

Modélisation physique et théorique du creusement pressurisé des tunnels en terrains meubles homogènes et stratifiés

Soutenance de Thèse de Doctorat

Nicolas BERTHOZ

Université de Lyon

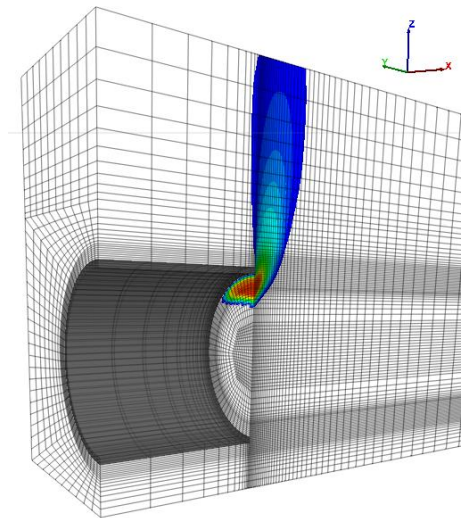
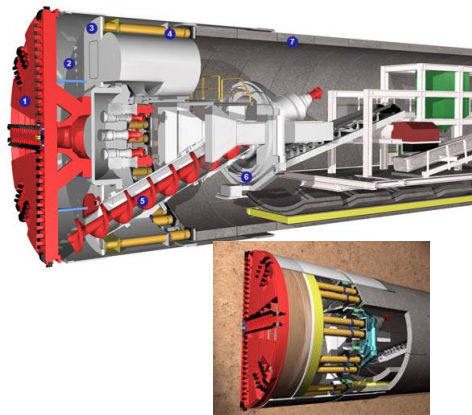
ENTPE-DGCB/FRE CNRS 3237

Directeurs de thèse :

Denis BRANQUE, Henry WONG

Partenaires :

Didier SUBRIN, Emmanuel HUMBERT



Quelques éléments de contexte

- Une extension des zones urbaines
 - Un besoin de mobilité croissant des biens et des personnes
 - Une volonté de « développement durable »
- ➔ Un intérêt croissant pour l'espace souterrain : gain de place, diminution des nuisances, traversée des zones de topographie difficile
- ➔ Une complexification des ouvrages à réaliser

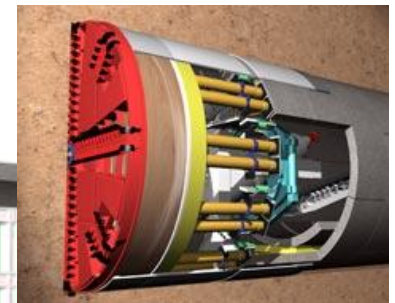
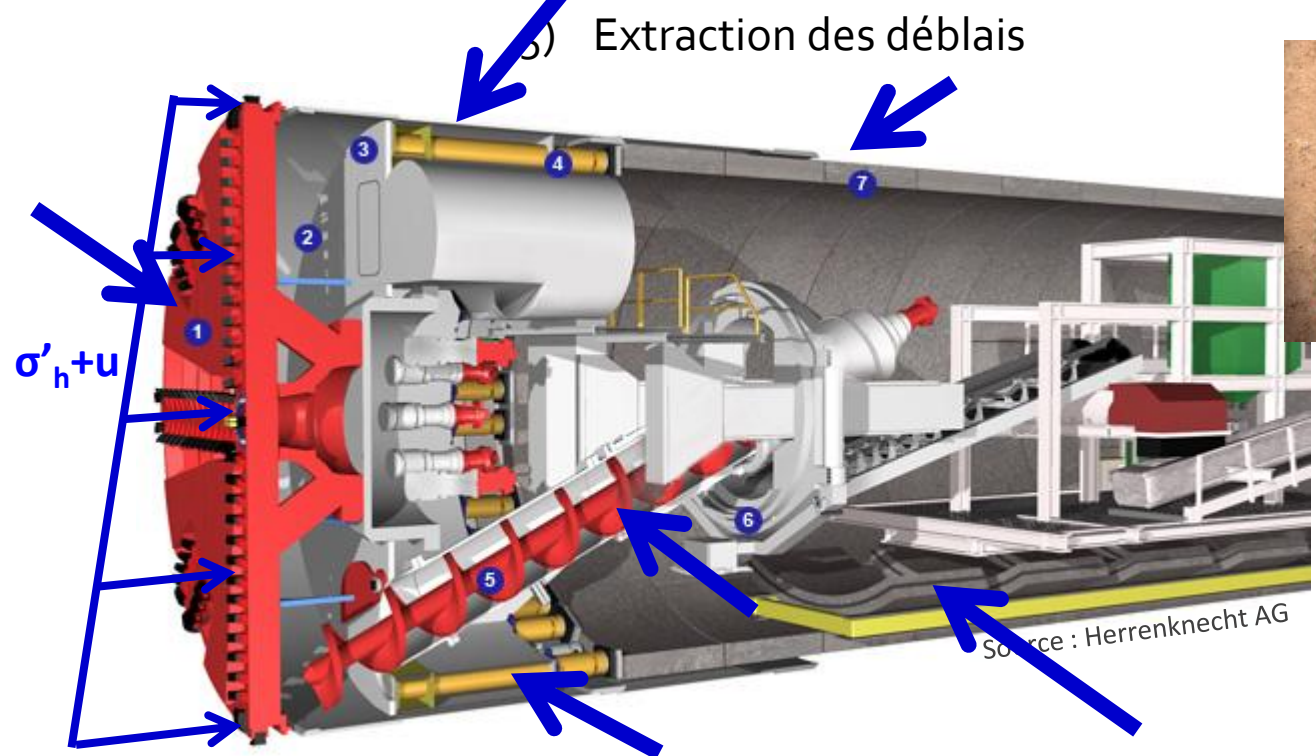
Terrains rocheux	Terrains meubles
Problèmes de fortes pressions hydrostatiques, de zones très fracturées, de fortes convergences...	Un enjeu majeur : <u>la nécessité de limiter les tassements de surface</u>

➔ Intérêt des tunneliers à front pressurisé

Le mode de creusement pressurisé des tunnels

• Différentes fonctions du tunnelier :

- | | | |
|---|--|--------------------------------|
| 1) Abattage du terrain par la roue de coupe | 3) Soutènement latéral de l'excavation | 6) Mise en place du revêtement |
| 2) Soutènement du front de taille | 4) Progression dans le terrain | 7) Bourrage du vide annulaire |



- Le mode de creusement à pression de terre :
 - Adapté aux terrains peu perméables ($k < 10^{-4}$ à 10^{-3} m/s)
 - Pas besoin d'additifs en général
 - Pas de limite de diamètre
 - Exemple de chantiers récents : prolongement métro L12 Paris, métro L9 Barcelone, Autoroute M30 Madrid, collecteurs d'eau...

- Le mode de creusement à pression de boue :
 - Adapté aux terrains plus perméables ($k < 10^{-2}$ m/s)
 - Nécessite une usine de retraitement des boues

- Le mode de creusement à pression d'air :
 - Historiquement le plus ancien
 - Adapté à des tunnels de faibles diamètres
 - Réservé aux terrains très peu perméables



Tunnelier à pression de terre utilisé lors du prolongement de la ligne 12 du métro parisien.

Problématique

Complexité de
ce mode de
creusement

+

Evolution
constante des
techniques

+

Persistance
d'incidents



*Exemple de tunnelier noyé (Présentation
mastère tunnel
G. Fontanille, NFM Technologies, 2011).*

Problématique

Complexité de
ce mode de
creusement

+

Evolution
constante des
techniques

+

Persistence
d'incidents

Besoin de



- Comprendre la phénoménologie du creusement pressurisé des tunnels (interaction sol/machine).
- Développer des outils d'aide à la justification de l'ouvrage, au dimensionnement des machines et au pilotage du chantier.

Trois axes de
recherche

- *Régime idéal* { *Comportement du sol* (**Partie 1**)
Grandeurs machine (**Partie 2**)
- *Régimes extrêmes : stabilité du front de taille* (**Partie 3**)

Une démarche tripolaire



Chantiers de tunnels creusés au bouclier pressurisé

Lois de similitude

1- Aide à la conception du modèle physique

2- Aide à la compréhension des mécanismes

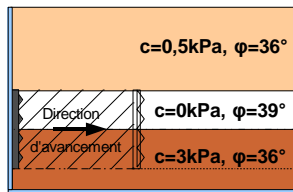
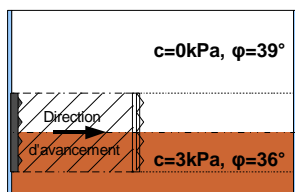


Modèle réduit de tunnelier à pression de terre

Travaux antérieurs : Eupalinos 2000 (φ'), Thèse Doan (2007) (c', φ').

Objectif de la thèse : mener les analyses à terme

➔ Synthèse essais massif homogène (7+5) + Extension massifs stratifiés



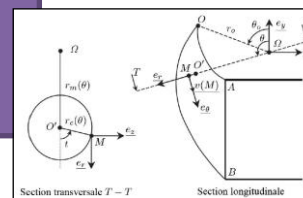
=> Influences $P_f, (c', \varphi'), q$

Légende :

➔ Permet de...

i- Ordre des étapes

Modèles théoriques (analytiques et numériques)



Une démarche tripolaire



Chantiers de tunnels creusés au bouclier pressurisé

Lois de similitude

1- Aide à la conception du modèle physique

2- Aide à la compréhension des mécanismes

3- Validation de la modélisation physique

Modèle réduit de tunnelier à pression de terre



Objectifs de la thèse : obtenir des éléments de validation ,
notamment dans le domaine des grandeurs-machines.

➔ Analyse données collecteur d'eau Rio Bogota +
prolongement L12 métro parisien

Légende :

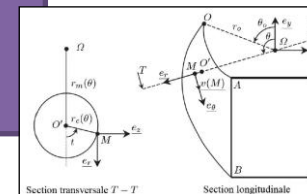


Permet de...

i-

Ordre des étapes

Modèles théoriques
(analytiques et numériques)



Une démarche tripolaire



Chantiers de tunnels creusés au bouclier pressurisé

Lois de similitude

1- Aide à la conception du modèle physique

2- Aide à la compréhension des mécanismes

3- Validation de la modélisation physique

Modèle réduit de tunnelier à pression de terre



Objectifs de la thèse :

- Développement d'une procédure de modélisation numérique du processus de creusement en régime idéal
- Stabilité du front de taille : validation des modèles analytiques existants + capacités limites MEF/MDF.

4- Aide au développement et au calage des modèles

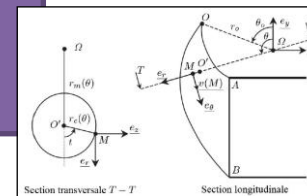
4- Aide à la compréhension des mécanismes mis en jeu

Légende :

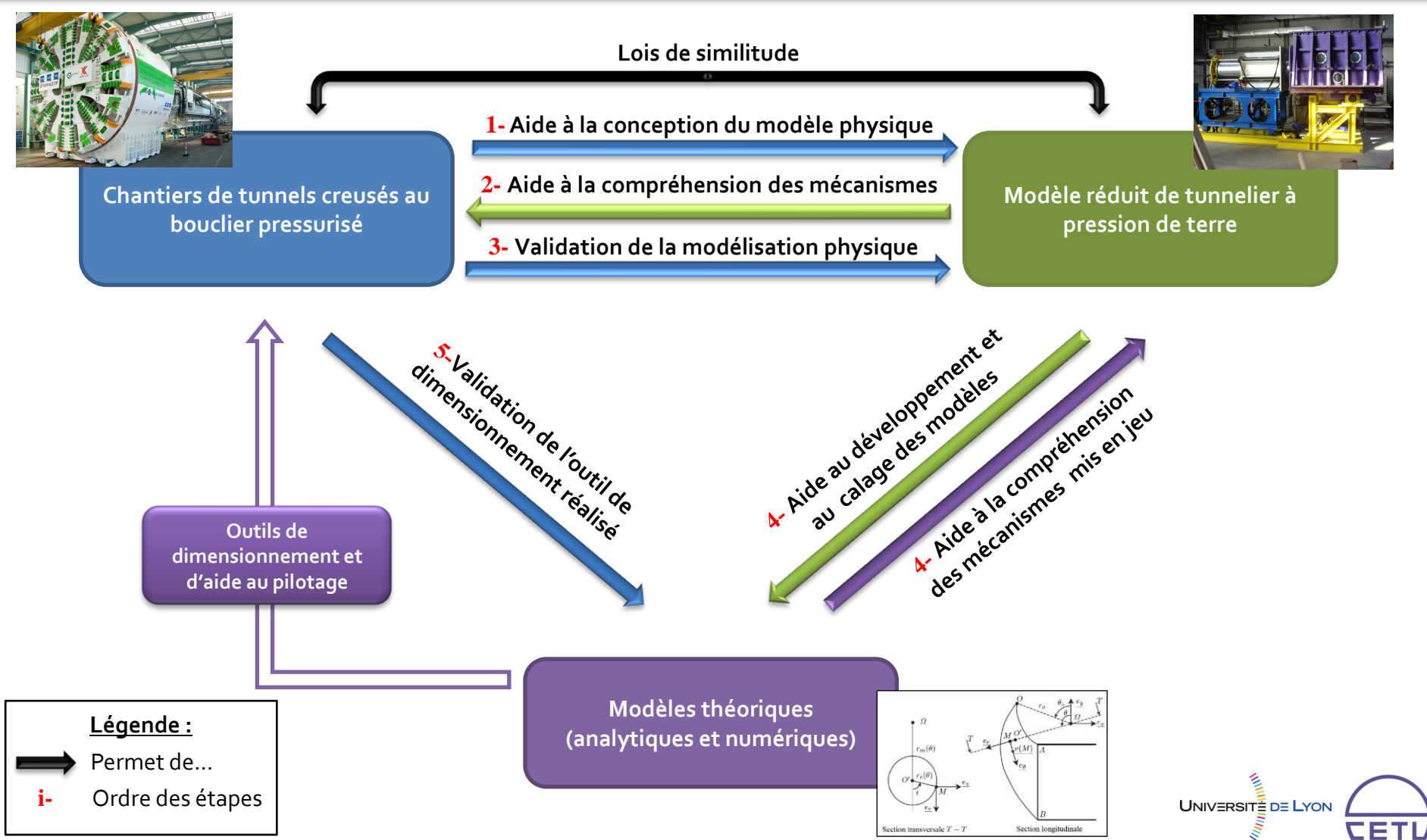
➔ Permet de...

i- Ordre des étapes

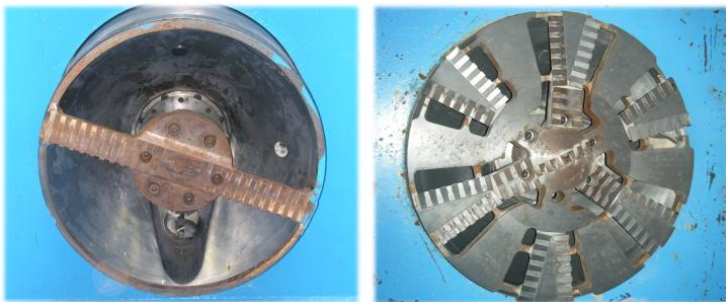
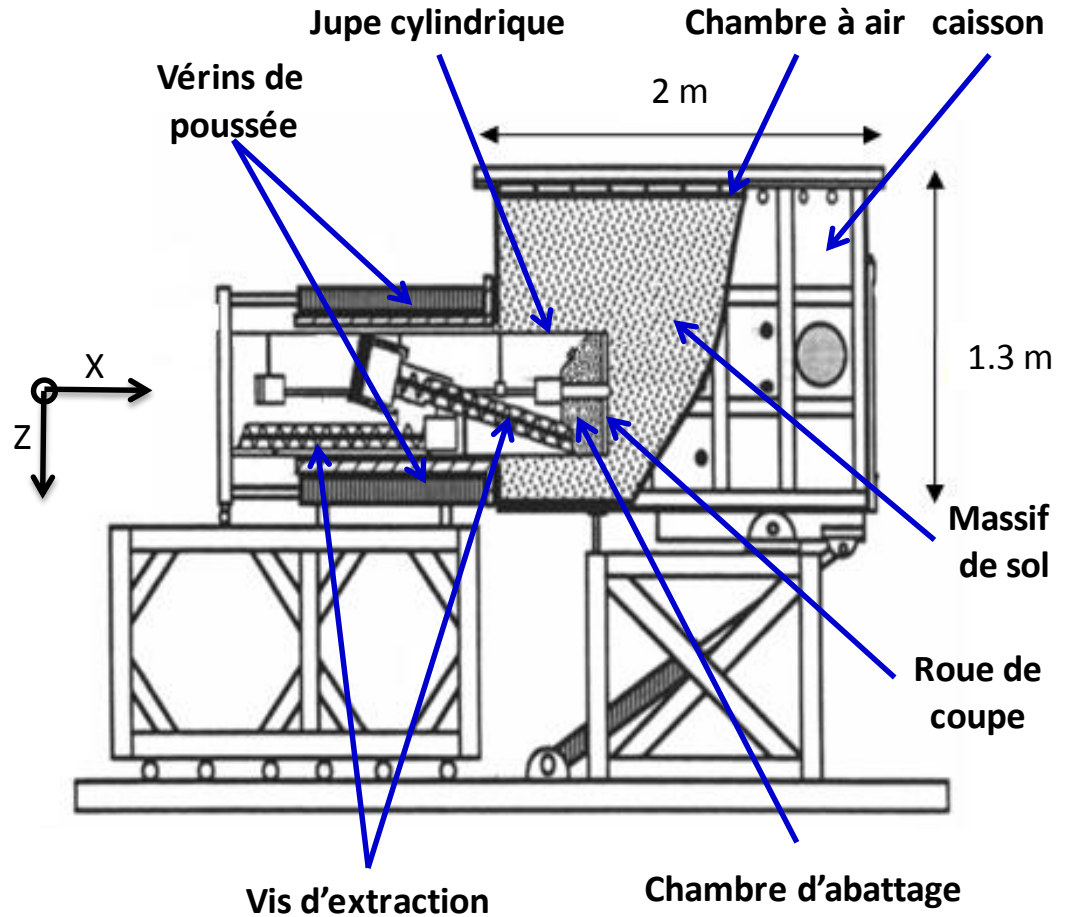
Modèles théoriques (analytiques et numériques)



Une démarche tripolaire



Présentation du dispositif expérimental



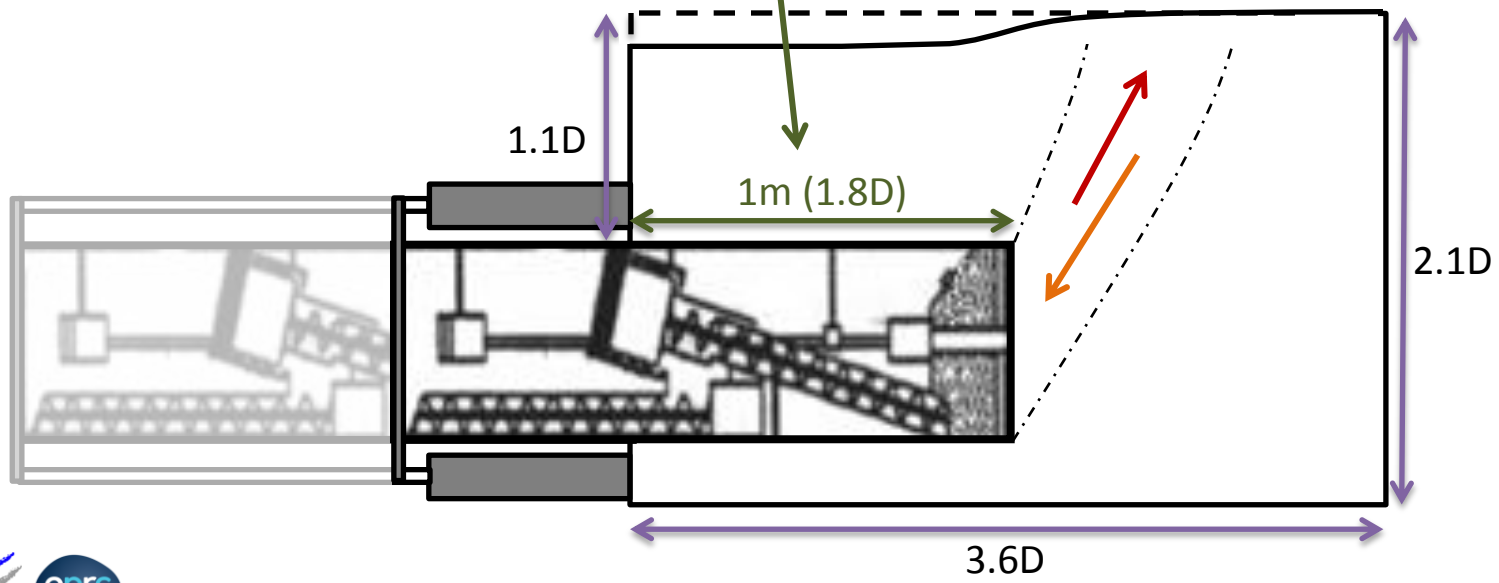
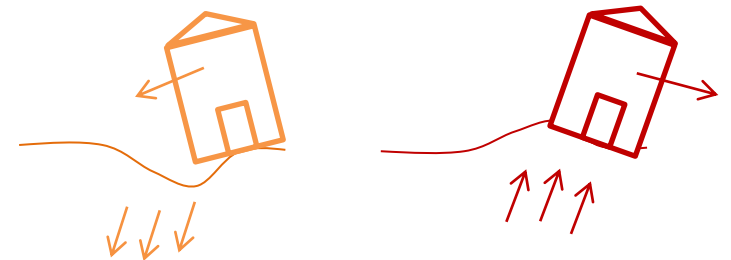
Roues de coupe à fort (80%) et faible (35%)
taux d'ouverture ($D=0.55\text{m}$)

Présentation du dispositif expérimental



Phase 1 : Régime idéal

Phase 2 : Régimes extrêmes
 Effondrement Refoulement



Instrumentation du modèle réduit

- Une instrumentation embarquée similaire à celle des tunneliers réels
 - 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,...

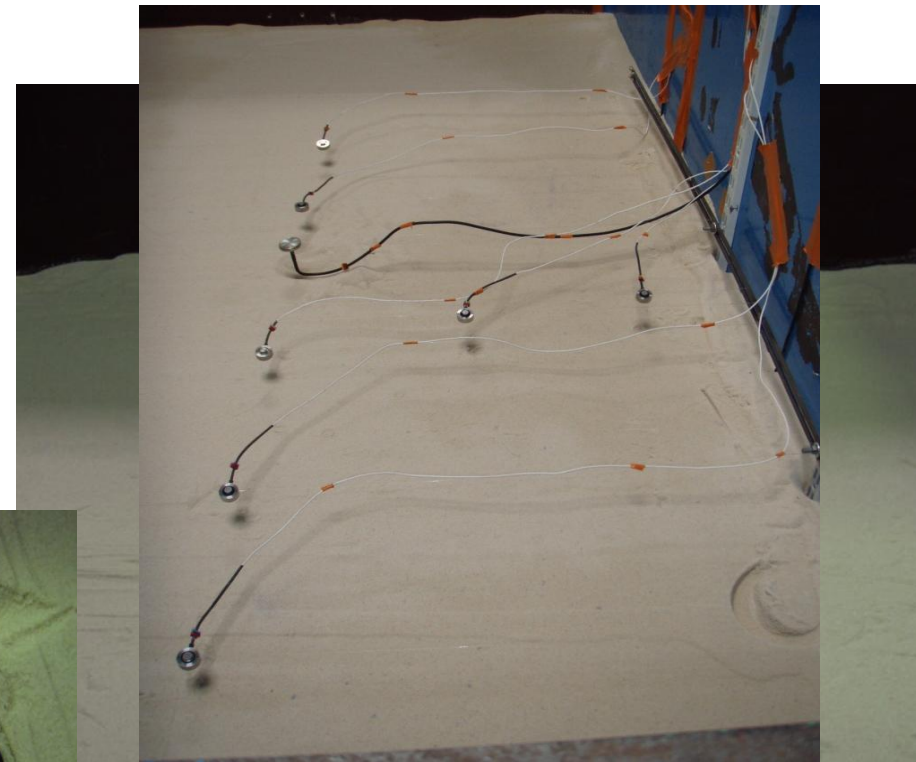


Arbre de coupe

Vis d'extraction

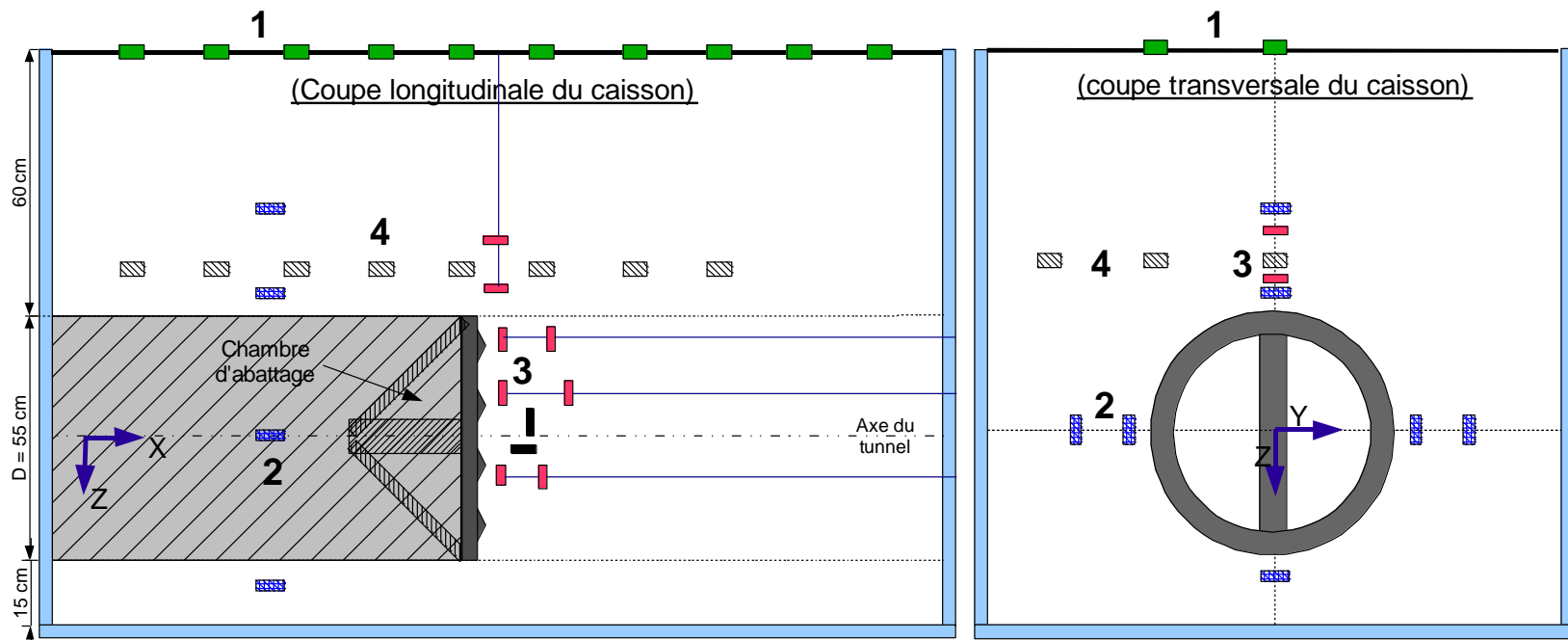
Instrumentation du modèle réduit

- Une instrumentation embarquée similaire à celle des tunneliers réels
- La capacité d'instrumenter fortement le massif de sol reconstitué
 - Capteurs de déplacements de surface
 - Capteurs de déplacements internes
 - Capteurs de contraintes totales (Entran EPN50, Kyowa BE-2KC)
Nota : Etude mesures de contrainte



Instrumentation du modèle réduit

- Une instrumentation embarquée similaire à celle des tunneliers réels
- La capacité d'instrumenter fortement le massif de sol reconstitué
 - ➔ Une analyse du comportement en contraintes et déformations en diverses positions.



Choix du matériau sol modèle (Branque et al, 2002 ; Doan, 2007)

- Des relations entre facteurs d'échelle ($U^*=U_m/U_p$) liées aux lois de similitude
- Une similitude partielle privilégiant les notions de rigidité (E^*) et de résistance mécanique (c^*, φ^*)

Grandeurs	Lois de similitude partielle	Caractéristiques mécaniques du matériau « sol »	
		Sol réel	Sol modèle
Pesanteur	$g^* = 1$		
Longueur	$0.04 \leq L^* = D_M/D_P \leq 0.2$		
Masse volumique	$\rho^* \approx 1$	ρ_P	$\rho_M \approx \rho_P$
Contrainte	$\sigma^* \approx L^*$		
Indice des vides	e^*	e_P	$e_M > e_P$
Déplacement	$\xi^* = L^*$		
Déformation	$\varepsilon^* = 1$		
Module de déformation	$E^* \approx L^*$	$E_P \approx 100 \text{ MPa}$ (pour $\varepsilon \approx 1\%$)	$4 \text{ MPa} \leq E_M \leq 10 \text{ MPa}$ (pour $\varepsilon \approx 1\%$)
Cohésion	$c^* \approx L^*$	$c_P < 40 \text{ kPa}$	$c_M \leq 8 \text{ kPa}$
Angle de frottement	$\varphi^* \approx 1$	$30^\circ \leq \varphi_P \leq 40^\circ$	$\varphi_M \approx \varphi_P$

Branque D., Mutin C. (2002). Contrôle du confinement à pression de terre - Etude de sol modèle réduit de laboratoire : essai de creusement sur massif de sol à faible cohésion, Projet National EUPALINOS 2000, rapport de synthèse, N°64-2001-B1.

Doan H.V. (2007). Creusement des tunnels en terrain sable et argile expérimentale sur modèle réduit de tunnelier à pression de terre en sol cohérent frottant, thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.

Matériaux retenus : sables Hostun S28 secs ou faiblement humides ($w < 5\%$) déposés dans un état lâche ($e \approx 1$)

Choix du matériau sol modèle (Branque et al, 2002 ; Doan, 2007)

- Des relations entre facteurs d'échelle ($U^*=U_m/U_p$) liées aux lois de similitude
- Une similitude partielle privilégiant les notions de rigidité (E^*) et de résistance mécanique (c^* , φ^*)
- Un matériau modèle en accord avec les chantiers étudiés

Grandeur	Facteur d'échelle	Collecteur Rio Bogota	Equivalent mod. réduit	Méto ligne 12	Equivalent mod. réduit	Modèle réduit
Caractéristiques mécaniques et géométriques						
D (m)	=> L^*	4.52	0.55 => $L^*=0.12$	9.17	0.55 => $L^*=0.06$	0.55
D vis extr. (m)	=> L_{vis}^*	0.6	0.08 => $L_{vis}^*=0.13$	0.9	0.08 => $L_{vis}^*=0.09$	0.08
Couverture C (m)	= L^*	6 à 11	0.7 à 1.3	13	0.8	1.1
E (MPa)	= L^*	3 à 40	0.4 à 4.8	120	7.2	5 à 10
c (kPa)	= L^*	5 à 22	0.6 à 2.6	30	1.8	0 à 2kPa

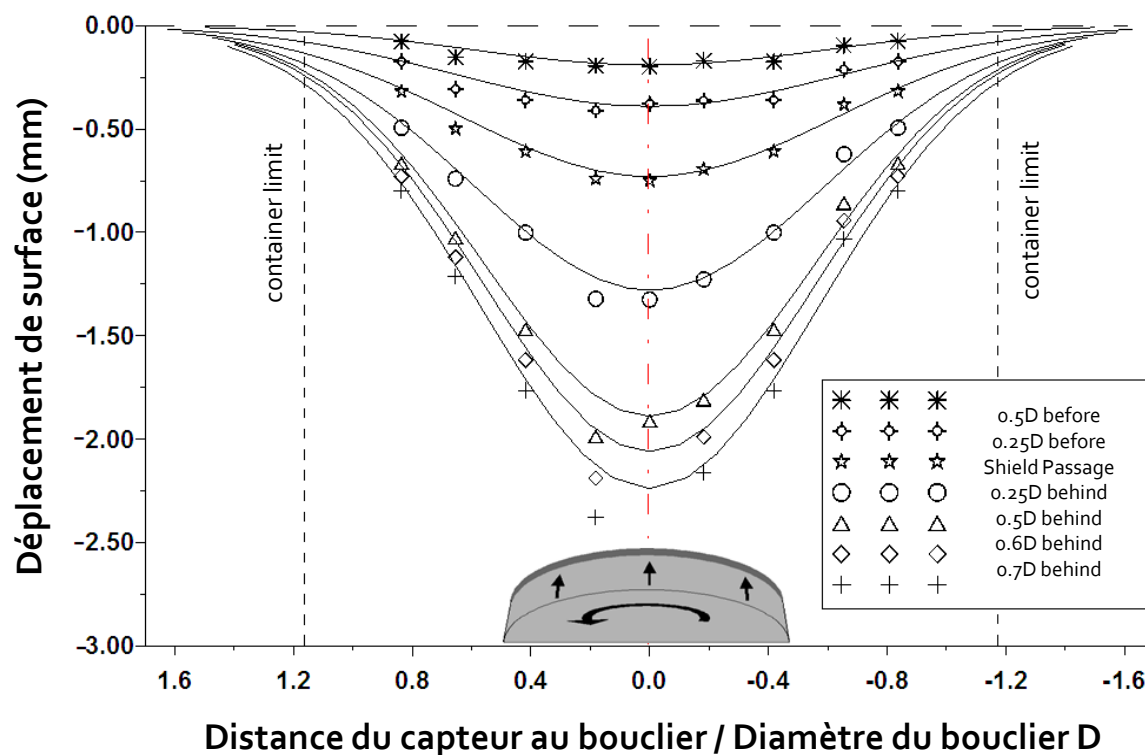
Excellent accord avec Modèle réduit ¹	Limite accord avec modèle réduit ²	Désaccord avec modèle réduit ³	Ne sait pas
--	---	---	-------------

- I. Introduction
- II. Régime idéal : analyse de la réponse du sol**
- III. Régime idéal : analyse des relations entre grandeurs-machines
- IV. Régimes extrêmes : analyse de la stabilité du front de taille
- V. Conclusion et perspectives

Déplacements de surface dans la direction transversale (Doan, 2007)

- Des cuvettes de forme gaussienne conformément à la formulation empirique

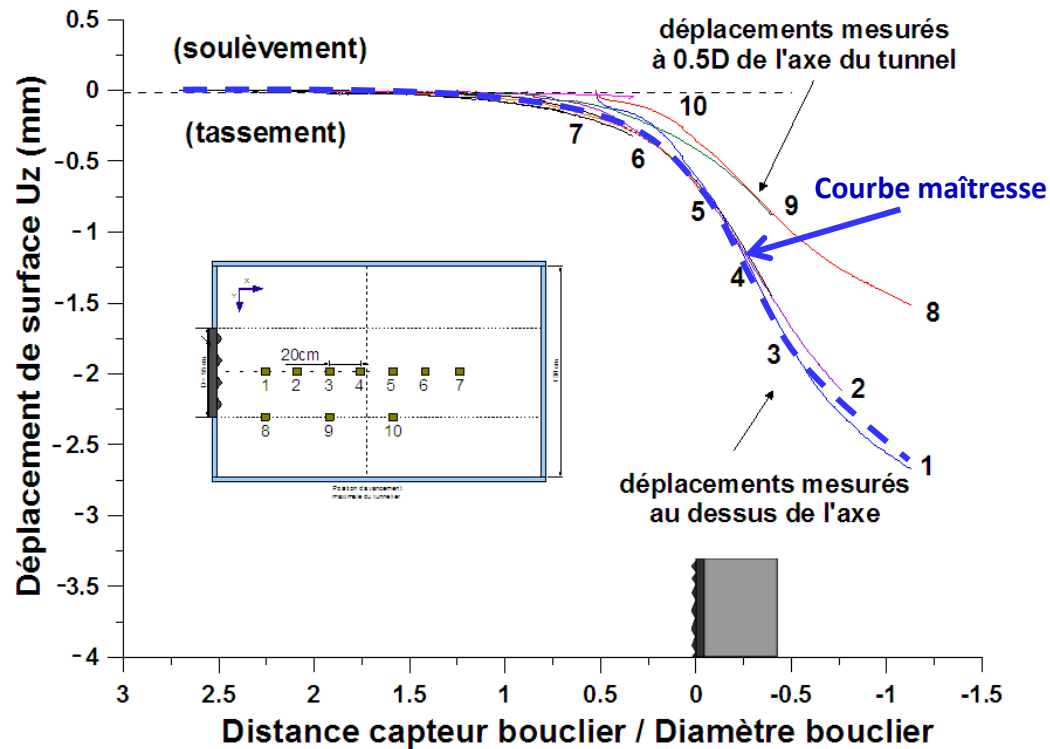
de Peck (1969) : $U(Y) = U_{X_max} \cdot e^{\frac{-Y^2}{2 \cdot I_Y^2}}$



Déplacements de surface dans la direction longitudinale

- Des profils stationnaires

- Une allure de type gaussienne cumulée¹
$$U(X) = U_{-1D} \cdot \frac{1}{I_X \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_X^{+\infty} e^{-\frac{(X_1 - \alpha)^2}{2 \cdot I_X^2}} \cdot dX_1$$

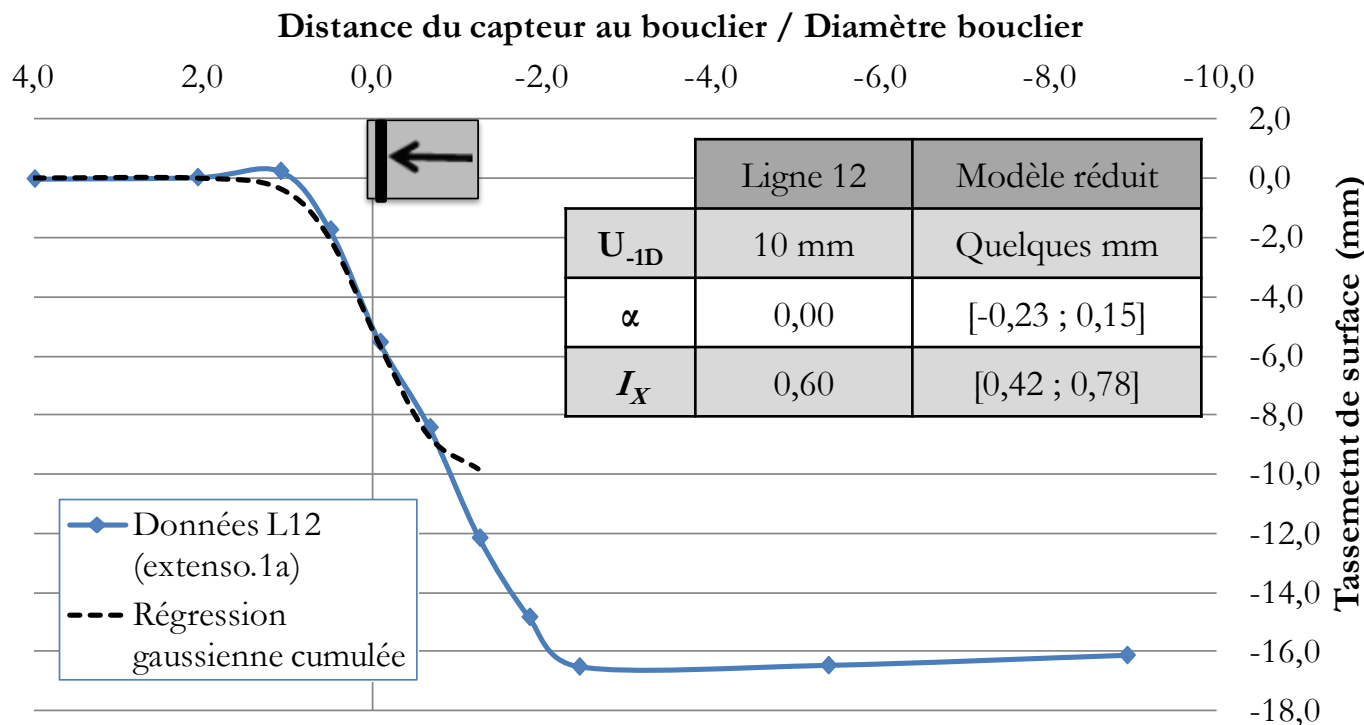


¹ Amélioration de la formule d'Attewell et Woodman (1982) [Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil, Ground Engineering, London, vol. 15, n°8, pp. 13-22].

Déplacements de surface dans la direction longitudinale

- Des profils stationnaires
- Une allure de type gaussienne cumulée¹
- Un bon accord avec le chantier (L12 métro parisien) jusqu'à 1D à l'arrière du bouclier.

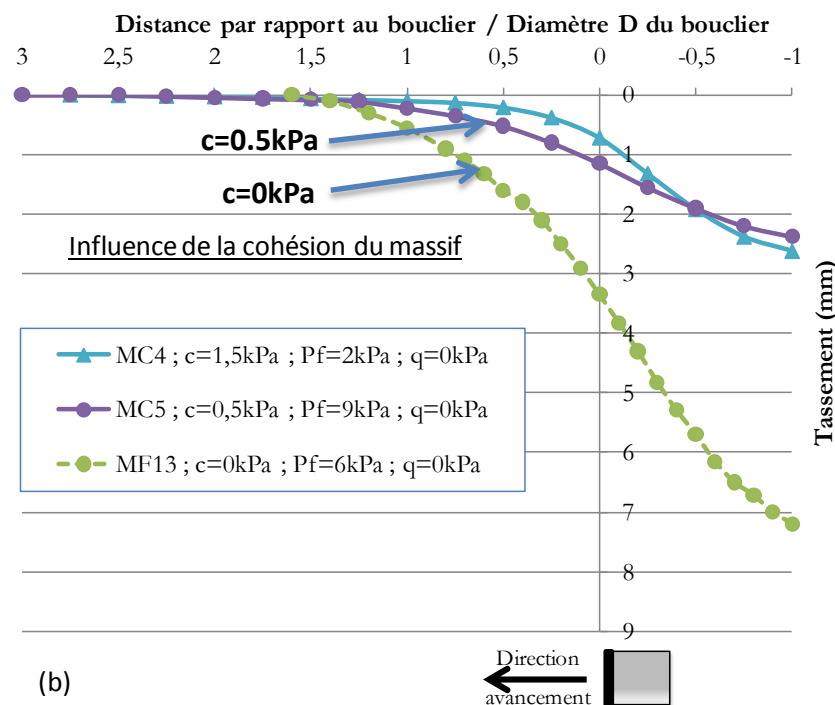
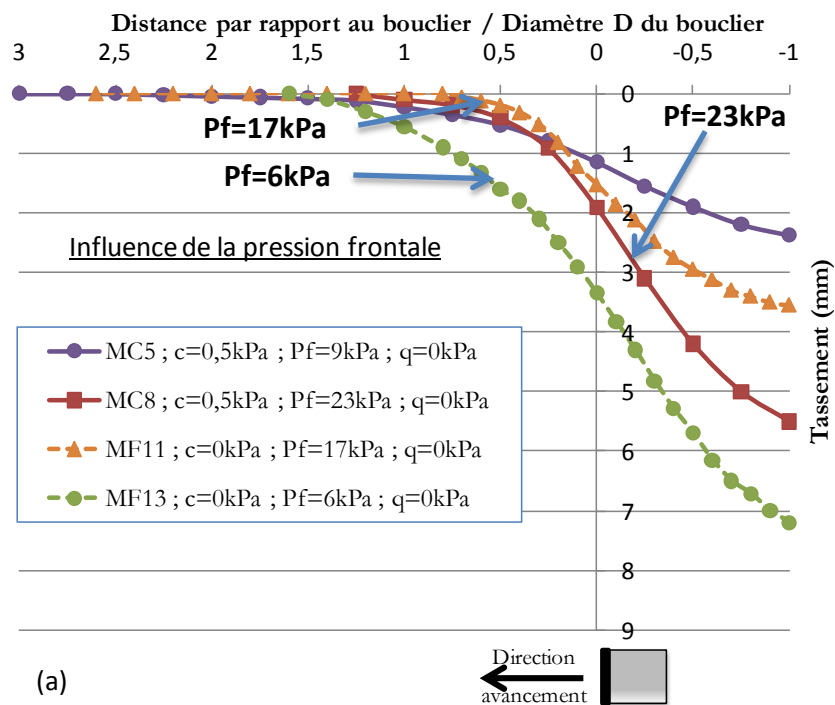
$$U(X) = U_{-1D} \cdot \frac{1}{I_X \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_X^{+\infty} e^{-\frac{(X_1 - \alpha)^2}{2 \cdot I_X^2}} \cdot dX_1$$



¹ Amélioration de la formule d'Attewell et Woodman (1982) [*Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil*, Ground Engineering, London, vol. 15, n°8, pp. 13-22].

Influences de la pression frontale et de la cohésion du sol sur les tassements

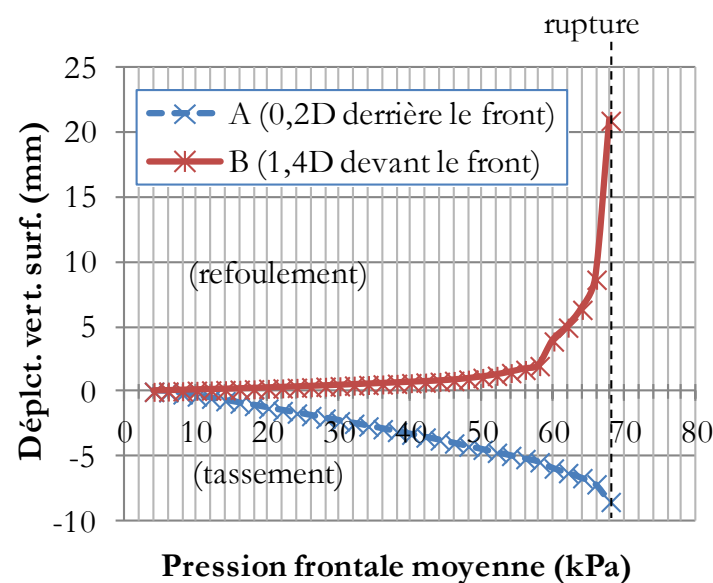
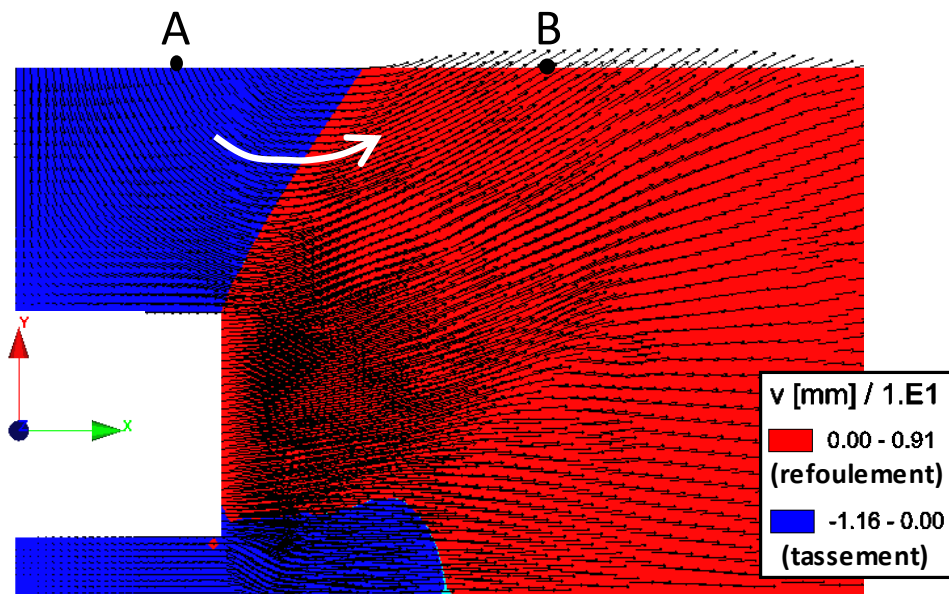
- Seul 30 à 60% du tassement généré un diamètre à l'arrière du front de taille est généré devant le bouclier.
- Des déplacements d'autant plus faibles que les conditions de stabilité du front de taille sont bonnes.
- Attention : une pression frontale trop importante accentue les tassements.



Influences de la pression frontale et de la cohésion du sol sur les tassements

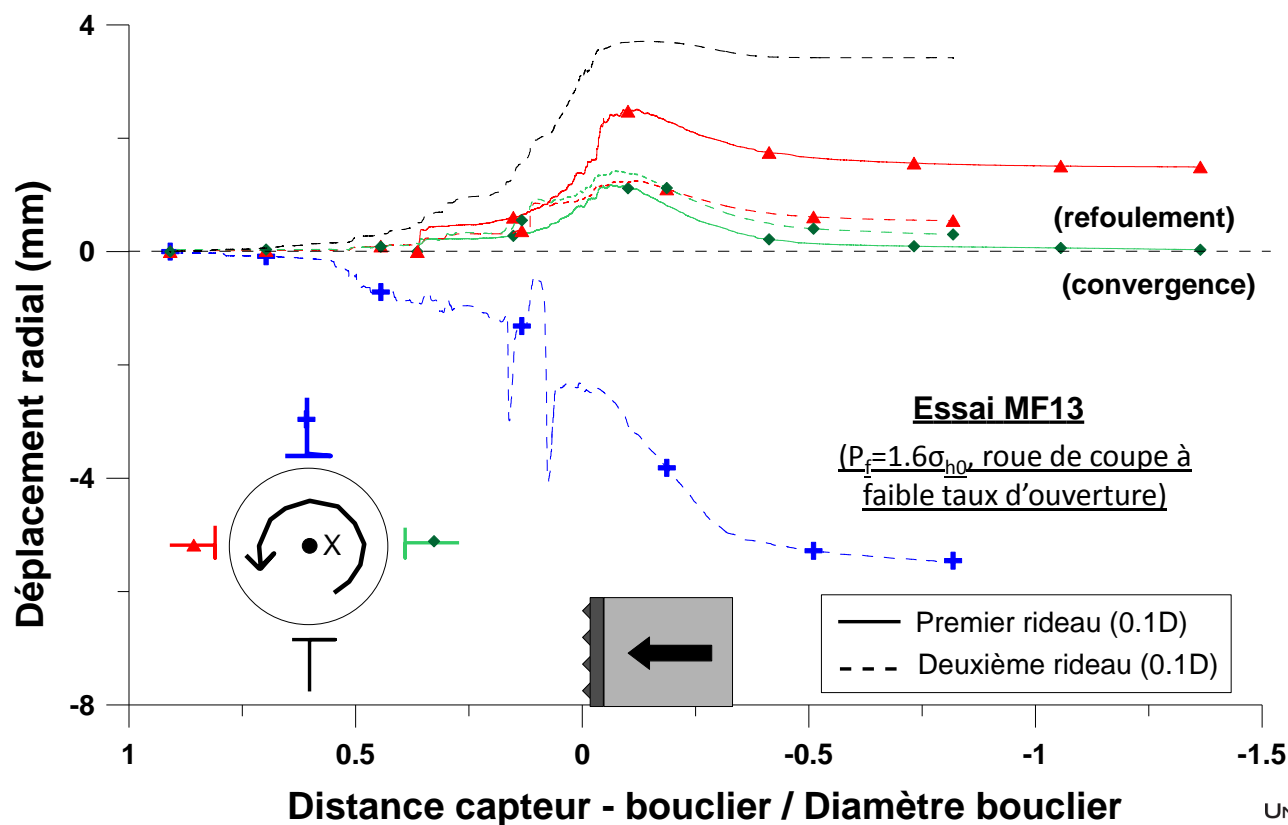
- Seul 30 à 60% du tassement généré un diamètre à l'arrière du front de taille est généré devant le bouclier.
- Des déplacements d'autant plus faibles que les conditions de stabilité du front de taille sont bonnes.
- Attention : une pression frontale trop importante accentue les tassements.

➡ Un résultat expliqué par la modélisation numérique.



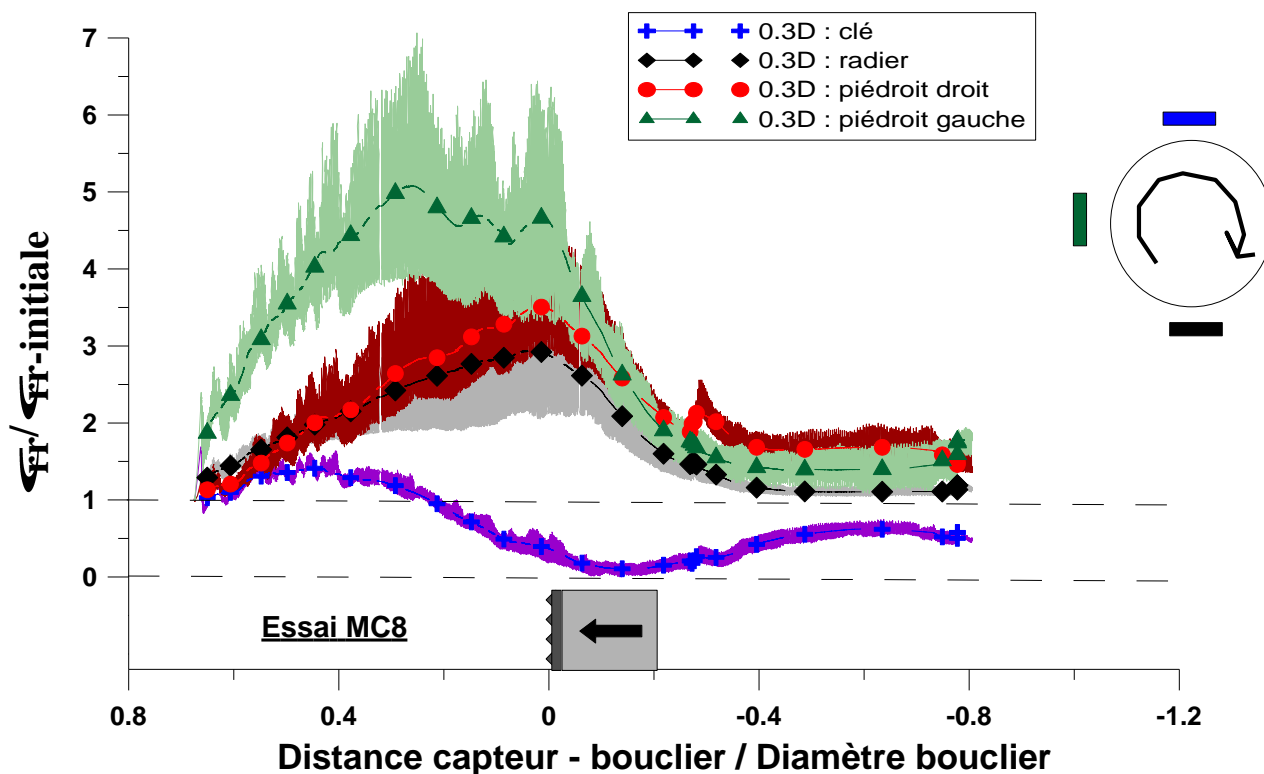
Profils de déplacements autour d'une section courante

- Des déplacements de deux types : refoulement à l'avant et convergence à l'arrière du bouclier.
- Un comportement similaire en pieds-droits et radier, mais différent en clé.



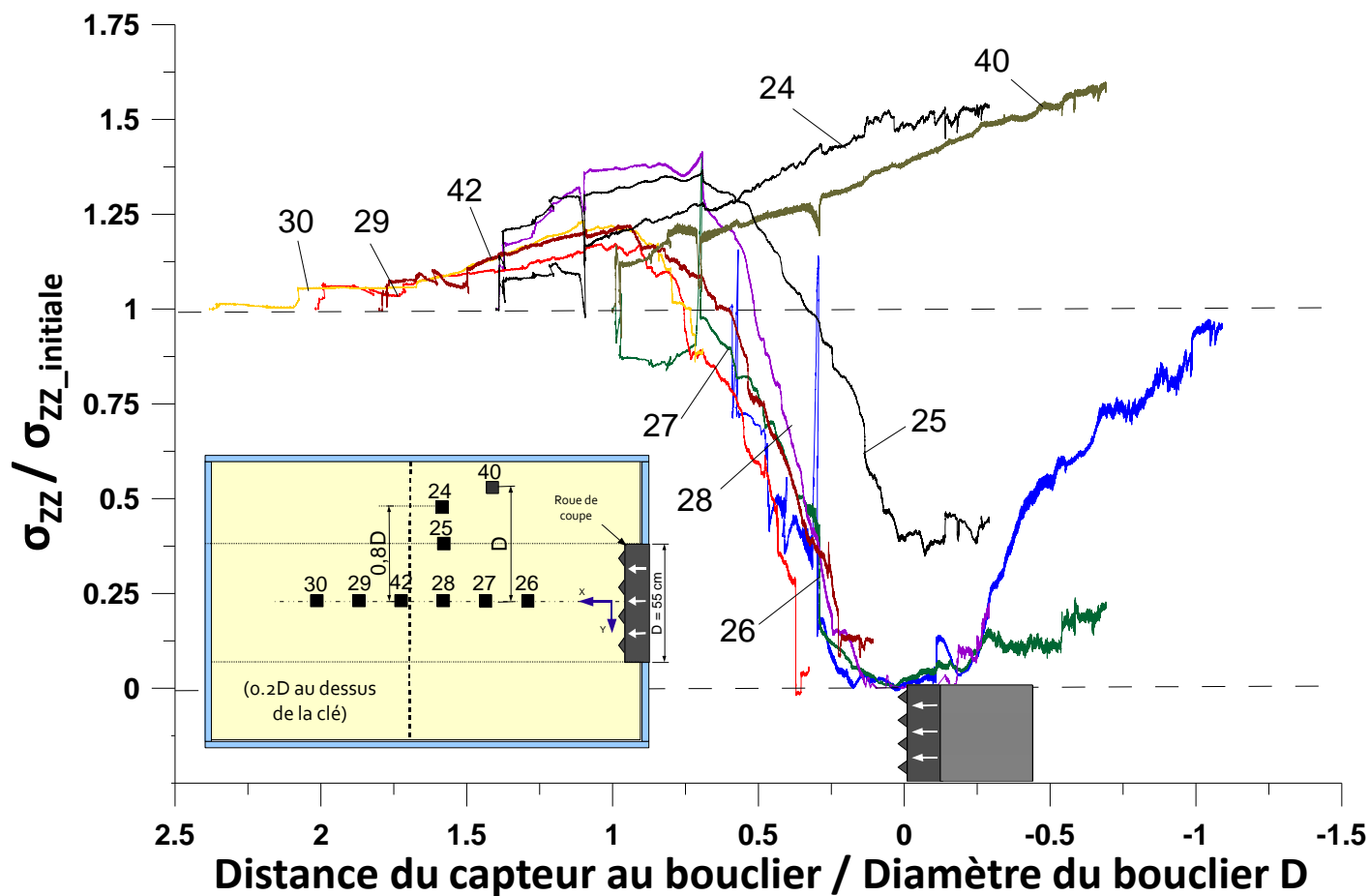
Profils de déplacements autour d'une section courante

- Des déplacements de deux types : refoulement à l'avant et convergence à l'arrière du bouclier.
- Un comportement similaire en pieds-droits et radier, mais différent en clé.
- Des tendances confirmées par les mesures de contraintes



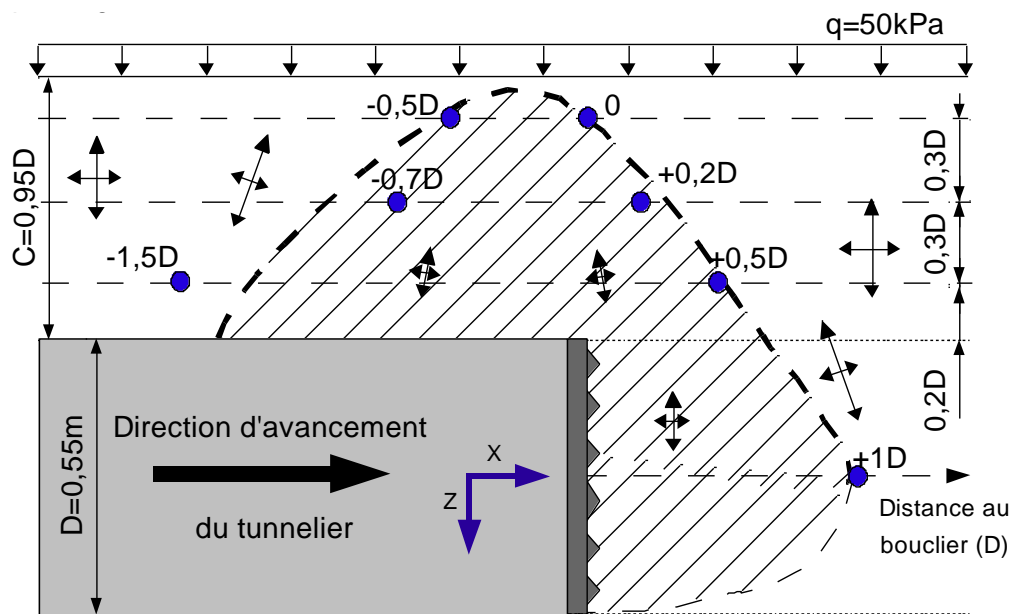
Profil de contrainte verticale au dessus de la clé du tunnel

- Des profils longitudinaux et transversaux de contrainte verticale $0,2D$ au dessus de la clé caractéristiques d'un effet de voûte.

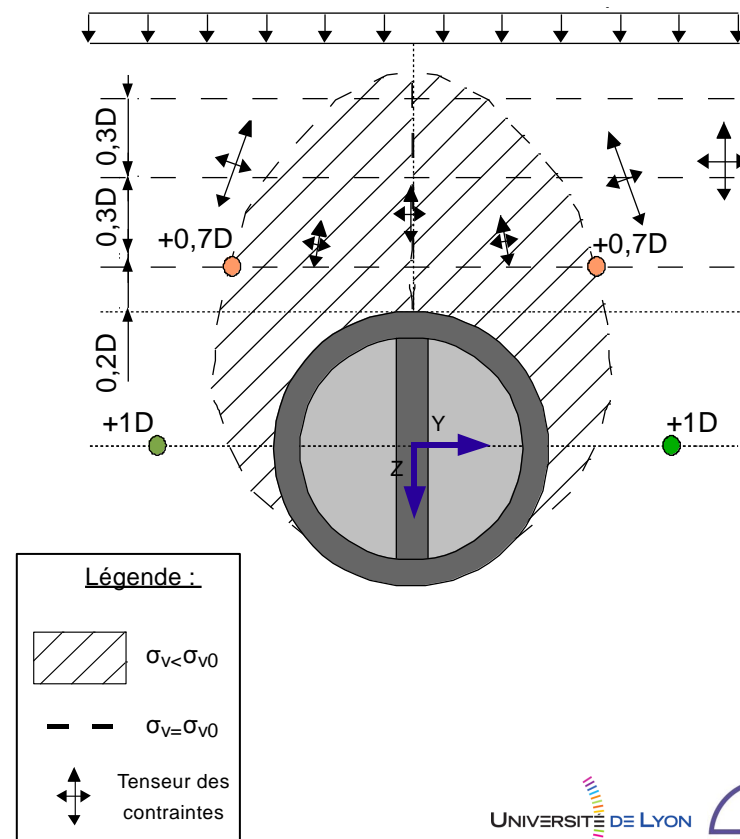


Géométrie tridimensionnelle de la zone allégée

(Coupe longitudinale dans l'axe)

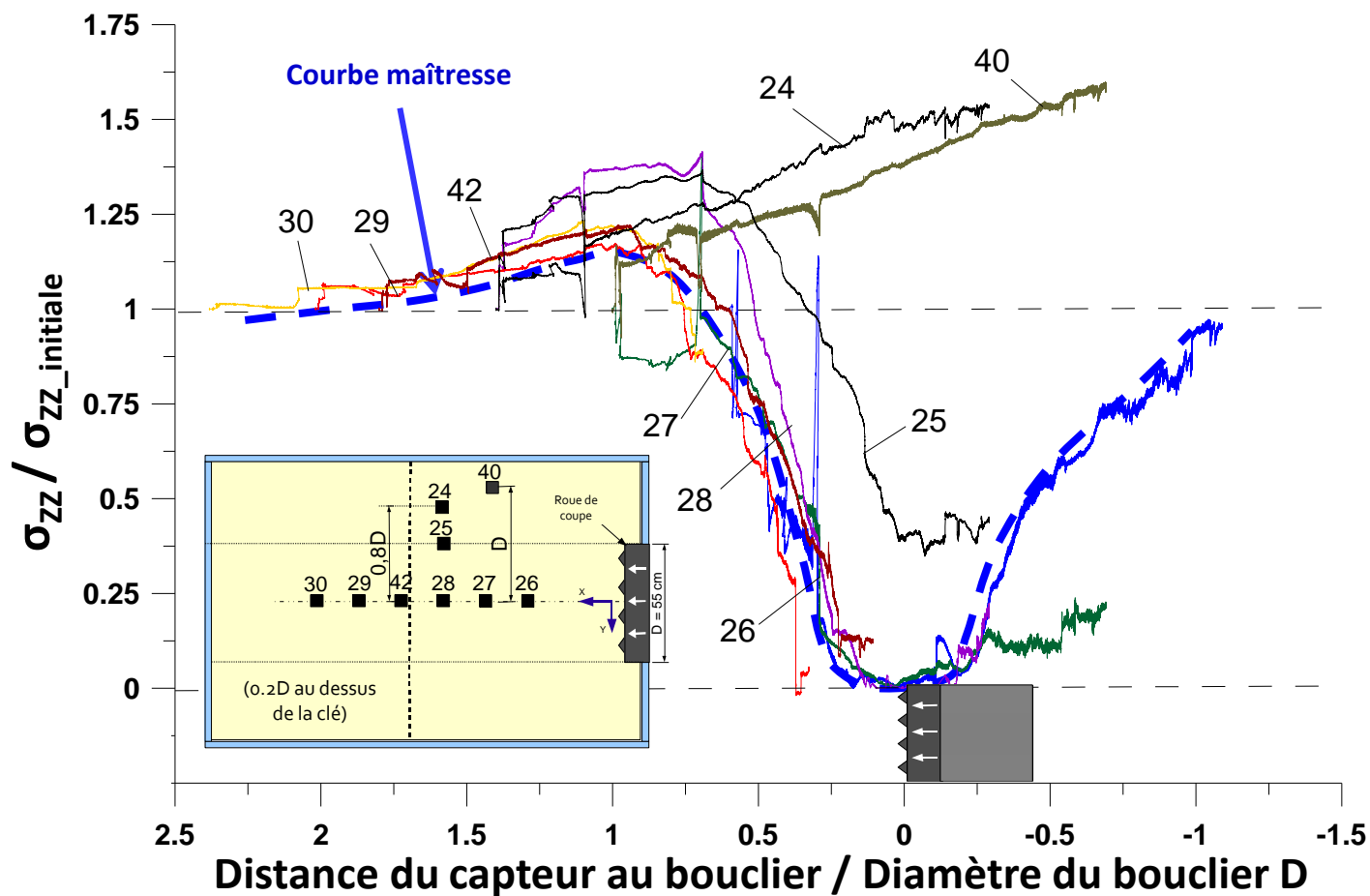


(Coupe transversale au passage du bouclier)



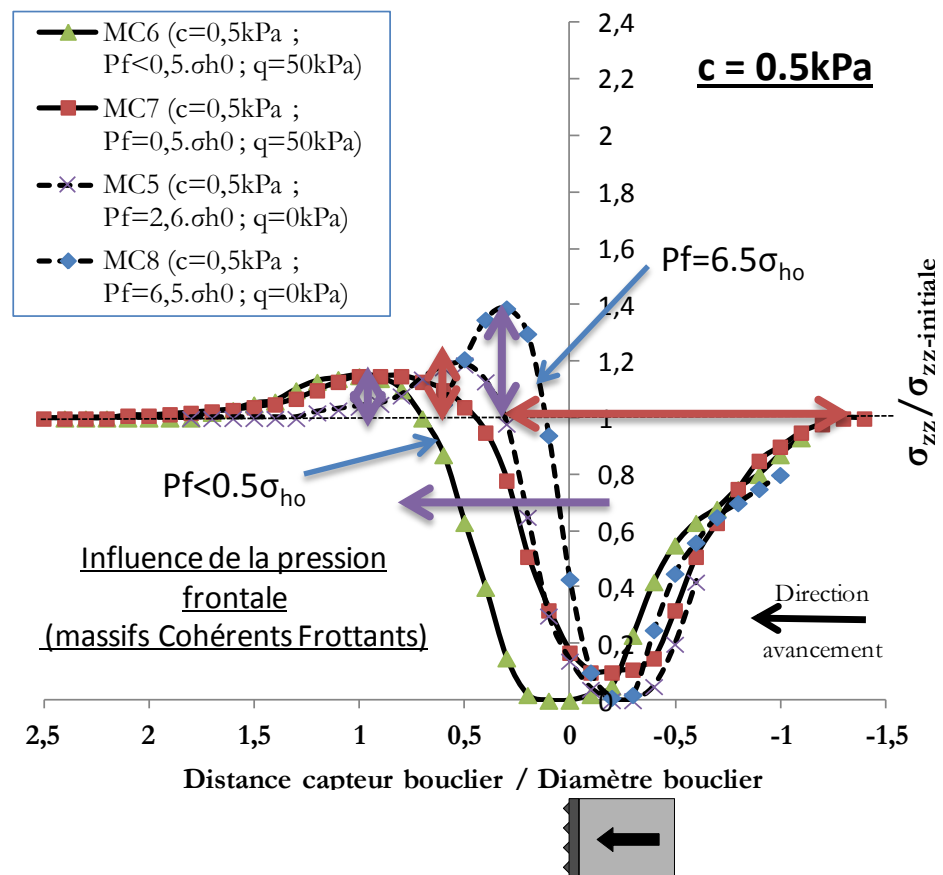
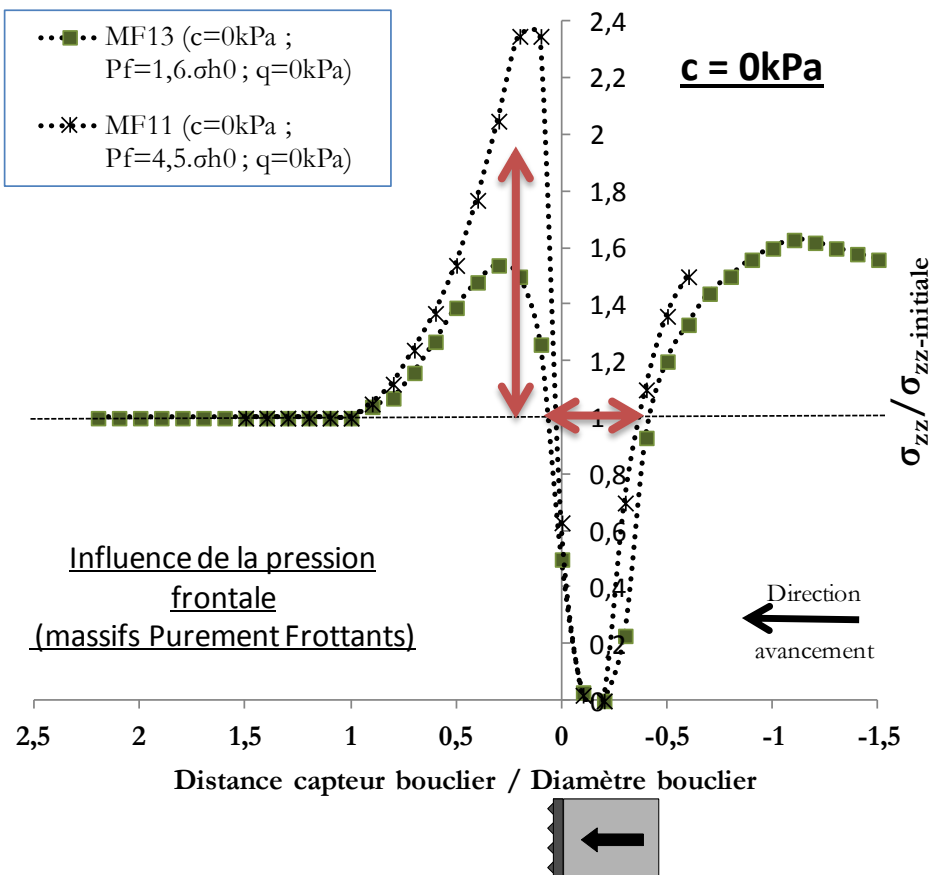
Profil de contrainte verticale au dessus de la clé du tunnel

- Des profils longitudinaux et transversaux de contrainte verticale $0,2D$ au dessus de la clé caractéristiques d'un effet de voûte.



Influences de la pression frontale et de la cohésion du massif sur les effets de voûte

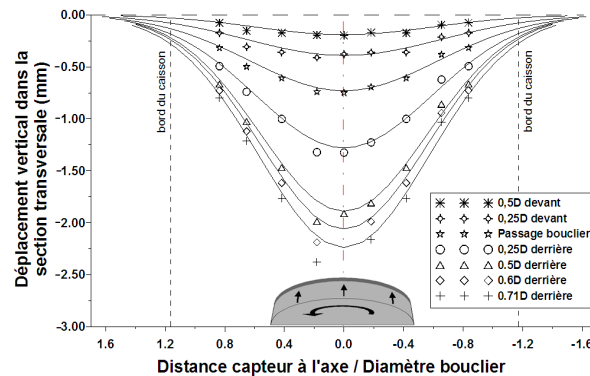
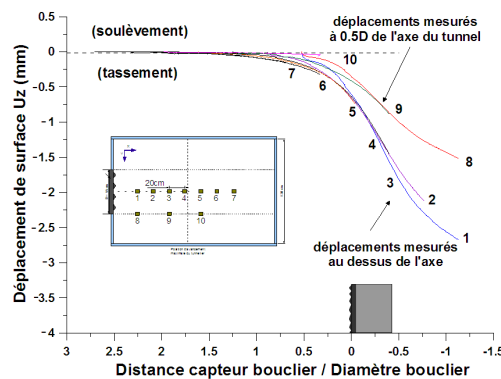
- Augmentation de la cohésion du sol => extension de la zone allégée et diminution de l'amplitude des reports de contrainte de part et d'autre de celle-ci.
- Même tendance lorsque la pression frontale diminue.



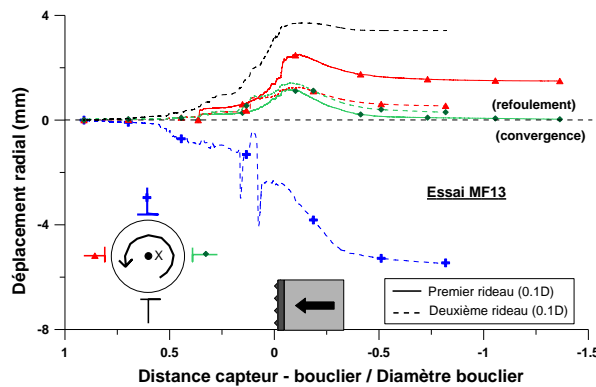
Développement d'une procédure de modélisation numérique du régime idéal

- Objectif : reproduire numériquement la phénoménologie observée sur modèle réduit.

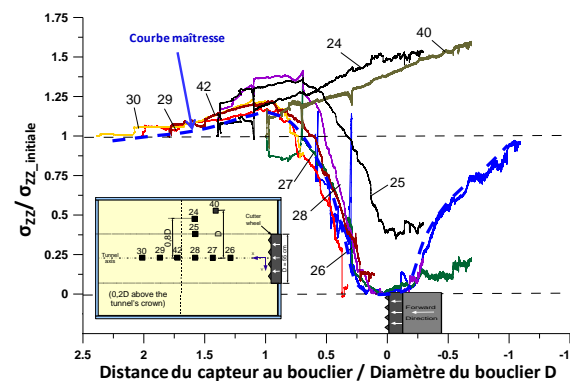
Déplacements de surface



Déplacements autour section courante

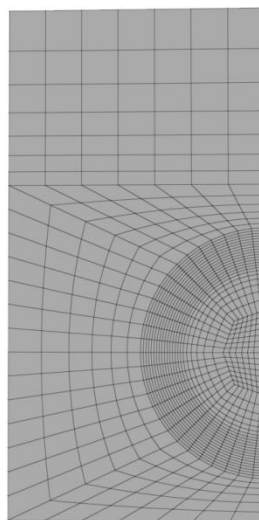
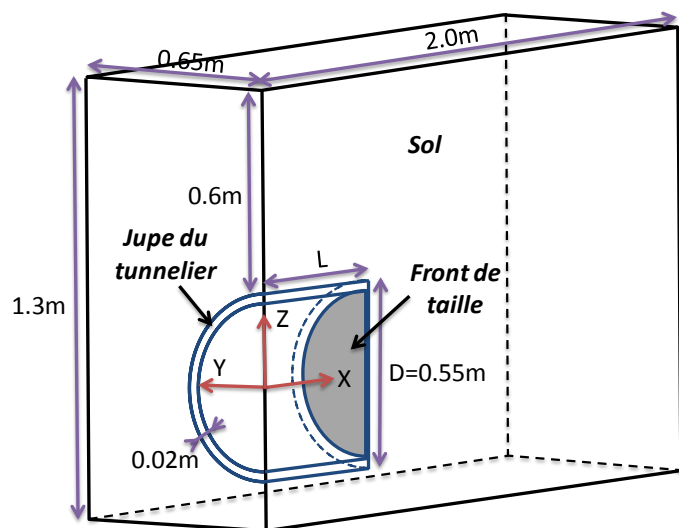


Effets de voûte

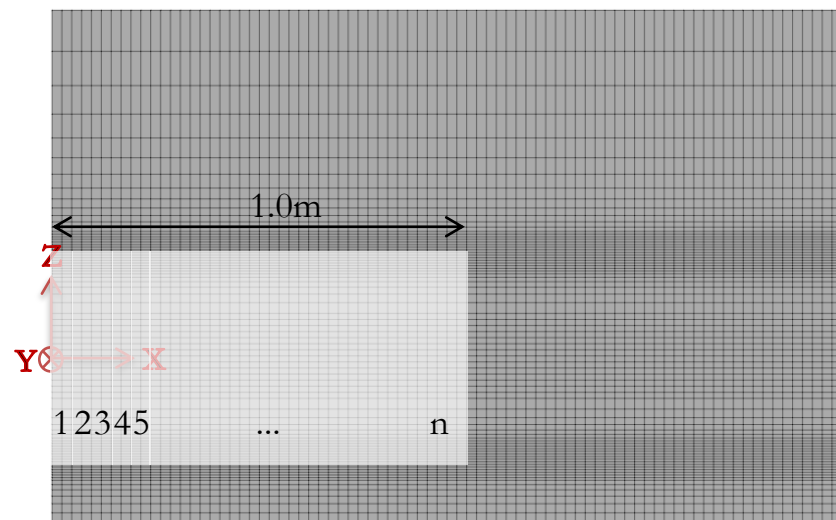


Développement d'une procédure de modélisation numérique du régime idéal

- Progiciel Flac3D®
- Géométrie du modèle réduit
- Etude de maillage ➡ maillage à 80028 nœuds (erreur < 10%, temps calcul ≈ 9h)
- Creusement sur une longueur d'un mètre, modélisé par succession de calculs statiques (« activation/désactivation d'éléments »)



Coupe transversale



Coupe longitudinale

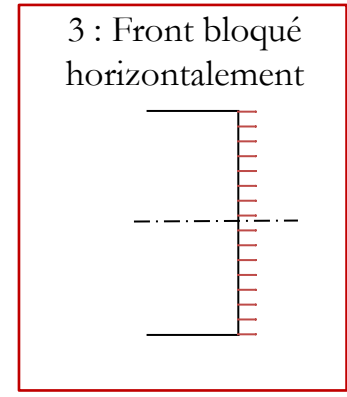
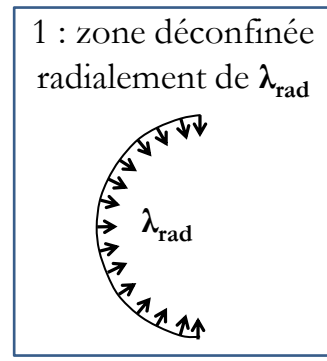
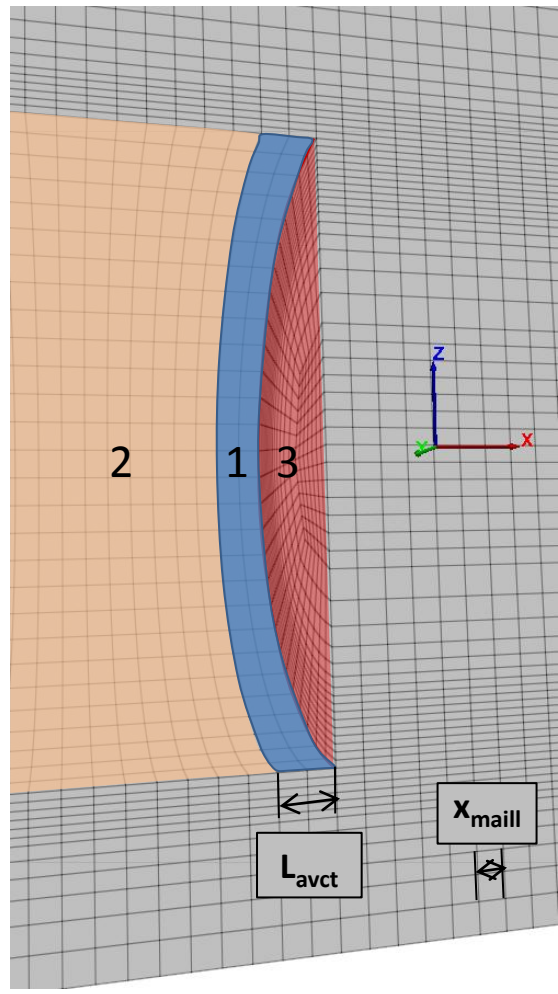
Développement d'une procédure de modélisation numérique du régime idéal

- Progiciel Flac3D®
- Géométrie du modèle réduit
- Etude de maillage → maillage à 80028 nœuds (erreur < 10%, temps calcul ≈ 9h)
- Creusement sur une longueur d'un mètre, modélisé par succession de calculs statiques (« *activation/désactivation d'éléments* »)
- Loi de comportement du sol : modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb
 - Plasticité parfaite
 - Module de déformation initial fonction de la contrainte moyenne : $10 \cdot \left(\frac{\sigma_{moy} (kPa)}{17} \right)^{0.5}$
 - Loi non associée
 - Caractéristiques mécaniques des sols utilisés lors de deux essais de référence : MC5 et MC8 ($c' = 0.5 kPa$)

• Une complexification progressive des conditions aux limites :

➤ Procédure 1 :
déconfinement
radial en paroi

Procédure 1 :

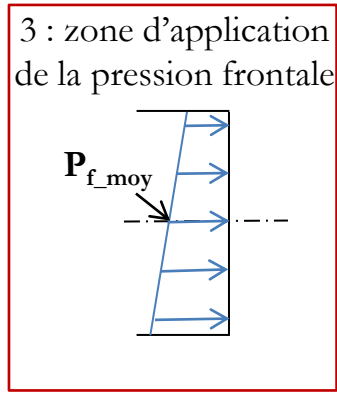
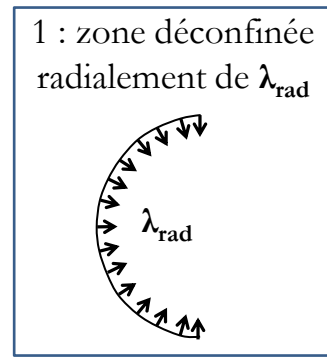
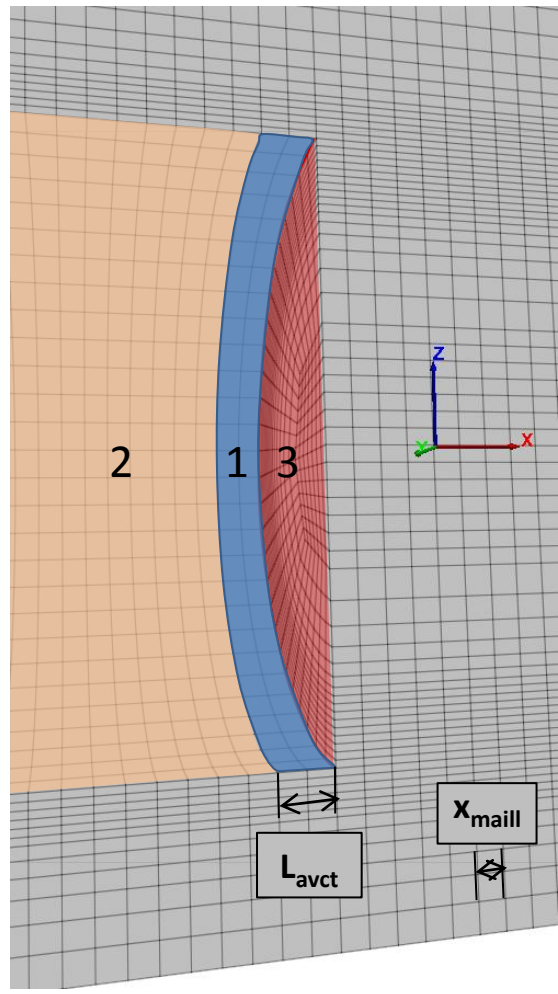


● Une complexification progressive des conditions aux limites :

- Procédure 1 :
déconfinement radial en paroi

- Procédure 2 :
ajout de la pression frontale

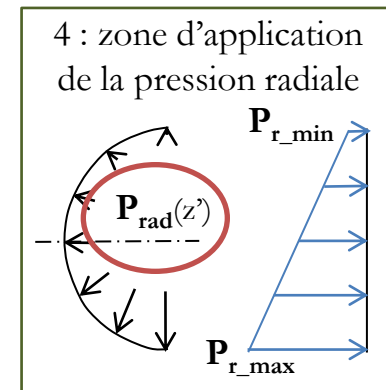
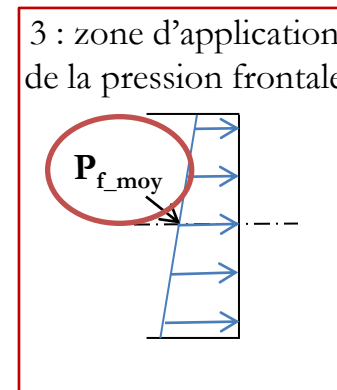
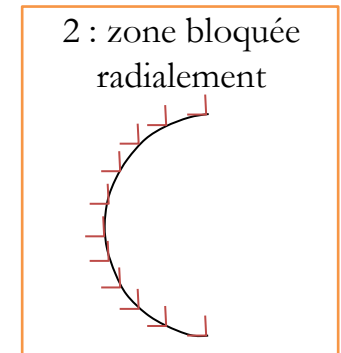
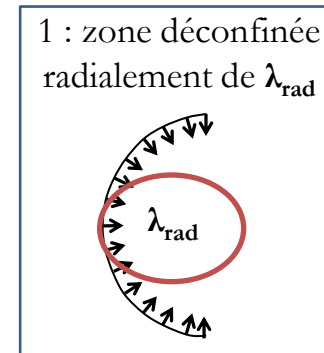
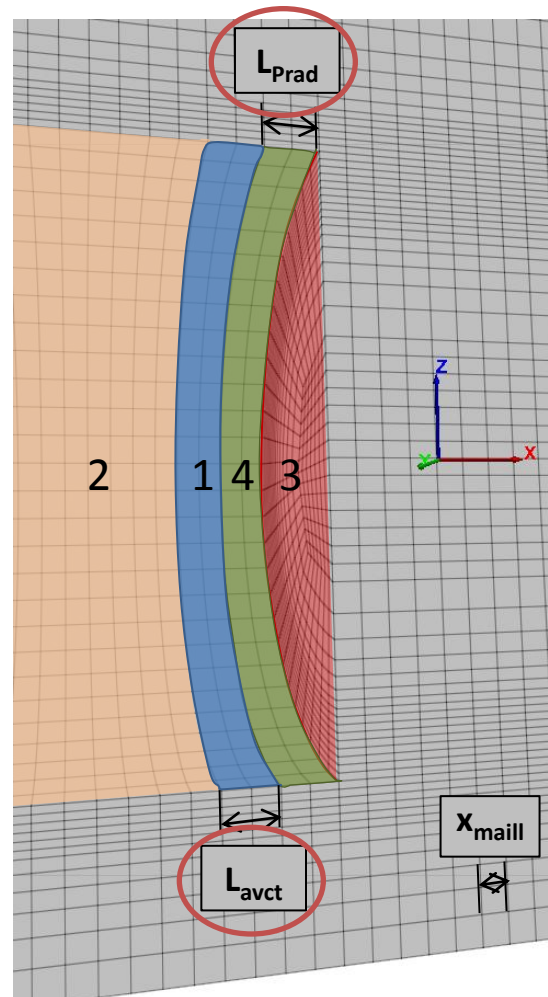
Procédure 2 :



• Une complexification progressive des conditions aux limites :

- Procédure 1 : déconfinement radial en paroi
- Procédure 2 : ajout de la pression frontale
- Procédure 3 : prise en compte de l'effet compressif de la roue de coupe

Procédure 3 :



Synthèse des capacités des trois procédures testées

	P1 = déconfinement radial	P2 = P1 + pression frontale	P3 = P2 + compression radiale
Profil déplacement surface direction longitudinale			
Profil déplacement surface direction transversale			
Amplitude déplacement de surface			
Comportement du front de taille			
Profil déplacement radial en piédroit			
Amplitude déplacement radial en piédroit			
Profil déplacement radial en clé			
Profil contrainte verticale direction longitudinale 0.2D au dessus de la clé.			
Amplitude contrainte verticale direction longitudinale 0.2D au dessus de la clé			

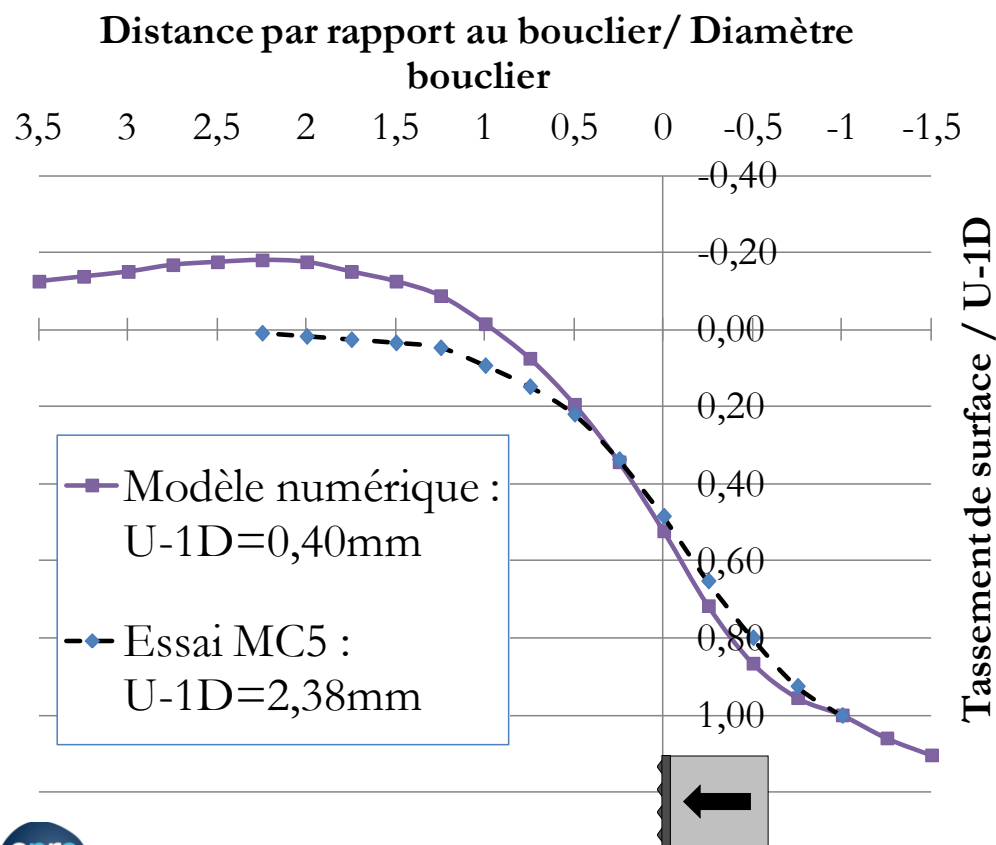
Très mauvais
accord



Très bon
accord

Illustration des résultats obtenus avec la procédure de modélisation 3

- Des profils de tassements de surface au dessus de l'axe similaires, mais d'amplitudes trop faibles.

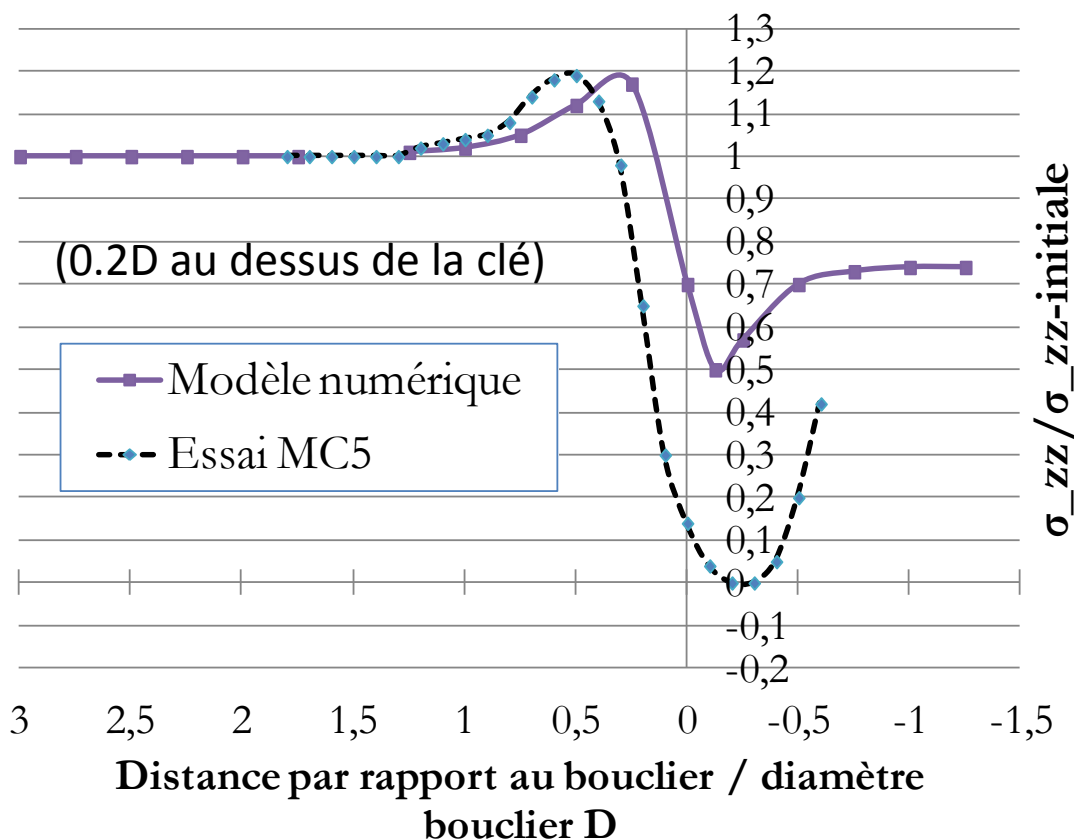


Essai MC5 :
 $P_{fmoy} = 9 \text{ kPa}$

Modélisation numérique
avec la procédure 3 :

$P_{fmoy} = 9 \text{ kPa}$
 $\lambda_{rad} = 100\%$
 $L_{avct} = 5 \text{ cm}$
 $L_{Prad} = 5 \text{ cm}$
 $P_{r_max} = 60 \text{ kPa}$

- Une bonne reproduction des phénomènes d'effets de voûte au dessus de la machine.



Essai MC5 :
 $P_{f\text{moy}}=9\text{kPa}$

Modélisation numérique
avec la procédure 3 :

$P_{f\text{moy}}=9\text{kPa}$
 $\lambda_{\text{rad}}=100\%$
 $L_{\text{avct}}=5\text{cm}$
 $L_{\text{Prad}}=5\text{cm}$
 $P_{r_{\text{max}}}=60\text{kPa}$

- I. Introduction
- II. Régime idéal : analyse de la réponse du sol
- III. Régime idéal : analyse des relations entre grandeurs-machines**
- IV. Régimes extrêmes : analyse de la stabilité du front de taille
- V. Conclusion et perspectives

Valeurs moyennes des grandeurs machine : confrontation modèle réduit / chantier

Grandeur	Facteur d'échelle	Collecteur Rio Bogota	Equivalent mod. réduit	Méto ligne 12	Equivalent mod. réduit	Modèle réduit
Caractéristiques mécaniques et géométriques						
D (m)	=> L*	4.52	0.55 =>L*=0.12	9.17	0.55 => L*=0.06	0.55
D vis extr. (m)	=> L* _{vis}	0.6	0.08 =>L* _{vis} =0.13	0.9	0.08 =>L* _{vis} =0.09	0.08
C (m)	= L*	6 à 11	0.7 à 1.3	13	0.8	1.1
E (MPa)	= L*	3 à 40	0.4 à 4.8	120	7.2	5 à 10
c (kPa)	= L*	5 à 22	0.6 à 2.6	30	1.8	0 à 2kPa
Paramètres de pilotage						
v moyenne avct. (mm/min)	= $\sqrt{L^*}$	100	35	31	7.6	1.8 à 5mm/min
w roue (tr/min)	= $1/\sqrt{L^*}$	nc	nc	1.4	5.7	1.3 à 5tr/min
w vis (tr/min)	= $1/\sqrt{L^*_{vis}}$	28	77	8.6	28.7	8 à 15
Paramètres de contrôle						
Couple roue (daN.m)	= (L*) ⁴	185bars * X=?	?	914000	12	12 à 33
Effort de poussée total (daN)	= (L*) ³	320 000	550	2535000	550	300 à 700 ¹
Pression moy. chambre (kPa)	= L*	120	14	175	10	3 à 20

Chantiers étudiés correspondent aux modélisations sur modèle réduit.

Une vitesse d'avancement un peu trop faible sur modèle réduit

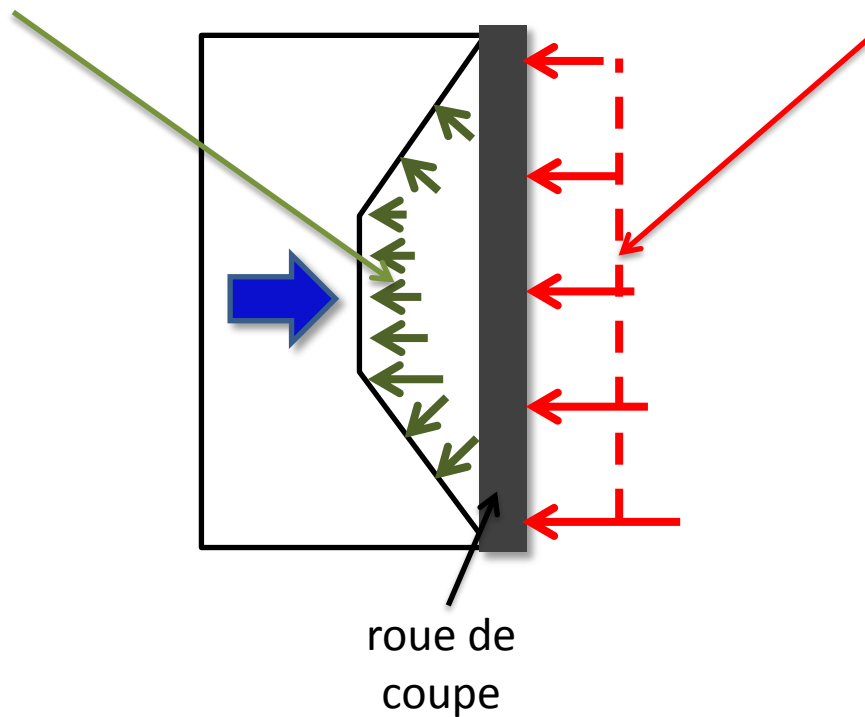
Bon accord des paramètres de contrôle du régime entretenu

Excellente accord avec Modèle réduit ¹	Limite accord avec modèle réduit ²	Désaccord avec modèle réduit ³	Ne sait pas
---	---	---	-------------

Effet d'écran exercé par la roue de coupe

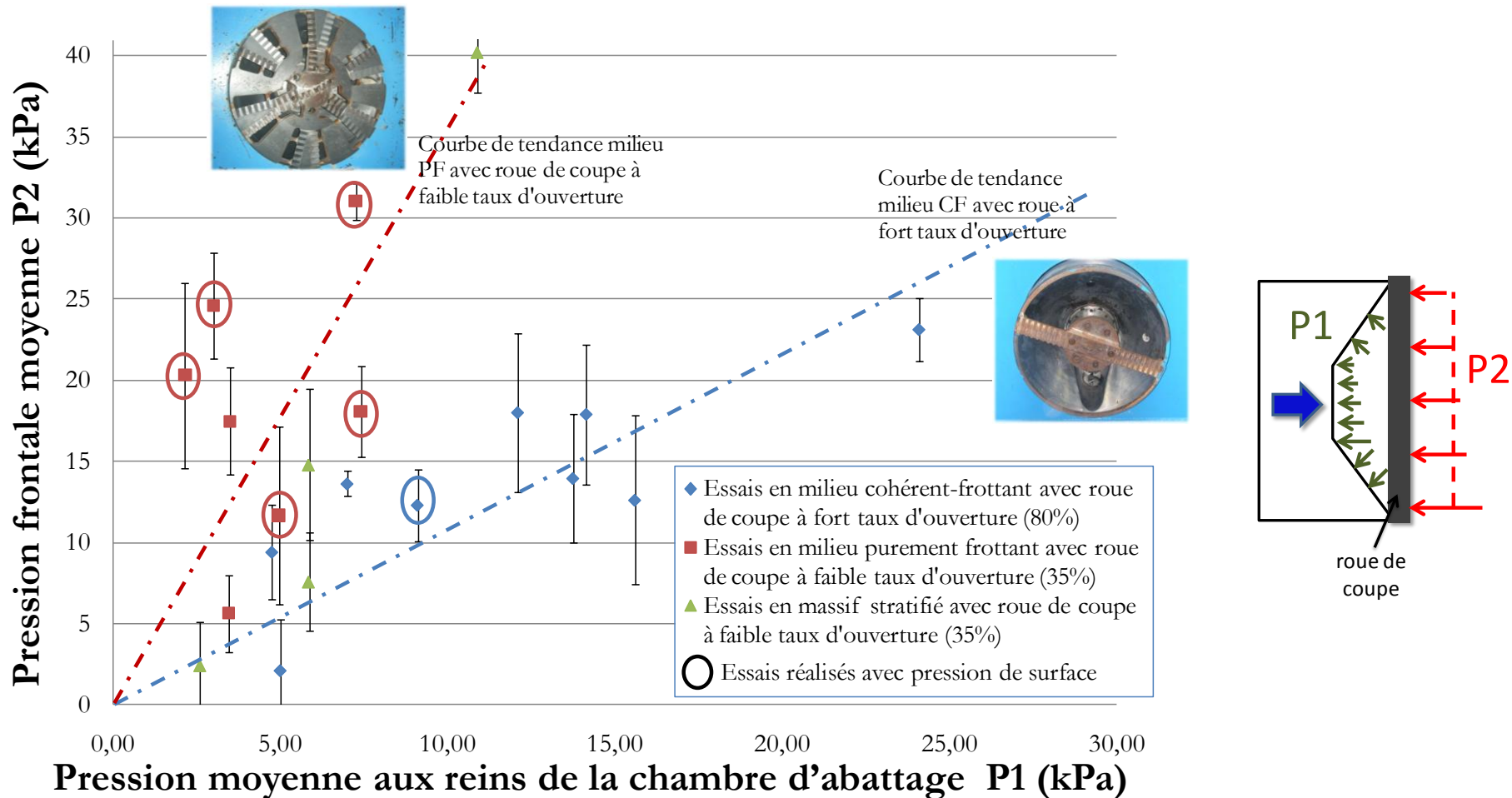
Pression mesurée dans la chambre d'abattage (P1)
=> Pilotage machine

Pression frontale appliquée (P2)
=> Stabilité du front



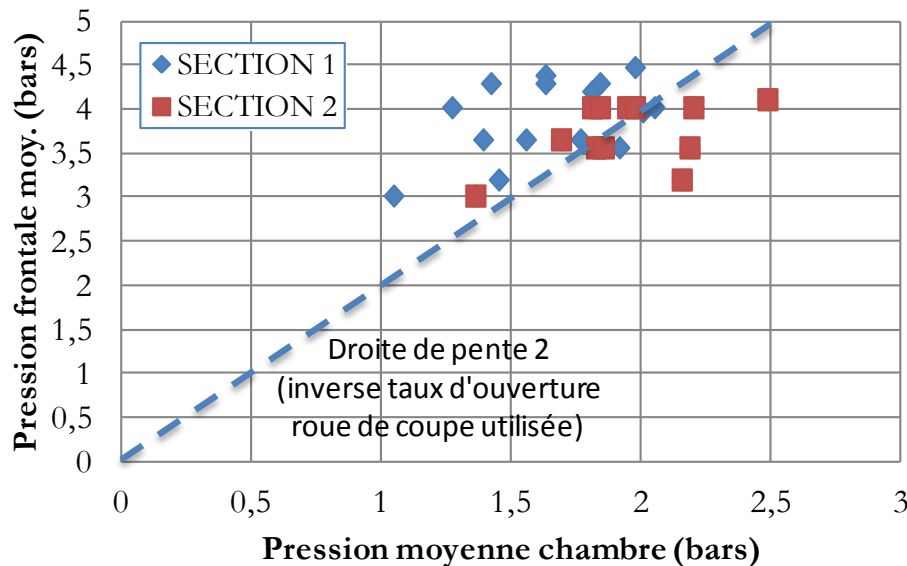
Effet d'écran exercé par la roue de coupe

- Seule une part de la pression exercée au front de taille égale au taux d'ouverture de la roue de coupe est transmise aux parois de la chambre d'abattage.



Effet d'écran exercé par la roue de coupe

- Seule une part de la pression exercée au front de taille égale au taux d'ouverture de la roue de coupe est transmise aux parois de la chambre d'abattage.
- Un résultat confirmé par les analyses menées sur le chantier ligne 12.

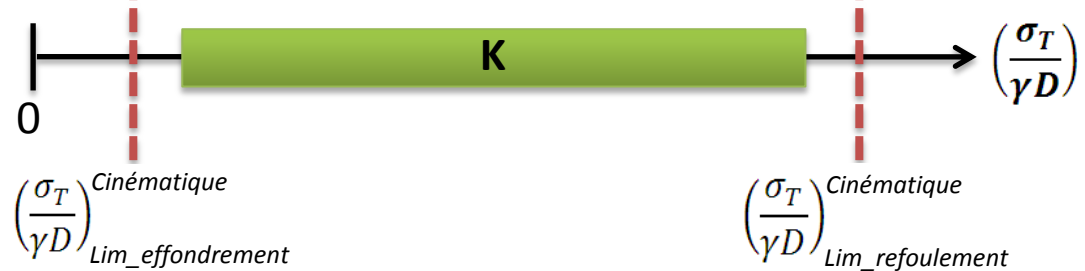
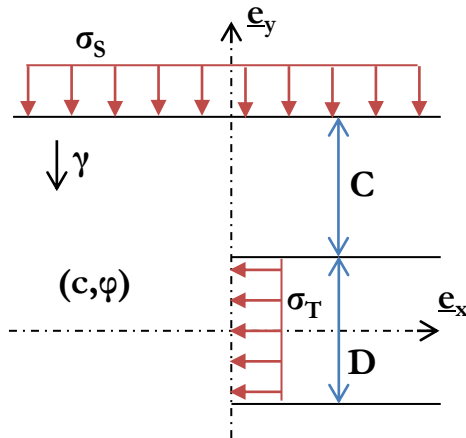


Roue de coupe du tunnelier utilisé lors du prolongement de la ligne 12 du métro parisien (taux d'ouverture = 50%)

- I. Introduction
- II. Régime idéal : analyse de la réponse du sol
- III. Régime idéal : analyse des relations entre grandeurs-machines
- IV. Régimes extrêmes : analyse de la stabilité du front de taille**
- V. Conclusion et perspective

Modèles analytiques considérés

- Principe de l'approche cinématique du calcul à la rupture (Salençon, 1983)



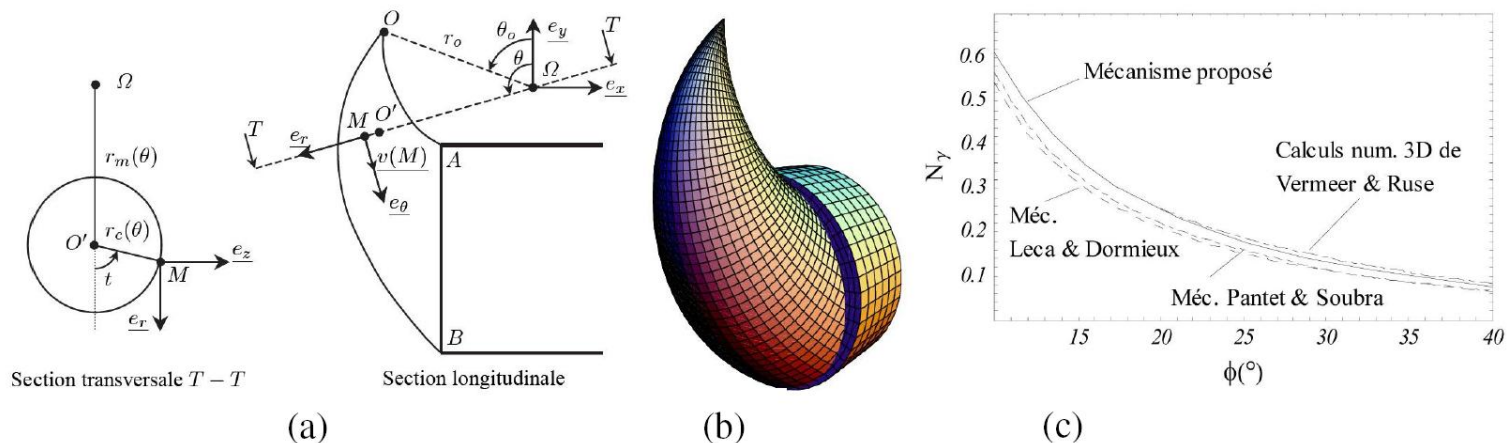
- Détermination de mécanismes de rupture cinématiquement admissible ;
- Utilisation de la contraposée du principe des puissances virtuelles :

$$\forall \underline{Q}, \exists \underline{v} \text{ C.A. } \mathbf{P}_{\text{ext}}(\underline{Q}, \underline{v}) > \mathbf{P}_{\text{int}}^{\text{sup}}(\underline{v}) \quad \Rightarrow \underline{Q} \notin \mathbf{K}$$

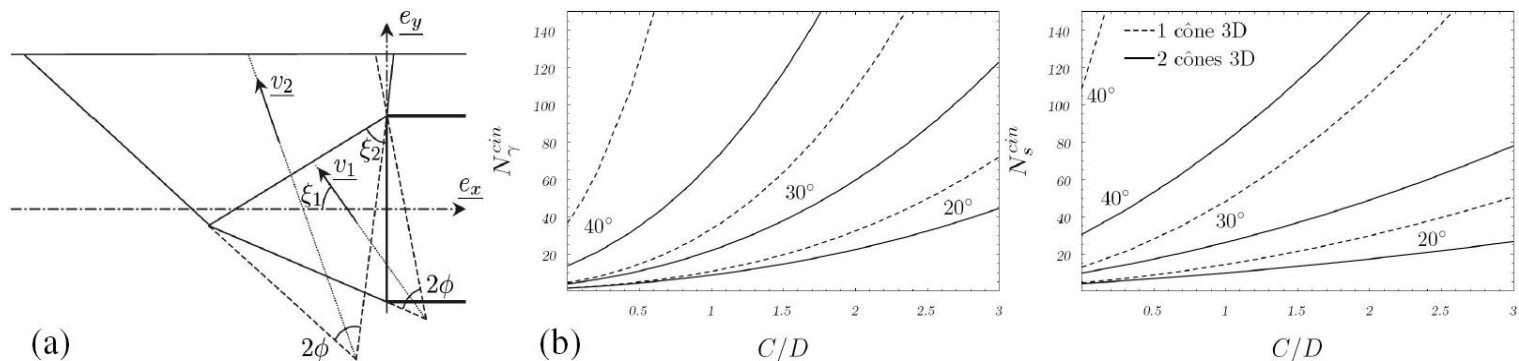
➡ Une évaluation « par l'extérieur » du domaine K.

Modèles analytiques considérés

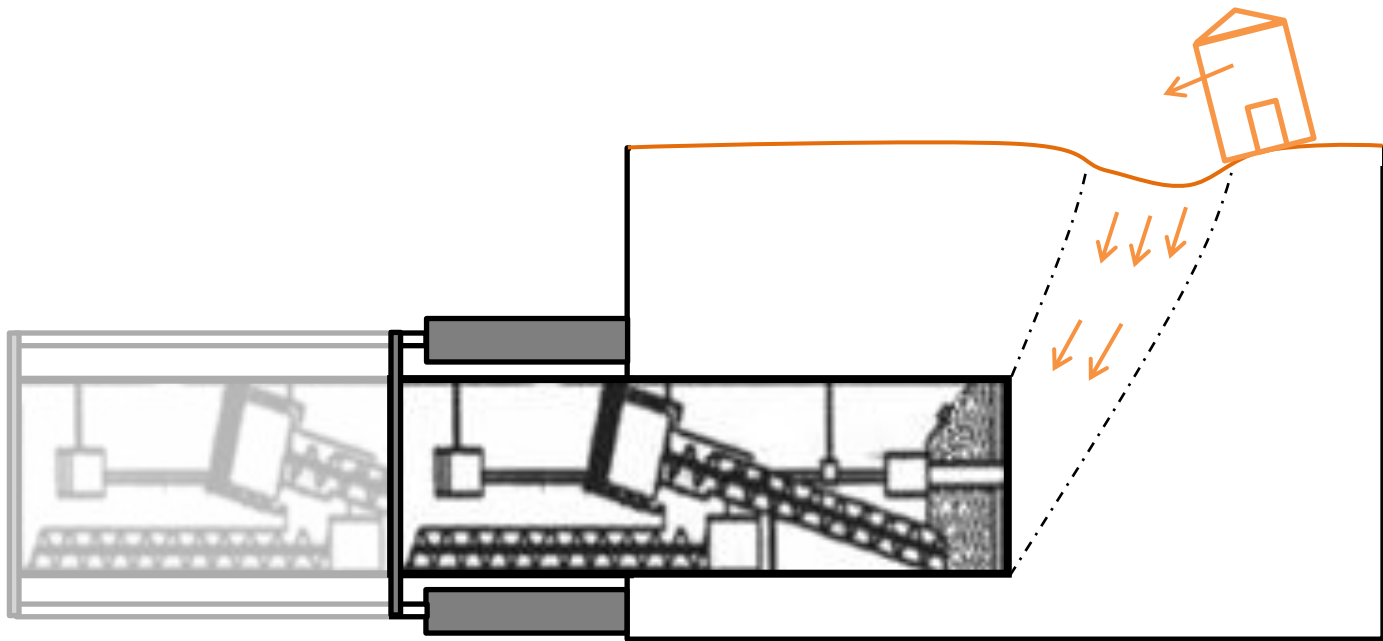
- Principe de l'approche cinématique du calcul à la rupture (Salençon, 1983)
- Mécanisme 3D de rupture par effondrement du front considéré (Subrin, 2002)



- Mécanisme 3D de rupture par refoulement du front considéré (Subrin, 2002)

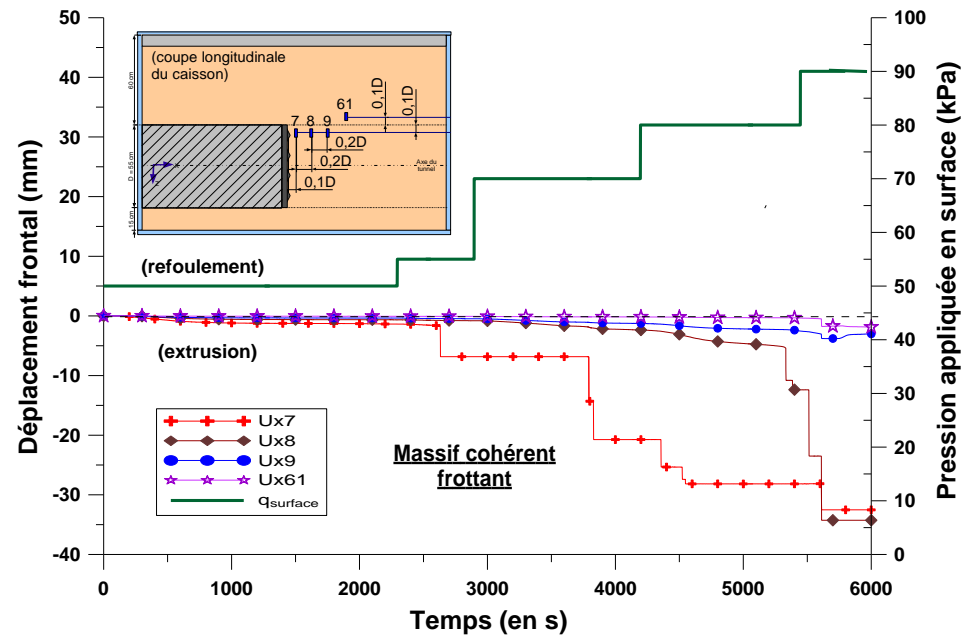
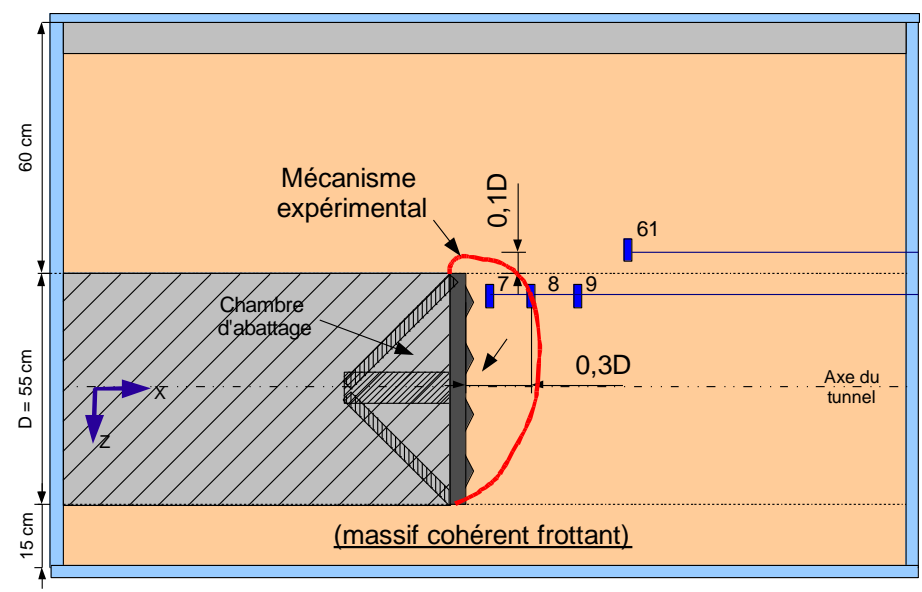


Mécanismes de rupture par effondrement en massif homogène



Mécanismes de rupture par effondrement en massif homogène

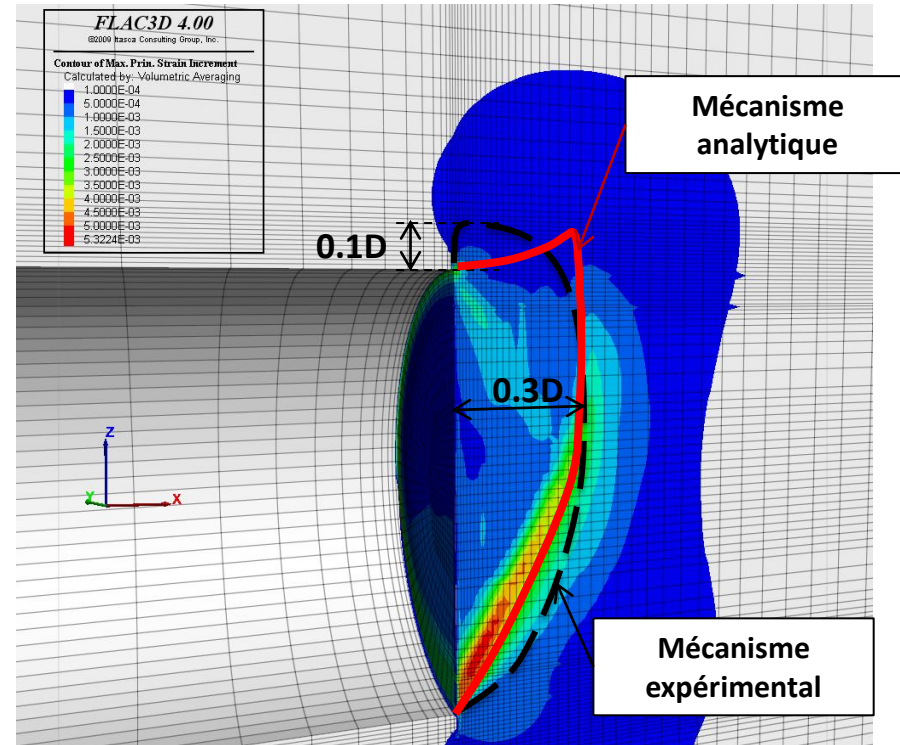
- Cas du massif cohérent frottant



Mécanismes de rupture par effondrement en massif homogène

Cas du massif cohérent frottant

Essai	c (kPa)	q _{ini} (kPa)	Observations expérimentales		Stabilité théorique		
			Front stable chambre vide ?	q _{max} (kPa)	Front stable pour q _{max} ?	σ _T ^{théo} (kPa)	Front 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 (massif cohérent frottant)	85	NON	0	Limite stabilité
MC8	0,5	0	NON	--	--	0	Limite Stabilité

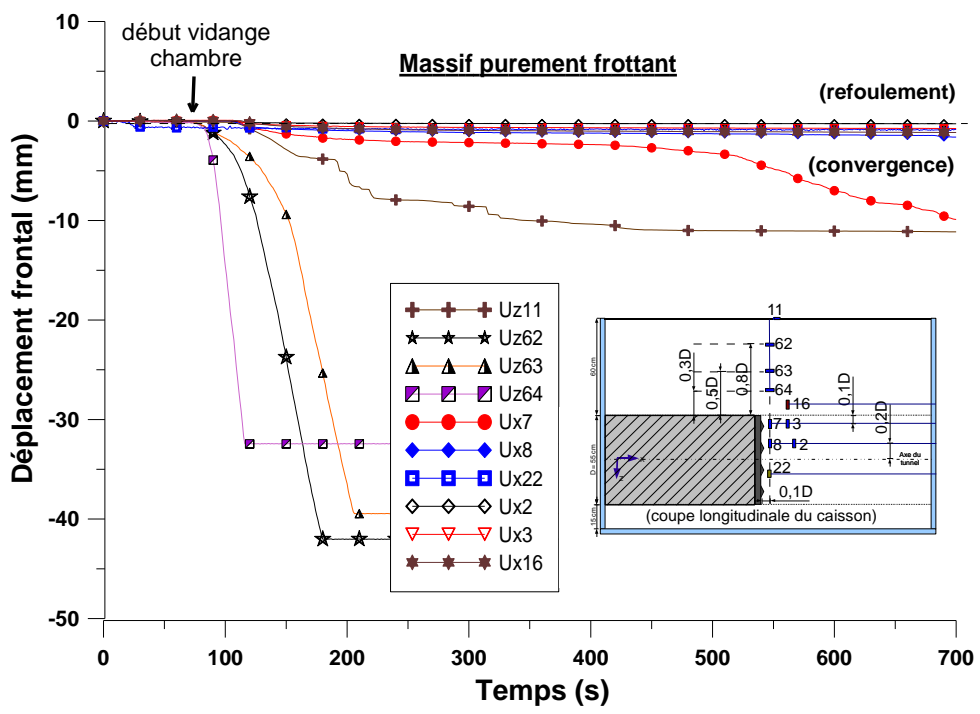
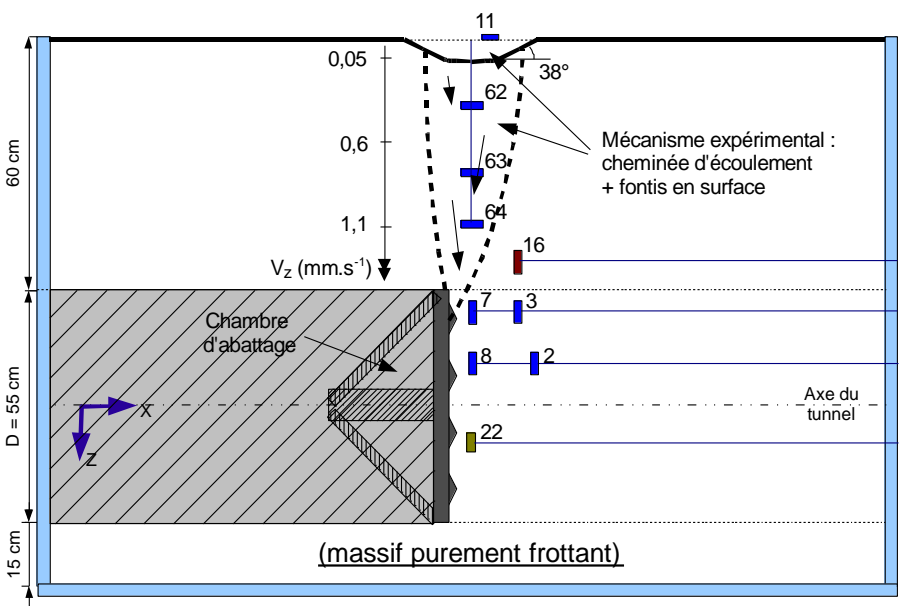


➡ Une cinématique en bon accord avec les modèles théoriques.

➡ Un bon accord également en termes de pressions limites.

Mécanismes de rupture par effondrement en massif homogène

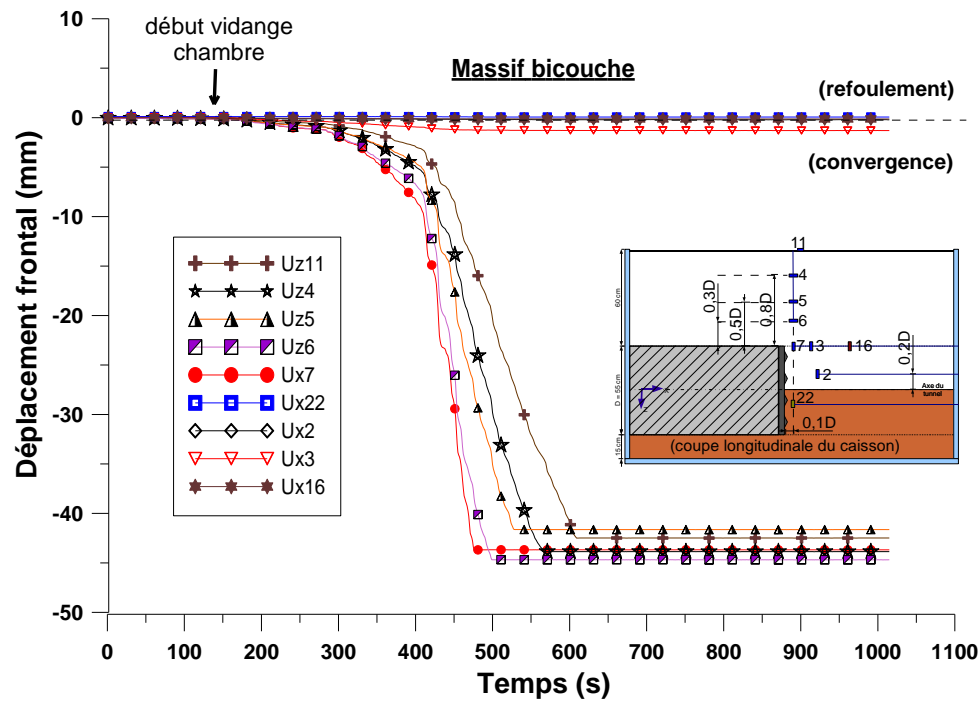
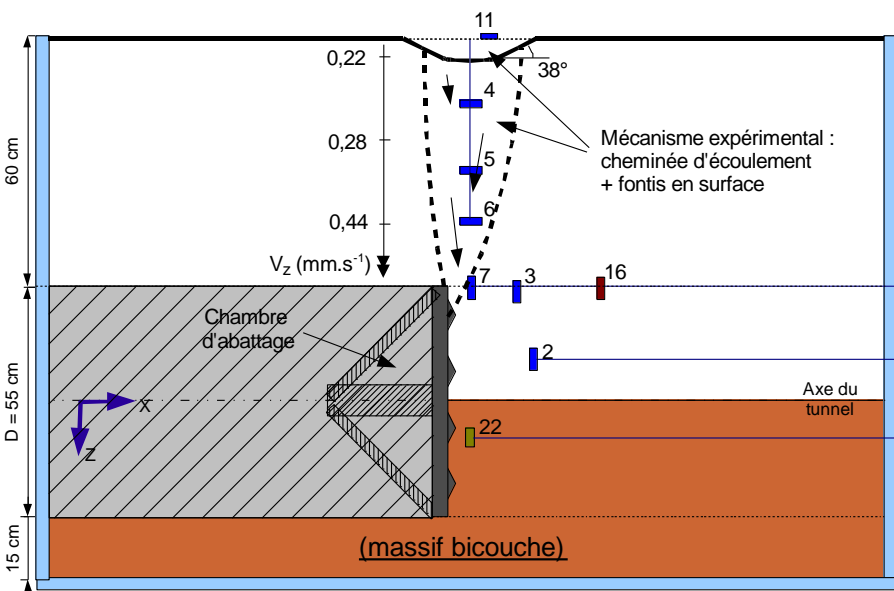
Cas du massif purement frottant :



➔ Des modèles théoriques aux conditions aux limites inadaptées : seule l'extrémité supérieure du front doit être déconfinée.

Mécanismes de rupture par effondrement en massif stratifié

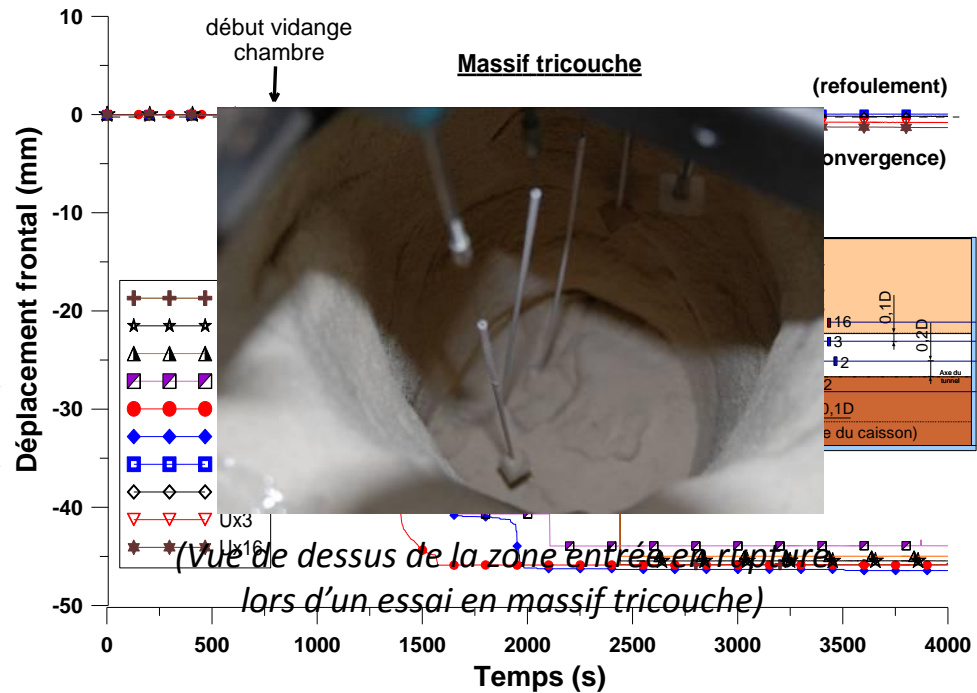
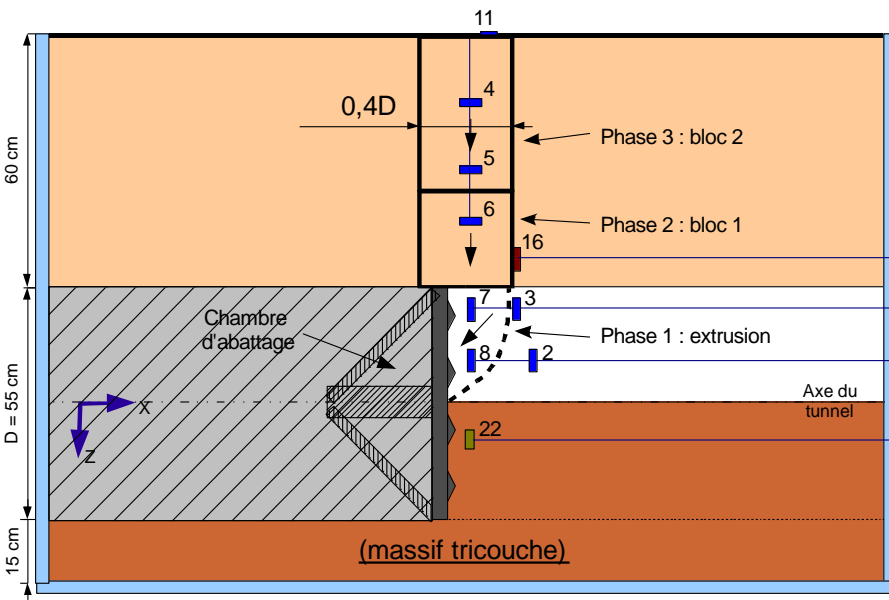
Cas du massif stratifié bicouche :



➔ Un mécanisme de rupture similaire à celui observé en massif homogène purement frottant.

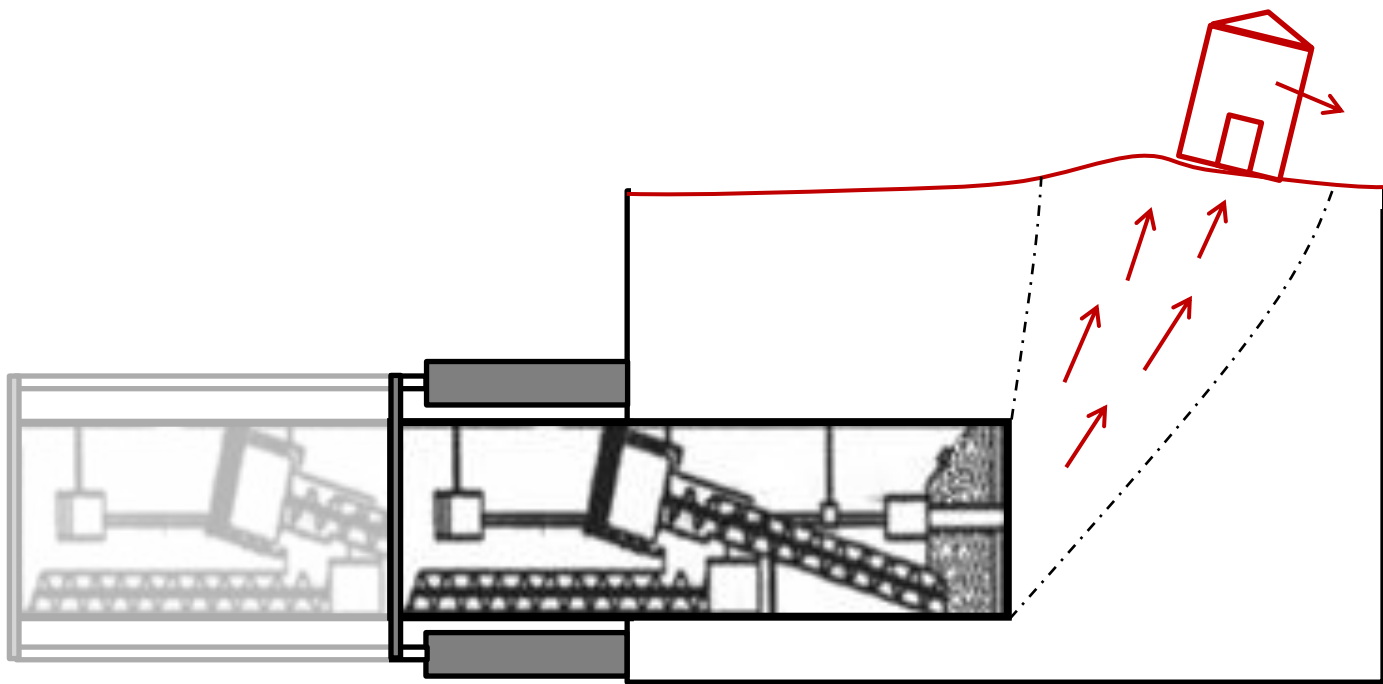
Mécanismes de rupture par effondrement en massif stratifié

Cas du massif stratifié tricouche :

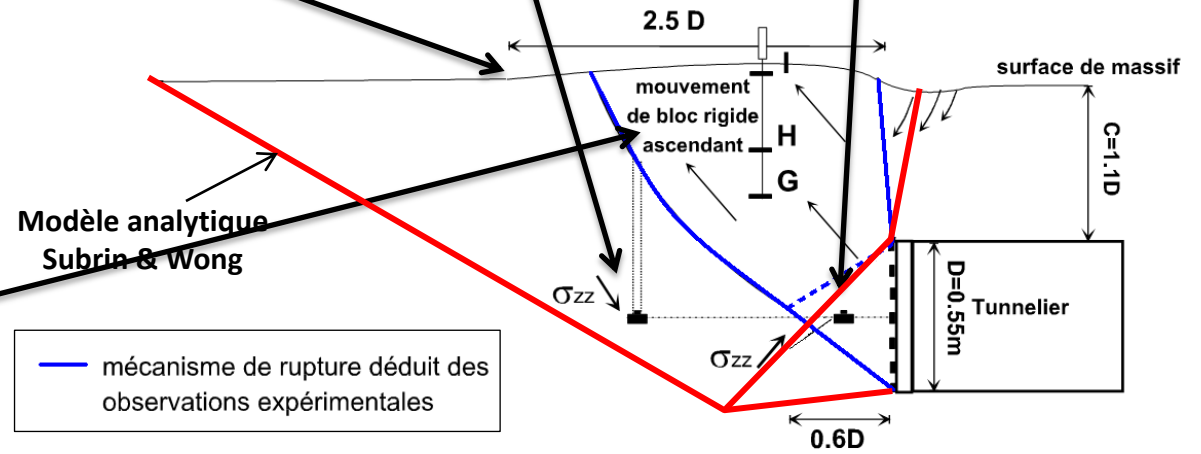
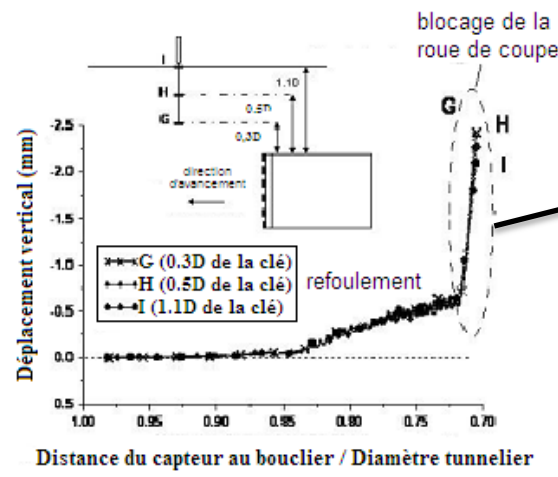
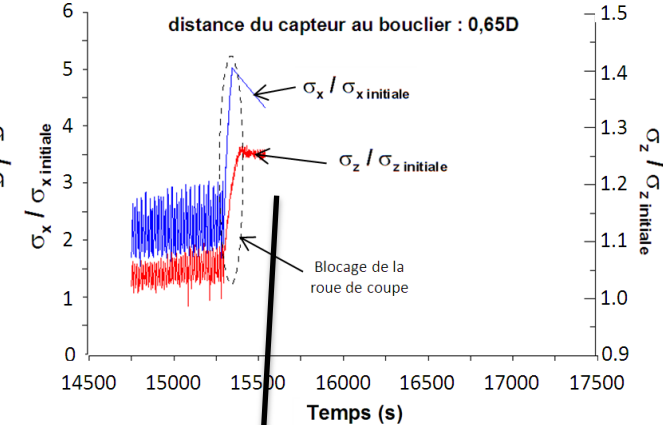
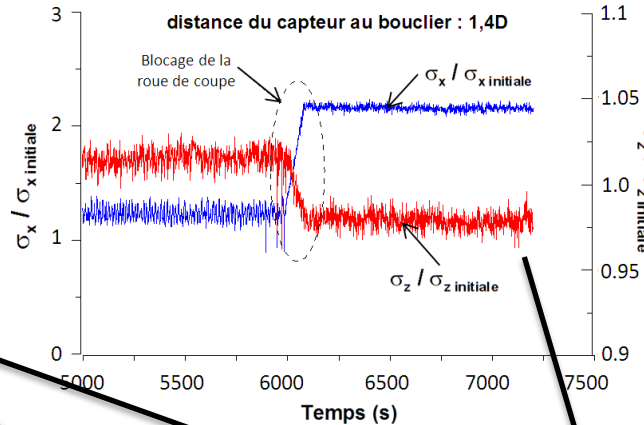
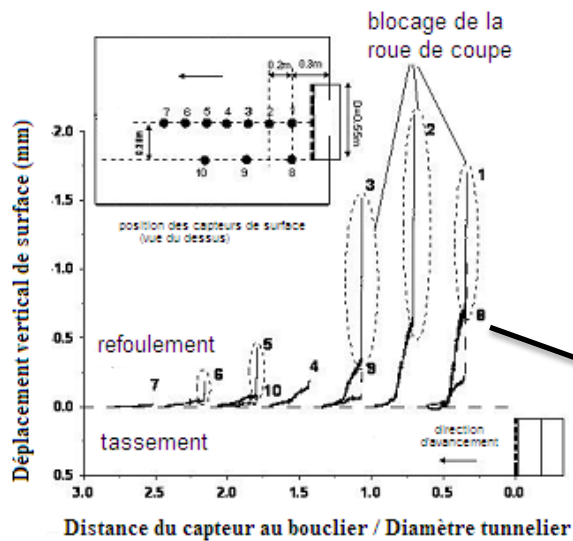


➔ Un mécanisme de rupture original : une extrusion dans la couche purement frottante source d'une sollicitation de type "trappe".

Mécanisme de rupture par refoulement du front de taille



Mécanisme de rupture par refoulement du front de taille



Pressions limites de rupture par refoulement du front de taille

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

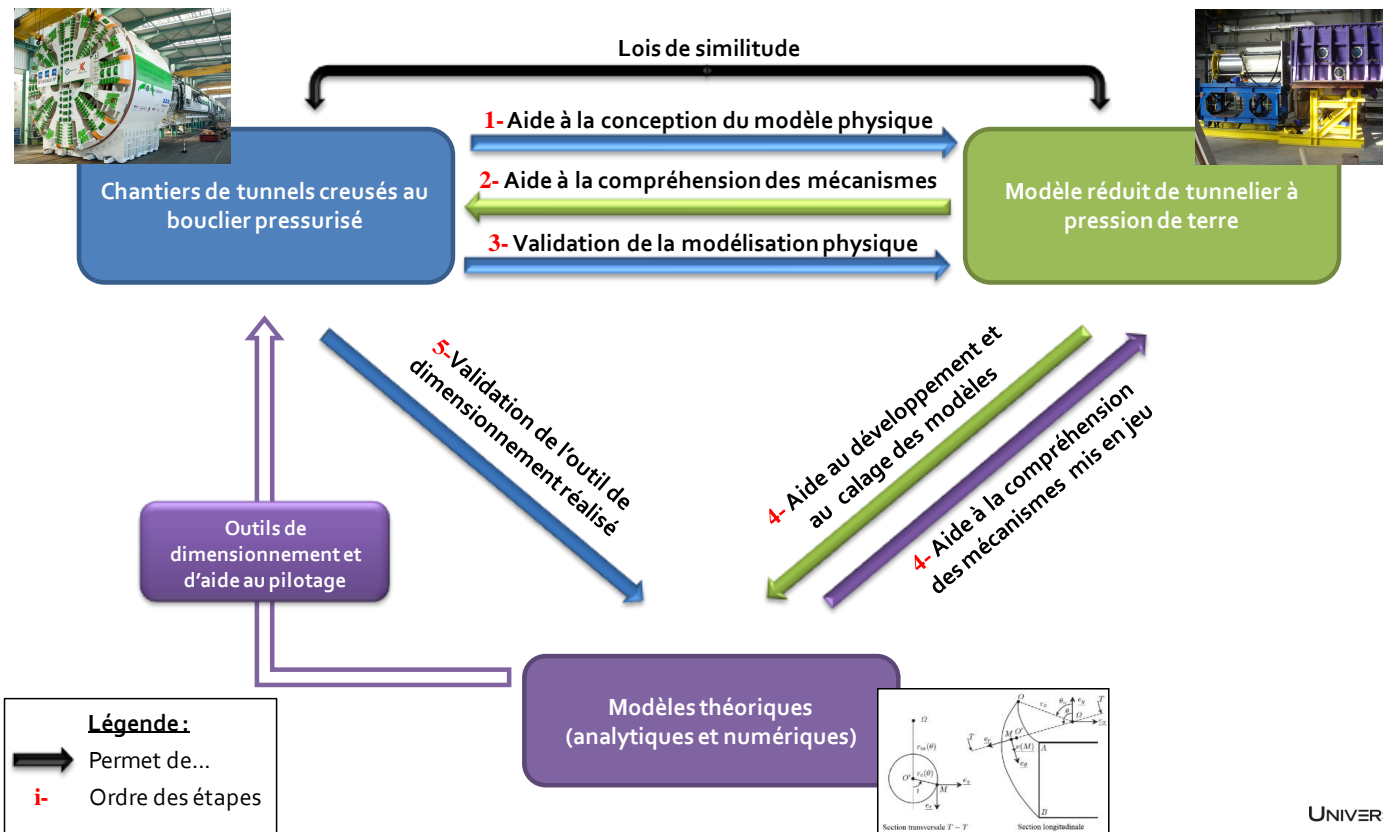
Nota : Critère retenu pour la pression frontale limite expérimentale : apparition du premier mouvement de refoulement en surface.

➡ Des modèles analytiques inadaptés à la détermination d'une pression limite de rupture par refoulement : préférer des approches en déplacement (modélisations numériques).

- I. Introduction
- II. Régime idéal : comportement du sol
- III. Régime idéal : grandeurs-machines
- IV. Stabilité du front de taille
- V. Conclusion et perspectives**

Conclusion

- Une contribution à la compréhension de la phénoménologie du creusement pressurisé des tunnels et aux développements d'outils adaptés.
- Une démarche tripolaire.



Conclusion

- Une contribution à la compréhension de la phénoménologie du creusement pressurisé des tunnels et aux développements d'outils adaptés.
- Une démarche tripolaire.
- De nouveaux éléments selon trois champs de recherche :

Régime idéal : comportement du sol

- Influences (P_f , c') sur les champs de déplacements et de contraintes autour du tunnelier.
+ extension sols stratifiés.
- Procédure de modélisation numérique du régime idéal.

Régime idéal : grandeurs-machines

- Rôle d'effet d'écran exercé par la roue de coupe.
- Eléments de validation de la modélisation physique par le chantier.

Régime extrêmes : stabilité du front

- Capacités et limites des modèles analytiques existants.
- Mécanismes de rupture par effondrement en massifs stratifiés

Publications

Revue internationale de rang A :

Berthoz N., Branque D., Subrin D., Wong H., Humbert E. (2012a). *Face failure in homogeneous and stratified soft ground: theoretical and experimental approaches on 1g EPBS reduced scale model.* Tunneling and Underground Space Technology (Accepted).

Berthoz N., Branque D., Wong H., Subrin D., Humbert E. (2012b). *Stress measure in partially saturated soils and its application to physical modeling.* European Journal of Environmental and Civil Engineering (under review)

Conférence internationale à comité de sélection :

Subrin D., Branque D., Berthoz N., Wong H. (2009). *Kinematic 3D approaches to evaluate TBM face stability: comparison with experimental laboratory observations,* Proceedings of the 2nd International Conference on computational Methods in Tunneling, Bochum, Germany, pp. 801-808.

Berthoz N., Branque D., Wong H., Généreux G., Subrin D., Humbert E. (2011a). *Tunneling of stratified soft ground: experimental study on 1g reduced scale model,* Proceedings of the 7th international symposium on geotechnical aspects of underground construction in soft ground, Roma, Italy.

Berthoz N., Branque D., Wong H., Subrin D., Humbert E., (2011b). *Le creusement de tunnels en massifs stratifiés : étude expérimentale sur modèle réduit non centrifugé.* Actes du Congrès international de l'AFTES, Lyon, France.

Conférences nationales :

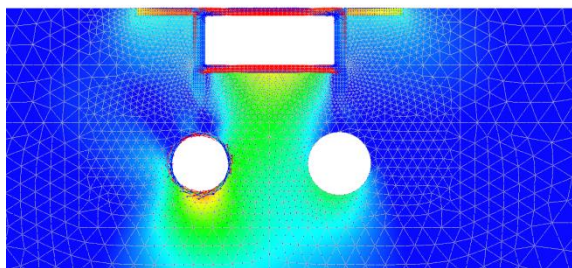
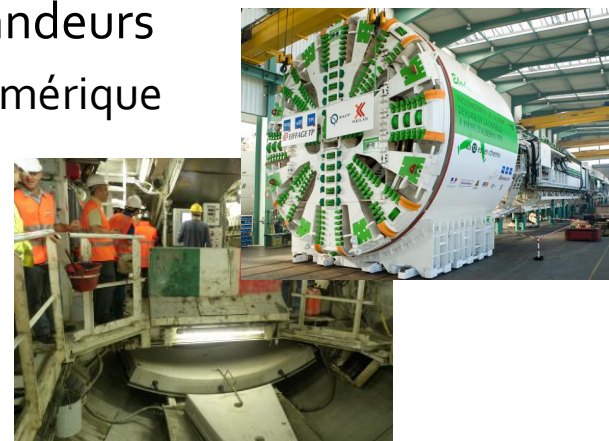
Berthoz N., Branque D., Wong H., Subrin D. (2010a). *Evolution des champs de contraintes et déplacements autour d'un tunnelier à front pressurisé,* Actes des JNGG, Grenoble, France, pp. 779-786.

Berthoz N., Branque D., Wong H., Subrin D. (2010b). *Stabilité frontale des tunnels creusés au bouclier à front pressurisé : Approches expérimentales et théoriques,* Actes de CIGOS, Paris, France.

Berthoz N., Branque D., Wong H., Subrin D., (2011c). *Evolution des champs de contraintes et déplacements autour d'un tunnelier à front pressurisé,* Actes des RIDAD, Vaulx-en-Velin, France.

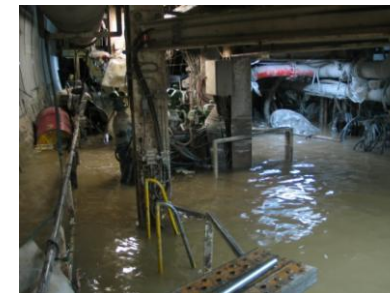
Perspectives

- Modélisation numérique du problème en vraies grandeurs
 - Mise en œuvre de la procédure de modélisation numérique du régime idéal en vraies grandeurs.
 - Extension du modèle numérique à la totalité du processus de creusement.
 - Validation par le biais de données de chantier.



- Analyse de l'influence du creusement au tunnelier sur le comportement du bâti, de ses fondations ou sur des réseaux enterrés.

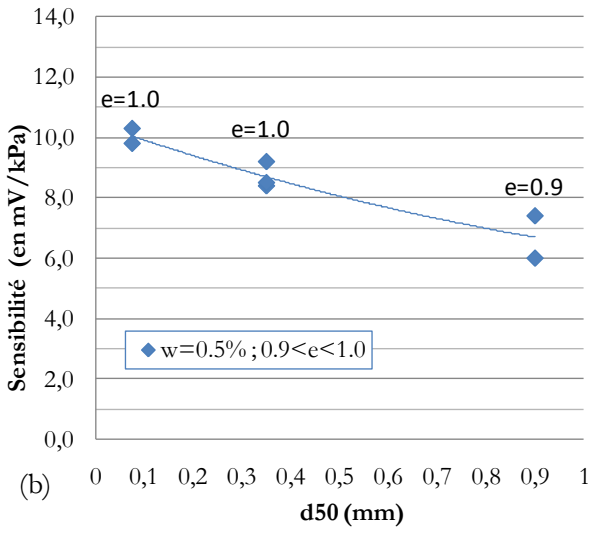
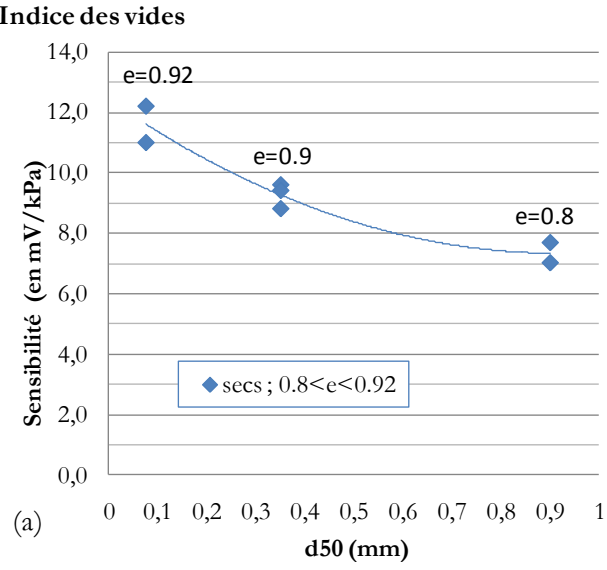
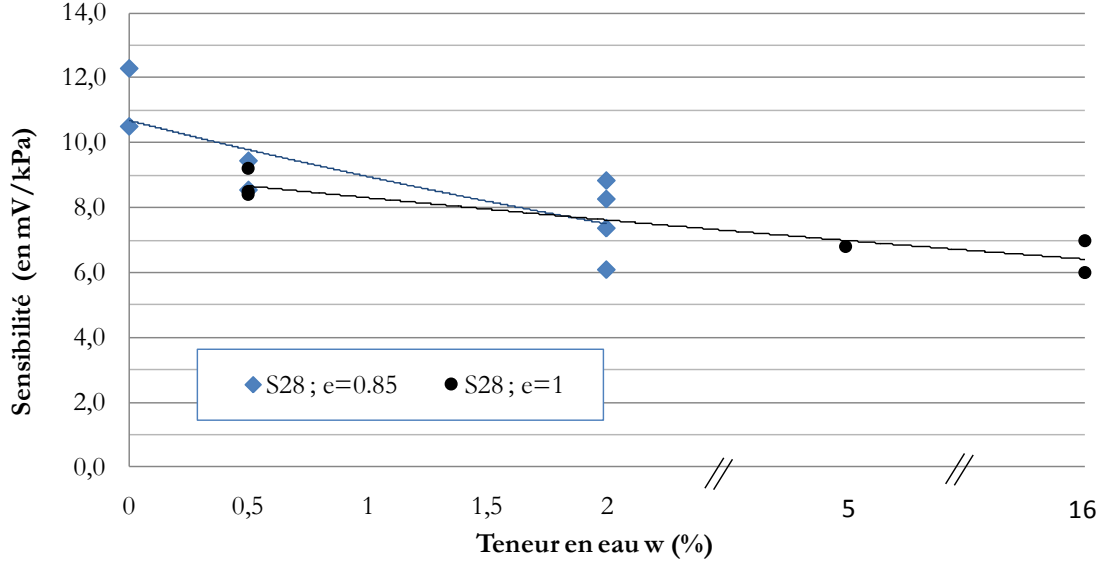
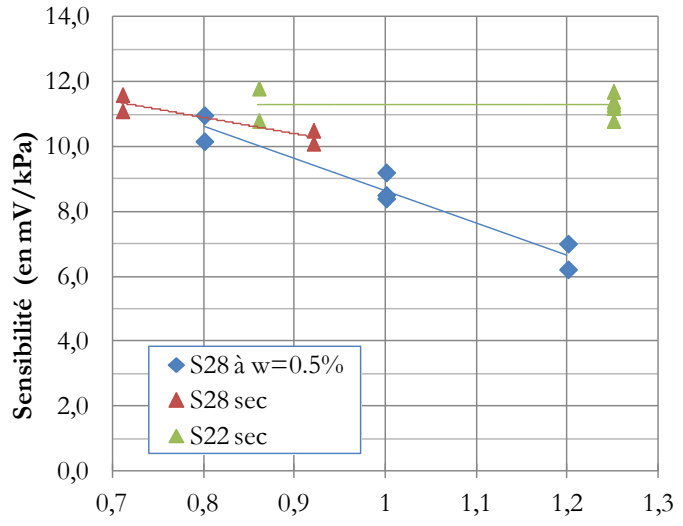
- Extension au cas du creusement sous nappe



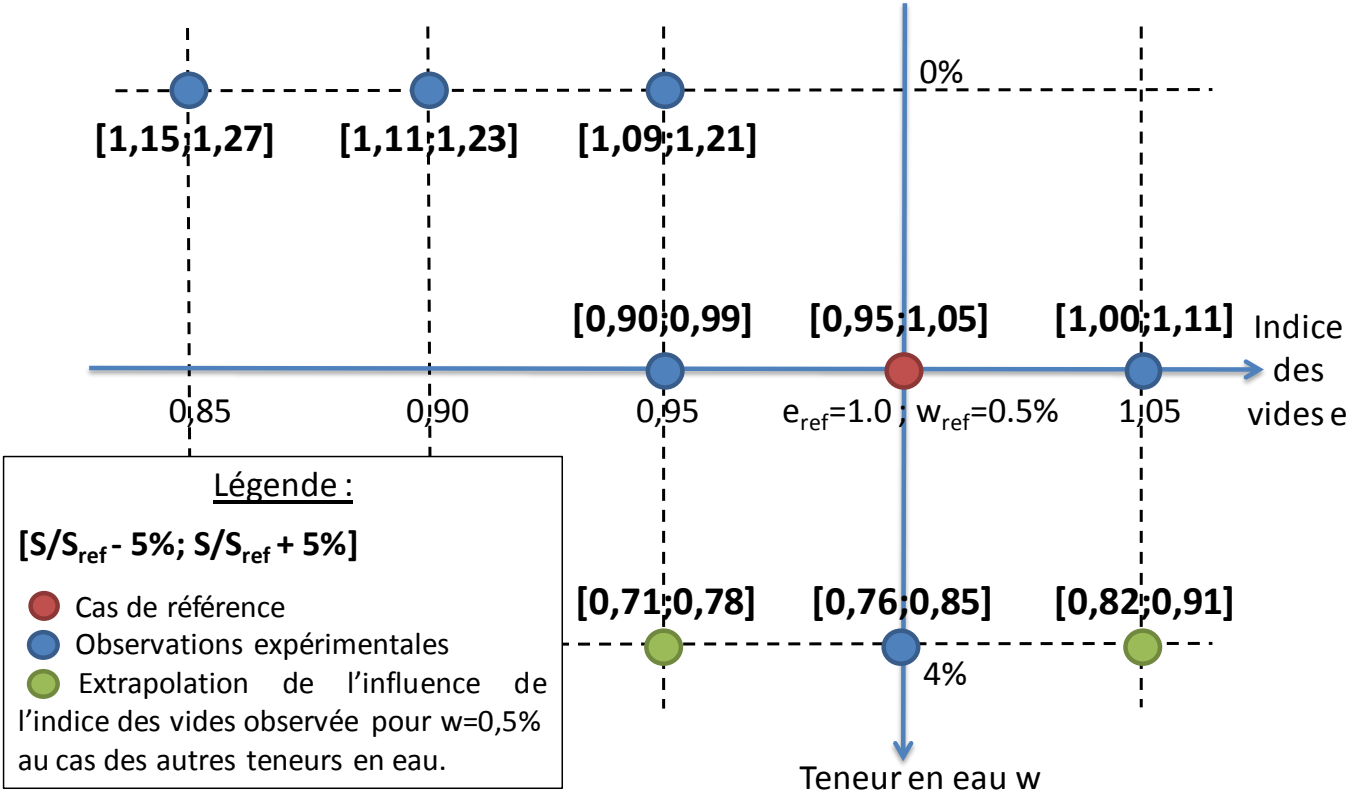
Exemple de tunnelier noyé (Présentation mastère tunnel G. Fontanille, NFM Technologies, 2011).

Merci de votre attention

Etude consacrée à la mesure des contraintes dans les sols



Etude consacrée à la mesure des contraintes dans les sols



Choix du matériau modèle

- Vers la transposition du problème en vraies grandeurs : les lois de similitude
 - Notion de facteur d'échelle (Mandel (1962)²):

$$U^* = \frac{U(m)}{U(p)}$$

← Grandeur physique du modèle réduit
 ← Grandeur physique du prototype

- Exemple des équations indéfinies de la dynamique :

$$\begin{aligned}
 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij(m)}}{\partial x_{j(m)}} + \rho_{(m)} g_{i(m)} &= \rho_{(m)} \frac{d^2 \xi_{i(m)}}{dt_{(m)}^2} & \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij(p)}}{\partial x_{j(p)}} + \rho_{(p)} g_{i(p)} &= \rho_{(p)} \frac{d^2 \xi_{i(p)}}{dt_{(p)}^2} \\
 & & & \Downarrow \\
 & = & = & \sum_{j=1}^3 \frac{L^*}{\sigma^*} \frac{\partial \sigma_{ij(m)}}{\partial x_{j(m)}} + \frac{\rho_{(m)} g_{i(m)}}{\rho^* g^*} = \frac{\rho_{(m)}}{\rho^*} \frac{(T^*)^2}{\xi^*} \frac{d^2 \xi_{i(m)}}{dT_{(m)}^2} \\
 & & & \Downarrow \\
 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij(m)}}{\partial x_{j(m)}} + \frac{\sigma^*}{L^* \rho^* g^*} \rho_{(m)} g_{i(m)} &= \frac{\sigma^* (T^*)^2}{\rho^* \xi^* L^*} \rho_{(m)} \frac{d^2 \xi_{i(m)}}{dT_{(m)}^2}
 \end{aligned}$$

² Mandel J. (1962), *Essais sur modèle réduits en mécanique des terrains. Etude des conditions de similitude*, Revue d'industrie minière, n°9, pp. 611-620.

Choix du matériau modèle

- Equation indéfinie de mouvement

$$\frac{\sigma^*}{L^* \rho^* g^*} = 1 \quad \Longrightarrow \quad \sigma^* = L^* \quad (\text{car } \rho^* \approx 1 \text{ et } g^* = 1)$$

- Conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad \Longrightarrow \quad \xi^* = L^* \quad \Longrightarrow \quad \varepsilon^* = 1$$

- Similitude du comportement élastique :

$$\text{Loi de Hooke} \quad \Longrightarrow \quad E^* = \sigma^* = L^* \quad \text{et} \quad \nu^* = 1$$

- Similitude du comportement plastique :

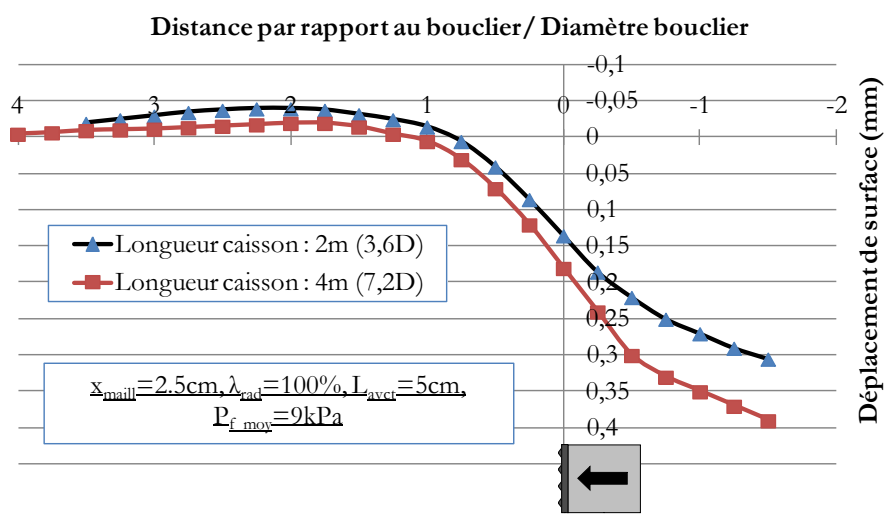
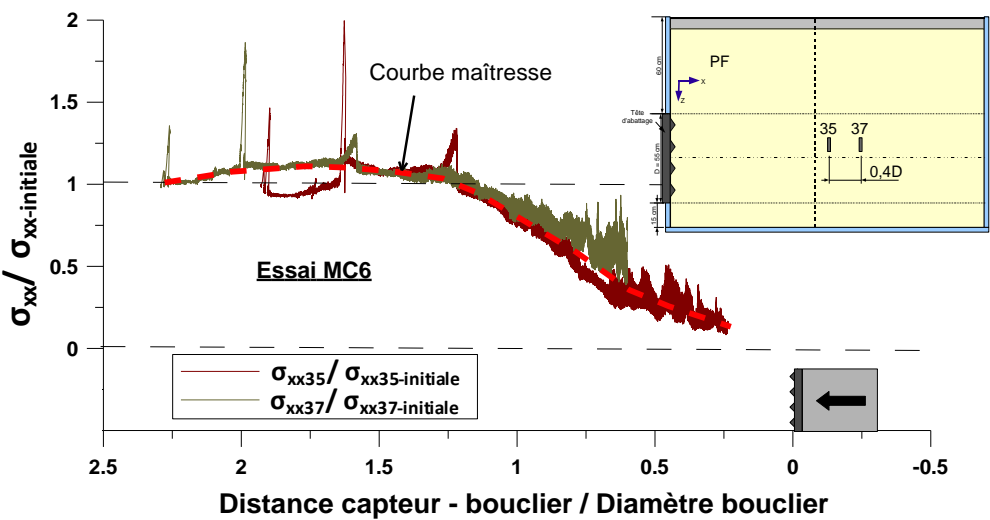
$$\text{Critère de Mohr-Coulomb} \quad \Longrightarrow \quad c^* = \sigma^* = L^* \quad \text{et} \quad \varphi^* = \psi^* = 1$$

- Similitude des déformations volumique :

$$\text{Même distance à la droite d'état critique (Scott (1989)³)} \quad \Longrightarrow \quad e^* > 1$$

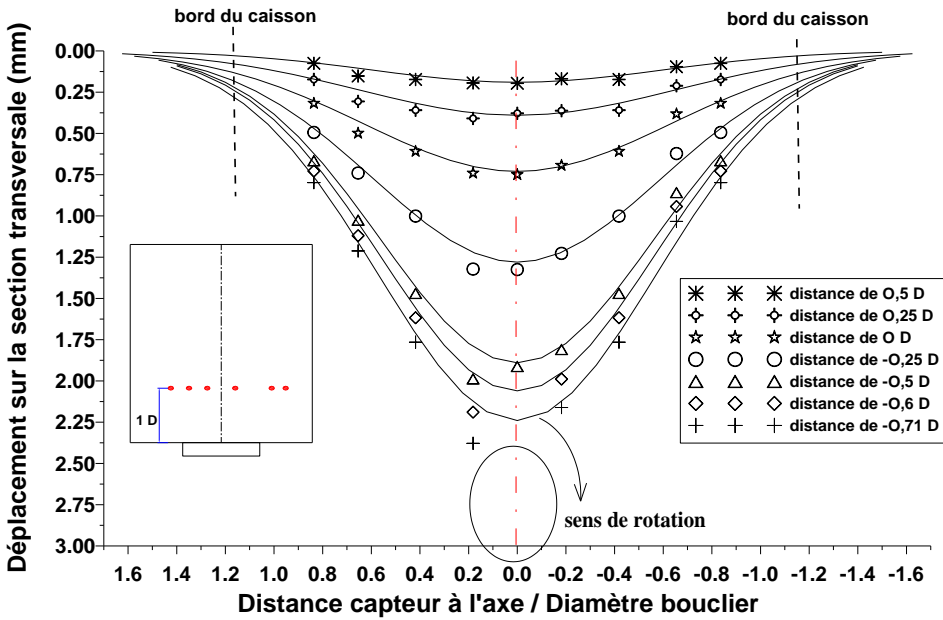
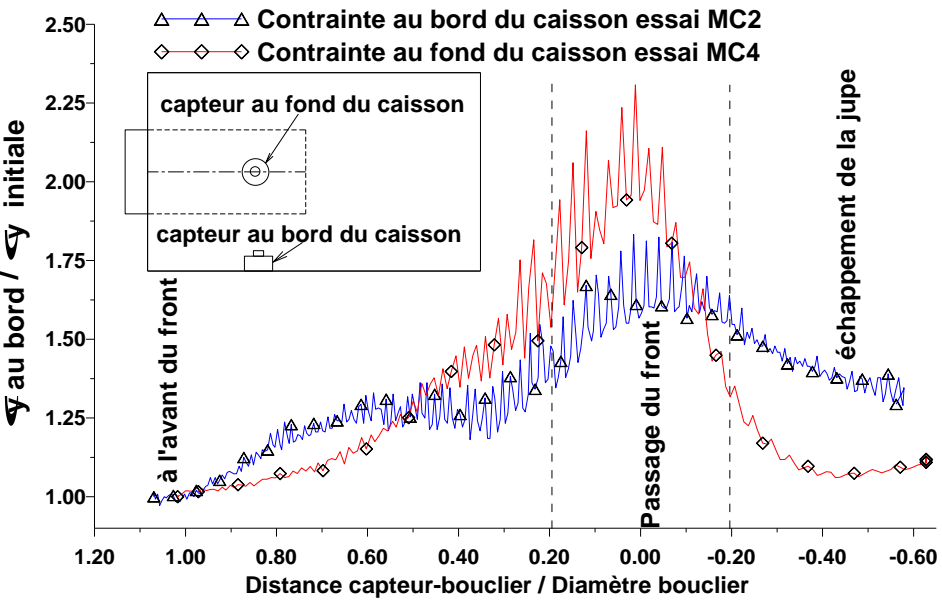
Effets de bord sur le modèle réduit

- Influence du bord frontal du caisson : FAIBLE
 - Faible augmentation de la contrainte horizontale 2D à l'avant
 - Stationnarité des phénomènes
 - Confirmation grâce à la modélisation numérique



Effets de bord sur le modèle réduit

- Influence du bord frontal du caisson : FAIBLE
- Influence des bords latéraux
 - EXISTE: Cf. mesures contrainte horizontale sur les parois (Doan, 2007) + cuvettes transverses de tassements interceptant les bords



Effets de bord sur le modèle réduit

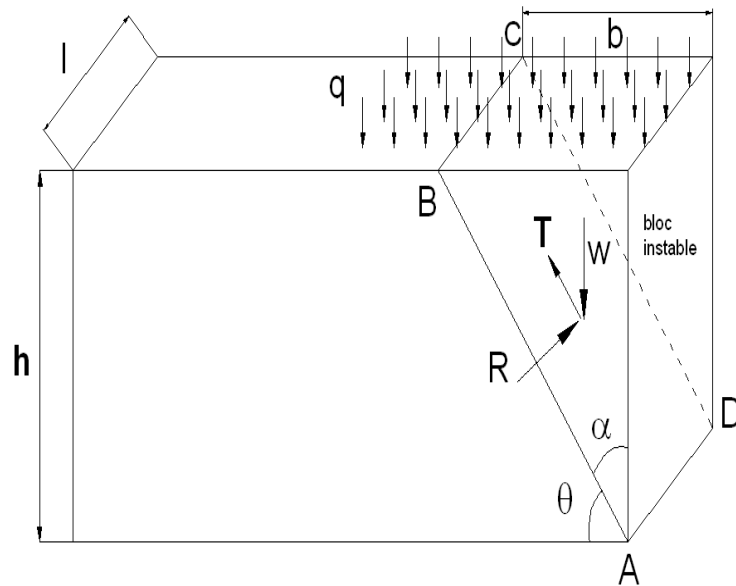
- Influence du bord frontal du caisson : FAIBLE
- Influence des bords latéraux
 - EXISTE: Cf. mesures contrainte horizontale sur les parois (Doan, 2007) + cuvettes transverses de tassements interceptant les bords
 - FAIBLE AMPLITUDE : cuvettes transverses en bon accord avec le chantier

Auteur	Expression proposée	i (D)	Type de sol
Attewell [1977], O'Reilly [1982], Rankin [1987], Sagiyama [1999] ,	$i = 0.5 H$	0.70	argiles
Chapeau [1991]	$i = 0.45H$	0.63	argiles
Clough et Schmidt [1981]	$i = 0.5H^{0.8}D^{0.2}$	0.66	argiles
Al Abram [1998]	$i = 0.1H+0.5D$	0.64	Sol analogique
Atkinson et Potts [1977]	$i = 0.25 (1.5C+D)$	0.59	Sable dense avec surcharge
Tunnelier-ENTPE	$i = 0.11C+0.5D$	0.63	Sol cohérent-frotant

Tableau VI-2 : Estimation de "i" à partir des relations empiriques disponibles dans la littérature pour des sols cohérents (Doan, 2007).

Essai de stabilité de tranchée

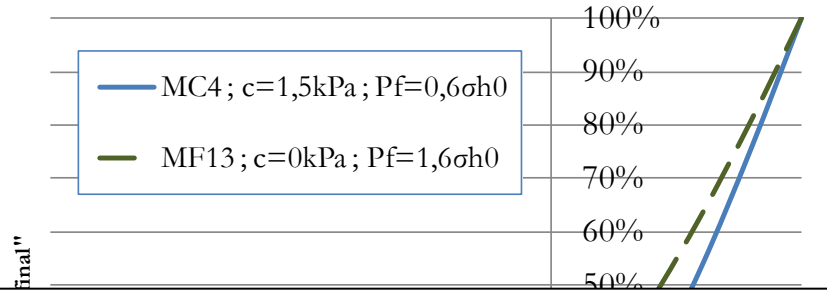
➔ Détermination de la cohésion des matériaux sols modèles



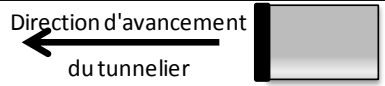
$$c' \geq \left(\frac{\gamma h}{2} + q \right) \left(\sin \alpha - \tan \varphi \cdot \sin \alpha \cdot \tan \alpha \right) \cos \alpha$$
$$\varphi = \frac{\pi}{2} - 2\alpha \quad (\text{Théorie de Rankine})$$



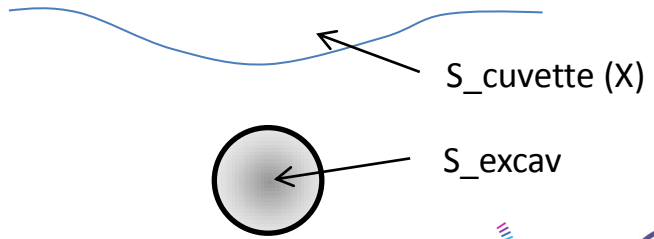
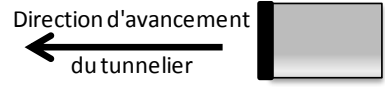
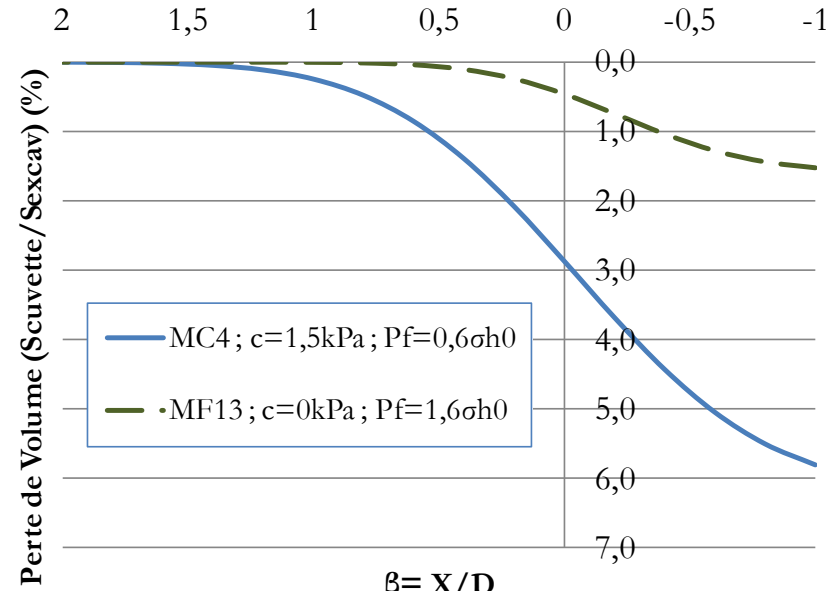
Estimation des pertes de volume en surface



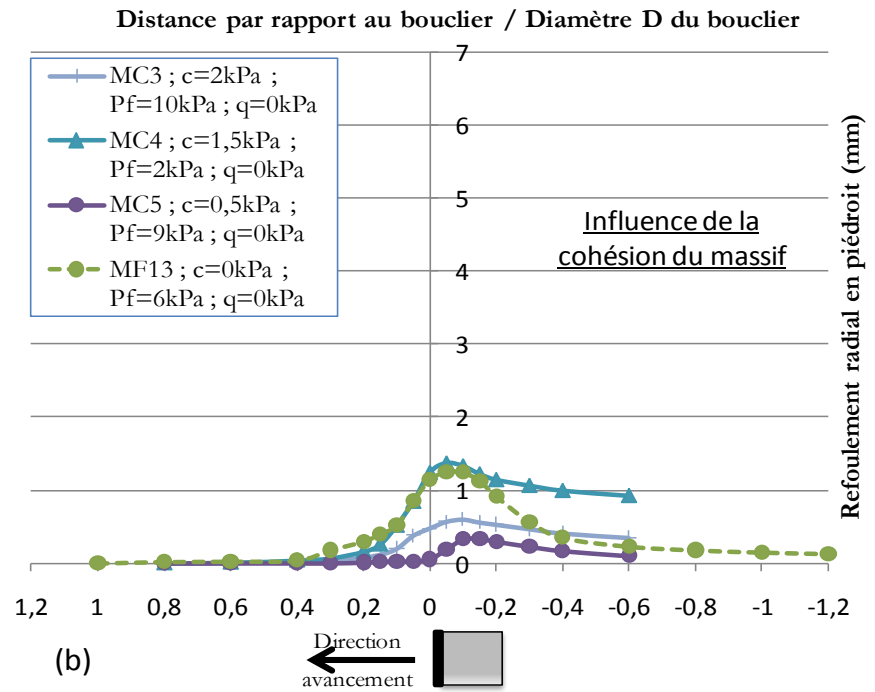
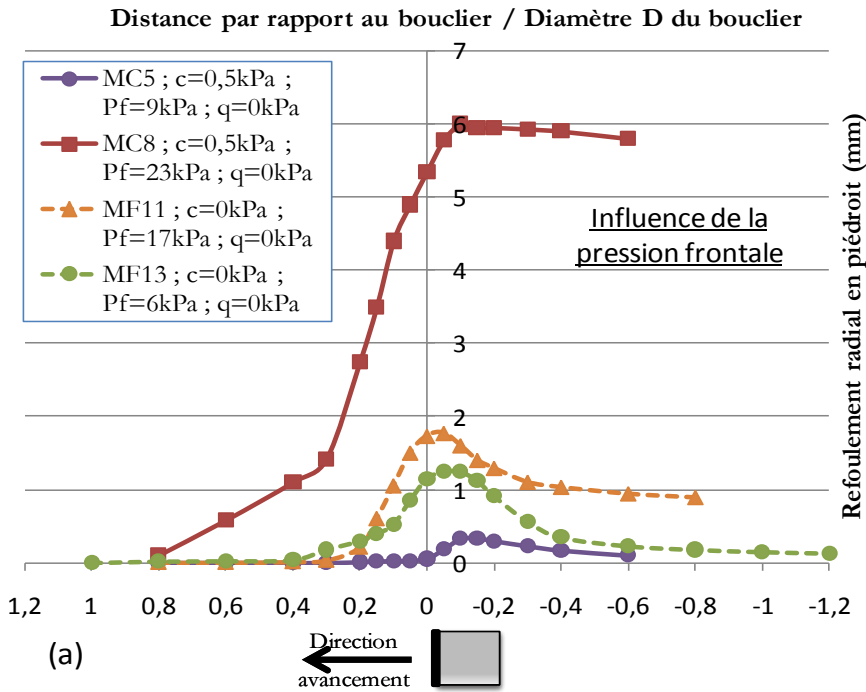
Dans la pratique, l'ordre de grandeur de l'ensemble de ces pertes de volume est évalué à 0.5% en terrains sableux, 1 à 2% dans les terrains argileux, et 2 à 4% dans des horizons mixtes, d'après les retours d'expériences de Mair & Taylor (1997), cité par Möller & Vermeer (2008).



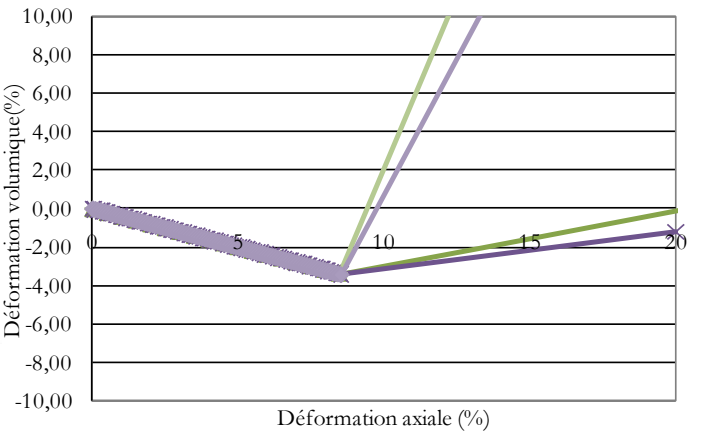
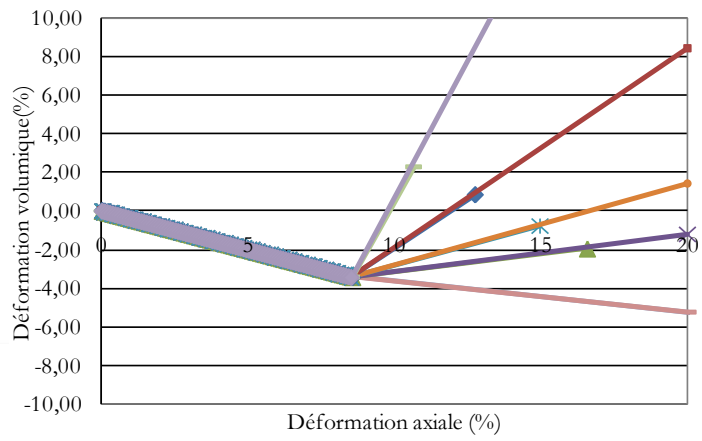
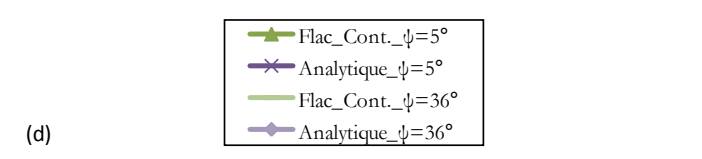
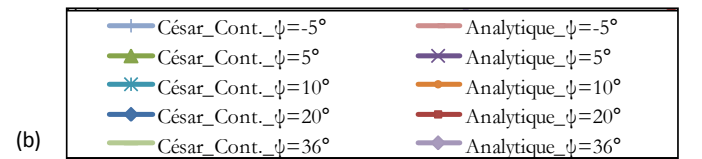
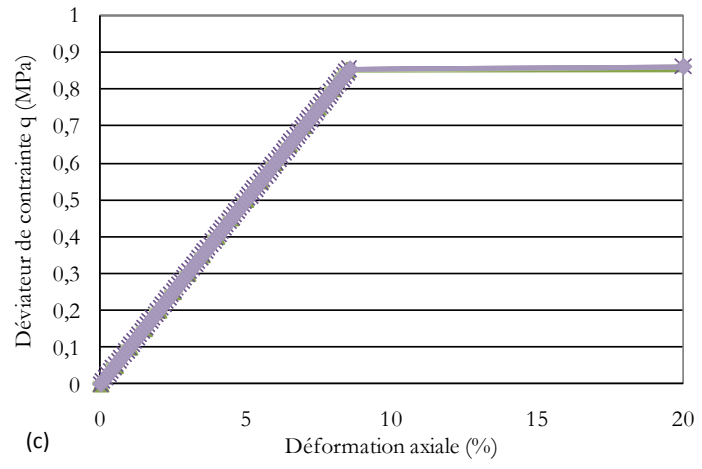
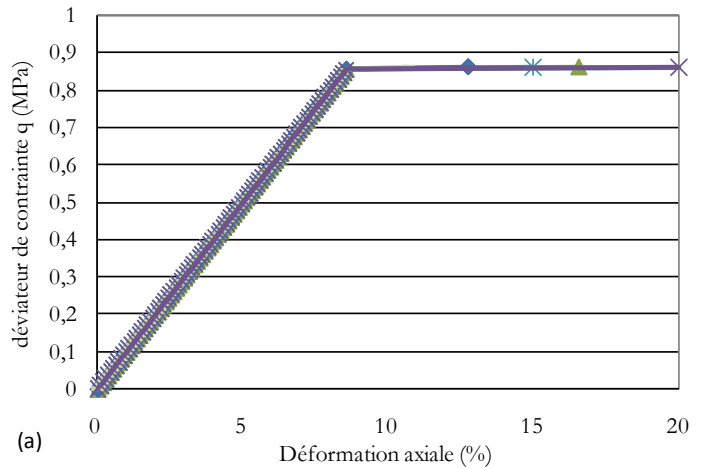
$$V_{a \text{ dim}}(\beta) = \int_{Y=-\infty}^{+\infty} \int_{X=\beta}^{+\infty} \left(\frac{U_{-1D}}{D} \left(\frac{1}{I_X \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_X^{+\infty} e^{-\frac{(X_1-\alpha)^2}{2 \cdot I_X^2}} \cdot dX_1 \right) e^{-\frac{Y^2}{2 \cdot I_Y^2}} \right) dX \cdot dY$$



Etude paramétrique menée sur les déplacements radiaux en piédroits



Modélisation numérique d'un essai triaxial (pilotage en contraintes)



Modélisation numérique d'un essai triaxial (pilotage en déplacements/vitesse)

