

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Creusement par tunnelier pressurisé: confrontation de simulations tridimensionnelles aux mesures *in-situ*

Slurry shield tunnelling: comparison between *in situ* data and three dimensional numerical simulations

D.Dias & R.Kastner – URGC Géotechnique, INSA Lyon, France
S.Benmebarek – Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie

RÉSUMÉ: Cette communication présente la confrontation de simulations numériques 2D et 3D aux observations des mouvements verticaux et horizontaux lors du creusement par tunnelier à pression de boue. L'approche bidimensionnelle utilise le concept de perte de volume appliqué à chaque étape de creusement. Elle permet de simuler approximativement les mouvements observés mais nécessite l'usage de coefficients empiriques pour représenter en 2D un problème tridimensionnel. L'approche 3D vise à prendre en compte plus directement la physique du problème : soutènement du front, conicité du tunnelier, injection du vide annulaire puis consolidation du coulis. Si le principe des calculs 3D apparaît plus satisfaisant, ces simulations très lourdes supposent que soient parfaitement connus et simulés les nombreux paramètres qui contrôlent les mouvements induits par le creusement.

ABSTRACT: This paper presents the confrontation between various approaches of 2D and 3D numerical simulations and in situ measurements on vertical and lateral soil movements in relation with slurry shield tunnelling. The two dimensional simulations consider the concept of volume loss for every step of the construction and enable to calculate approximately the measured movements using a corrective coefficient due to 2D simplification. The 3D numerical simulations aim to take into account the physics of the problem: face supporting, conical shape of the machine, injection of grout in the annular void and its consolidation. If 3D numerical simulations appear overall more satisfactory than 2D simulations, they need very heavy calculations as well as a good apprehension of the main parameters which control the work of the tunnel boring machine.

1 INTRODUCTION

Les mouvements de sol liés au creusement d'un tunnel par tunnelier à pression de boue dépendent de la nature du sol mais aussi de nombreux paramètres de contrôle de la machine : pression de boue au front, surcoupe, conicité de la jupe, procédure et paramètres d'injection du vide annulaire, nature du coulis.

Si les observations effectuées *in situ* permettent d'analyser la contribution de ces divers paramètres aux déplacements du terrain autour du tunnelier, la prédiction de ces mouvements reste encore difficile et empirique. Les simulations numériques 2D utilisent des concepts tels que le déconfinement en contrainte ou en volume à chaque étape des travaux. Toutefois, ces approches nécessitent l'utilisation de coefficients empiriques similaires au coefficient de déconfinement et visant à prendre en compte la nature localement tridimensionnelle du problème.

Si l'on souhaite simuler l'incidence des principaux paramètres de creusement, seule une approche 3D prenant en compte chacun d'entre eux permettra de rendre compte directement de la physique du problème. Il faudra ainsi simuler correctement le soutènement du front, l'avancement de la jupe conique, l'injection du vide annulaire contrôlée en pression ou volume puis la consolidation du coulis.

Cette étude repose sur l'exemple du chantier de Vaise du métro de Lyon pris comme référence en raison des observations *in situ* complètes et précises réalisées sur divers plots expérimentaux.

2 DESCRIPTION DU SITE ET DU PROJET

En raison de l'environnement bâti du quartier de Lyon Vaise, le prolongement de la ligne D du métro de Lyon ne pouvait se réaliser qu'en souterrain. Par ailleurs le contexte géotechnique difficile a conduit à choisir la méthode du tunnelier à pression de boue.

Le tracé comporte 2 tunnels de 6,27 mètres de diamètre et de

950 m de long creusés sous la nappe avec une couverture faible n'excédant pas 15 m. L'horizon superficiel dans lequel se développe une grande partie du tracé est constitué de limons et argiles de faibles caractéristiques mécaniques, avec une teneur en eau naturelle localement proche de la limite de liquidité. Le revêtement du tunnel est en béton armé et est constitué d'anneaux de 1 mètre de longueur dont les voussoirs sont assemblés à l'abri du tunnelier. Afin de limiter les tassements en relation avec le vide annulaire, celui-ci est injecté en continu au fur et à mesure de l'avancement de la machine par six injecteurs situés en périphérie de la jupe. Cette injection de coulis inerte est contrôlée de manière continue en pression par un automate.

2.1 Dispositif expérimental

En vue d'identifier précisément les origines des mouvements de sol engendrés par la construction des deux tunnels, deux sections expérimentales ont fait l'objet d'une instrumentation complète. Ces observations avaient également comme objectif de constituer une base de données pour la mise au point de procédures de simulation numériques.

A cet effet, le programme expérimental comportait :

- Une reconnaissance géotechnique spécifique des sections expérimentales
- Le suivi en continu des mouvements et pressions interstitielles à proximité du tunnel comme en surface,
- L'enregistrement des principaux paramètres de fonctionnement du tunnelier.

La figure 1 présente une coupe du site expérimental faisant l'objet des analyses présentées ici. La section de mesure comportait :

- Des extensomètres verticaux à quatre points de mesure, les plus proches du tunnel étant situés à moins d'un mètre du tunnel.
- Des inclinomètres latéraux
- Une cellule de mesure de la pression interstitielle
- Un système de suivi des tassements de surface.

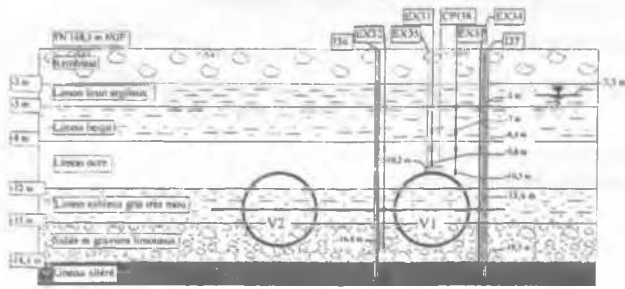


Figure 1 : Instrumentation de la section S2 (Ollier, 1997)

Tableau 1 : Propriétés mécaniques des sols rencontrés.

Paramètres	Remblais	Limon argileux	Limon beige	Limon ocre	Argile grise	Sables et graviers
Module volumique (MPa)	7,8	7,3	7,3	7,3	4,2	28
Module de cisaillement (MPa)	2,9	2,7	2,7	2,7	1,6	10,5
Cohésion (kPa)	30	10	15	15	5	0
Angle de frottement (°)	30	25	32	25	30	34
Angle de dilataance (°)	17	15	20	14	14	20
Poids volumique (kN/m ³)	19	20	20	21	20	21

Par ailleurs, 50 paramètres du tunnelier étaient enregistrés toutes les 2 secondes. A l'exception des mesures inclinométriques, l'ensemble des points de mesure étaient suivis en continu à l'aide d'une centrale d'acquisition lors du passage du tunnelier. On trouvera une description complète de ce dispositif dans (Ollier, 1997).

2.2 Caractérisation géotechnique

Une reconnaissance spécifique comportant des carottages, des essais pressiométriques et pénétrométriques a été conduite sur les sections expérimentales. Elle a été complétée en laboratoire par des essais triaxiaux et oedométriques. Le tableau 1 présente les propriétés mécaniques des différents horizons représentés sur la coupe de la figure 1.

Les différentes simulations 2D et 3D ont été effectuées en adoptant pour le sol un comportement élastique linéaire parfaitement plastique suivant un critère de Mohr Coulomb non associé. Les mesures de pression interstitielle ayant montré des dissipations très rapides des surpressions, les calculs ont été menés en conditions drainées avec un coefficient K_0 pris égal à $(1 - \sin \phi)$ pour ces horizons normalement consolidés.

3 REPONSE DU TERRAIN AU CREUSEMENT

Les observations (figure 2) ont montré que les mouvements pouvaient être décomposés suivant 5 phases principales, comme le montre l'enregistrement effectué sur l'extensomètre EX31, à 1m au dessus du tunnel :

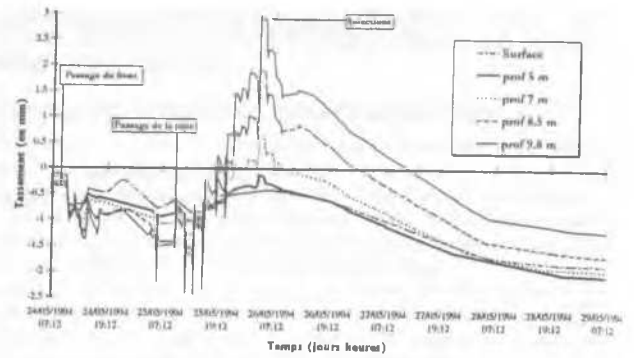


Figure 2 : Evolution des tassements (EX31).

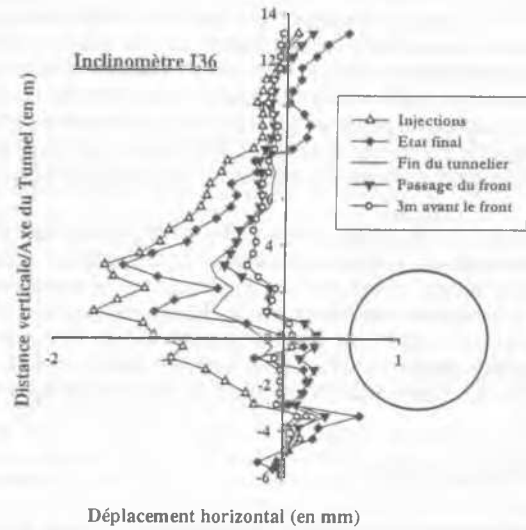


Figure 3 : Mouvements latéraux.

- Phase 1 : Avant le passage du front
Les tassements sont très faibles (<0,5mm).
- Phase 2 : Passage du front
On note au passage du front un tassement immédiat de l'ordre de 0,35 mm,
- Phase 3 : Passage de la jupe
Le tassement en profondeur augmente graduellement et atteint au maximum 2,5 mm. Il reste légèrement plus faible en surface.
- Phase 4 : injection du vide annulaire
Le point le plus proche du tunnel est soulevé de 3 mm au-dessus de sa position par les injections alors qu'il subit un très léger tassement en surface.
- Phase 5 : Consolidation finale
Le coulis inerte mais peu perméable s'essore progressivement, provoquant en se consolidant un tassement final en surface de 2 mm environ. A proximité du tunnel, le tassement reste plus faible, suite au soulèvement lié aux injections.

La figure 6 montre l'évolution des cuvettes de tassement. On note une cuvette assez étroite, avec un volume de l'ordre de 0,4 ‰ de la surface du tunnel et un léger soulèvement du sol latéralement qui peut être attribué à un fort niveau des pressions d'injection.

La figure 3 montre pour ces 5 phases l'évolution des déplacements horizontaux latéraux mesurés par inclinométrie à 1m du tunnel. On note essentiellement que le sol est repoussé latéralement au-dessus de l'axe du tunnel, phénomène lié aux injections, avant une convergence partielle dans la phase finale de consolidation.

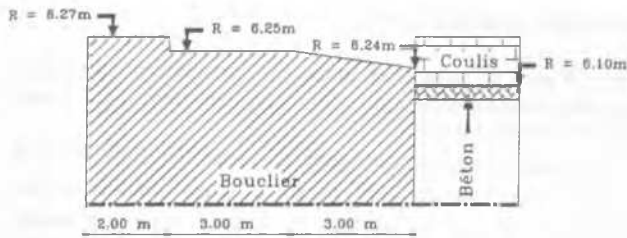


Figure 4 : Simulation en 4 phases.

Globalement, il apparaît de ces mesures que la pressurisation du front est très efficace avec des mouvements tant verticaux qu'horizontaux négligeables. Ensuite, la convergence du sol liée à la conicité du tunnelier provoque une augmentation des tassements. Les pressions d'injection du vide annulaire sont suffisantes pour repousser le sol à proximité du tunnel au delà de sa position initiale, tant verticalement qu'horizontalement. Toutefois, ceci ne permet pas d'annuler le tassement de surface survenu lors de la phase précédente. Enfin, le coulis inerte se consolide sur une période de l'ordre de 3 à 5 jours.

4 PROCEDURES DE SIMULATION NUMERIQUE

De nombreux auteurs ont décrit diverses procédures de simulation numérique des mouvements liés au creusement de tunnels, tels que (VanEekelen, 1997), (Bernat, 1996). Sur la base de nos observations, nous présentons et comparons ici deux approches, la première en 2D et la seconde en 3D. Pour ces procédures, nous avons retenu les phases de travaux résumées par le schéma de la figure 4.

- Passage du front
- Passage du tunnelier
- Injection du vide annulaire
- Consolidation du coulis

4.1 Analyse bidimensionnelle

Elle est réalisée sur une coupe orthogonale à l'axe du tunnel suivant le schéma de la figure 1. Dans cette approche, les différentes phases de creusement sont simulées par la modification du chargement à la périphérie du tunnel. Le chargement peut être appliqué soit en contraintes, soit en déplacements. Pour la première approche, (Bernat, 1996) a montré la nécessité d'appliquer des taux de déconfinement en contrainte normales et tangentiels différents.

L'approche en déplacement consiste à simuler les différentes étapes à l'aide de variations de diamètre de l'excavation. C'est cette seconde approche que nous avons adoptée ici. On modélise un anneau rigide en contact avec le sol et représentant le tunnel dans un premier temps puis le revêtement. Son interaction avec le sol est modélisée par des éléments d'interface ayant un comportement de type Mohr Coulomb. L'analyse est effectuée en grands déplacements avec le code de calcul Flac2D.

Suivant (DeBorst, 1996) et (BenMebarek, 1998), on admet dans cette approche que la base du tunnel est fixée.

Les différentes étapes sont ensuite modélisées de la manière suivante :

- Le passage du front est simulé par une réduction des caractéristiques en frottement à l'interface sol/tunnelier ($c=0$, $\varphi=11,5^\circ$) autorisant le glissement du sol autour du tunnel. On retrouve ainsi le tassement mesuré en l'absence de perte de volume à ce stade, le tunnelier travaillant sans surcoupe.
- Le passage du tunnelier conique est ensuite simulé par une réduction du diamètre du tunnel.
- La phase d'injection est simulée par un accroissement du diamètre du tunnel. (BenMebarek, 1998) a montré que cette procédure était nettement plus satisfaisante que le reconfinement en contraintes.

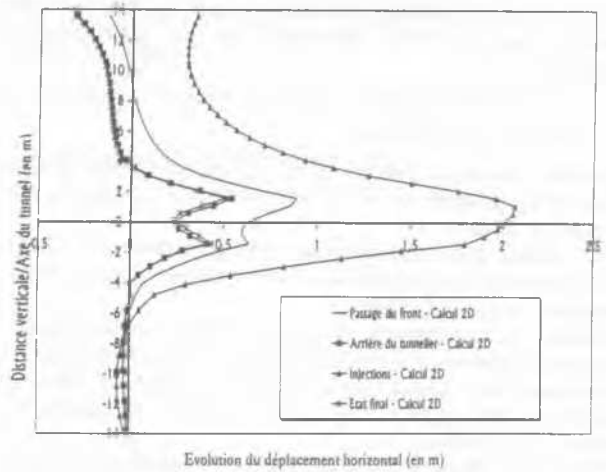


Figure 5 : Mouvements latéraux à 4 mètres de l'axe du tunnel.

d) Enfin, la phase de consolidation est à nouveau simulée par une diminution du diamètre de l'excavation.

Il convient de noter que ces variations de diamètre qui ne peuvent être déterminées a priori sont ici ajustées phase par phase par calage sur le point de mesure le plus profond de l'extensomètre EX31.

4.2 Analyse tridimensionnelle

L'objectif de l'analyse tridimensionnelle proposée est de réduire la part des coefficients empiriques qu'il est nécessaire d'introduire dans les analyses 2D. En effet, ces coefficients ne peuvent être évalués a priori en raison de la complexité des interactions 3D en jeu au niveau du tunnelier. Aussi, ces approches 2D nécessitent un étalonnage préalable au début de chaque chantier et les corrections ne peuvent être mises directement en rapport avec les paramètres de contrôle de la machine. Les différentes conditions aux limites introduites dans l'analyse 3D visent à simuler de manière simple le processus constructif sont les suivantes :

- Au niveau du front de taille, on applique au terrain une pression normale égale à la pression effective appliquée par la boue bentonitique.
- Le tunnelier est supposé rigide, avec une réduction de diamètre conforme à la figure 4.
- L'effet de l'injection du coulis inerte est simulée par l'application d'une pression sur la paroi interne de l'excavation. La valeur de cette pression est contrôlée par le réglage de l'automate d'injection du tunnelier. On admet qu'elle est appliquée sur une longueur de 5 mètres.
- Enfin, pour ces premiers calculs, la consolidation est modélisée approximativement en imposant progressivement la dissipation de la pression interstitielle. Dans une prochaine étape, la simulation réelle de la consolidation, en calcul couplé, sera envisagée.

5 RESULTATS DES SIMULATIONS

5.1 Simulations bidimensionnelles

Pour les différentes phases, les conditions aux limites ont été ajustées conformément à la description donnée en 2.1 par ajustement au déplacement du point de mesure situé à 1 mètre au-dessus du tunnel.

On note à la figure 5 que les déplacements inclinométriques calculés ainsi sont voisins de ceux mesurés (figure 3). Par contre, le tassement de surface final n'est pas simulé correctement. L'approche 2D proposée ici, qui apparaît satisfaisante lorsque le niveau d'injection est modéré (BenMebarek, 1998) ne permet

pas de rendre compte des phénomènes complexes liés au soulèvement local du terrain provoqué par une forte pression d'injection.

5.2 Résultats des calculs 3D

L'objectif était ici de simuler directement le creusement suivant le processus présenté en 2.2 et sans ajustement a posteriori sur un point de mesure.

Le premier calcul réalisé suivant cette approche a montré des écarts importants par rapport aux observations et a conduit aux ajustements partiels suivants :

- réduction de la concité de la jupe pour tenir compte de la migration probable vers l'avant du coulis injecté à haute pression.
- ajustement de la longueur de la zone où l'injection du coulis est simulée par une pression (3m), puis ajustement du module du coulis ($E_c = 1,5 \text{ MPa}$).

Dans ces conditions, l'évolution des mouvements en profondeur comme en surface apparaît qualitativement semblable à celle observée (figure 7). Toutefois le tassement de consolidation du coulis, dont le module moyen est difficile à mesurer précisément, apparaît trop élevé dans cette simulation. Par contre les cuvettes de tassement présentent une évolution proche de celles observées (figure 6).

Le résultat est moins probant pour ce qui concerne les mouvements horizontaux qui apparaissent surévalués au niveau du tunnel.

Il faut noter que les difficultés rencontrées pour ces simulations 3D tiennent pour l'essentiel à la difficulté de simuler simplement le processus d'injection :

- d'une part le processus lui-même est complexe avec des à coups de pression importants liés au mode de contrôle automatique par seuil de pression. Il semble d'ailleurs que ce mode conduit indirectement au contrôle des volumes injectés.
- d'autre part, le coulis est de nature rhéologique complexe, passant progressivement de l'état liquide à l'état de sol frottant.

6 CONCLUSIONS

La prévision par simulation numérique des mouvements engendrés lors du creusement d'un tunnel par tunnelier à front pressurisé reste un problème difficile.

Les simulations bidimensionnelles nécessitent l'utilisation de coefficients de passage du 3D au 2D difficiles à estimer a priori. De plus, l'approche 2D est mise en défaut lorsque le processus engendre une succession de cycles de déconfinement et de re-confinement comme dans l'exemple présenté ici.

Les simulations 3D, à priori plus réalistes, sont confrontées à la difficulté de simuler simplement le processus complexe de remplissage du vide annulaire, par injection sous pression d'un coulis aux propriétés rhéologiques complexes et évolutives.

REFERENCES

- BenMebarek, S., R. Kastner & C. Ollier (1998). Auscultation et modélisation numérique du processus de creusement à l'aide d'un tunnelier, *Géotechnique* 48, N°6, 801-818.
- Bernat, S. (1996). Modélisation des déformations induites par le creusement d'un tunnel - Application au métro de Lyon-Vaise, Ph. D Thesis, Ecole Centrale de Lyon.
- De Borst, R., W.L.A.H. Van den Broek & A.E. Groen (1996). Two and three dimensional numerical modelling of a guided pipe-jacking in soft soil, *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*, London, April 1996. Rotterdam : Balkema.
- Ollier, C. (1997). Etude expérimentale de l'interaction sol-machine lors du creusement d'un tunnel peu profond par tunnelier à pression de boue, Ph. D Thesis, INSA de Lyon.
- Van Eekelen S., P. Van den Berg & K.J. C. Bakker (1997). 3D analysis of soft soil tunneling, *Proceedings of the fourteenth international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Hamburg, 1997. Rotterdam : Balkema.

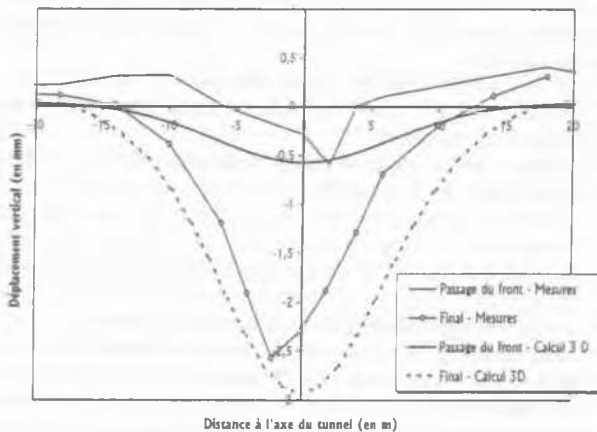


Figure 6 : Cuvettes de tassement

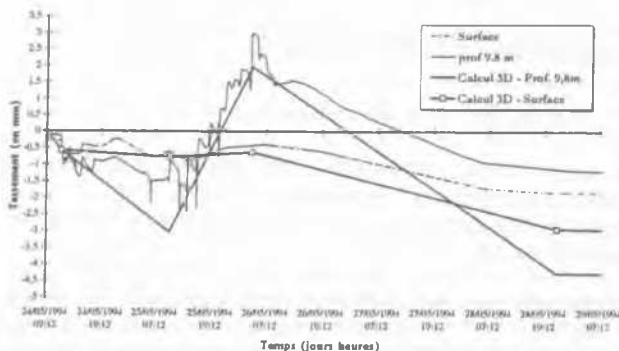


Figure 7: Déplacement vertical