

Développement d'un essai de convergence pour simuler l'action d'un tunnelier

Development of a convergence test to simulate the action of a tunnel boring machine

Philippe REIFFSTECK^{1*}, Michel RISPAL², Carlos MINATCHY¹, Alain LE KOUBY¹

1 Univ Gustave Eiffel, SRO, F-77454 Marne-la-Vallée, France

2 Fondasol, Direction technique, F-84140 Montfavet, France

**philippe.reiffsteck @univ-eiffel.fr*

RESUME : Dans le cadre du projet ANR E-Pilot, un appareillage innovant a été développé pour tenter de réaliser un essai de convergence dans les sols. Cet appareil a été construit sur la base d'une sonde pressiométrique instrumentée localement au niveau de la paroi par 12 capteurs de déplacement locaux aptes à suivre la diminution de volume imposée par le contrôleur pression volume. La mise en place est réalisée par autoforage et pour cette première tentative en condition verticale. Le développement de l'appareil et les premiers essais réalisés sur le site du métro de Toulouse sont présentés. Plusieurs essais ont été réalisés à côté d'un puit de ventilation de la nouvelle ligne construite par Tisséo dans les molasses. L'analyse des essais permet d'observer le phénomène de manière probante.

ABSTRACT: As part of the ANR E-Pilot project, innovative equipment has been developed to attempt to perform a convergence test in soil. This device was constructed on the basis of a pressuremeter probe instrumented locally at the wall by 12 local displacement sensors capable of monitoring the volume reduction imposed by the volume pressure controller. Installation is carried out by self-drilling and, for this first attempt, in vertical conditions. The development of the device and the first tests carried out at the Toulouse metro site will be presented. Several tests were carried out next to a ventilation shaft on the new line built by Tisséo in the molasses. Analysis of the tests provides conclusive evidence of the phenomenon.

Mots-clés: mesure en place, tunnel, convergence, sol, forage.

1 INTRODUCTION

La convergence des tunnels est l'un des problèmes qui affectent les performances des tunnels, tant pendant leur excavation pour des raisons de sécurité que pour leur impact sur le voisinage. Habituellement, la convergence est estimée sur la base d'une étude conventionnelle du sol, de l'expertise des praticiens et d'études paramétriques impliquant de nombreuses modélisations numériques. Afin d'obtenir de nouvelles informations sur cet obstacle majeur, cette recherche propose un essai visant à développer un protocole innovant adapté à l'excavation et aux structures souterraines.

L'idée est de reproduire les sollicitations particulières (trajectoires de contraintes) que subissent les massifs de sol lors du passage du tunnelier. Dans un deuxième temps, des essais cycliques pourraient être réalisés pour évaluer l'effet du passage des trains. L'objectif initial était de réaliser un forage spécifique « à pression de boue » in situ en simulant l'excavation, c'est-à-dire la convergence et l'application d'une pression de boue dans la gamme de valeurs utilisées par les tunneliers.

Une des ambitions du projet ANR E-Pilot piloté par l'Univ. G. Eiffel était de développer un essai basé sur l'utilisation d'équipements disponibles dans le commerce de manière innovante, afin de faciliter un transfert rapide vers l'industrie. Le but de l'essai est de reproduire l'évolution des contraintes entre l'état initial et l'état résultant de la convergence de la masse autour de l'excavation, en effectuant un déchargement contrôlé. L'avantage de cette approche serait de pouvoir simuler facilement différentes spécificités géométriques ou procédurales du creusement de tunnels dans un massif intact. Le dispositif pourrait être mis en œuvre verticalement comme pour un sondage classique au pressiomètre ou horizontalement dans le cas de grandes excavations. Réalisés verticalement, ces essais seront reproduits tout au long du tracé du tunnel. Une étude paramétrique sera également réalisée afin d'estimer l'intensité de l'impact des paramètres géologiques et mécaniques de la roche sur la convergence du tunnel. L'exploitation des résultats suppose que les volumes injectés ou expulsés de la sonde puissent être mesurés avec un haut degré de précision : il est donc crucial que les mesures de

volume soient effectuées au niveau de la zone sollicitée afin de limiter les pertes de charge qui se produisent lorsqu'elles sont effectuées en surface. Dans le projet E-pilot, un développement a été proposé pour avoir accès à ces mesures locales, c'est-à-dire aussi près que possible de la sonde.

2 CONCEPTION

2.1 Principe

Le concept de cet essai consiste à simuler le plus fidèlement possible, à échelle réduite, la progression d'un tunnelier. L'outil tricône et l'outil de forage représentent la roue de coupe (Figure 1). La partie intermédiaire correspond à la jupe entre cette première section et la zone de pose des segments de tunnel.

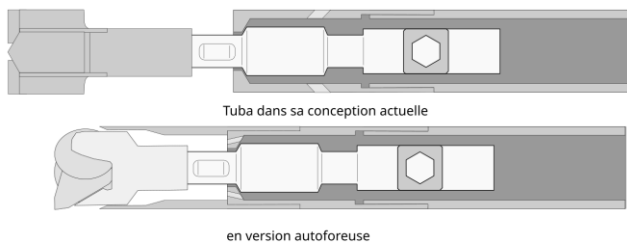


Figure 1. Tête de forage du système Tuba actuel et conception prévue

La partie fendue du tube est celle où s'appliquent les contraintes et où sont réalisées les mesures de convergence. Dans une première approche, il a été proposé de maintenir les lamelles métalliques à un diamètre donné à l'aide d'un anneau métallique dans lequel passerait le train interne de tiges, qui serait déplacée ultérieurement. Une fois le train de tiges interne retiré, la sonde est positionnée de manière à ce que la membrane touche la paroi interne du tube. Elle repousse l'anneau et prend sa place (Figure 2).

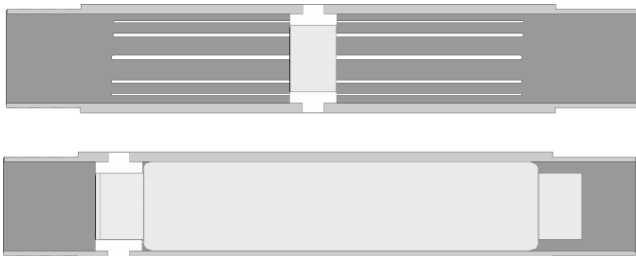


Figure 2. Système d'ancrage permettant de positionner la membrane devant le tube à fente.

2.2 Conception

La première version était basée sur un système de tube lanterné avec enlèvement de matière au fur et à mesure

de son avancement, de manière similaire à un pressiomètre autoforeur. La version développée en interne chez Fondasol est appelée Tuba. D'un diamètre extérieur de 60 mm, il est équipé d'un outil de forage qui reste en place pendant les phases d'essai intermédiaires. Seule la tige de forage interne est rétractée pour faire de la place à la sonde de mesure (Figure 3 et Figure 4).

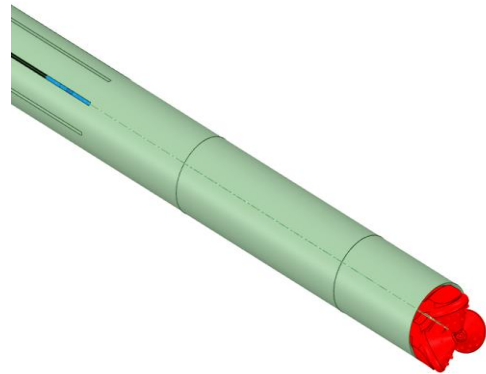


Figure 3. Zoom sur l'outil de forage et le patin de coupe



Figure 4. Vue d'ensemble et coupe transversale de l'ensemble du dispositif d'essai

Dans la deuxième version, le diamètre a été augmenté afin d'offrir plus d'espace annulaire au niveau de la sonde pour accueillir le système de mesure, et au niveau de l'ensemble de tiges pour permettre de tirer les câbles vers le haut. L'outil de coupe de l'outil de forage a également été allongé.



Figure 5. Éléments de la sonde

Afin de simplifier la conception, nous avons choisi d'utiliser un concept de packer déjà utilisé dans l'industrie du forage qui a été refabriqué par Fondasol (Figure 5). La figure montre également l'outil rotatif

tricône utilisé et les événements permettant la remontée des débris de forage.

2.3 Système de mesure

La mesure indirecte de la déformation radiale par la mesure du volume a été largement utilisée sur les pressiomètres autoforeurs développés au LRPC de Saint-Brieuc (Baguelin et al., 1975 ; Jézequel et Touzé, 1970). Elle donne une précision satisfaisante et présente l'avantage de réduire les coûts en cas de perte du dispositif. Toutefois, si un espace annulaire est laissé entre la gaine et le corps de la sonde, il n'y a aucune raison, a priori, pour que la gaine reste cylindrique pendant l'insertion (action de la pression du sol).

Par conséquent, la mesure de la déformation radiale basée sur les volumes peut être critiquée. Ghionna et al. (1982) ont comparé les techniques de mesure des contraintes horizontales à l'aide de capteurs de déformation radiale et de mesures de volume. Pour ces raisons, dans cette étude, les capteurs locaux ont été préférés pour leur fiabilité.

La mesure directe à l'aide d'un palpeur local équipé de jauges ou poussant un LVDT permet d'obtenir une précision de 10^{-4} , mais présente un risque de perte en cas de rupture de la membrane et un investissement important. Ghionna et al. notent qu'une sonde défectueuse conduit à une surestimation de la pression du sol et concluent en disant « avant de développer de nouvelles méthodes d'interprétation des courbes, nous devrions nous concentrer sur l'amélioration du matériel et de l'électronique » (il s'agissait d'un Camkometer) (1983).

Sans aucun doute, l'utilisation de capteurs à effet Hall affleurants ou de fibres optiques pourrait résoudre ces difficultés.

Pour notre prototype, nous avons choisi de suivre le déplacement de la gaine à l'aide de six capteurs disposés à 60° , comme le montre la Figure 6. Nous pourrions également utiliser six transducteurs de déplacement sans contact ciblant les lamelles métalliques à l'extrémité de la zone de mesure. La déformation radiale maximale à mesurer sera limitée à 20 - 25 %.

Pour mesurer la convergence de la cavité, des capteurs de déplacement sans contact suivront le mouvement des lamelles métalliques le long d'une ou plusieurs lignes génératrices.



Figure 6. Les deux parties du tube fendu avec les aimants attachés

L'utilisation de capteurs à effet Hall (Asch et al., 1998 ; Hall E.H., 1879) a été choisie pour mesurer les déplacements relatifs verticaux. Le principal avantage de ce type de capteur est qu'il permet de mesurer la position ou le déplacement latéral à travers une paroi non ferromagnétique séparant l'objet supportant l'aimant de la sonde.

Une première étape a été de tester la linéarité du capteur et l'influence de la lamelle métallique formée par la membrane.

Le capteur testé est un capteur analogique à effet Hall Honeyvell, compensé en sensibilité et en température (Figure 7). Le circuit électronique et le principe de fonctionnement sont simples : le capteur est alimenté en tension continue sur l'une des trois broches, marquée +, la seconde marquée - est reliée à la masse, enfin la dernière marquée O est utilisée pour la mesure.

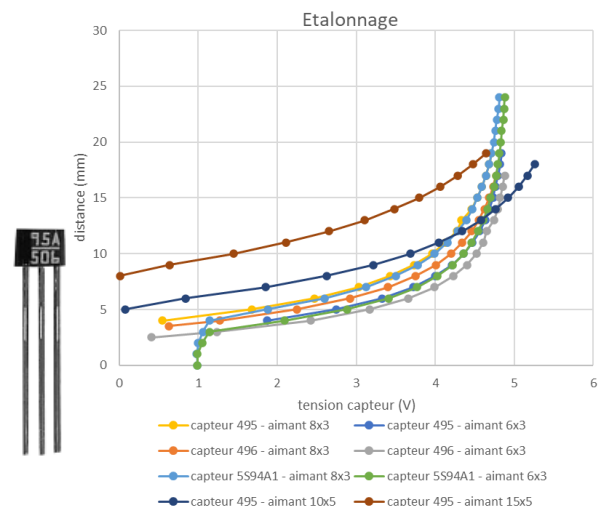


Figure 7. Capteurs à effet Hall Honeyvell SS495

Une bonne linéarité est observée sur la plage de mesure. Une étude paramétrique a été réalisée en fonction des caractéristiques des capteurs et de la nature des aimants.

3 SITE

Les essais ont été réalisés en novembre 2024. Le site est situé à Toulouse, sur une bouche d'aération de la ligne C du métro. Il s'agit de la structure PTR, un puits de ventilation entre les stations Limayrac et Ormeau (Figure 8, Figure 10, Figure 11).



Figure 8. Carte des lignes de métro Tisseo à Toulouse



Figure 9. Carte géologique du site PTR (Géoportail)

D'après les études du sol, principalement basées sur des carottages et le modèle géologique élaboré dans le cadre du projet, la stratigraphie est constituée de molasse indifférenciée avec quelques couches de molasse grossière. Cependant, on observe une grande dispersion, probablement due à l'intervention humaine (Figure 9).



Figure 10. Dessins du site PTR, le puits est le mur circulaire au centre

Les opérations de forage ont été sous-traitées à l'agence Fondasol Toulouse.



Figure 11. Vue du site testé à proximité du mur en coulis déjà réalisé

4 MISE EN SITUATION

La sonde a été mise en œuvre sur un des sites d'étude du projet E-Pilot. Tous les câbles et tuyaux sont placés dans les tubages de forage, prêts à être mis en place pendant le forage (Figure 12). Une fois que la sonde est purgée de toutes bulles d'air, le placage de la sonde sur la paroi interne du tube fendu est réalisé, tous les capteurs sont mis à zéro et l'enregistrement est démarré. Après le pré-forage du tube, la cavité d'essai est créée par la sonde elle-même.



Figure 12. Préparation de la sonde et mise en place par la sondeuse

Le test comporte deux phases principales :

- d'abord une phase de relaxation pour permettre à la potentielle surpression interstitielle induite par la mise en place de se dissiper,
- une phase de déchargement qui peut être réalisée par étapes (paliers de pression ou de volume) ou à un taux de déformation radiale ou pression continu.

Dans les exemples présentés ci-après, toutes les figures présentées sont en fonction du temps, hormis pour la Figure 13 et la Figure 17, l'axe des ordonnées est en Volts. Les informations de la Figure 7 peuvent être utilisées pour transformer le signal en déplacement radial.

4.1 Premier exemple

La Figure 13 synthétise l'ensemble des mesures réalisées par le contrôleur pression volume (CPV) pendant les phases successives de forage, de dissipation et d'essai de convergence.

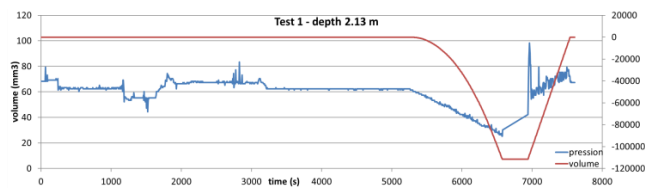


Figure 13. Ensemble des mesures

La Figure 14 détaille les mesures réalisées au niveau des palpeurs de la sonde et montre bien les phases de mise en rotation de l'outil de forage, descente dans le tubage, puis poussée de la sonde dans le sol avec foration.

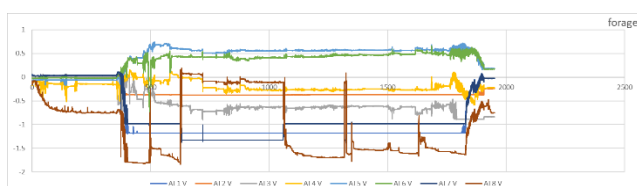


Figure 14. Mise en place par la sondeuse

La Figure 15 présente à pression contrôlée constante par le CPV, la phase de dissipation qui a été fixée d'après l'expérience acquise avec la mise en œuvre des pressiomètres autoforeurs, à 30 minutes (Baguelin et al., 1978).

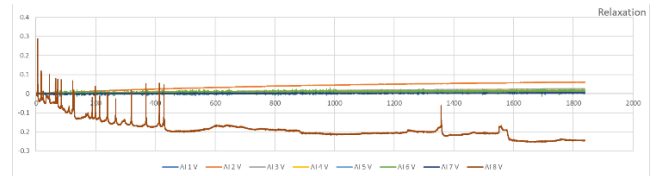


Figure 15. Relaxation

La phase de convergence a été réalisée pour cet exemple en vitesse de pression (Figure 16).

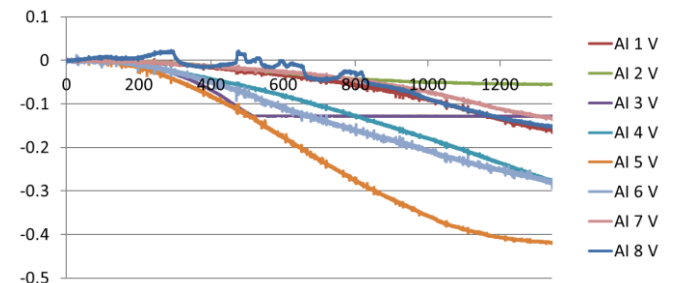


Figure 16. Essai de convergence

On observe que tous les capteurs ont répondu, certains montrent une variation symptomatique de sortie de plage de mesure ou de réarrangement.

Toutefois, la conclusion semble être que la sonde ne se déforme pas de manière parfaitement cylindrique, ce qui était attendu.

4.2 Second exemple

Les mêmes phases d'essais ont été imposées lors de ce deuxième exemple (Figure 17, Figure 18, Figure 19, Figure 20). La phase de convergence a cette fois-ci était réalisée en paliers décroissants de pression.

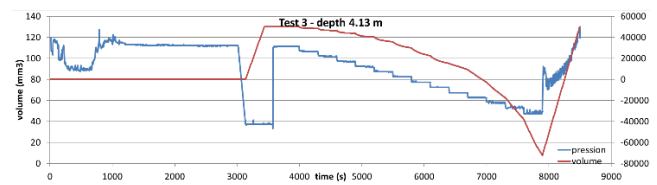


Figure 17. Ensemble des mesures

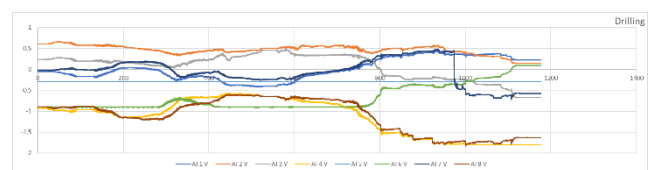


Figure 18. Mise en place par la sondeuse

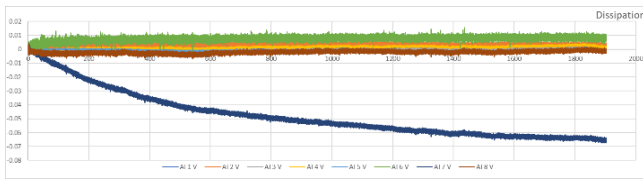


Figure 19. Phase de dissipation

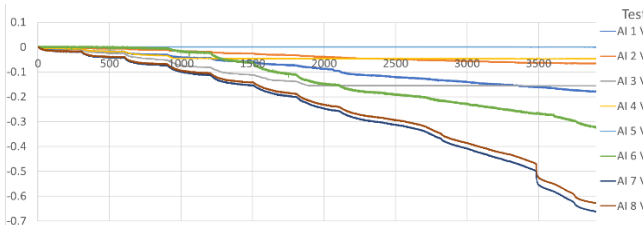


Figure 20. Essai de convergence

La Figure 21 présente le comportement de l'ensemble terrain-sonde analysé dans un diagramme (pression, volume). La courbe de convergence représente la réponse du terrain.

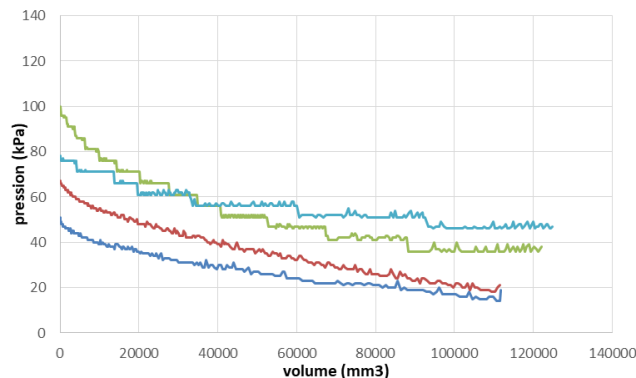


Figure 21. Courbes de convergence

Pour les essais présentés, les courbes donnent la même tendance, que ce soit lors du déchargement à vitesse constante ou par paliers.

5 BILAN – DISCUSSION

Les essais ont pu être réalisés conformément à l'objectif malgré les difficultés du chantier.

Au bout du cinquième essai, la sonde a présenté des défauts. Le colmatage de l'outil de forage dans une couche plus rigide a entraîné le cisaillement des vis de positionnement, ce qui a provoqué la rotation du tube, la déconnexion de la tubulure de fluide et une traction excessive sur les câbles jusqu'à la rupture.

Il n'y a pas eu de temps disponible pour effectuer les réparations nécessaires en raison des contraintes et retards accumulés sur chantier (non disponibilité des

accès chantier, intervention des entreprises tierces non prévues).

6 CONCLUSIONS

Le projet ANR E-Pilot piloté par l'université G. Eiffel avait pour ambition de développer une sonde apte à mesurer le phénomène de convergence qui est un point essentiel pris en compte dans la conception des ouvrages souterrains. La conception, la construction et la validation d'un nouveau prototype de sonde capable de converger au lieu de réaliser une expansion ont été réalisées avec succès. Des essais ont été effectués sur la ligne de métro de Toulouse, même si des difficultés ont été rencontrées en raison des contraintes du chantier limitant l'intervention de l'équipe de recherche.

Les résultats sont conformes aux attentes. Toutefois, le budget restreint de cette action a limité la poursuite des essais.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'organisme de financement ANR pour son soutien financier, les sociétés Tisséo et Fondasol pour leur soutien logistique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Asch G. et coll. (1998) Les capteurs en instrumentation industrielle Ed. Dunod, 5ème édition, 833 pages
- Baguelin F. Jézéquel J., (1975), Further insights on the self-boring technique developed in France, In situ measurement of soil properties Rayleigh, ASCE, pp. 231-243
- Baguelin F., Jézéquel J., Shield D.H. (1978) The pressuremeter and foundation engineering, Transtech publications, 618 pages
- Ghionna V. Jamiolkowski M., Lacasse S., Ladd C.C. Lancellotta R., Lunne T., (1983), Evaluation of self-boring pressuremeter, Symp. In situ testing, Paris, Vol. 3, pp.293-301
- Hall E. (1879). On a New Action of the Magnet on Electric Currents. American Journal of Mathematics. 2 (3): 287–92.
- Jézequel J., Touzé J., (1970), Sonde foreuse pressiométrique, Brevet d'invention N°1.596.747, 5 pages