ (kN/m ³)	e	Et (MPa)	C' (kPa)	ϕ' (°)	ψ (°)	q (kPa)
Massifs purement frottants	MF11	13.8	0,90	5	0	39	2	0
	MF12	13.7	0,98	5	0	39	2	0
	MF13	13.7	0,98	5	0	39	2	0
Massifs cohérents - frottants	MC2	13.4	1,03	10	2	36	5	0
	MC3	13.4	1,03	10	2	36	5	0
	MC4	13.4	1,04	10	1.5	36	5	0
	MC5	13.25	0,92	10	0.5	36	5	0
	MC6	13.05	1,02	10	0.5	36	5	50
	MC7	13.05	1,00	10	0.5	36	5	50
	MC8	13.05	1,00	10	0.5	36	5	0

Classification des régimes de creusement

- › **Observations expérimentales:** le comportement en contraintes- déformations du massif dépend de la nature du régime entretenu
- › **Régimes de creusement idéaux :** régimes qui minimisent les déplacements et déformations au sein du massif.
- › **Régimes de creusement extrêmes:** régimes qui génèrent des déformations importantes au sein du massif, voire conduisent à sa rupture s'ils sont maintenus durablement.



Régime de sur extraction
(rupture par effondrement)



Régime de sous extraction
(rupture par refoulement)

Conditions d'obtention du régime idéal

Trois conditions nécessaires à l'obtention des régimes idéaux:

- Etat initial d'équilibre stable entre machine et terrain:

$$p_{\text{front.}}^{\text{équilibre}} = f(\text{géométrie du pb., caractéristiques du terrain, critère de tassements admissibles,...})$$

- Maintien d'une quantité constante de matériau dans la chambre d'abattage

$$R = \frac{\text{débit massique d'extraction}}{\text{débit massique d'excavation}} = \frac{Q_t}{Q_c} = 1$$

- $\omega_{\text{roue}} > \omega_{\text{seuil}}$ avec $\omega_{\text{seuil}} = f(\text{vitesse d'avancement, ...})$

(condition d'absence de mise en butée du massif par perte de l'homogénéité des contraintes au front de taille).

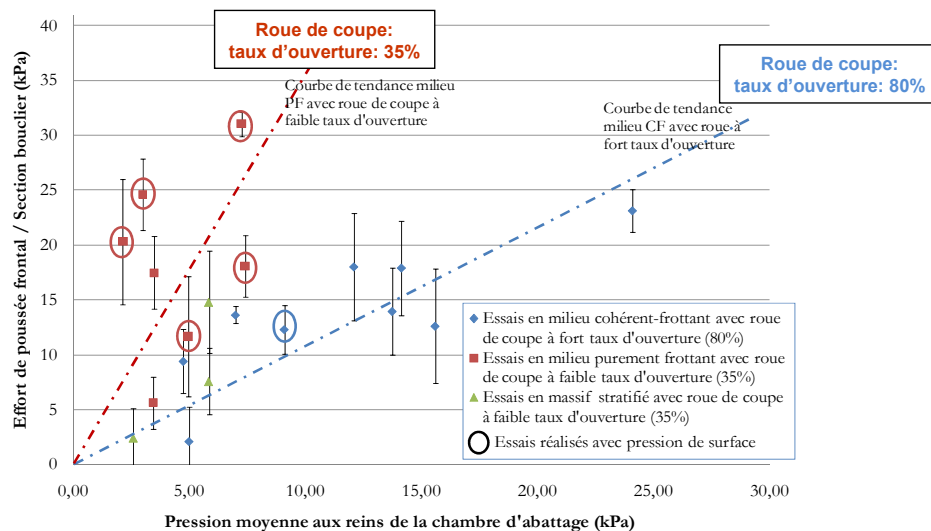
Identification en temps réel du régime entretenu

Deux grandeurs « machine » complémentaires:

- Les pressions mesurées sur les parois de la chambre d'abattage renseignent sur l'état de remplissage et de confinement de la chambre d'abattage (cond.1)

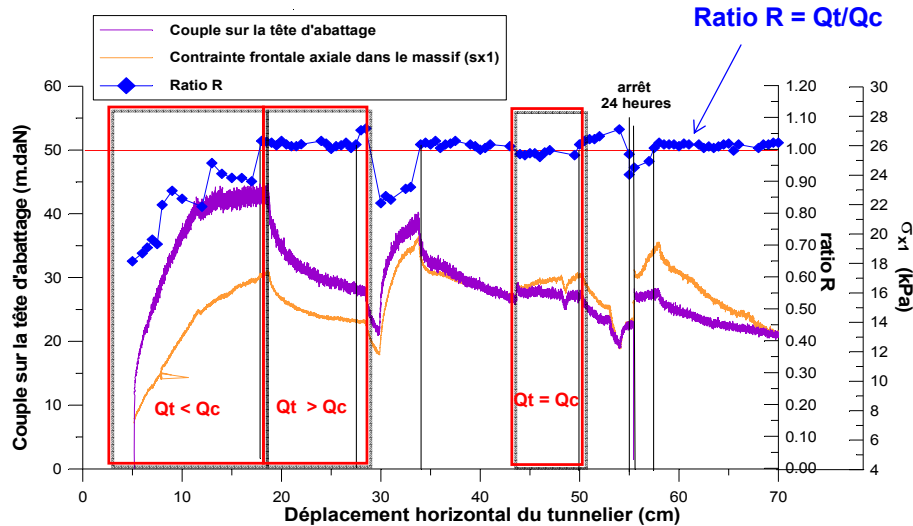


Les pressions dans la chambre d'abattage peuvent différer de la pression appliquée au front de taille (rôle d'écran joué par la roue de coupe)



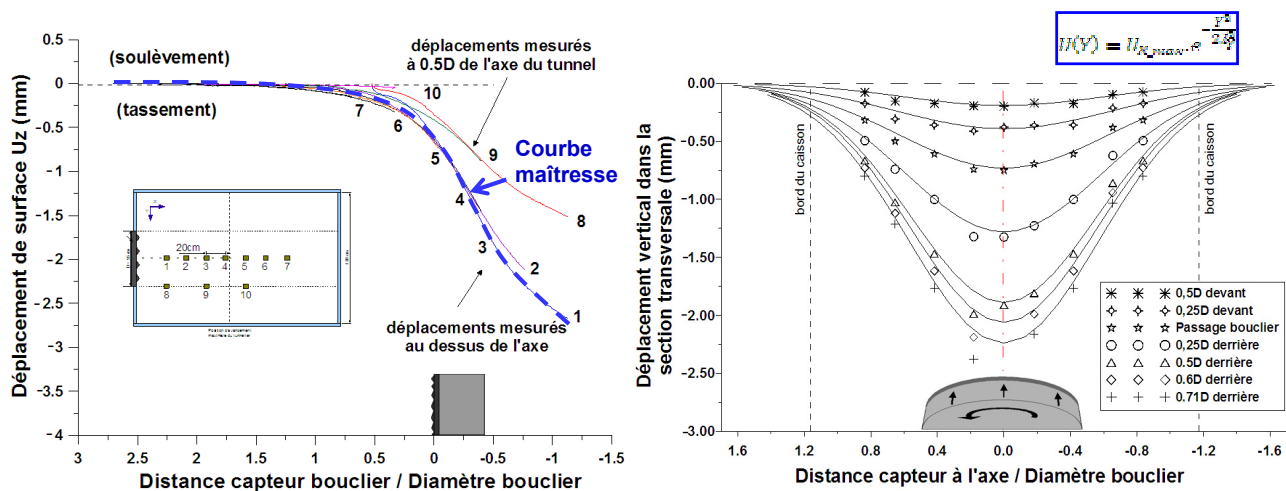
Contrôle en temps réel du régime entretenu

- Les variations relatives du couple sur la roue de coupe renseignent sur la condition d'invariance de la quantité de matière dans la chambre d'abattage (cond. 2)



Exemple de déplacements de surface observés

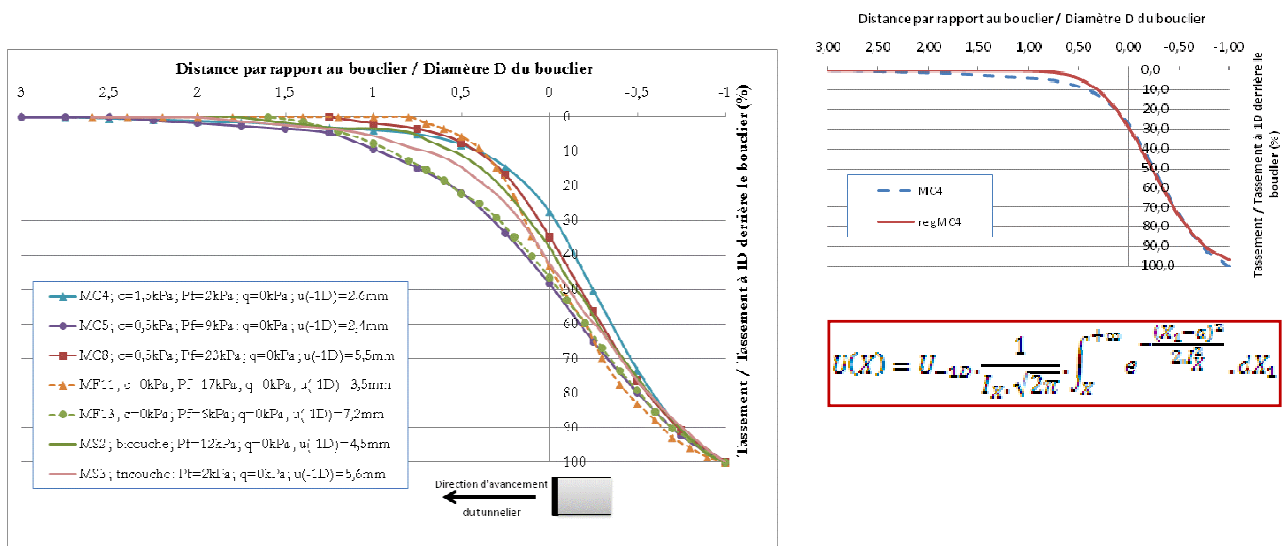
- Une stationnarité des déplacements de surface dans la direction longitudinale.
- Des tassements transversaux de formes gaussiennes conformes à la formulation empirique de Peck (1969)⁴ utilisée dans la pratique.
- Des amplitudes de tassements (de l'ordre du mm) en accord (au facteur d'échelle près) avec les tassements observés in situ (de l'ordre du cm)



⁴Peck R.B. (1969), *Deep excavations and tunneling in soft ground*, Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State of the Art Volume, pp. 225-290.

Synthèse des profils de tassements longitudinaux

- 30 à 50 % des tassements mesurés à 1D à l'arrière du front de taille ont lieu à l'avant du bouclier (⇔ pertes de volume au front)
- Profils de tassements longitudinaux en bon accord avec la formule d'Attewell et al. (1982)¹



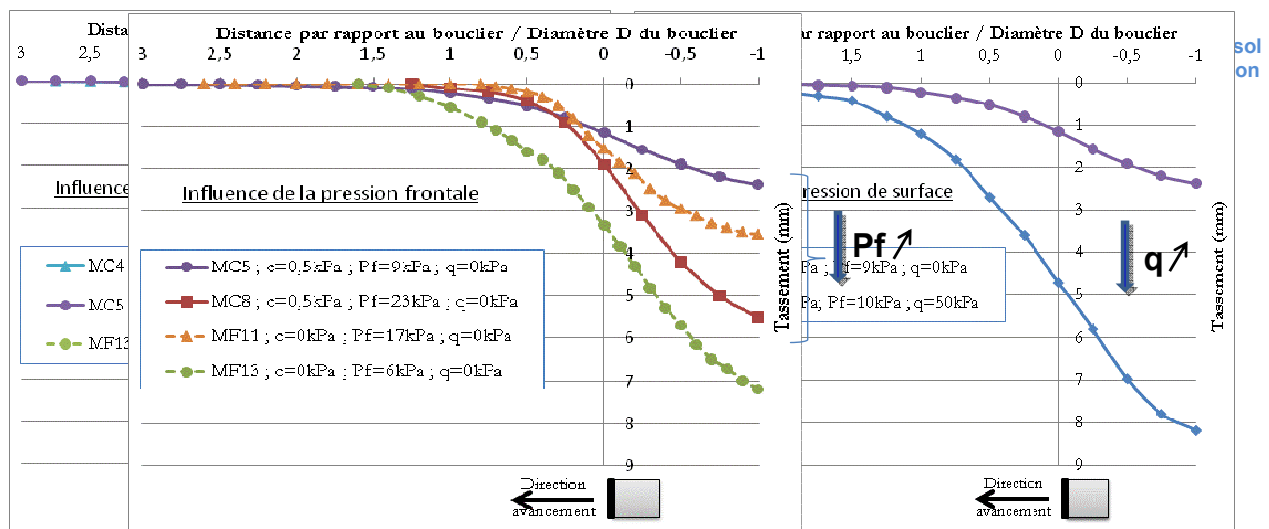
¹Attewell P.B., Woodman J.P. (1982). Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil, Ground Engrg, London, 15(8), 13-22

Synthèse des profils de tassements longitudinaux

- Les tassements à l'avant du front sont d'autant plus faibles que les conditions de stabilité du massif sont bonnes

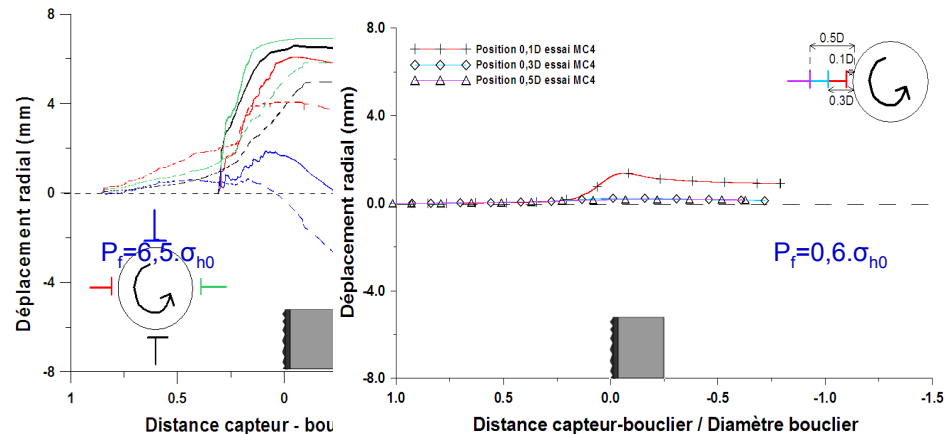


Une pression frontale élevée limite les tassements à l'avant du front mais peut favoriser leur accentuation à l'arrière du front (zones de sol en traction)



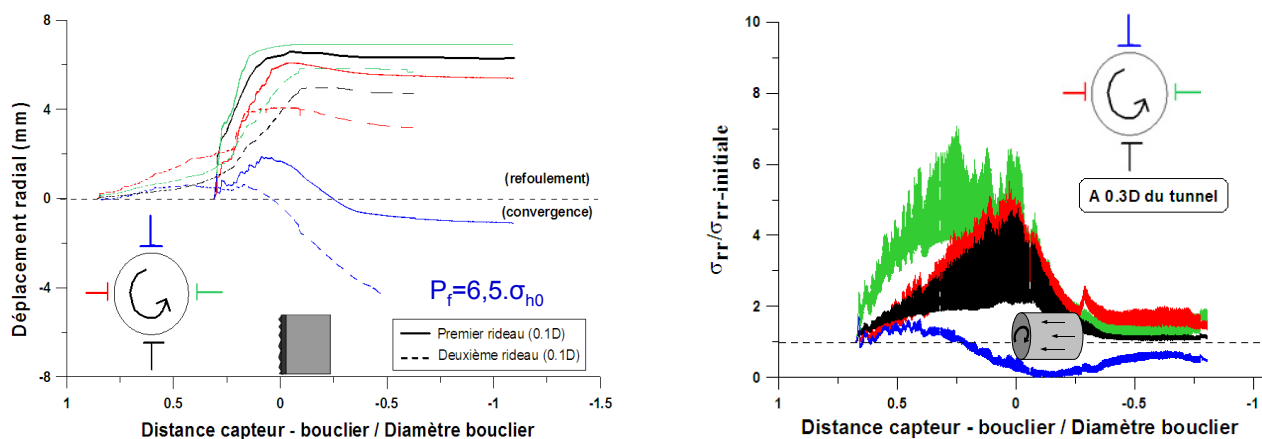
Comportement autour d'une section courante

- Tendance générale observée pour les déplacements radiaux : refoulement à l'avant et convergence à l'arrière du bouclier.
- Une convergence accentuée en clé sous l'action de la gravité
- Mise en évidence de l'influence de la pression frontale
- Correspondance avec le comportement en contraintes.



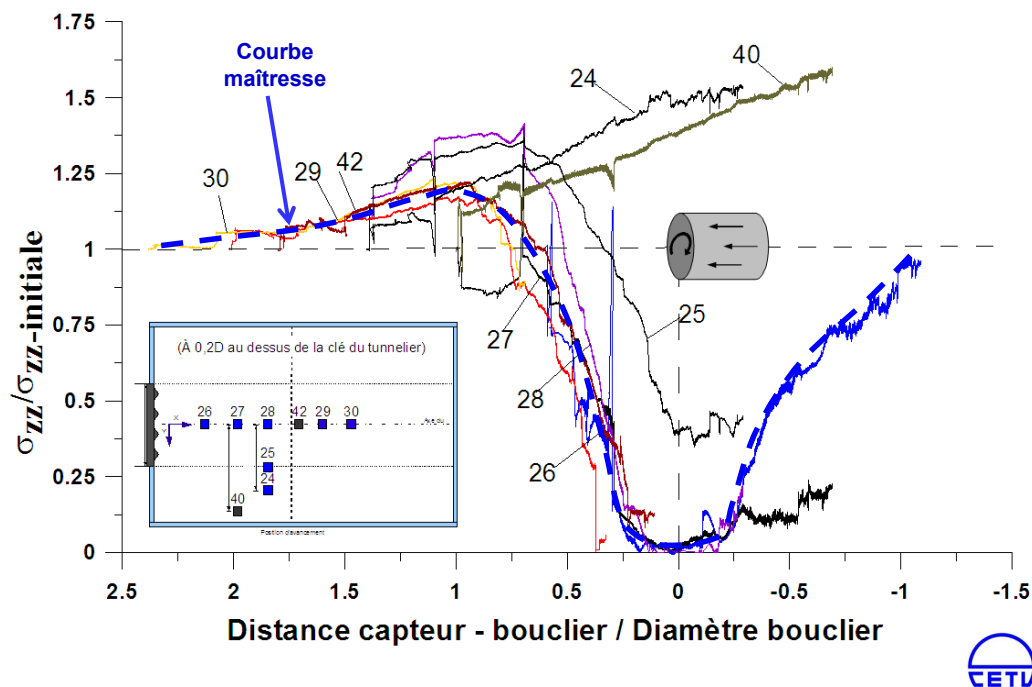
Comportement autour d'une section courante

- Tendance générale observée pour les déplacements radiaux : refoulement à l'avant et convergence à l'arrière du bouclier.
- Une convergence accentuée en clé sous l'action de la gravité
- Mise en évidence de l'influence de la pression frontale
- Correspondance avec le comportement en contraintes.



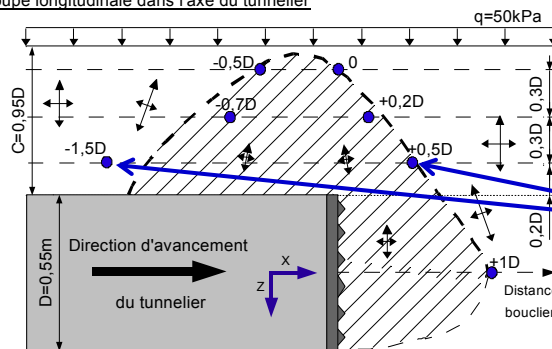
Effets de voûte longitudinaux et transversaux

- Une stationnarité de l'évolution de la contrainte verticale au dessus de la clé du tunnelier.

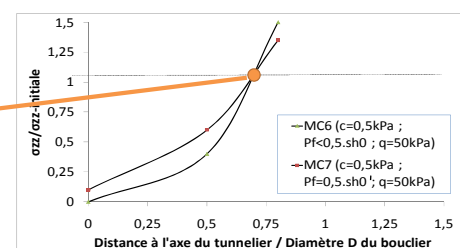
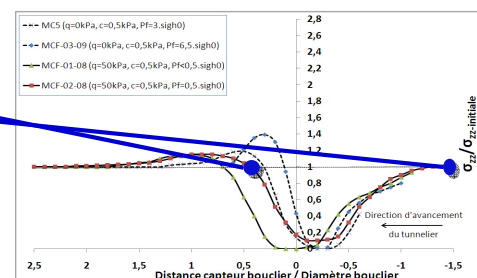
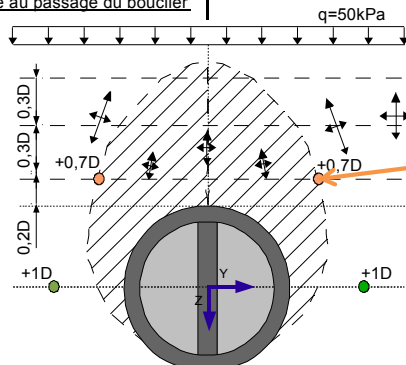


Géométrie de la zone de sol déconfinée verticalement

Coupe longitudinale dans l'axe du tunnelier



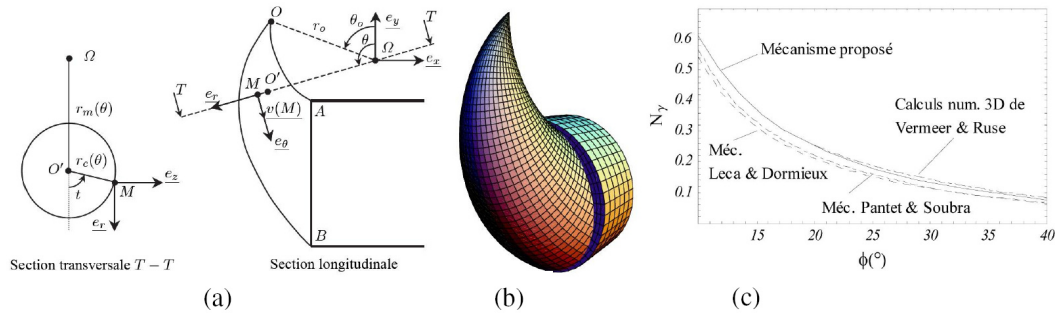
Coupe transversale au passage du bouclier



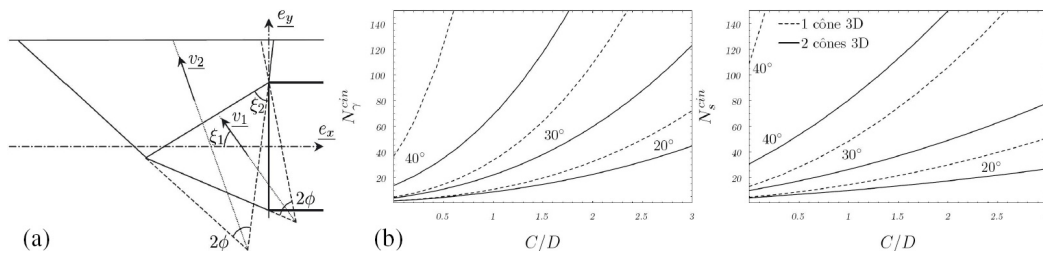
(Essais MCF-01-08 et MCF-02-08)

Confrontation modèles théoriques 3D (Subrin et al)⁴ / Expériences

- Rupture par effondrement du front de taille



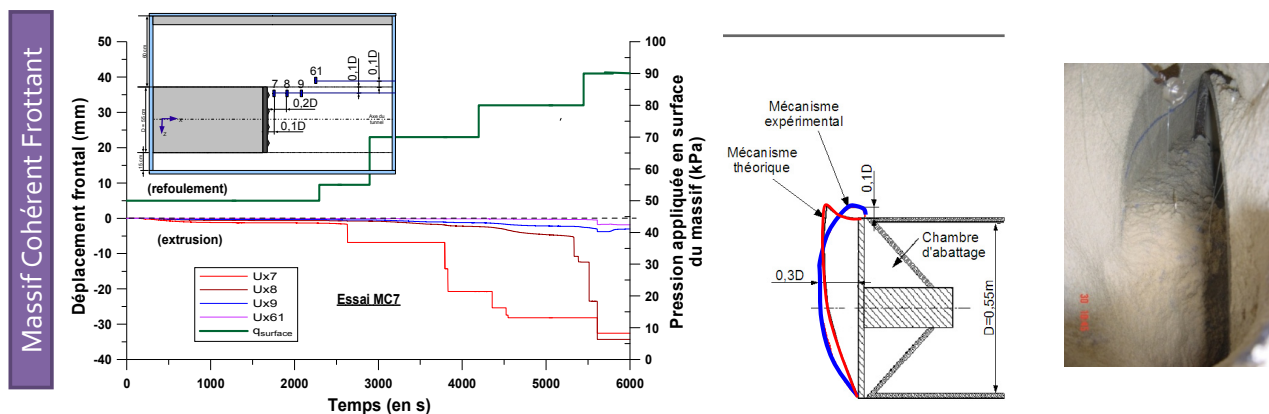
- Rupture par refoulement du front de taille



⁴ Subrin D. (2002), *Etudes théoriques sur la stabilité et le comportement des tunnels renforcés par boulonnage*, thèse de doctorat de l'ENTPE/INSA Lyon.

Mécanismes de rupture par effondrement du front de taille

- Rupture par bloc en massif cohérent frottant ($c=0.5\text{kPa}$)
- Bonne correspondance entre cinématiques de rupture expérimentale et théorique

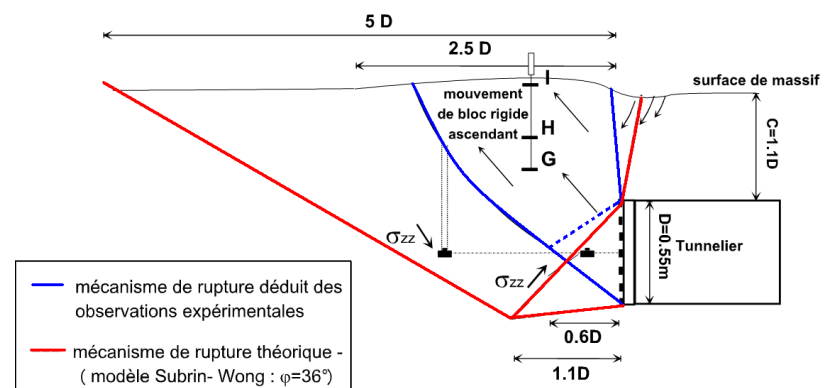
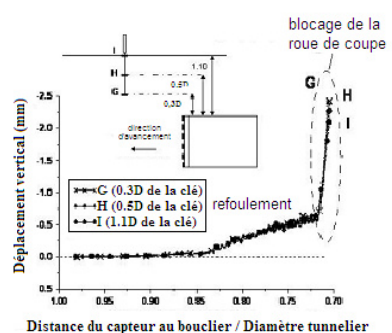
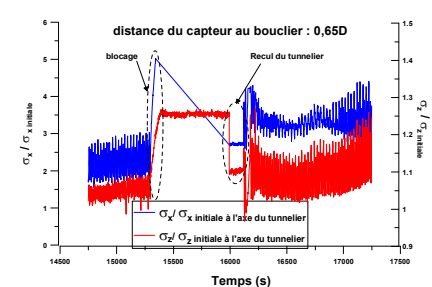
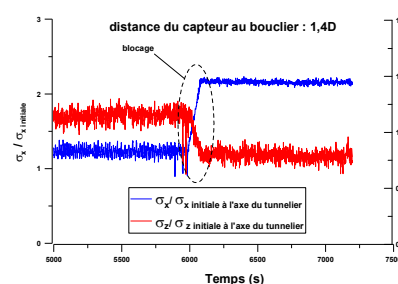
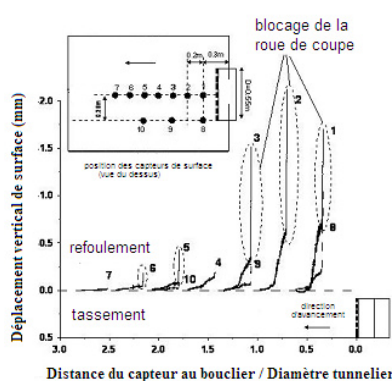


Pressions frontales limites

- Pressions limites de rupture: bonne correspondance entre les approches théoriques et expérimentales :
 - Massifs de cohésion $c \geq 1.5\text{kPa}$: Front de taille stable à chambre d'abattage vide et lors de l'application d'une pression de surface.
 - Massifs de cohésion $c' = 0.5\text{kPa}$: Front de taille en limite de stabilité.

Essai	c (kPa)	q_{ini} (kPa)	Observations expérimentales			Stabilité théorique	
			Front stable à chambre vide ?	q_{max} (kPa)	Front stable pour q_{max} ?	σ_{Tcin} (kPa)	Front théoriquement stable à chambre vide ?
MC2	2,5	0	OUI	0	OUI	-2,7	OUI
MC3	2,5	0	OUI	50	OUI	-2,7	OUI
MC4	1,5	0	OUI	50	OUI	-1,4	OUI
MC5	0,5	0	OUI	45	NON	0	Limite stabilité
MC7	0,5	50	OUI	85	NON	0	Limite stabilité
MC8	0,5	0	NON	--	--	0	Limite Stabilité

Mécanisme de rupture par refoulement du front de taille



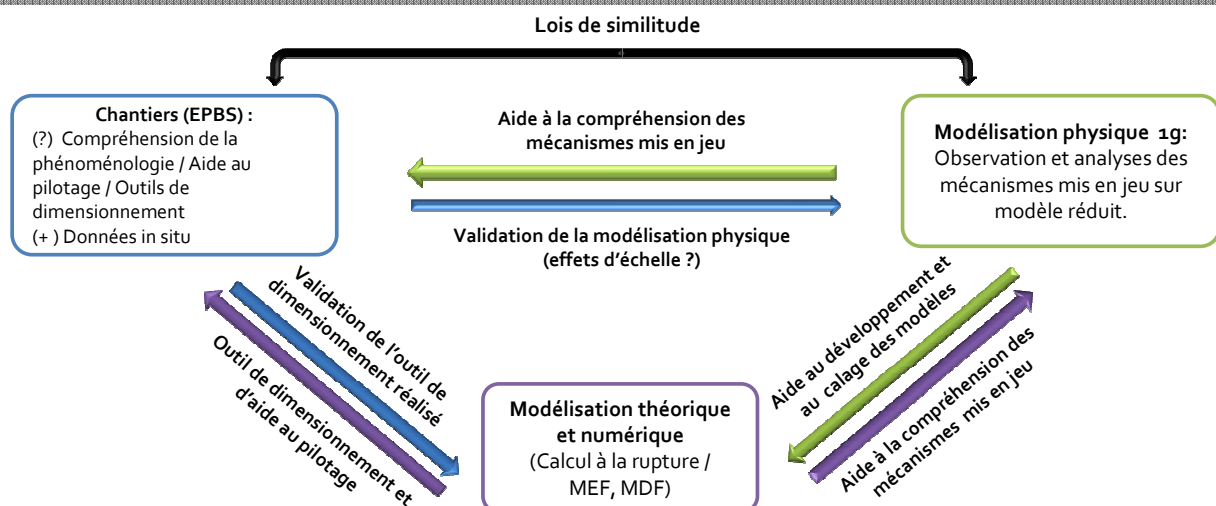
Pressions frontales limites

- Pressions limites (et volumes de sols mobilisés) inférieurs expérimentalement que théoriquement

Rupture considérée	c (kPa)	q (kPa)	σ_{T}^{exp} (kPa)	σ_{T}^{cin} (kPa)
MC1-B1	2,5	0	34	612
MC1-B2	2,5	0	10	612
MC3-B2	2,5	0	21	612
MC5-B1	0,5	0	47	515
MC5-B3	0,5	0	21	515
MC6-B2	0,5	50	70	3854
MC7-B2	0,5	50	76	3854
MC7-B3	0,5	50	43	3854

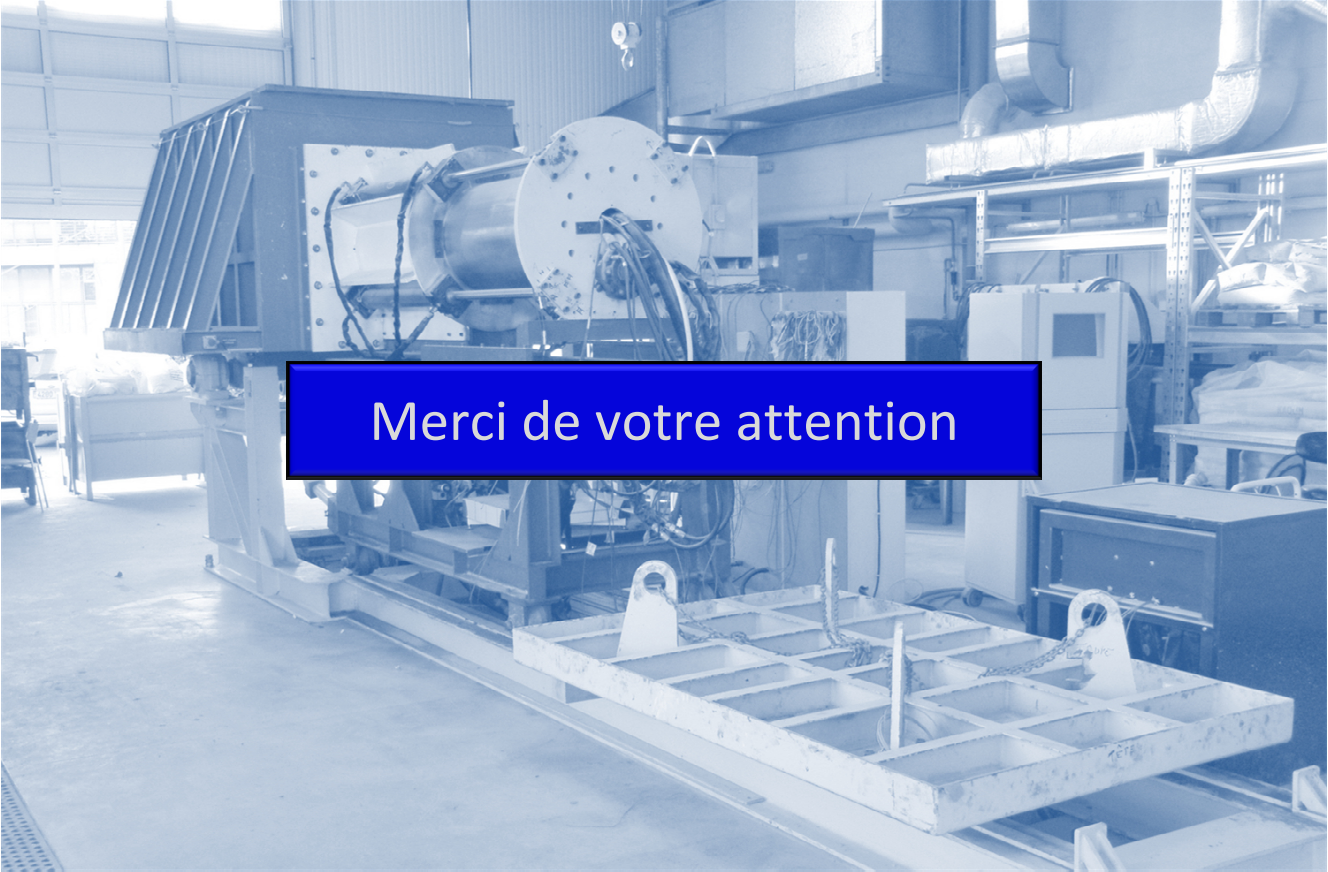
- Critère retenu pour la pression frontale limite expérimentale : apparition du premier mouvement de refoulement en surface.
- Faible pertinence du modèle théorique: de grands déplacements sont nécessaires pour mobiliser la totalité des conditions cinématiques (irréaliste du point de vue pratique)

Conclusion



Pertinence des essais sur modèle réduit 1g

- Bonne compréhension de la phénoménologie
- Réponses concrètes à des problèmes de la pratique
- Base de données consistante pour la modélisation théorique du problème



Merci de votre attention