

# ESTIMATION DE L'EFFET DE LA GÉOLOGIE ET DES PARAMÈTRES DU TUNNELIER SUR LES TASSEMENTS PAR LES RÉSEAUX DE NEURONES

**R. BOUBOU, F. EMERIAULT, R. KASTNER**  
Université de Lyon, INSA-Lyon, LGCIE

## 1. INTRODUCTION

Lors de creusement des tunnels à faible profondeur en site urbain, une grande attention doit être apportée à l'évaluation des mouvements induits par le creusement, ces mouvements pouvant induire des dommages dans le bâti existant et sur les réseaux enterrés. La forme et l'amplitude des tassements de surface sont influencés principalement par l'ensemble des paramètres géométriques et mécaniques du tunnel et de son revêtement, des paramètres géologiques du massif traversé et des paramètres de fonctionnement de la machine utilisée pour le creusement. D'après les observations effectuées sur différents chantiers, la description a posteriori des tassements a pour l'instant été principalement basée sur des paramètres géologiques et géométriques.

Les nouvelles méthodes analytiques ou numériques ([VAN 06], [KAS 06]) offrent la possibilité de représenter le comportement du terrain lors de son creusement et de prendre en compte l'influence des paramètres de fonctionnement du tunnelier sur le tassement. En revanche, ces méthodes sont très consommatrices en temps, la principale difficulté résidant dans le choix des lois complexes de comportement des sols à considérer et dans la détermination des nombreux paramètres, et des approches alternatives sont

nécessaires pour corréliser les mouvements au sol aux paramètres de fonctionnement de TBM. Par ailleurs, ces méthodes numériques n'ont pour l'instant accordé une attention particulière qu'à des paramètres simples de l'interaction sol-tunnelier : les pressions appliquées par le tunnelier pendant les différentes phases de confinement et d'injection sont ainsi généralement considérées a priori comme les facteurs les plus influents sur le tassement.

Une réduction de tassement est en effet généralement associée à l'augmentation de la pression de confinement ([OOT 06], [PHI 06]), de même pour la pression d'injection derrière les anneaux de revêtement du tunnel ([KOM 01], [SUW 07]). Les paramètres de pilotage de tunnelier ont été également étudiés comme la vitesse d'avancement de tunnelier [MEL 97], la poussée des vérins [MAT 94] et les paramètres de déviations du tunnelier pendant son avancement [VAN 05].

Etant donné leur capacité à traiter des problèmes complexes et non linéaires, les réseaux de neurones artificiels [SHA 04], [JAK 08]) constituent un outil mathématique qui a été utilisé depuis plus de 20 ans dans le domaine de génie civil : après un apprentissage sur un ensemble de données exemples, ces systèmes sont capables de capturer les relations fonctionnelles subtiles qui peuvent exister entre elles, même si ces relations sont inconnues ou si leur

signification physique est difficile à expliciter [MAI 00]. Ce principe est fondamentalement différent des méthodes empiriques et statistiques les plus traditionnelles qui nécessitent la connaissance (ou le postulat) d'une relation mathématique entre les données. Les premiers travaux de recherche ont montré que les réseaux de neurones pouvaient constituer un outil puissant pour l'étude du tassement des tunnels, en particulier pour analyser le tassement induit par le creusement ([KIM 01], [SUW 06]).

Les réseaux de neurones permettent la prise en compte de différents types de paramètres d'excavation qui sont difficiles à être étudiés par les méthodes traditionnelles. En intégrant des combinaisons non linéaires plus complexes, les paramètres d'excavation en particulier ceux de fonctionnement de tunnelier sont plus facilement analysés avec cette méthode ([JAV 06], [SAN 08]). De plus, cette approche est moins exigeante sur la prise en compte des conditions géologiques, elle ne nécessite pas d'identification des lois de comportement pour représenter la variabilité du sol [RAN 09].

Le but de la présente étude est de proposer et d'évaluer une méthodologie basée sur les réseaux de neurones pour déterminer les paramètres de fonctionnement du tunnelier les plus influents sur le tassement, en tenant compte également des paramètres géologiques et géométriques. Les données analysées sont celles du Lot 2 (4.7 km) de la ligne B du métro de Toulouse, creusé par tunnelier à pression de terre. Une procédure d'élimination permet d'identifier les paramètres de fonctionnement du tunnelier les plus influents.

## 2. LE PROJET DE LA LIGNE B DU MÉTRO DE TOULOUSE

La ligne B du métro de Toulouse (16 km de long) traverse la ville du Toulouse du nord au sud sous des zones avec différentes densités urbaines. Elle a été réalisée en 5 lots par trois types différents de tunnelier : tunnelier à pression de terre pour les lots 2 et 5; à pression de boue pour le lot 4 ; et le lot 3 par un tunnelier à pression d'air. Le diamètre excavé est égal à 5.6 m pour le Lot 3 et 7.8 m pour les autres lots. Le sol de la ville de Toulouse est constitué essentiellement d'une molasse surconsolidée (avec une valeur de  $K_0$  le coefficient de pression latérale des terres au repos voisine de 1.8) couverte par des formations d'alluvions et des remblais historiques.

### 2.1 Reconnaissance géologique

La campagne de reconnaissance géologique effectuée sur le projet de métro du Toulouse [ANT 98] contient 303 sondages situés entre 30 et 50 m de l'axe du tracé du tunnel (en moyenne un point de reconnaissance tous les 63 m du tracé).

Pour l'analyse effectuée sur le Lot 2, la nature et l'épaisseur de chaque couche de sol ont été déterminées à partir de ces sondages. Le sol a été présenté en cinq catégories qui sont les suivantes : Couverture (qui représente les rem-

blais et les alluvions), Argile, Argile sableuse, Sable et Dur (conglomérat). L'épaisseur de chaque type du sol a été calculée entre l'axe du tunnel et jusqu'à la surface. Seuls 95 sondages ont été retenus pour cette étude (ceux pour lesquels un profil de tassement transversal pouvait être défini). Une analyse statistique est effectuée pour déterminer les profils de sol les plus fréquents (Tableau 1).

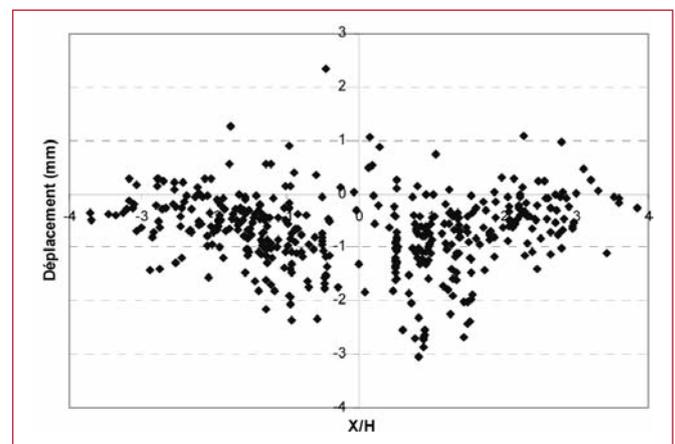
Profil	Couverture %	Argile %	Argile sableuse %	Sable %	Dur %	Fréquence %
1	25	3	45	22	5	12.63
2a	30	40	20	0	10	8.42
2b	30	40	30	0	0	8.42
2c	40	30	30	0	0	8.42
2d	42	26	26	6	0	8.42

**Tableau 1. Profils de sol les plus fréquents dans les sondages du Lot 2.**

Le profil 1 qui contient principalement de l'Argile sableuse et du Sable est le plus fréquent. Quatre autres profils ayants la même fréquence (constitués principalement de sols argileux) ont été trouvés. Ces cinq profils qui représentent presque la moitié des cas trouvés le long du Lot 2, vont être employés dans l'analyse des mouvements.

### 2.2 Mesures sur chantier

Le projet de recherche METROTOUL a permis de construire une base de données des mouvements du sol ainsi que des paramètres de fonctionnement du tunnelier (jusqu'à 150 paramètres enregistrés sur le lot 2). Un premier choix effectué par [VAN 06] n'a retenu que 10 paramètres comme a priori les plus influents sur le tassement de surface. Ces paramètres sont: vitesse d'avancement, pression de confinement du front, pression moyenne d'injection de mortier, volume de mortier injecté, pression de la roue de coupe, poussée totale des vérins de poussée, temps mis pour réaliser l'ensemble d'un anneau (excavation et pose des voussoirs), paramètres de guidage horizontal et vertical du tunnelier ( $Diffdh$  et  $Diffdv$ ) et énergie d'abattage.



**Figure 1. Mouvements du sol en section transversale mesurés sur le Lot 2.**

Les mesures de mouvements de surface ont été effectuées par des repères de nivellement positionnés sur chaussées et sur bâtiments. Des profils transversaux de 5 points ont été implantés tous les 30 m le long de tracé du tunnel. D'après les observations effectuées sur chantier, il a été décidé d'étudier les mouvements dus au creusement à court terme. Les relevés de tassement ont été compilés entre -20 m et 50 m après le passage du tunnelier. Les données retenues pour cette étude sont celles mesurées sur les bâtiments (Figure 1) parce qu'elles sont plus précises que celles mesurées sur la chaussée. Les mouvements de surface ont été représentés dans une section transversale en fonction de X/H, avec X la distance horizontale du point de mesure à l'axe du tunnel et H la profondeur de l'axe du tunnel pour le profil transversal correspondant.

### 3. ANALYSE DES DONNÉES PAR LA MÉTHODE DES RÉSEAUX DE NEURONES

Un réseau de neurones est un assemblage d'éléments identiques appelés neurones qui forment trois types de couches : entrée, couche(s) cachée(s), sortie. Pour définir l'architecture d'un réseau de neurones, il faut définir sa taille (le nombre total de couches et de neurones par couche) et sa structure (le type de couches et d'interconnexion entre les neurones), ce qui nécessite une étude d'optimisation. Le fonctionnement d'un réseau repose sur deux étapes: une étape d'apprentissage (à partir d'un ensemble de données d'apprentissage), et une étape de validation (à partir d'un autre ensemble de validation, indépendant de celui d'apprentissage). Le choix des données du réseau et leur division pour les deux phases d'entraînement et de validation jouent un rôle très important sur la performance du réseau [SHA 04].

#### 3.1 Construction du modèle

Dans l'ensemble des points de nivellement de tassement disponibles (433 points), seuls ceux pour lesquels un profil de tassement transversal pouvait être défini ont été retenus pour cette étude (95 points) et ont été reliés à la géologie locale issue de l'analyse des sondages proches. 60% des données ont été employées pour l'entraînement du réseau et les 40% qui restent sont employées pour la validation.

Une première analyse effectuée sur l'ensemble de ce lot en considérant une géologie homogène sur l'ensemble du tracé [BOU 09] a permis de définir 7 paramètres de tunnelier comme les plus influents sur le tassement. Ces paramètres sont: Vitesse d'avancement du tunnelier, Pression de confinement au front, Paramètre de guidage vertical du tunnelier ( $Diffdv$ ), Poussée totale des vérins, le volume injecté, Pression de la roue de coupe et le Temps d'excavation de l'anneau. Dans cette étude, ces 7 paramètres sont repris comme entrées du réseau avec 5 paramètres supplémentaires représentant la géologie (épaisseur de chacun des types de sol). Un dernier paramètre [ $\exp(-X^2/H^2)$ ] a

également été ajouté pour rendre compte de manière adimensionnelle de la position relative du point de mesure de tassement par rapport au tunnel (une valeur plus appropriée que X/H [BOU 09]). L'étude d'optimisation de l'architecture du réseau a donné deux couches cachées avec 7 neurones dans chacune, 6000 cycles de calcul sont nécessaires pour effectuer l'entraînement du réseau. La sortie du réseau sera le tassement de surface dont on cherche à prédire les valeurs à l'aide des différents paramètres d'entrée. La valeur de RMSE (Root Mean Square Error) qui exprime l'erreur commise sur la prédiction dans la phase de validation a été utilisée pour évaluer la performance du réseau. Cette valeur est représentée en pourcentage par l'équation suivante :

$$RMSE \% = \frac{\sqrt{\frac{\sum (S^2 - C^2)}{N}}}{\sqrt{\frac{\sum S^2}{N}}} \quad [1]$$

Avec S: la valeur mesurée des déplacements, C : la valeur du déplacement calculée par le réseau et N: le nombre de valeurs de l'ensemble de validation. Cette définition implique que la valeur de RMSE doit être le plus faible possible.

#### 3.2 Résultats de prédiction

Basé sur les 13 paramètres mentionnés précédemment, le réseau a été entraîné avec 60% des données et 6000 cycles. La validation sur les 40% de données restantes a donné une valeur de RMSE égale à 13.13%. La Figure 2 montre les résultats de cette phase de validation comparés aux valeurs mesurées.

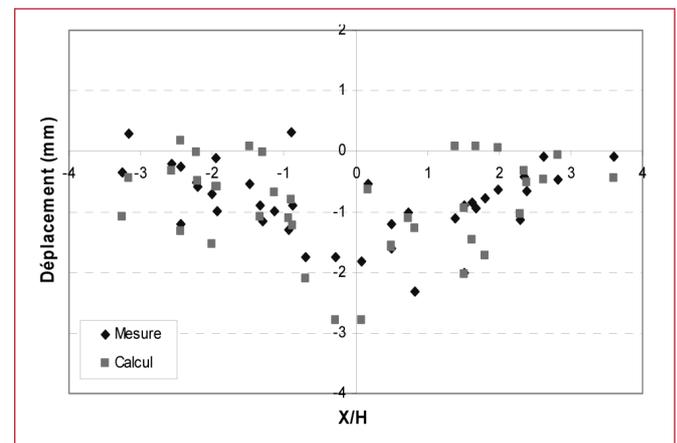


Figure 2. Déplacements mesurés et calculés dans la phase de validation.

L'histogramme des écarts entre les valeurs mesurées et celles calculées (Figure 3) présente une distribution gaussienne des écarts avec 34% des valeurs ayant un écart inférieur à 0.25 mm.

Pour vérifier la capacité du réseau à reproduire la forme de la cuvette sur une section transversale, les valeurs de X/H ont été variées entre -4 et +4 en fixant les paramètres du tunnelier sur leur valeur moyenne. Les cinq principaux profils géologiques ont été considérés. La Figure 4 montre que la forme de la cuvette est fortement influencée par le type de géologie rencontrée.

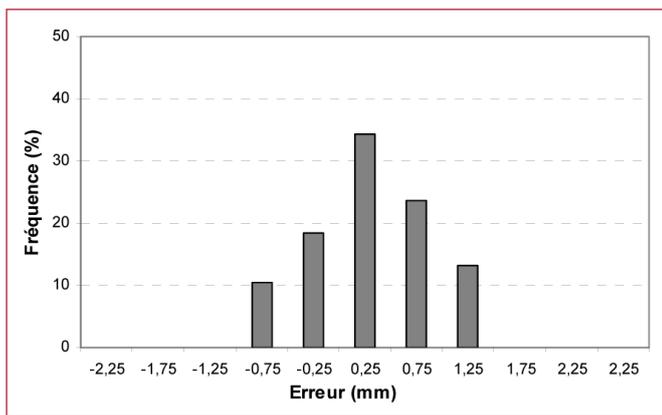


Figure 3. Histogramme des écarts entre les mesures et les calculs.

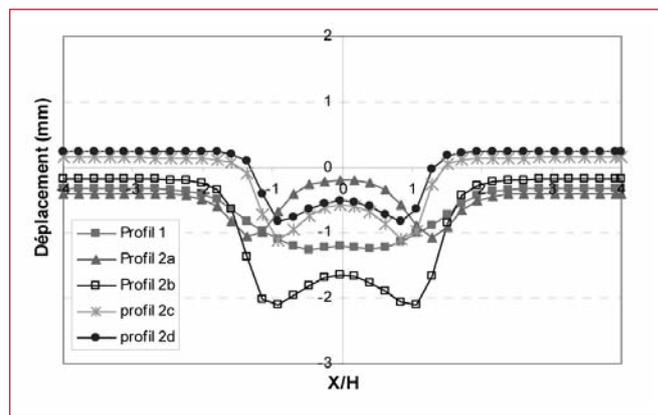


Figure 4. Cuvettes de tassement tracées avec les cinq principaux profils géologiques.

Par exemple, l'existence de 22% de sable dans le profil 1 donne une cuvette de tassement et on n'observe pas le comportement de soulèvement au centre qui est présent pour les autres profils. Par contre, l'existence du Dur dans le profil 2a donne un soulèvement maximum au niveau de l'axe du tunnel. Afin de classer les paramètres du tunnelier selon leurs influences sur les déplacements, une procédure d'élimination successive des paramètres a été appliquée aux 7 paramètres utilisés dans cette analyse.

### 3.3 Procédure d'élimination

L'élimination successive des paramètres diminue la valeur de RMSE jusqu'à 5 paramètres quand cette valeur re-augmente (Figure 5). Par la suite la valeur de RMSE commence à dégrader, ce qui est lié à un nombre insuffisant des paramètres employés dans l'analyse.

Le nombre optimal des paramètres est donc 5 paramètres, le classement de ces paramètres selon leur importance est présenté dans Tableau 2.

Afin de prendre en compte le nombre optimal des paramètres, on élimine des 7 paramètres proposés au début, les deux paramètres : temps d'excavation d'anneau et la pression de la roue de coupe étant les moins influents sur la prédiction du tassement. L'analyse effectuée avec 11 paramètres (5 paramètres du tunnelier) améliore les résultats avec une valeur de RMSE de 11.5 % et 42% des valeurs ayant un écart inférieur à 0.25mm sur l'histogramme des écarts (Figure 6).

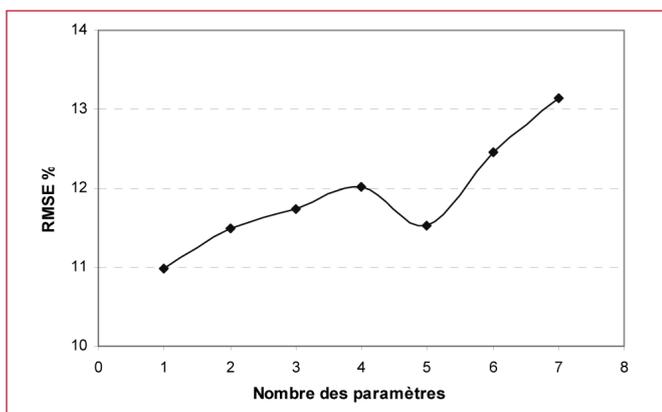


Figure 5. Evolution de valeur de RMSE avec l'élimination des paramètres.

Résultat de la procédure d'élimination		
1	Temps d'excavation d'anneau	-
2	Pression de la Roue de Coupe	
3	<i>Diff dv</i>	
4	Vitesse d'avancement	
5	Pression de confinement	
6	Volume injecté	+
7	Poussé total des vérins	

Tableau 2. Classement des paramètres selon leur importance croissante.

L'analyse précédente montre que le modèle proposé par les réseaux de neurones donne des résultats satisfaisants sur la prédiction du tassement de surface. Ce modèle est basé essentiellement sur deux types de données : les données géologiques et les données du tunnelier. Sans définir une corrélation entre le tassement de surface et les paramètres donnés, le modèle se base sur des exemples d'entraînement pour pouvoir calculer les résultats recherchés. Une étude paramétrique sera donc un moyen d'estimer l'influence de chaque paramètre sur les résultats. Dans la partie 4, on ne s'intéressera qu'à l'effet du profil de sol rencontré (types de sol présents et épaisseur relative).

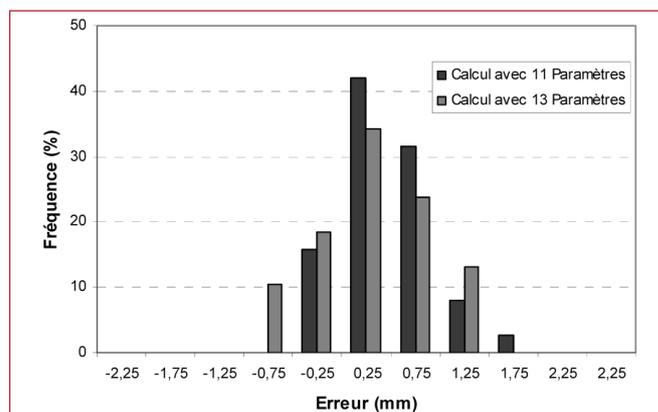


Figure 6. Histogramme des écarts pour les calculs avec 11 et 13 paramètres.

Profil	Couverture %	Argile %	Argile sableuse %	Sable %	Dur %
3	40	25	25	10	0
4	40	20	20	20	0
5	40	10	10	40	0
6	40	20	40	0	0
7	40	40	20	0	0
8	40	30	25	0	5
9	40	30	20	0	10
10	40	20	25	0	15

Tableau 3. Profils du sol employés dans l'étude de l'effet de la géologie.

## 4. ÉTUDE DE L'EFFET DE LA GÉOLOGIE SUR LE TASSEMENT

Dans cette analyse, les pourcentages de chaque type de sol vont être variés autour des pourcentages d'un profil de référence (Tableau 1). Le calcul sera effectué avec des nouveaux profils (Tableau 3) en prenant les 5 paramètres optimaux du tunnelier. Par exemple, pour étudier l'effet du sable sur la prédiction du tassement, trois profils ont été proposés (3, 4 et 5) avec deux profils de référence (2c et 2d).

La Figure 7 montre que l'augmentation de pourcentage de sable pour les deux profils 2c et 2d, donne une augmentation du soulèvement observé au niveau de l'axe du tunnel (un tassement plus important à l'extrémité de la cuvette).

Les profils 3, 4 et 5 donnent une cuvette plus profonde avec une diminution du soulèvement observé au niveau de l'axe du tunnel avec l'augmentation du pourcentage du sable. On arrive même avec le profil 5 (40% du sable et 10% du sol argileux) à une cuvette du tassement sans soulèvement au niveau de l'axe du tunnel. La première conclusion qui peut être tirée de cette analyse est que le comportement de soulèvement observé au niveau de l'axe du tunnel est lié à l'existence de sol argileux. L'augmentation du pourcentage d'Argile de 20 à 40 % dans les deux profils 6 et 7 (profil

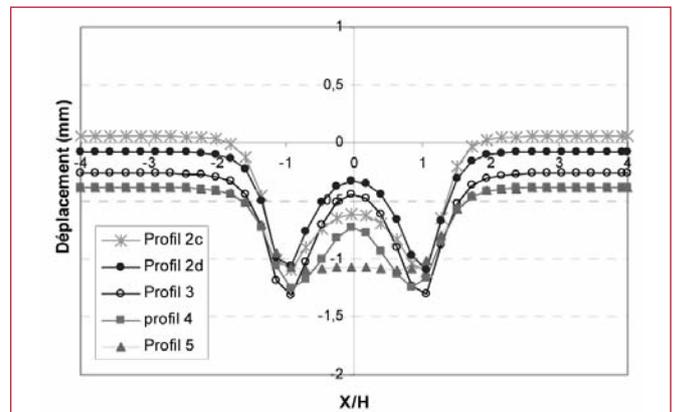


Figure 7. Effet du pourcentage de Sable sur la forme de la cuvette de tassement.

de référence 2c) donne une cuvette plus profonde avec un soulèvement plus important au niveau de l'axe du tunnel (Figure 8-a).

Par contre, l'augmentation du pourcentage de Dur des profils 8, 9 et 10 (Figure 8-b) donne une cuvette de tassement moins profonde avec une diminution du tassement maximum au niveau de l'axe du tunnel (absence de comportement du soulèvement au niveau de l'axe du tunnel). En conclusion, l'existence de deux types de sol Sable et Dur (en bon pourcentage) donne une cuvette de tassement plus profonde sans soulèvement au niveau de l'axe du tunnel (résul-

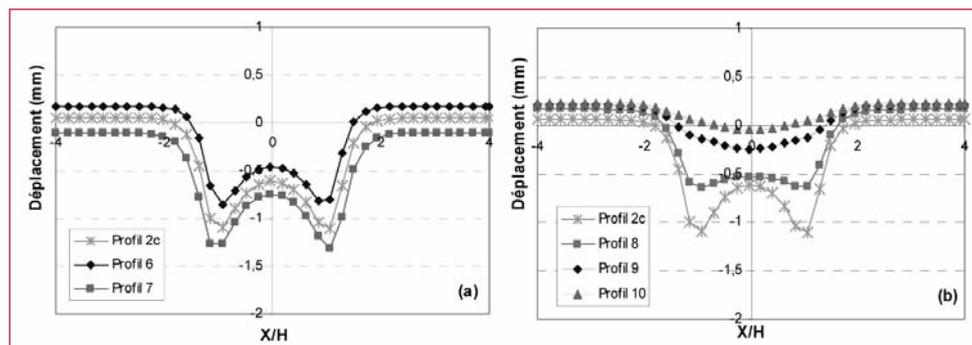


Figure 8. L'effet de pourcentage de (a- l'Argile et l'Argile sableuse, b-Dur) sur la forme de la cuvette de tassement.

tat physiquement prévisible). La présence d'Argile donne une cuvette plus profonde avec un soulèvement au niveau de l'axe du tunnel. Le comportement de soulèvement au centre peut donc être expliqué par le caractère surconsolidé de sol en particulier dans le cas des profils argileux (hypothèse validée par des rétro-analyses numériques [VAN 06]).

## 5. CONCLUSION

Les mouvements du sol induits par le creusement d'un tunnel et leur corrélation avec la géologie et les paramètres de fonctionnement du tunnelier ont été analysés par une méthodologie basée sur les réseaux de neurones. Des données de la ligne B de métro du Toulouse ont été employées pour évaluer la capacité de la méthodologie proposée. La procédure d'élimination fournit les cinq paramètres de fonctionnement du tunnelier les plus influents sur le tassement de surface. Le réseau ainsi entraîné permet d'étudier l'effet sur la forme et l'amplitude des tassements du pourcentage de chaque type de sol. Par exemple, la présence importante de sable induit une augmentation du tassement alors que celle d'argile induit une modification de l'allure de la cuvette (avec des possibles soulèvement au centre). L'étude a montré qu'en se basant sur les données disponibles du creusement, les réseaux de neurones donnent une bonne approximation des mesures obtenues sur chantier. La méthodologie proposée a permis, sans que celle-ci n'ait été imposée au départ, de reproduire la forme générale des cuvettes de déplacements malgré la spécificité de l'analyse avec des déplacements mesurés qui sont relativement faibles par rapport à l'incertitude de mesure. Ce type d'analyse peut également être employé pour déterminer les éléments adaptés à prendre en compte dans un modèle numérique complexe ou pour réaliser une analyse inverse détaillée des résultats. Cette méthodologie peut également être appliquée pour analyser d'autres cas de travaux de creusement par tunnelier dans d'autres contextes géologiques et/ou avec d'autres types de tunnelier. Le cas de référence utilisé ici peut être considéré comme critique, étant donné les faibles valeurs de tassements observés.

## 6. RÉFÉRENCES

- [ANT 98] ANTEA – TEMSOL – CEBTP – 2GH, Ligne B – Reconnaissance géologique, géotechnique et hydrogéologique, rapport de synthèse B1998-0101-M, 1998, Document B-AVP-ANT-RA-715-LB-00 0.
- [BOU 09] BOUBOU R., EMERIAULT F., KASTNER R., «Prediction of Surface Settlements Induced by Tunnel Boring Machines Using Artificial Neural Networks Method», *2<sup>nd</sup> International Conference on Computational Methods in Tunnelling-EURO:TUN 2009*, Bochum, 2009, p.627-632.
- [JAK 08] JAKSA M.B., MAIER H.R., SHAHIN M.A., «Future challenges for artificial neural network modelling in geotechnical engineering», *In Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Congress of IACMAG*, Goa, India, 2008, p. 1710-1719.
- [JAV 06] JAVADIS A.A., «Estimation of air losses in compressed air tunneling using neural network», *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 21, 2006, p.9-20.
- [KAS 06] KASPER T., MESCHKE G., «Parametric studies for shield tunneling in soft soils», *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*, London, 2006, p. 543-549.
- [KIM 01] KIM C.Y., BAE G.J., HONG S.W., PARK C.H., MOON H.K., SHIN, H.S., «Neural network based prediction of ground surface settlements due to tunnelling», *Computers and Geotechnics*, n° 28, 2001, p.517-547.
- [KOM 01] KOMIYA K., SOGA K., AGAKI H., JAFARI M.R., BOLTON M.D., «Soil consolidation associated with grouting during shield tunneling in soft clayey ground», *Géotechnique*, vol. 51, n°10, 2001, p.835-846.
- [MAI 00] MAIER H.R. DANDY G.C., «Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: A review of modeling issues and applications», *Environmental Modeling & Software*, vol. 15, 2000, p.101-124.
- [MAT 94] MATSUSHITA Y., IWASAKI Y., HASHIMOTO T., IMANISHI H., «Behaviour of subway tunnel driven by large slurry shield», *In Proceedings of the Geotechnical aspects of underground Construction in Soft Ground*, 1994, p.253-256.
- [MEL 97] MELIS M., ARNAIZ M., OTEO C.S., MENDANA F., «Ground displacements in Madrid soils due to tunnel excavation with earth pressure TBM», *In Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, 1997, p.1433-1436.
- [OOT 06] OOTA H., NISHIZAWA K., HASHIMOTO T., NAGAYA J., «Prediction of shield tunnelling influences on ground deformation based on the construction process», *In Proceedings of the Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*, Amsterdam, 2006, p.275-281.
- [PHI 06] PHIENWEJ N., HONG C.P., SIRIVACHIRAPORN A., «Evaluation of ground movements in EPB shield tunnelling for Bangkok MRT by 3D numerical analysis», *Tunnelling and underground space technology*, vol. 21, n° 3-4, 2006, p.273.
- [RAN 09] RANGEL-NÚÑEZ J.L., AYALA-MILIAN G., TAMEZ-GONZALEZ E., «Evaluation of Superficial Settlements during Tunnelling in Soft Soils Using Real Data Modelled by Artificial Neural Networks and 3D Numerical Models», *2<sup>nd</sup> International Conference on Computational Methods in Tunnelling-EURO:TUN 2009*, Bochum, 2009, p.619-626.
- [SAN 08] SANTOS Jr.O.J., CELESTINO T.B., «Artificial neural networks analysis of Sao Paulo subway tunnel settlement data», *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 23, 2008, p.481-491.
- [SHA 04] SHAHIN M.A., MAIER H.R., JAKSA M.B., «Data division for developing neural networks applied to geotechnical engineering», *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 18, n°2, 2004, p.105-114.

- [SUW 06] SUWANSAWAT S., EINSTEIN H.H., «Artificial neural networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPB shield tunnelling», *Tunnelling and underground space technology*, n°21, 2006, p.133-150.
- [SUW 07] SUWANSAWAT S., EINSTEIN H.H., «Describing settlement troughs over twin tunnels using a superposition technique», *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 133, n°4, 2007, p.455-468.
- [VAN 05] VANOUDEUSDEN E., PETIT G., ROBERT J., EMERIAULT F., KASTNER R., LAMBALLERIE J.-Y., REYNAUD B., «Impact sur l'environnement du creusement dans la molasse toulousaine d'une galerie par une méthode conventionnelle», *In Proceedings of the Congrès International de l'AFTES*, Chambéry (France), 2005, p.287-292.
- [VAN 06] VANOUDEUSDEN E., Impact de la construction des tunnels urbains sur les mouvements de sol et le bâti existant, Incidence du mode de pressurisation du front, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2006.