

EVOLUTION DES CHAMPS DE CONTRAINTES ET DEPLACEMENTS AUTOUR D'UN TUNNELIER A FRONT PRESSURISE

EVOLUTION OF STRESSES AND DISPLACEMENTS FIELDS AROUND A PRESSURIZED SHIELD TUNNEL BORING MACHINE

Nicolas Berthoz¹, Denis BRANQUE¹, 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

RÉSUMÉ – Dans le cas du creusement de tunnel au tunnelier à pression de terre, l'évolution des champs de contraintes et déplacements internes, leur lien avec les déplacements de surface, ainsi que les effets de voûte tridimensionnels apparaissant autour du bouclier sont analysés à partir d'essais sur modèle réduit de laboratoire.

ABSTRACT – In the case of tunnel excavation using earth-pressure balanced shields, the evolution of internal stresses and displacements, in relation with surface settlements as well as three dimensional arching effects appearing around the shield are analyzed based on laboratory tests on a reduced-scale physical model.

1 Introduction

Les ouvrages souterrains construits en sites urbains sont pour la plupart creusés dans des conditions difficiles, tant du point de vue géotechnique (terrains meubles et aquifères) qu'environnemental. Ces projets nécessitent de façon croissante l'emploi de tunneliers équipés de bouclier à front pressurisé pour garantir la stabilité de l'ouvrage en cours d'excavation et limiter les tassements en surface. L'utilisation de tels procédés complexes, en constante évolution technologique, posent alors aux concepteurs des problèmes nouveaux, tant du point de vue de la compréhension des phénomènes d'interaction sol-structure liés à la construction de ces ouvrages que du développement d'outils de calcul adaptés aux situations rencontrées.

Dans ce contexte, l'estimation des pressions à appliquer au front de taille dans le cas de terrains de faible tenue ainsi que la prévision des tassements dans le cas de tunnels creusés au tunnelier ont fait l'objet de différents travaux expérimentaux sur modèles physiques de laboratoire 1g ou centrifugés (Megui & al, 2007). De son côté, le Département Génie Civil de l'ENTPE a développé un modèle réduit original de tunnelier à pression de terre permettant de recréer sous gravité terrestre les différentes phases du processus de creusement à pression de terre. Les objectifs visés sont d'analyser et de comprendre les mécanismes mis en jeu dans ce mode de creusement, d'apporter des éléments d'aide au pilotage sur chantier, d'aider au développement d'outils théoriques et numériques de dimensionnement des tunnels.

Cet article présente différents résultats obtenus avec ce dispositif. Ceux ci concernent principalement le comportement d'interaction sol – machine dans le cas de régimes de creusement idéaux pour lesquels la stabilité du front de taille est vérifiée.

2 Le modèle réduit de tunnelier à pression de terre de l'ENTPE

Le modèle réduit de tunnelier à pression de terre de l'ENTPE (échelle comprise entre 1/4 et 1/20^{ème}) permet de reproduire les principales caractéristiques de ce mode de creusement : excavation du sol par la roue de coupe (diamètre : 0,55m), confinement du front de taille par le matériau excavé et contenu dans la chambre d'abattage, soutènement radial provisoire par la jupe métallique du tunnelier (Cf. figure 1). Il dispose d'une instrumentation embarquée très proche de celle disponible sur les tunneliers réels : mesure des couples sur la roue de coupe et la vis d'extraction, des efforts de poussée et des pressions dans la chambre d'abattage, du débit d'extraction et de la vitesse d'avancement.

Les massifs de sol modèle étudiés (dimensions : 2m x 1,3m x 1,3m) sont confectionnés à partir de sable Hostun S28 sec (massifs purement frottants) ou faiblement humide (massifs cohérents frottants). Dans ce dernier cas, la cohésion est fonction de la teneur en eau et de la densité du sable. Le matériau modèle et son mode de mise en place (épandage régulier à hauteur de chute nulle pour les massifs purement frottants et compactage par couches pour les massifs cohérents frottants) ont été définis en tenant compte des conditions de similitude (similitude partielle définie par Mandel (1962)) et décrits dans Doan (2007). En raison du faible état de contrainte régnant sur maquette, le matériau modèle est mis en place dans un état lâche afin de tendre vers une similitude du comportement volumique (Scott, 1989). Des contrôles de densité et de teneur en eau sont effectués lors de la confection du massif. Ce dernier est par ailleurs instrumenté en capteurs de déplacements de surface, déplacements internes et contraintes totales. Une pression q peut être appliquée en surface du massif par le biais de chambres à air.

Les caractéristiques des essais analysés dans cet article sont données au tableau I. Ces essais ont tous été réalisés en régimes de creusement « à l'équilibre » (régimes idéaux). Ces régimes vérifient la stabilité du front de taille et minimisent les déformations au sein du massif. Ils se distinguent des régimes extrêmes conduisant à la rupture du massif par refoulement ou effondrement du front de taille (Subrin & al, 2009). Les conditions d'obtention des régimes de creusement « à l'équilibre » ont été définies sur maquette pour différentes conditions de creusement : application d'une pression d'équilibre (P_f) adéquate au front de taille (figure2), égalité des débits massiques d'excavation et d'extraction, vitesse de rotation de la roue de coupe suffisante afin d'assurer une homogénéité des pressions au front de taille (Branque & Boutin, 2002).

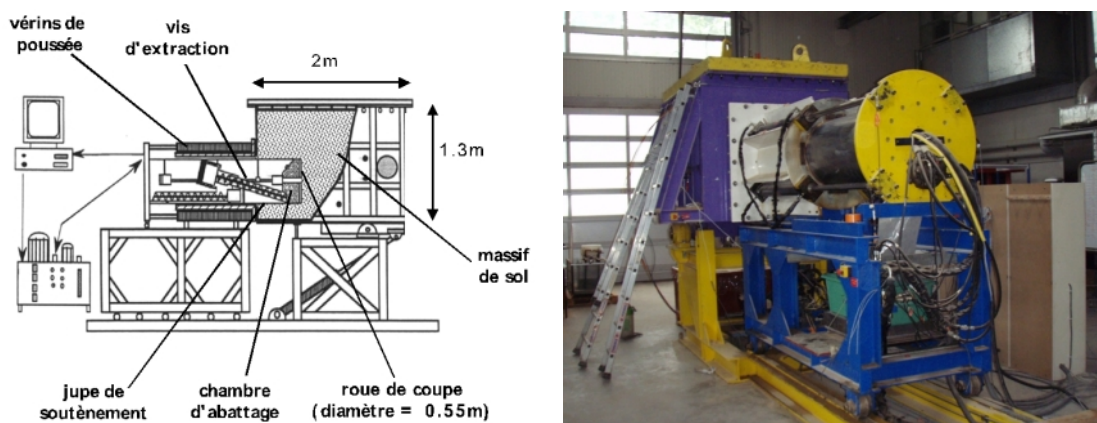


Figure 1 : schéma en coupe et photographie du modèle réduit de tunnelier à pression de terre de l'ENTPE.

Tableau I. Caractéristiques des essais

Nom de l'essai	γ (kN/m ³)	E_t (MPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)	ψ' (°)	q (kPa)	P_f / σ_{h0}^*
MCF-03	13.40	10	2	36	5	0	2.8
MCF-04	13.25	10	1.5	36	5	0	0.6
MCF-05	13.05	10	0.5	36	5	0	2.5
MCF-01-08	13.05	10	0.5	36	5	50	0.5
MCF-02-08	13.05	10	0.5	36	5	50	0.5
MCF-03-09	13.05	10	0.5	36	5	0	6.5
MF-01-07	13.70	5	0	39	2	0	4.5

* σ_{h0} : contrainte horizontale des terres au repos

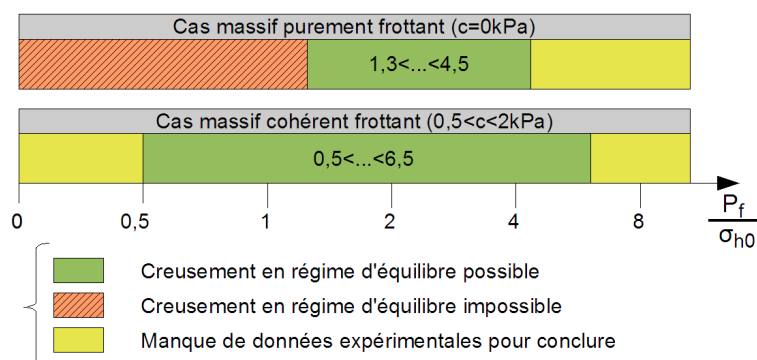


Figure 2 : Domaines des pressions frontales correspondant aux régimes d'équilibre observés sur modèle réduit.

3 Analyse des déplacements de surface

Dans le cas des régimes « d'équilibre », notons que les essais réalisés sur modèle réduit témoignent d'un comportement stationnaire des déplacements verticaux de surface. Ainsi pour une distance à l'axe donné, les profils longitudinaux de tassement ne dépendent que de la distance au bouclier (figure 3a). Dans le même temps, les profils transverses de cuvette de tassement exprimés en fonction de la distance au front de taille (figure 3b) sont en accord avec la répartition gaussienne proposée par Peck (1969). Enfin, l'ordre de grandeur des amplitudes de tassement observées sur maquette (de l'ordre du mm) correspondent, au facteur d'échelle près, à ceux pouvant être observés dans la pratique (de l'ordre du cm).

La figure 4 donne pour l'ensemble des essais menés en régime d'équilibre, les courbes maitresses des profils longitudinaux de tassement. Celles-ci sont déduites du comportement stationnaire décrit précédemment. Notons que 30 à 60% du tassement mesuré à 1D à l'arrière du front ($u(-1D)$) sont observés avant passage du bouclier et peuvent être reliées aux pertes de volume se produisant au niveau du front (action compressive du bras de coupe, défaut de pression frontale,...). Notons que ces tassements à l'avant du front sont d'autant plus faibles que les conditions de stabilité du massif sont bonnes (cohésion du massif élevée, pression frontale importante, pression de surface faible).

Après passage du bouclier, les tassements observés sont en partie provoqués par les efforts de cisaillement le long de la jupe (absence de surcoupe). Il apparaît toutefois qu'une pression importante au front tend à amplifier ces tassements à l'arrière du bouclier (essai MCF-03-09). Ce résultat conforme à ceux observés en régime extrême de sous extraction s'explique par l'apparition dans ce cas de contraintes horizontales de traction à la verticale du front de taille.

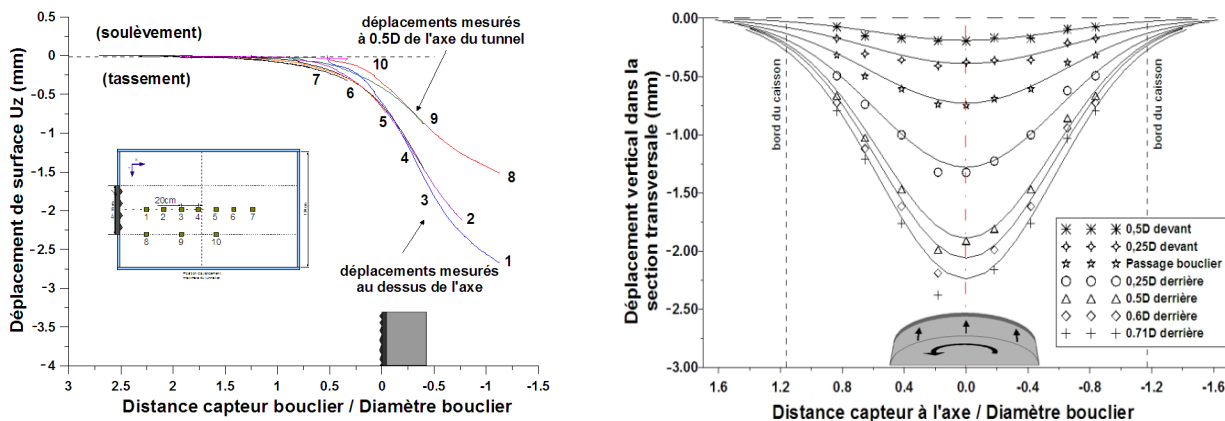


Figure 3 : Profils longitudinaux et transverses des cuvettes de tassement observés en régime d'équilibre (essai MCF-04).

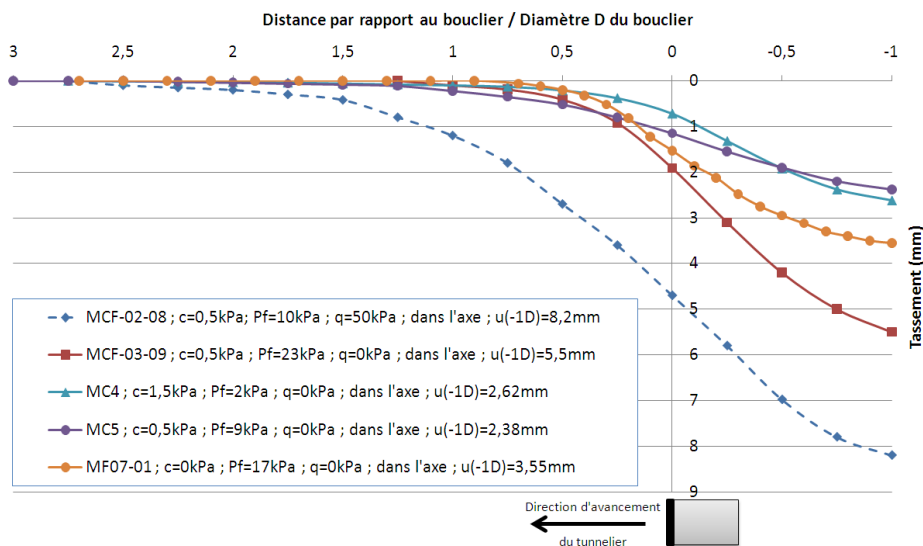


Figure 4 : Courbes maîtresses des profils longitudinaux de tassements de surface déduites du comportement stationnaire en régime d'équilibre.

4 Analyse des déplacements radiaux

Comme les déplacements de surface, les déplacements internes radiaux mesurés autour du tunnelier présentent des profils stationnaires lors des phases de creusement en régime d'équilibre (figures 5a et 5b). Ceux-ci témoignent d'une phase de refoulement radial à l'avant du bouclier liée à l'action de soutènement frontal du tunnelier, puis d'une phase de convergence provoquée par le cisaillement le long de la jupe après passage du bouclier.

Ces mouvements radiaux perçus en pieds-droits jusqu'à une distance d'au moins 0,5D de la jupe sont d'autant plus importants que la pression imposées au rein de la chambre d'abattage est grande. Les amplitudes de ces déplacements dépendent également de la direction radiale considérée. Si entre piédroits et radier ces amplitudes sont similaires, les déplacements en clé sont par contre caractérisés par un refoulement plus faible et une convergence plus importante, vraisemblablement à cause de l'action prépondérante de la gravité dans la direction verticale.

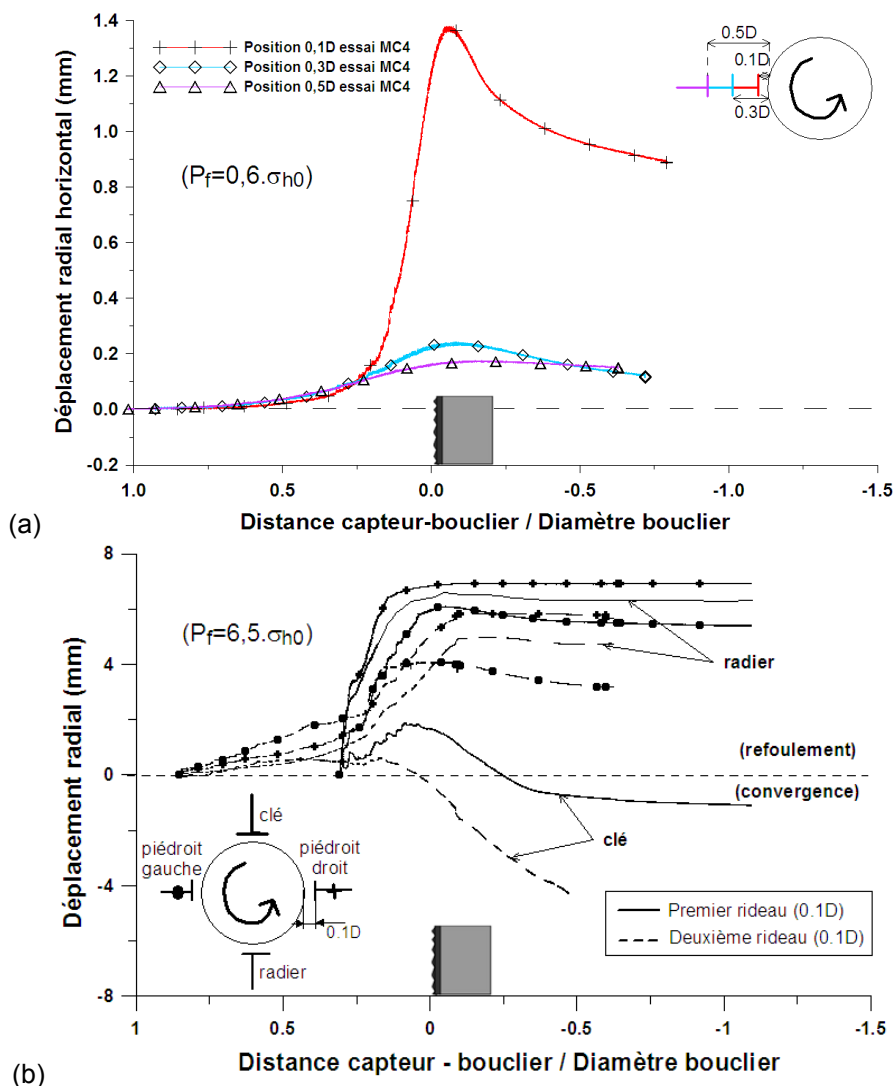


Figure 5 : Déplacements radiaux observés autour du tunnelier lors des essais (a) MCF-04 et (b) MCF-03-09.

Concernant la relation entre déplacements radiaux et déplacements de surface, nos essais montrent qu'un refoulement radial important en piédroits (6mm pour l'essai MCF-03-09 à 0.1D de la jupe contre 1.4 mm pour l'essai MCF-04) peut aller de pair avec une amplification des tassements de surface à l'avant du bouclier (2mm au passage du bouclier pour l'essai MCF-03-09 contre 0.7mm pour l'essai MCF-04) (figure 4). Ce résultat tend à montrer que l'action compressive du tunnelier au front provoque un refoulement horizontal radial qui contribue également au processus de tassement en surface de massif.

5 Analyse des contraintes radiales

Les contraintes radiales mesurées dans les directions horizontale et verticale lors de l'essai MCF-03-09 à une distance de 0.3D de la jupe sont données sous forme adimensionnelle (figure 6). Pour cet essai réalisé avec une forte pression frontale (de l'ordre de 6,5 fois la poussée horizontale des terres au repos), l'évolution des contraintes radiales en clé, piédroits et radier est cohérente avec les déplacements

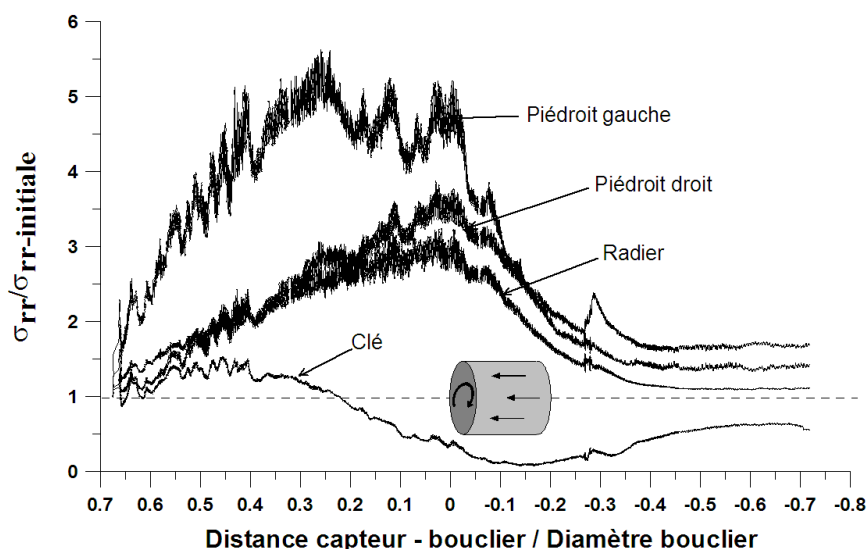


Figure 6 : Evolution des contraintes radiales autour du tunnelier (distance 0.3D) lors de l'essai MCF-03-09.

radiaux présentés en figure 5b, à savoir une augmentation progressive de la contrainte radiale jusqu'au passage du bouclier suivie d'une diminution jusqu'à une valeur proche de la valeur initiale, pour une distance d'environ 0.5D à l'arrière du front de taille. Comme pour les déplacements radiaux, le comportement en contrainte radiale au niveau de la clé diffère en termes d'amplitude de ceux observés en pieds-droits et radier. Ainsi la forte convergence observée en clé à partir d'une distance de 0.2D à l'arrière du bouclier (figure 5b) s'accompagne d'un déconfinement vertical du terrain dans cette zone (figure 6). L'allègement de la colonne de sol observé dans ce cas peut s'expliquer par la présence d'arc de voûte au dessus du tunnelier comme mis en évidence ci –après.

6 Effets de voûte longitudinal et transversal

La figure 7 donne l'évolution des contraintes verticales mesurées dans un plan horizontal à 0.2D au dessus de la clé du tunnel, lors d'une phase de creusement en régime d'équilibre (essai MCF-01-08). Les mesures réalisées en différents points situés le long de deux axes longitudinal et transversal témoignent d'un comportement stationnaire de la contrainte verticale. Au dessus de l'axe du tunnel (capteurs 26 à 30, 42), la contrainte verticale croit à l'approche du bouclier puis décroît fortement jusqu'à s'annuler juste après son passage. Elle réaugmente ensuite jusqu'à une valeur qui dans certains essais peut être supérieure à sa valeur initiale (figure 8a). Cette évolution des contraintes au cours du creusement s'explique par l'existence d'un effet de voûte longitudinal déjà partiellement observé sur modèle réduit centrifugé (Nomoto & al, 1999).

La croissance continue de la contrainte verticale mesurée dans la direction transverse par les capteurs 24 et 40 au cours du creusement atteste quant à elle de l'existence d'un effet de voûte transversal conjointement à cet effet de voûte longitudinal. Notons que lors de cet essai, le report du poids des terres a lieu à une distance comprise entre 0.5 et 0.8D de l'axe du tunnel dans la direction transversale comme l'indique le comportement opposé des contraintes verticales mesurées par les capteurs 24 (augmentation de σ_{zz}) et 25 (diminution de σ_{zz}).

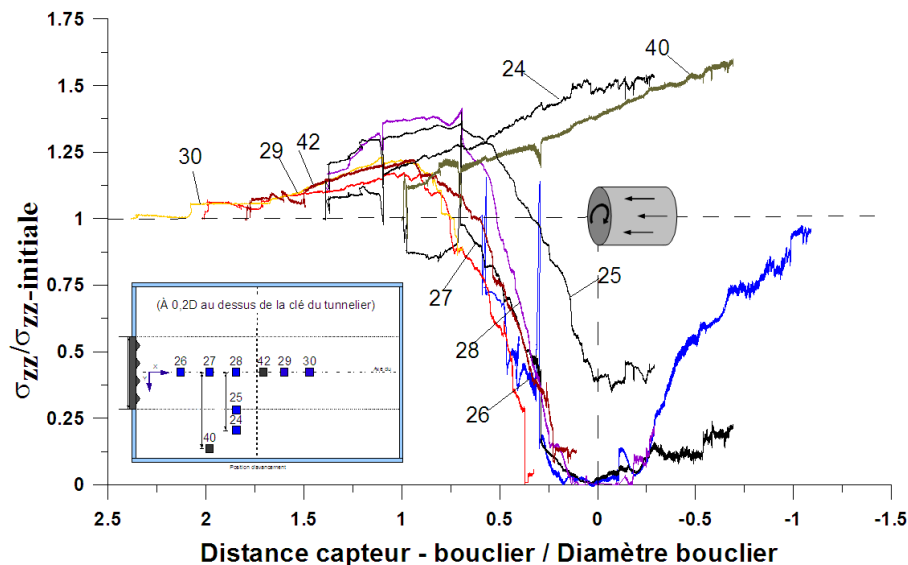


Figure 7 : Effets de voûte longitudinaux et transversaux (essai MCF-01-08).

La figure 8 rassemble pour différentes cohésions de massif les courbes maîtresses des profils de contraintes verticales mesurées dans la direction longitudinales à 0.2D au dessus de la clé du tunnel. Ces courbes déduites du comportement stationnaire décrit précédemment montrent qu'une augmentation de la cohésion du massif conduit à l'extension de l'arc de voûte longitudinal et à une atténuation du report du poids des terres de part et d'autres de la voûte. Ainsi, il apparait qu'une augmentation des contraintes de cisaillement admissibles dans le terrain favorise la reprise du poids des terres (par cisaillement) et autorise un plus grand étalement horizontal de l'arc de voûte.

La figure 8 illustre la géométrie dans le plan longitudinal de la zone allégée

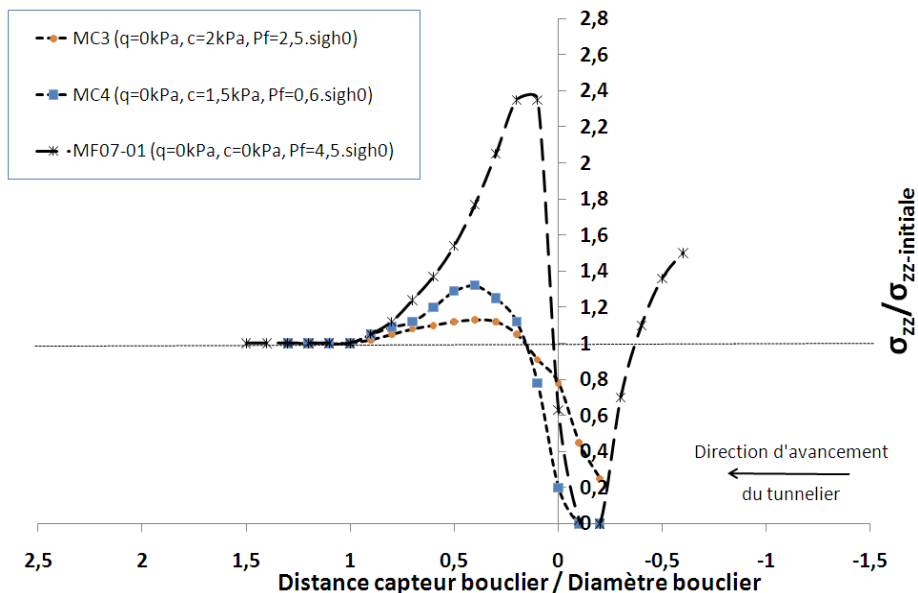


Figure 8 : Courbes maîtresses d'évolution de la contrainte verticale en régime d'équilibre pour différentes cohésions de massif (à 0.2D de la clé du tunnel)

observée lors des essais réalisés avec une pression de surface en massifs cohérents frottants (essais MCF-01-08 et MCF-02-08). Cette géométrie a été obtenue à partir d'un positionnement adéquat des capteurs de contrainte verticale placés dans le terrain.

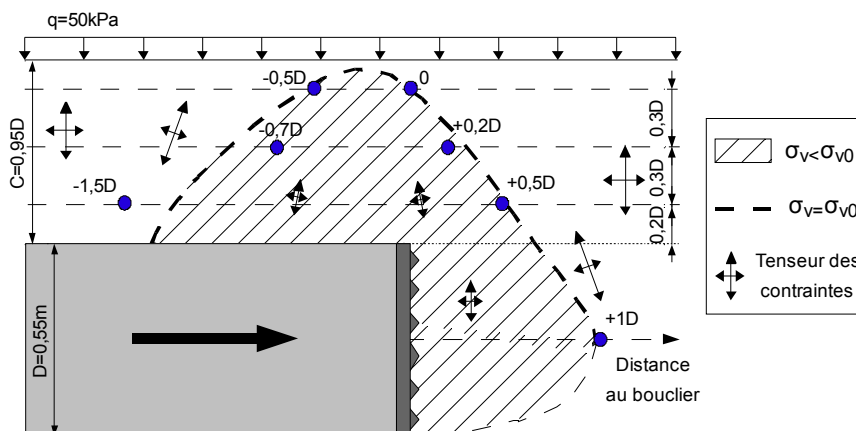


Figure 8 : Schéma de synthèse de l'effet de voûte longitudinal observé lors des essais réalisés avec une pression de surface.

7 Conclusion

Les essais réalisés sur modèle réduit de tunnelier à pression de terre de l'ENTPE apparaissent comme un moyen pertinent de compréhension des mécanismes mis en jeu dans ce mode de creusement. Ils permettent également de disposer d'une base de données et d'analyse consistante en vue d'une modélisation numérique de ce processus d'excavation.

8 Références bibliographiques

- Branque D. & Boutin C. (2002) Contrôle du confinement à pression de terre – Etude sur modèle réduit de laboratoire : essais 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 meuble : étude expérimentale sur modèle réduit de tunnelier à pression de terre en sol cohérent frottant, Thèse de doctorat ENTPE / INSA de Lyon.
- 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.
- Meguid M.A. & Saada.O & Nunes M.A. & Mattar J. (2008), Physical modeling of tunnels in soft ground: A review, Tunneling and Underground Space Technology, n°23, pp 185-198.
- Nomoto T. & Imamura S. & Hagiwara T. & Kusakabe O. & Fujii N. (1999) Shield Tunnel Construction in Centrifuge, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, vol 125, n°4, pp 289-300.
- Peck R.B. (1969) Deep excavations and tunneling in soft grounds, Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State of the Art Volume, pp 225-290.
- Scott R.F. (1989) Essais en centrifugeuse et technique de la modélisation, Revue française de Géotechnique, n°48, pp15-34.
- 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, pp 801-808.