

CALCUL DES TUNNELS AU TUNNELIER SANS TAUX DE DECONFINEMENT : EST-CE POSSIBLE, VOIRE SOUHAITABLE ?

DESIGN OF TBM TUNNELS : IS THE USE OF CHARACTERISTIC CURVES SUITABLE OR NOT ?

Bruno DEMAY

¹GEOTUN, Issy Les Moulineaux, FRANCE

RÉSUMÉ –Le calcul des tunnels au tunnelier, et notamment du revêtement en voussoirs, via la méthode convergence-confinement est un problème complexe dépendant de nombreux facteurs. Nous présentons ici un concept de calcul intégré via la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel PLAXIS permettant de simuler les différentes phases du creusement et ne faisant pas appel à une valeur explicite du taux de déconfinement.

ABSTRACT–The design of TBM tunnels with segments by means of the characteristic curves (or Convergence-Confinement CV-CF) method is a complex problem. The purpose of this paper is to present a fully integrated calculation scheme with the Finite Elements Method using the PLAXIS code, simulating the different stages of the excavation / support phases and therefore without any reference to the convergence-confinement method.

1 Introduction

Le domaine d'emploi des tunneliers à voussoirs n'a cessé de se développer pour constituer aujourd'hui une solution très souvent envisagée pour le creusement d'un projet de tunnel quelles que soient les conditions géologiques.

Indépendamment de questions économiques qui peuvent conduire à préférer une solution dite « conventionnelle », force est de constater que des solutions avec tunnelier posant des voussoirs sont maintenant mises en œuvre dans des tunnels longs et profonds, sous forte couverture, jusque-là creusés par des méthodes conventionnelles. De même, des projets de tunnel sous forte charge hydrostatique dans des terrains bouillants et aquifères sont désormais régulièrement envisagés alors même qu'ils auraient été jugés irréalisables il y a seulement dix ans, parce que les progrès réalisés par les chantiers de tunneliers à confinement permettent maintenant de les considérer comme faisables.

Pour les tunneliers à confinement, des diamètres intérieurs de 13 à 14 mètres de diamètre sont maintenant courants et l'on a vu récemment des diamètres de creusement dépasser les 17 mètres, et les pressions de confinement dépasser les 10 bars.

Au vu des progrès spectaculaires en termes de vitesse de réalisation obtenus dans les projets, de nouveaux domaines s'offrent au tunnelier posant des voussoirs, comme les longues galeries hydrauliques dans les projets de barrages ou les galeries d'ossatures de mines, projets à forte profondeur ou couverture.

Le point commun de ces évolutions récentes est d'envisager systématiquement la pose d'un revêtement en voussoirs en même temps que le creusement via un bouclier mécanisé, souvent avec confinement du front, quelles que soient les conditions géologiques rencontrées et l'état de contraintes existant dans le terrain.

L'augmentation de la profondeur et / ou du diamètre pose avec encore plus d'acuité la question du dimensionnement des composantes de ces projets, notamment le revêtement en voussoirs. L'objet de la présente communication est de présenter une réflexion sur l'adéquation de quelques pratiques courantes de dimensionnement à cette problématique.

2 L'emploi de la méthode convergence-confinement dans un tel contexte

La méthode convergence-confinement est un puissant outil d'analyse préliminaire des problèmes posés par le calcul des tunnels et les concepts qu'elle développe peuvent s'appliquer à la problématique de conception des ouvrages souterrains dans de nombreux cas de figure.

La méthode convergence-confinement est traditionnellement utilisée en France dans les calculs aux éléments finis de revêtement de voussoirs des tunnels creusés au tunnelier, où l'on utilise des formules donnant le taux de déconfinement en fonction de la distance au front de taille pour estimer la charge s'exerçant sur le revêtement après passage du tunnelier. A l'heure actuelle, dans beaucoup de calculs, on ne différencie pas les phases spécifiques de l'excavation, du passage de la jupe du tunnelier, et d'injection du vide annulaire. Or la réalité est beaucoup plus complexe compte tenu du rôle joué par la jupe du tunnelier qui, dans le cas de faibles caractéristiques du terrain, vient bloquer son déplacement radial et donc *empêcher tout déconfinement supplémentaire*. Le terrain est alors soutenu et il faut appliquer les théories de la variation du taux de déconfinement *dans le cas des terrains soutenus*, ce qui modifie considérablement le taux de déconfinement réel à la pose du revêtement.

Le taux de déconfinement derrière un tunnelier à la pose des voussoirs peut donc varier dans de *très grandes proportions* en fonction des caractéristiques du terrain et de l'état de contraintes, et donc être très différent du taux de déconfinement estimé classiquement dans le cas du terrain non soutenu, qui dépend essentiellement de la distance au front de taille.

L'augmentation de la profondeur et du diamètre peut donc avoir pour effet de générer des situations critiques où le dimensionnement de la machine et du revêtement s'avère insuffisant compte-tenu d'une sous-estimation des charges exercées par le terrain par suite d'une hypothèse de taux de déconfinement trop élevé.

Par ailleurs, la méthode convergence-confinement est une méthode analytique fondée sur des hypothèses précises :

- Terrain unique et homogène
- Etat de contraintes homogène et isotrope

Dans le cas des tunnels en terrains meubles et aquifères, il est rare de constater dans la pratique que ces hypothèses sont réunies, notamment car l'augmentation des diamètres ne va pas nécessairement de pair avec l'augmentation de la profondeur. On se retrouve alors dans une situation où l'état de contraintes autour du tunnel est tout sauf isotrope et où le dimensionnement du revêtement est conditionné par la reprise des efforts de flexion et non plus de compression, notamment à cause de la réduction de section au niveau des joints de voussoirs.

La méthode présente enfin des limitations d'emploi :

- Dans la pratique, loi de comportement des terrains simplificatrice (comportement élasto-plastique)
- Prise en compte difficile du couplage eau / sol et notamment de l'influence de la vitesse de rétablissement du régime hydrostatique autour de l'excavation (comportement à court terme / long terme)
- Difficulté de représenter en un seul calcul les différentes phases de la réalisation du tunnel (excavation, passage de la jupe, injection du mortier de bourrage, pose du revêtement, évolution à long terme)

Enfin le calcul analytique convergence-confinement impose d'analyser de façon séparée la problématique spécifique du confinement du front de taille lorsque celui-ci s'impose. De même l'estimation des tassements doit faire l'objet d'une analyse distincte.

Nous avons donc réfléchi à une méthodologie de calcul aux éléments finis à l'aide du logiciel PLAXIS 2D permettant de d'intégrersimultanément toutes ces problématiques.

3 Calcul détaillé par la méthode aux éléments finis

3.1 Un calcul par phases

Un des principaux avantages de la méthode de calcul aux éléments finis 2D appliquée aux tunnels est de pouvoir analyser distinctement les nombreuses étapes de la réalisation d'un tunnel avec un tunnelier. Nous avons élaboré la séquence suivante :

1. Initialisation des contraintes
2. Excavation, en intégrant ou non une pression de confinement,
3. Passage du tunnelier par simulation de la présence du bouclier (structure métallique de la jupe), en imposant une contraction,
4. Injection du mortier de bourrage (avec ou sans pression suivant qu'il s'agit d'un matériau liquide ou d'un simple matériau de remplissage type gravette),
5. Mise en place du revêtement en voussoirs,
6. Suivant le cas, intégration d'une phase de consolidation correspondant à la dissipation des surpressions interstitielles générées lors des phases précédentes,
7. Intégration des caractéristiques à long terme du béton et des terrains après consolidation / dissipation des surpressions hydrostatiques

Les phases ci-dessus peuvent être répétées pour étudier l'influence du creusement d'un second tunnel à proximité du premier.

3.2 Données d'entrée – hypothèses

3.2.1 Données géologiques et géotechniques

Le modèle de comportement *EPMC* (Elasto-Plastique avec critère de rupture de MOHR-COULOMB) est généralement utilisé dans le calcul analytique convergence-confinement.

D'une manière générale, un modèle de comportement *HSM* (non-linéaire avec écrouissage) rendra mieux compte des déplacements à observer car il intégrera de façon plus précise le comportement du terrain lors des différentes phases de chargement et de déchargement se produisant dans les terrains environnant l'excavation.

D'autre part, dans le cas fréquent où il faut prendre en compte la présence d'une nappe, il est très important de savoir si l'on doit considérer un comportement *drainé* ou *non drainé* des matériaux dans lequel le tunnel va être creusé.

Le calcul du temps de rétablissement de la pression hydrostatique, tel que décrit par (PANET, 1995) et initié par (RAT, 1973), permet de savoir si l'on doit considérer des conditions drainées dès la première phase d'excavation, ou si l'on doit considérer des conditions non drainées à l'excavation (terrain étanche lorsque l'on excave – pas d'écoulement à front) puis introduire une phase de consolidation correspondant au rétablissement du régime hydrostatique autour de l'excavation après dissipation des surpressions hydrostatiques générées par la modification de l'état de contraintes dans le terrain autour de l'excavation proprement dite.

3.2.2 Données liées au tunnelier

Les données liées au tunnelier concernent :

1. Le diamètre d'excavation
2. La surcoupe
3. La conicité de la jupe (différence entre le diamètre d'excavation diminué de la surcoupe et le diamètre en fin de jupe)
4. Le poids du bouclier

On cherchera à modéliser le bouclier (tunnelier sans train suiveur) par un cylindre métallique indéformable sous forme d'une coque en acier dont l'épaisseur est suffisamment élevée pour qu'elle ne se déforme pas sous la pression des terres qui lui

sera appliquée. Généralement une épaisseur équivalente de 100 mm est suffisante pour ce faire.

La connaissance de la masse totale du bouclier permet d'affecter un poids unitaire particulier à cette structure métallique tout en conservant les caractéristiques d'inertie et de rigidité d'un cylindre métallique indéformable. L'impact de la masse du bouclier n'est plus à négliger dans le cas de tunnels excavés à faible profondeur dans des terrains déformables. Il faut alors comparer le poids des terres excavées et le poids du tunnelier.

3.2.3 Données liées au revêtement

On utilisera les données dont on dispose habituellement :

- Diamètre intérieur du revêtement
- Epaisseur proposée du revêtement
- Nombre de voussoirs
- Largeur de contact au niveau des joints

Ceci permettra de calculer une inertie équivalente pour l'anneau par la formule de MUIR-WOOD. Connaissant le module de déformation du béton (court terme / long terme) on peut ensuite calculer la rigidité EI de l'anneau à court et à long terme.

De cette rigidité à court et à long terme on pourra déduire, après division par l'inertie de la section complète, un module de béton équivalent que l'on utilisera comme caractéristique du matériau linéaire élastique affecté au revêtement en voussoirs (béton court terme / béton long terme).

De même, on créera un matériau linéaire élastique pour le mortier de bourrage après durcissement dont la valeur du module de déformation est, dans le cas des sols, intermédiaire entre le module de déformation du sol et le module de déformation du béton. Ceci légitime le fait de choisir en première approche un comportement linéaire élastique pour le mortier de bourrage. Ce n'est plus le cas lorsque l'on creuse dans du rocher.

Dans ce cas le mortier de bourrage est souvent remplacé par un matériau de type gravette. Il faut alors supprimer la phase injection du mortier de bourrage dans le calcul et activer directement dans le modèle les groupes d'éléments du matériau correspondant dans la phase de mise en place du revêtement. On peut raffiner la modélisation en séquençant l'activation du matériau de bourrage, par exemple lorsqu'un complément d'injection est fait à travers les voussoirs.

A noter que l'on peut choisir de donner une loi de comportement plus élaborée (par exemple élasto-plastique) aux matériaux choisis pour le revêtement béton et le remplissage du vide annulaire (mortier, gravette). Un développement serait à mener dans le cas des terrains où l'on anticipe de fortes convergences, en introduisant par exemple une loi de comportement type rigide-plastique avec palier large.

3.3 Modélisation

La création des structures tunnel se fait sur les diamètres principaux identifiés précédemment :

- Le diamètre d'excavation, qui permet de créer une structure tunnel dite « TBM » par un cercle à laquelle on va affecter une contraction et la structure coque correspondant à la jupe du tunnelier,
- Le diamètre intérieur du revêtement, qui permet de créer une structure tunnel correspondant à l'anneau de voussoirs par deux cercles intrados / extrados

A priori les deux structures tunnel ainsi définies sont concentriques, mais on pourrait s'il y a lieu introduire une excentricité correspondant par exemple au cas d'un revêtement mis en place sur un mortier liquide dans un terrain très raide (rocher).

L'ajout d'une interface à l'extérieur du revêtement permet de créer des conditions de contact et de perméabilité pour la simulation des écoulements vers l'intérieur du tunnel

lorsqu'on veut modéliser un revêtement non imperméable. On affectera à l'espace entre le cercle extradossé et le cercle d'excavation les propriétés du mortier de bourrage.

La figure ci-dessous montre les épaisseurs relatives du mortier de bourrage (15 cm) et de l'anneau de voussoirs (40 cm) dans le cas théorique d'un tunnel de 10 m de diamètre creusé dans du sable hors nappe sous 25 m de couverture. On a créé des éléments volumiques dans lesquels on aura pris soin de modéliser une plaque fictive pour extraire les sollicitations dans le revêtement.

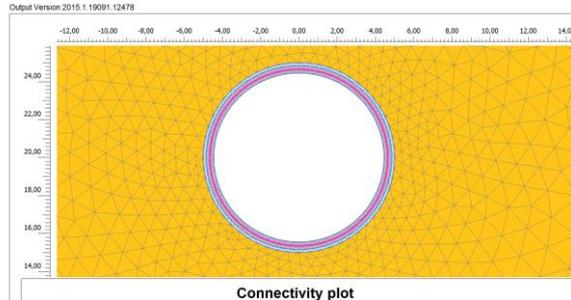


Figure 1 Modélisation

3.4 La phase excavation

La phase d'excavation comprend la désactivation de tous les groupes d'éléments au sein du cercle d'excavation et l'application des conditions hydrostatiques correspondant à la pression de confinement souhaitée. Pour ce faire on applique sur tous les groupes d'éléments concernés des conditions imposées dans lesquelles on fixe :

- L'ordonnée de la génératrice supérieure en voûte (y_{ref}),
- Le niveau de pression souhaitée en voûte (p_{ref})
- La densité du fluide assurant le confinement (par exemple 12 KN/m³ en pression de boue, 14 KN/m³ en pression de terre et 0 pour l'air)

Une estimation de la valeur de p_{ref} peut être faite suivant les méthodes analytiques usuelles (spirale logarithmique, prisme de terrain, etc...). Dans les terrains drainés sans cohésion, il s'agit de la pression hydrostatique augmentée en général de quelques dizaines de KPa. Dans les terrains non drainés possédant une cohésion apparente, il faut procéder à une analyse spécifique tenant compte de la vitesse potentielle de rétablissement du régime hydrostatique autour de l'excavation.

En cas de pression insuffisante, le calcul numérique ne converge pas. Dans l'exemple ci-dessus on obtient les valeurs suivantes pour la pression minimale assurant la stabilité du front :

Tableau 1 – Pressions de confinement

METHODE DE CALCUL	Pression en voûte (KPa)	Pression à l'axe (KPa)
Spirale logarithmique	-	80
Borne inférieure de la méthode LECA - DORMIEUX	-	90
Prisme de terrain	-	116
Cercle de MOHR	-	157
Calcul PLAXIS	102	172

On mesure dans cet exemple, qui écarte volontairement l'influence régulatrice d'une pression hydrostatique, les disparités potentielles entre les différentes méthodes de calcul de la pression de confinement, mais aussi tout l'intérêt du calcul MEF qui permet d'observer simultanément les déplacements dans le terrain.

Des analyses de sensibilité des tassements au confinement peuvent alors être effectuées en faisant varier la pression p_{ref} et en traçant les courbes correspondantes des cuvettes de tassements en surface.

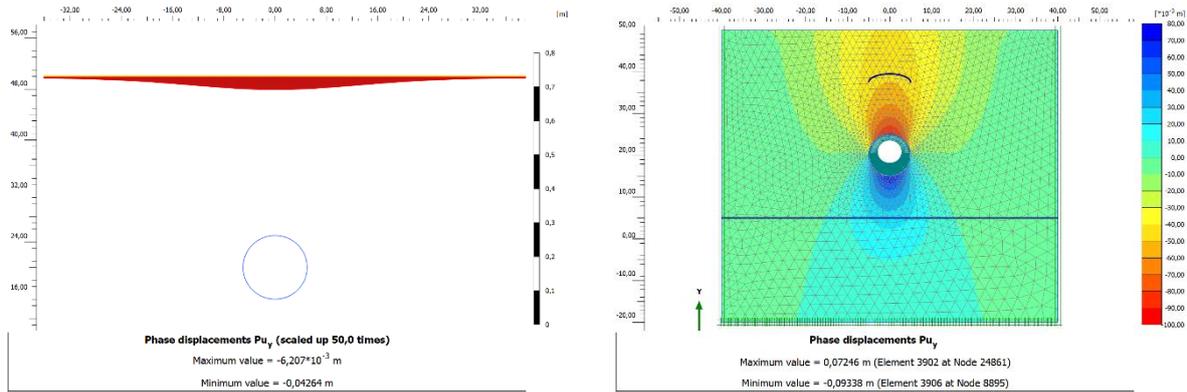


Figure 2 Déplacements verticaux et tassements en surface pendant la phase d'excavation

3.5 La phase passage du tunnelier

Dans cette phase on active la structure coque de la jupe du tunnelier et l'on impose une absence d'eau dans les groupes d'éléments de la section d'excavation.

La principale difficulté de cette phase réside dans le choix de la valeur à donner à la contraction. La contraction dans PLAXIS correspond à la réduction relative de section entre la section excavée (incluant l'influence d'une éventuelle surcoupe) et la section finale de la jupe du bouclier. *La borne supérieure de la contraction* correspond au cas où rien ne vient compenser le déplacement d'un terrain déformable qui a tendance à s'expanser radialement jusqu'à venir au contact de la jupe. La jupe étant infiniment raide, l'expansion du terrain est bloquée par la présence de la jupe (cas des sols).

Mais l'équilibre convergence / confinement à pression radiale nulle peut être atteint avant que le massif ne soit rentré en contact avec la jupe du bouclier. Les déplacements finaux sont alors inférieurs à la surcoupe et à la conicité de la jupe. C'est typiquement le cas d'un terrain à module de déformation élevé (rocher) où le déplacement radial lors de l'excavation est très faible. La décroissance de la contrainte radiale sur la courbe convergence est très rapide pour des déplacements faibles, car la pente à l'origine, déterminée par le module de déformation, est forte.

Il faut donc savoir quelle est la forme exacte de la jupe, et s'il y a une *surcoupe de construction*, réalisée par une molette extérieure biaisée par rapport à l'axe du tunnel.

Il importe ensuite de connaître le *mode de confinement utilisé* : pression de boue ou pression de terre. Dans le cas d'un tunnelier fonctionnant en pression de boue et avec surcoupe, et dans une moindre mesure un tunnelier à pression de terre avec injection radiale de bentonite, la boue sous pression est présente le long de la jupe et donc s'oppose au déplacement radial du terrain, ce qui diminue la contraction réelle. Dans le cas du tunnelier sans surcoupe, il est difficile d'imaginer le cheminement de la boue le long de la jupe et donc la contraction réelle est égale à la contraction théorique.

On pourrait envisager une contraction inférieure à 0.2 % pour le tunnelier à pression de boue *avec surcoupe*, et de l'ordre de 0.5 % avec un tunnelier à pression de terre *avec injection radiale de bentonite*. Dans le cas d'un tunnelier à pression de boue *sans surcoupe* ou d'un tunnelier à pression de terre *sans injection radiale* de compensation, il y aurait lieu de prendre en compte la contraction géométrique qui peut atteindre 1% à 1.5 %. Dans l'exemple présenté, avec une contraction de 1% non compensée, le passage du tunnelier accentue de 23 mm le tassement maximum en surface.

3.6 La phase d'injection du mortier de bourrage

Cette phase permet de prendre en compte explicitement l'injection du mortier de bourrage lorsque celui-ci est pompé à travers la jupe. On désactive la structure coque

correspondant à la jupe du tunnelier puis on applique une pression radiale, à priori uniforme, correspondant à la pression réelle estimée qu'exerce le mortier sur le sol.

On observe souvent que la pression de mortier exercée sur le terrain nécessaire pour stabiliser, voire réduire, les tassements en surface est supérieure de 1 bar au minimum à la pression de confinement en voûte. Dans l'exemple étudié, en injectant avec une pression de 2.7 bars (pression de confinement à l'axe + 1 bar) le tassement maximum en surface est réduit de 22 mm. Pour des tunnels à faible profondeur creusés dans des terrains déformables, l'application d'une différence de pression de 1 bar peut conduire à un soulèvement du terrain.

3.7 La phase de mise en place des voussoirs

Cette phase voit l'activation des éléments volumiques correspondant au mortier de bourrage et au revêtement en voussoirs, ainsi que de l'interface extérieur lorsque jugé nécessaire, et de la plaque fictive incluse dans les éléments volumiques du revêtement.

La figure 6 montre la distribution de l'effort normal et des moments de flexion dans le revêtement de l'exemple étudié (valeurs réelles = valeurs graphiques x 1000). Les analyses paramétriques montrent est que l'effort normal dans le revêtement est fortement influencé par la valeur de la pression d'injection du mortier de bourrage.

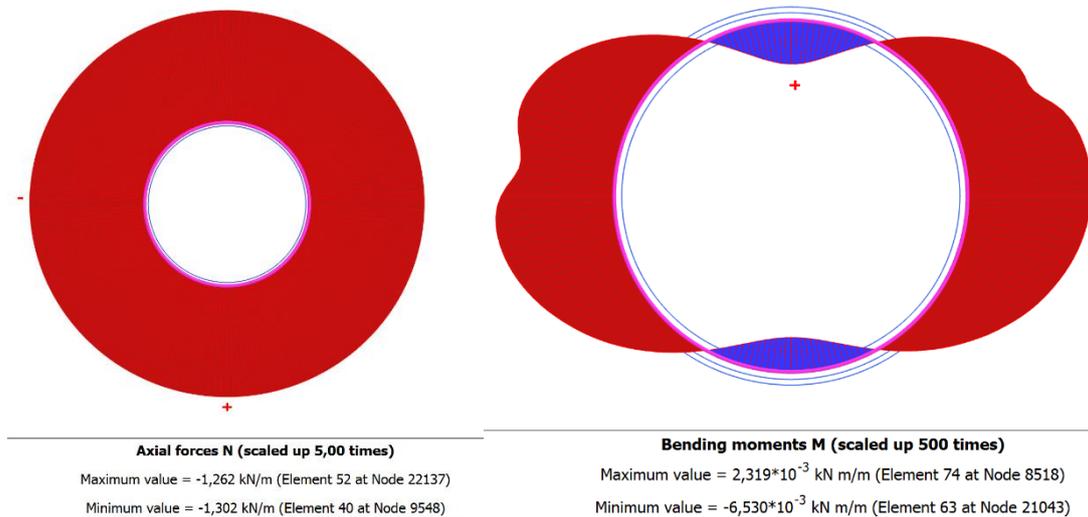


Figure 3 Effort normal et moments de flexion dans le revêtement

L'intérêt d'une modélisation volumique est de pouvoir visualiser instantanément les contraintes tangentielles dans le revêtement et donc de s'intéresser directement aux zones les plus sollicitées. Cette répartition des contraintes tient compte de l'épaisseur du mortier de bourrage qui participe à la redistribution des efforts en fonction de sa rigidité. Dans l'exemple étudié, la contrainte de compression dans le revêtement varie entre 1.6 et 2.2 MPa, en fonction de la répartition des moments de flexion.

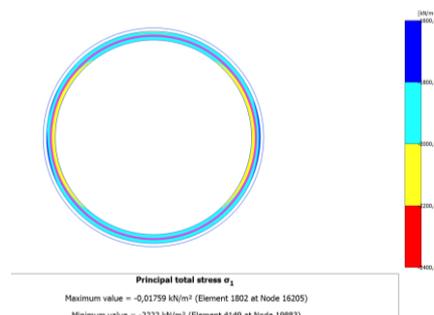


Figure 7 Contraintes dans le revêtement (1.6-2.2 MPa)

3.8 Consolidation

Cette phase est à appliquer pour dissiper les surpressions interstitielles produites lors des phases précédentes, lorsque les matériaux ont un comportement jugé non drainé lors des phases d'excavation et de passage du tunnelier. Elle présente un intérêt pour les terrains déformables peu perméables sensibles au phénomène de consolidation (argiles molles, limons argileux, argiles sableuses normalement consolidées).

On peut être confronté à plusieurs cas :

- La durée de consolidation est libre : la phase de consolidation est définie par la recherche d'une surpression hydrostatique minimale (exemple moins de 1 KPa) ou d'un degré de consolidation maximal (plus de 99 %) dans le modèle
- La durée de consolidation est imposée, par exemple un intervalle de temps entre le creusement de deux tunnels

Dans le premier cas le modèle calcule le temps nécessaire à la consolidation, dans le deuxième cas le modèle garde en mémoire les surpressions interstitielles non dissipées au bout de l'intervalle de temps imposé. On observe souvent dans cette phase une légère remontée de l'anneau, particulièrement dans les grands diamètres sous faible couverture.

4 Conclusion

L'augmentation de la profondeur et du diamètre constatée depuis plusieurs années pour les tunneliers à voussoirs pose certaines questions vis-à-vis de l'emploi des méthodes usuelles d'analyse et de dimensionnement des tunnels, notamment le concept de taux de déconfinement du terrain.

Le calcul des tunnels au tunnelier via l'évaluation du taux de déconfinement est un problème complexe dépendant de nombreux facteurs comme le confinement au front de taille, les dimensions géométriques du tunnelier, la pression d'injection et les caractéristiques du matériau de remplissage du vide annulaire...

La jupe du tunnelier a pour effet de bloquer le déplacement radial du terrain et donc de stopper le processus de déconfinement, ce qui peut conduire à des efforts dus au terrain insupportables pour les capacités usuelles des machines et du revêtement en voussoirs.

Afin de s'affranchir des difficultés liées à la détermination du taux de déconfinement, nous avons présenté ici un concept de calcul par la méthode des éléments finis, établi à l'aide du logiciel PLAXIS, permettant de simuler les différentes phases du creusement : excavation avec ou sans confinement, passage du tunnelier, injection du mortier de bourrage, pose du revêtement, comportement à long terme avec dissipation des surpressions hydrostatiques...et donc ne faisant pas appel à une valeur explicite du taux de déconfinement.

Il s'agit là des bases d'un concept de dimensionnement global des tunnels creusés par un tunnelier à voussoirs, destiné à mieux évaluer les efforts apportés par le terrain aux machines et aux revêtements. La compréhension de l'interaction terrain / machine / revêtement devient impérative compte tenu de l'extension sans cesse grandissante du domaine d'emploi de ces machines.

5 Références bibliographiques

Rat M. (1973) Ecoulement et répartition des pressions interstitielles autour des tunnels, *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées N° 68, Ref.1423, pp. 109-124*

Panet M. (1995). Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement, Presses des Ponts