

INFLUENCE DE LA GEOMETRIE DU FRONT DE TAILLE D'UN TUNNEL SUR SA STABILITE

INFLUENCE OF THE GEOMETRY OF A TUNNEL FACE ON ITS STABILITY

Cédric HOUNYEVOU-KLOTOE¹, Emmanuel BOURGEOIS¹

¹ Université Paris-Est, IFSTTAR, Champs-sur-Marne, France

RÉSUMÉ – Cette communication présente des études tridimensionnelles par éléments finis visant à comparer la stabilité d'un front de taille vertical, incliné ou courbe. L'influence de différents paramètres est étudiée : le type de matériau (cohérent ou frottant), la profondeur du tunnel, la finesse du maillage.

ABSTRACT – This communication presents three dimensional finite element simulations aiming at discussing the stability of a tunnel face, in the case of a vertical, inclined or curved tunnel face. The influence of several parameters is investigated: the material behavior (frictional or cohesive), the depth of the tunnel, the coarseness of the mesh

1. Introduction

La stabilité du front de taille d'un tunnel est un problème tridimensionnel par nature, qui a fait l'objet de nombreuses études analytiques ou numériques. Les études analytiques reposent sur l'analyse limite ou le calcul à la rupture (Davis et al, 1980, Leca et Panet, 1988, Leca et Dormieux, 1990). Des développements récents ont conduit à définir des mécanismes de rupture complexes qui affinent les résultats (Wong et Subrin, 2006, Mollon et al, 2010, 2011). Les calculs numériques permettent de prendre en compte des stratigraphies complexes ou des paramètres géométriques variés (voir par exemple Dias et Kastner, 2005), et d'étudier par exemple l'influence de la forme de la section. Dans ces études, le front de taille est généralement considéré comme vertical. Cependant, pour un tunnel construit de manière conventionnelle (c'est-à-dire sans utiliser un tunnelier), il est possible de réaliser, au cours du creusement, un front de taille de géométrie différente, ce qui représente potentiellement un moyen d'améliorer la stabilité du front.

Dans cette communication, nous présentons des études tridimensionnelles par éléments finis pour étudier la stabilité d'un front de taille incliné ou courbe. Après avoir défini le problème et présenté l'approche adoptée pour les simulations numériques, nous discutons l'influence de la géométrie du front de taille sur sa stabilité, pour un matériau frottant et pour un matériau purement cohérent, et pour deux profondeurs relatives. Nous discutons également l'influence de la finesse du maillage sur les résultats.

2. Position du problème

2.1. Géométrie

On considère un tunnel de diamètre extérieur $D = 4$ m, excavé dans une couche de sol horizontale et homogène. La couverture au-dessus de la clé du tunnel est notée C . L'épaisseur de terrain au-dessous du tunnel est égale à $B = 3$ m. La stabilité du front de taille est discutée pour une géométrie fixe, c'est-à-dire que l'avancement du creusement n'est pas prise en compte dans l'analyse. L'axe du tunnel est parallèle à la direction y .

Dans ce qui suit, le point le plus haut du front de taille se trouve dans le plan $y=0$. Compte tenu des symétries du problème, le domaine maillé utilisé dans les simulations ne comprend que la moitié de l'ouvrage. D'autre part, dans la mesure où le but du calcul est d'estimer un facteur de sécurité du front de taille et de se faire une idée du mécanisme de rupture, il n'est pas nécessaire de prendre en compte dans le domaine maillé une zone très étendue : le maillage se limite à 21 m dans la direction de l'axe (15 m en avant du front de taille, 6 m en arrière, et à une distance $d = 8$ m dans la direction horizontale perpendiculaire à l'axe (Figure 1).

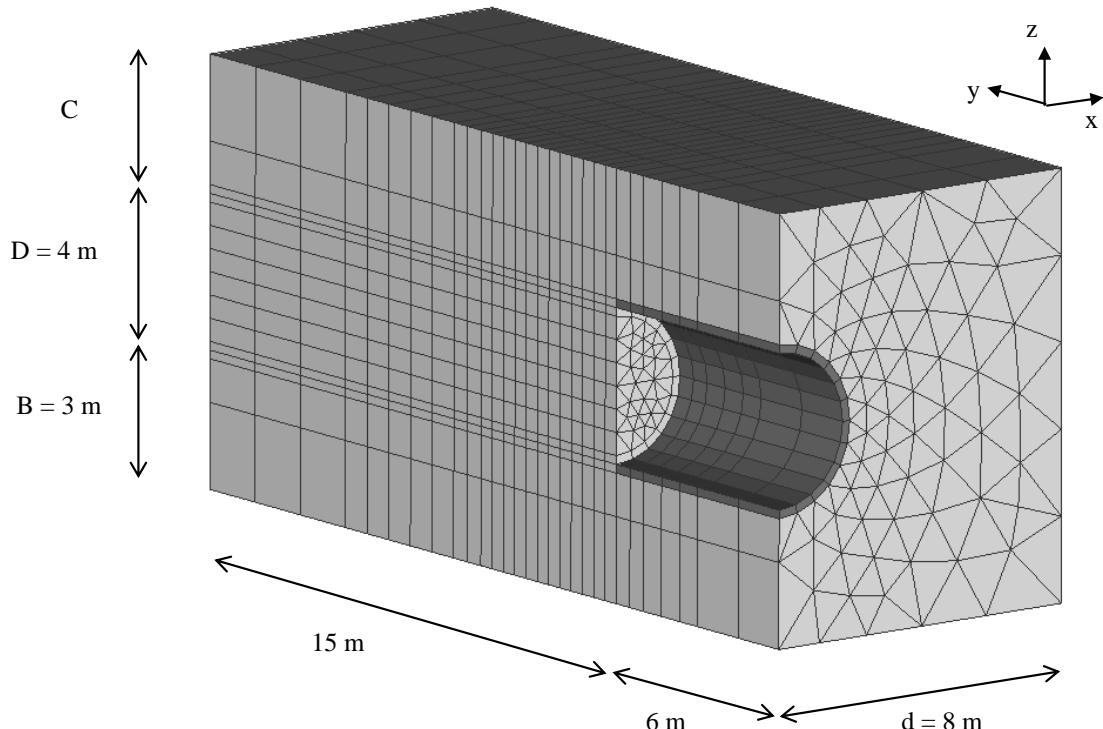


Figure 1. Maillage tridimensionnel pour le cas du front de taille vertical

Le soutènement fait 20 cm d'épaisseur. Il est considéré comme élastique linéaire, avec les caractéristiques suivantes : poids volumique $\gamma_c = 20 \text{ kN/m}^3$, module de Young $E_c = 30000 \text{ MPa}$, coefficient de Poisson $\nu_c = 0,2$.

Pour le terrain encaissant, on considère deux cas : celui d'un matériau purement cohérent et celui d'un matériau frottant. Dans le cas du matériau cohérent, les simulations sont conduites avec le modèle de Tresca, avec une élasticité linéaire isotrope, sans écrouissage et les propriétés mécaniques prennent les valeurs suivantes :

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3, E = 150 \text{ MPa}, \nu = 0,3, c = 50 \text{ kPa}$$

Dans le cas du matériau frottant, on utilise le modèle de Mohr Coulomb (avec une élasticité linéaire isotrope, sans écrouissage), avec les paramètres suivants :

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3, E = 150 \text{ MPa}, \nu = 0,3, c = 20 \text{ kPa}, \varphi = 30 \text{ degrés}$$

Comme il est habituel de le faire dans le contexte de l'analyse limite, on considère une loi d'écoulement associée, et l'angle de dilatance est donc égal à l'angle de frottement.

2.2. Profondeur du tunnel

L'influence de la profondeur du tunnel est étudiée en considérant deux valeurs de la couverture C au-dessus de la clé de voûte du tunnel. La valeur de référence correspond à un tunnel peu profond : $C = 3 \text{ m}$. On compare les résultats obtenus pour un tunnel plus profond, correspondant à une couverture C égale à 7 m .

2.3. Influence de la densité du maillage

Pour chaque profondeur de tunnel, deux maillages ont été réalisés : un maillage de référence, pour lequel la taille des éléments au voisinage du front de taille est de l'ordre de $D/10$. Un maillage plus fin a été constitué avec des éléments dont la taille est proche de $D/15$. Le nombre total de nœuds et d'éléments pour chaque maillage et chaque profondeur est donné dans le tableau 1.

Tableau 1. Nombre de nœuds et d'éléments pour les différents maillages

Couverture C (m)	Densité du maillage	Nombre de noeuds	Nombre d'éléments
3	Fin	40493	13543
	grossier	17082	5729
7	Fin	51916	17867
	grossier	16189	5468

2.4. Influence de la géométrie du front de taille

Le cas de référence est celui du front de taille vertical. Partant du constat que le facteur de stabilité d'un talus décroît si la pente augmente, on peut imaginer qu'il en va de même du facteur de stabilité du front de taille d'un tunnel, et qu'on peut améliorer sa stabilité en modifiant sa géométrie (dans le cas d'un tunnel creusé par la méthode traditionnelle, sans tunnelier). Dans ce qui suit, on considère un front de taille incliné, avec une pente fixée arbitrairement à $4/1$ (figure 2a), et le cas où l'excavatrice permet de réaliser un front de taille courbe (figure 2b). On fait l'hypothèse que le centre du front est situé au point B et que le rayon R est choisi de telle sorte que la distance entre les points A et F soit égale à $D/4$.

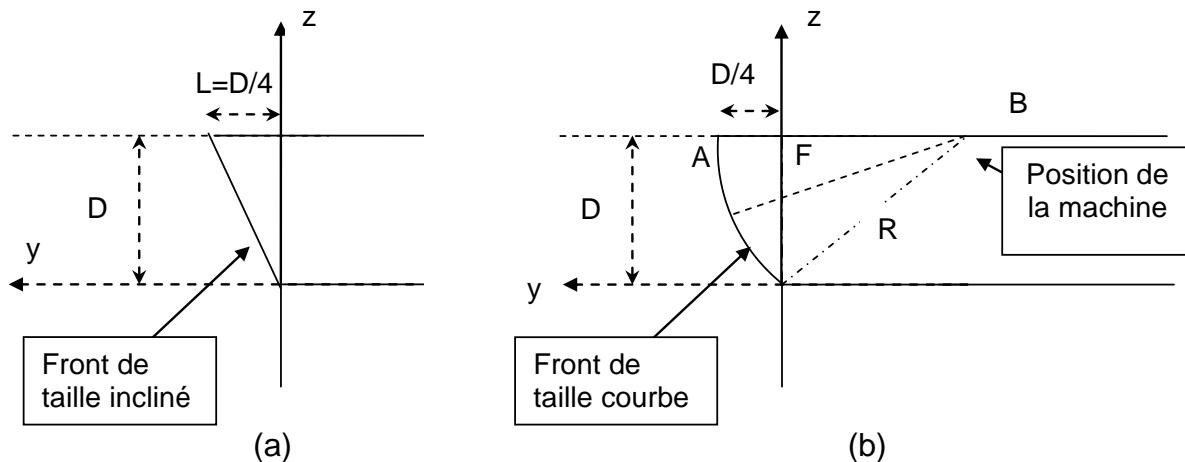


Figure 2. Géométrie du front de taille (a) incliné et (b) du front de taille courbe

3. Analyse numérique de la stabilité du front de taille

Dans le cas de référence, le maillage est obtenu en translatant un maillage plan de la section du tunnel dans la direction de l'axe du tunnel (figure 1). La taille des éléments est plus faible au voisinage du front de taille de manière à s'assurer que l'on reproduit correctement le mécanisme de rupture dans la simulation numérique. Les éléments sont des pentaèdres pour le sol et des hexaèdres pour le soutènement, avec des interpolations d'ordre 2. Le code utilisé pour cette étude est le logiciel CESAR-LCPC (Humbert et al, 2005), qui combine une interface graphique et un solveur qui communiquent par l'intermédiaire de fichier au format texte. L'interface graphique a été

utilisée pour constituer le maillage dans le cas de référence. On a ensuite récupéré les coordonnées des nœuds, et on les a modifiées au moyen de script Python pour obtenir deux nouveaux maillages correspondant au front de taille incliné et au front de taille courbe. Le traitement consiste à modifier la coordonnée des nœuds dans la direction de l'axe, pour obtenir le profil voulu au niveau du front, en gardant les limites du maillage verticales. La modification ne modifie pas le nombre de nœuds et d'éléments. Le résultat est illustré par la figure 3.

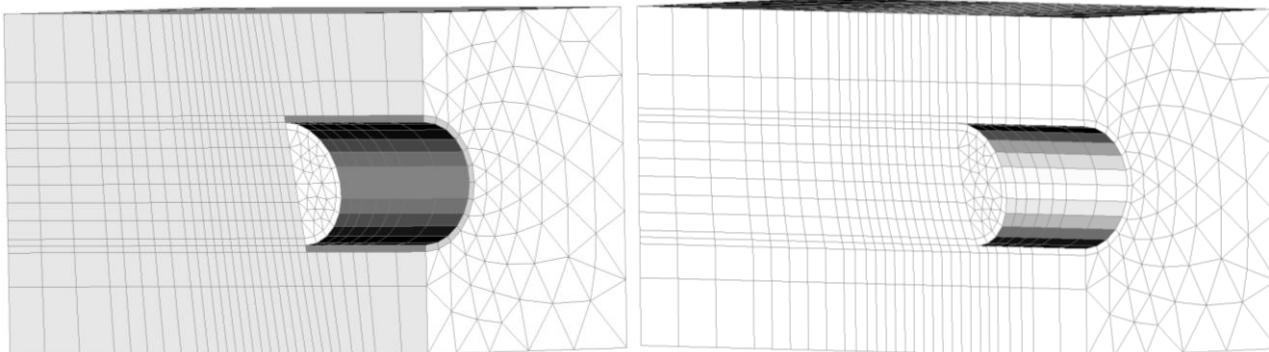


Figure 3. Maillages obtenus pour (a) le front de taille incliné et (b) pour le front de taille courbe

Les conditions aux limites fixent à zéro les trois composantes du déplacement sur la face inférieure du maillage ; le déplacement normal des faces verticales du maillage est également nul.

Les seuls chargements appliqués sont le poids propre du terrain et du soutènement.

Pour ce qui concerne l'évaluation du facteur de sécurité, deux approches sont possibles. La première consiste à le définir par rapport aux charges appliquées, c'est-à-dire à rechercher la plus grande valeur par laquelle on peut multiplier les chargements sans provoquer la rupture. Alternativement, on peut rechercher la plus grande valeur par laquelle on peut diviser les caractéristiques de résistance c et $\tan \varphi$, en utilisant une procédure dite de « c -phi réduction ». Les deux approches conduisent à des valeurs différentes du facteur de sécurité, qu'on notera ici F_{char} et F_{res} respectivement.

Dans les deux cas, le calcul numérique repose sur une succession de simulations élastoplastiques, l'ouvrage étant stable si le calcul converge au bout d'un nombre d'itérations inférieur à une valeur donnée (par exemple 500) pour une tolérance donnée, qui limite par exemple la norme du résidu du calcul élastoplastique à 0,1% de la norme des forces nodales correspondant aux efforts extérieurs.

4. Résultats

4.1 Cas d'un matériau cohérent

Les résultats obtenus pour un matériau cohérent sont donnés dans le tableau 2. Les facteurs de sécurité donnés par les deux approches sont identiques : cela résulte du modèle utilisé pour représenter les caractéristiques de résistance du sol, pour lequel la stabilité est contrôlée par le rapport sans dimension $\gamma H/c$, où H est la profondeur de l'axe du tunnel $H = C + D/2$. L'augmentation du chargement d'un facteur donné est équivalente à la réduction de la valeur de la cohésion par le même facteur.

Les résultats montrent que les facteurs de sécurité sont plus grands pour le tunnel superficiel que pour le tunnel profond, ce qui est cohérent avec les analyses classiques

basées sur la valeur du rapport $\gamma H/c$. De manière plus précise, Mollon (2010) propose un abaque permettant de calculer la valeur limite du rapport $\gamma H/c$ en fonction de C/D.

Pour le tunnel peu profond, on a C = 3 m, D = 4 m et H = 5 m ; pour C/D = 0,75, la valeur limite lue sur l'abaque est de 7, et le facteur de sécurité vaut $7/(\gamma H/c)=3,5$.

Pour le tunnel profond, on a C = 7 m, D = 4 m, H = 9 m ; pour C/D = 1,75, la valeur limite lue sur l'abaque est proche de 9,2, ce qui conduit à un facteur de sécurité de 2,55.

Les calculs numériques présentés ici donnent, pour le front vertical, un facteur de stabilité de 3,5 pour le tunnel superficiel et de 2,3 pour le tunnel profond, en bon accord avec celles déduites de l'abaque de Mollon (2010).

Les résultats montrent aussi que la densité du maillage n'a pratiquement pas d'impact sur les résultats, et qu'il y a, qualitativement, une amélioration de la stabilité du front de taille pour une géométrie non verticale, mais la différence relative sur les facteurs de sécurité est négligeable, en particulier pour le tunnel profond.

Tableau 2. Facteurs de sécurité calculés pour un matériau cohérent

Couverture C	Maillage	Géométrie du front	Facteurs de sécurité F_{char}/F_{res} (-)	Variation relative de F par rapport au front vertical
3 m	Grossier	vertical	3.52	
		incliné	3.66	+4%
		courbe	3.64	+4%
	Fin	vertical	3.55	
		incliné	3.73	+5%
		courbe	3.71	+5%
7 m	Grossier	vertical	2.26	
		incliné	2.28	+1%
		courbe	2.27	+0%
	Fin	vertical	2.26	
		incliné	2.26	+0%
		courbe	2.27	+0%

4.3 Cas d'un matériau cohérent et frottant

Les résultats obtenus pour le matériau cohérent et frottant sont donnés dans le tableau 3 pour le facteur de sécurité défini par rapport aux chargements appliqués, et dans le tableau 4 pour le facteur de sécurité basé sur la réduction des caractéristiques de résistance.

Comme pour le matériau purement cohérent les facteurs de sécurité sont plus grands pour le tunnel peu profond. L'influence de la densité du maillage est plus significative que dans le cas du matériau cohérent, et les résultats indiquent qu'il est nécessaire d'utiliser des maillages plus fins pour les matériaux frottants. En particulier, la densité du maillage ne modifie pas seulement les valeurs absolues des facteurs de sécurité calculés, mais aussi les variations relatives entre le cas du front de taille vertical et les autres géométries.

Les deux définitions du facteur de sécurité donnent des résultats cohérents, en cela qu'ils montrent une influence claire de la géométrie du front de taille sur sa stabilité, contrairement au cas du matériau cohérent. On notera aussi que les deux géométries non verticales donnent des facteurs de sécurité voisins, et que les simulations ne donnent pas systématiquement un facteur de sécurité plus grand pour le front courbe que pour le front incliné.

Tableau 3. Facteurs de sécurité sur les chargements appliqués

Couverture C	Maillage	Géométrie du front	Facteurs de sécurité sur le chargement F_{char}	Variation relative de F par rapport au front vertical
3 m	Grossier	vertical	3.83	
		incliné	5.10	+33%
		courbe	5.18	+35%
	Fin	vertical	3.64	
		incliné	4.95	+36%
		courbe	5.07	+39%
7 m	Grossier	vertical	2.98	
		incliné	3.83	+29%
		courbe	3.81	+28%
	Fin	vertical	2.65	
		incliné	3.30	+25%
		courbe	3.27	+23%

Tableau 4. Facteurs de sécurité sur les caractéristiques de résistance

Couverture C	Maillage	Géométrie du front	Facteurs de sécurité sur la résistance F_{res}	Variation relative de F par rapport au front vertical
3 m	Grossier	vertical	2.36	
		incliné	2.57	+9%
		courbe	2.54	+8%
	Fin	vertical	2.31	
		incliné	2.55	+10%
		courbe	2.54	+10%
7 m	Grossier	vertical	1.90	
		incliné	2.01	+6%
		courbe	1.99	+5%
	Fin	vertical	1.82	
		incliné	1.94	+7%
		courbe	1.92	+5%

5. Discussion

D'un point de vue qualitatif, l'augmentation du facteur de sécurité obtenu pour le cas d'un front non vertical était anticipée. L'intérêt de la simulation est de quantifier cet effet, et de mettre en évidence l'influence des propriétés du terrain encaissant et du rapport entre la couverture et la profondeur de l'axe.

Dans le cas du matériau frottant, l'augmentation du facteur de sécurité (sur les chargements) est de l'ordre 30 à 40 % pour le tunnel peu profond, et de 25 % pour le tunnel plus profond.

Par contraste, les augmentations du facteur de sécurité calculé sur les caractéristiques de résistance, obtenu par la procédure de c-phi réduction, sont moins spectaculaires, et pourraient conduire à conclure que l'apport en termes de stabilité n'est pas significatif. Les résultats donnés par les deux approches sont cohérents, mais leur interprétation demande un jugement d'ingénieur : la même valeur du facteur de sécurité traduit une augmentation de stabilité plus ou moins significative selon la définition adoptée.

En dernier lieu, la figure 4 montre les zones du maillage pour lesquelles la norme des déformations plastiques dépasse 1% de la déformation plastique maximale, pour le maillage le plus fin, dans le cas du tunnel peu profond, et pour le matériau cohérent et

frottant. Bien que ce genre de représentation puisse être difficile à interpréter, il semble que, dans le cas vertical, le mécanisme fait apparaître une lentille de terrain dans le front de taille qui s'effondre dans le tunnel sans se déformer, donc sans que sa résistance soit mobilisée. Dans le cas du front courbe, la zone non déformée semble plus réduite. On peut donc estimer que la résistance est mieux mobilisée, ce qui se traduit par un facteur de sécurité plus grand.

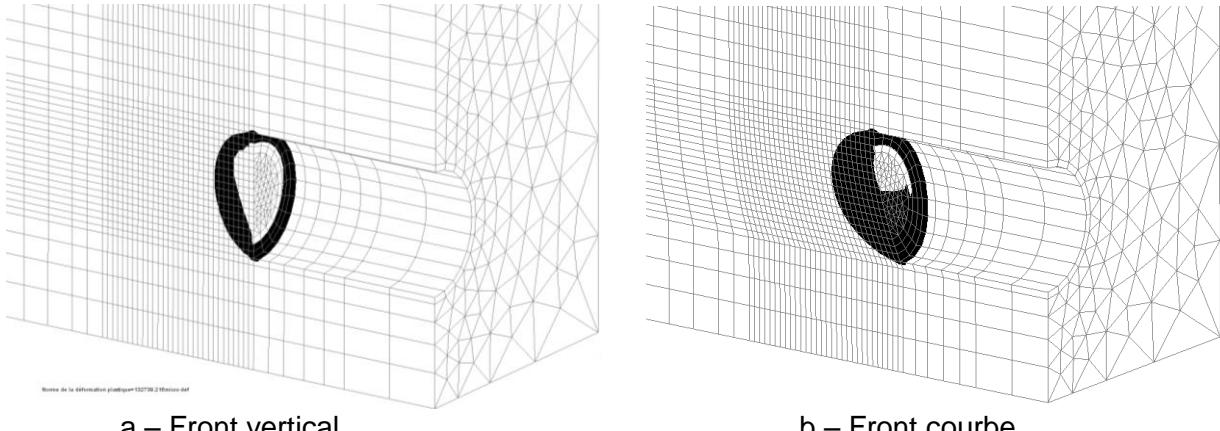


Figure 5. Zones où la norme de la déformation plastique dépasse 1% de la valeur maximale.

6. Conclusion

Les simulations par éléments finis en condition tridimensionnelle permettent d'aborder relativement simplement des problèmes qui ne peuvent pas être traités par les méthodes traditionnelles (analytiques ou semi-analytiques). L'étude de la stabilité du front de taille d'un tunnel est un problème fortement tridimensionnel, qui illustre l'intérêt des approches numériques.

Les résultats présentés ici montrent que le facteur de sécurité est pratiquement insensible à la géométrie du front de taille du tunnel, pour les gammes de géométrie envisagées ici, dans le cas d'un matériau purement cohérent. La conclusion est différente dans le cas d'un matériau cohérent et frottant : le facteur de sécurité est largement amélioré pour un front de taille incliné ou courbe, la différence étant plus nette pour un tunnel peu profond.

En conclusion, la forme du front de taille d'un tunnel a une influence significative sur sa géométrie. Si les méthodes de construction permettent de réaliser des formes plus complexes qu'un front de taille vertical dans des conditions de coût et de sécurité acceptables, on peut imaginer d'optimiser cette forme : on peut envisager de rechercher la meilleure valeur du rapport L/D, introduire une courbure dans l'autre direction, pour se rapprocher d'une forme sphérique par exemple. Du point de vue du concepteur, il est intéressant de retenir que l'analyse de stabilité sur la base d'un front vertical représente une approche conservative.

Cette petite discussion pourrait être prolongée dans deux directions : on pourrait, d'une part, chercher à évaluer l'influence de la géométrie du front sur les tassements provoqués en surface par le creusement. D'autre part, il serait intéressant de comparer le gain de stabilité procuré par le changement de géométrie avec celui obtenu en renforçant le front par des boulons en fibre de verre, mais cette comparaison n'a pas été entreprise ici en raison du fait qu'il n'y a pas vraiment de méthode robuste et largement partagée concernant la modélisation du rôle des boulons, en dépit des très nombreuses références sur le sujet.

7. Références

- Davis EH, Gunn MJ, Mair RJ, Seneviratne HN (1980). The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive material. *Géotechnique*, volume 30, issue 4, pp 397–416.
- Dias D, Kastner R (2005). Modélisation numérique de l'apport du renforcement par boulonnage du front de taille des tunnels. *Can. Geotech. J.* 42 (6), 1656–1674.
- Humbert P, Dubouchet A, Fezans G, Remaud D (2005) CESAR-LCPC: A computation software package dedicated to civil engineering uses, Bull Lab Ponts et Chaussées, n°256-257, pp 7-37.
- Leca E, Panet M (1988). Application du Calcul à la Rupture à la stabilité du front de taille d'un tunnel. *Revue Française de Géotechnique*, 43, 5-19 (in French)
- Leca E, Dormieux L (1990). Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material, *Géotechnique*, 40(4), 581–606.
- Mollon, G. (2010). "Analyse de la stabilité d'un front de taille pressurisé par deux nouveaux mécanismes rotationnels d'effondrement", Rencontres Universitaires de Génie Civil 2010 (AUGC 2010), La Bourboule, France, 2-4 juin 2010
- Mollon G, Dias D, Soubra AH (2010). Face stability analysis of circular tunnels driven by a pressurized shield. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 136 (1), 215–229, DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000194
- Mollon G, Dias D, Soubra AH (2011). Rotational failure mechanisms for the face stability analysis of tunnels driven by a pressurized shield, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 35 (12) :1363-1388. DOI: 10.1002/nag.962
- Wong H, Subrin D (2006). Stabilité frontale d'un tunnel: mécanisme 3D en forme de corne de rhinocéros et influence de la profondeur. *Revue européenne de génie civil* 10 (4), 429–456.