

METHODES 3D SIMPLIFIEES POUR EVALUER L'IMPACT DU BOULONNAGE AU FRONT : REX DE LA L11-GC03, PARIS

SIMPLIFIED 3D METHODS TO EVALUATE THE IMPACT OF THE FACE BOLTING: BACK-ANALYSIS OF THE L11-GC03 METRO EXTENSION, PARIS

Zapata Franco D.¹, Janin J-P.¹, Dano C.¹, Le Bissonnais H.¹, Falconi F.², Gérardin C.³

¹ Terrasol, France

² Spie batignolles, Neuilly-sur-Seine, France

³ RATP, Paris, France

RÉSUMÉ – Les deux méthodes numériques 3D simplifiées présentées dans cet article, simulant explicitement le boulonnage au front, se basent sur le concept des cuvettes longitudinales instantanées de tassements. Elles permettent de diminuer significativement le temps de calcul par rapport à une modélisation complète. L'étude s'est basée sur une rétro-analyse numérique aux éléments finis des déplacements générés par l'excavation d'un tunnel du prolongement de la L11 du métro parisien (lot GC03).

ABSTRACT – The two simplified 3D numerical methods developed in this article, that simulate explicitly the face bolting of the tunnel, are based on the concept of the « longitudinal phase displacements ». The approach was based on 3D FE numerical back-analysis on the displacement values measured during the excavation of a tunnel as part of the extension of Paris metro line 11 (lot GC03).

1. Introduction

Depuis les années 1980, la technique du boulonnage de front est très souvent employée pour le creusement de tunnels en méthode conventionnelle en site urbain, où les tassements doivent être maîtrisés.

Pour évaluer la cuvette transversale de tassement, l'approche semi-empirique de Peck (1969) est très utilisée compte tenu du faible nombre de paramètres nécessaires et de sa rapidité. Pour la détermination du profil en long des tassements on retrouve dans la bibliographie différentes méthodes empiriques ou semi-empiriques qui ont été calées sur des mesures de chantier (Serratrice et Magnan 2002, Janin 2012), ou des formulations obtenues suite à un calage numérique (Bourgeois 2002).

Néanmoins, la modélisation numérique 3D est la méthode qui permet de mieux prendre en compte le problème complexe du creusement d'un tunnel et d'étudier l'effet des présoutènements (Janin, 2017). Cependant, les modélisations numériques 3D nécessitent un temps de préparation et de calcul importants.

Il existe des méthodes permettant de simplifier les modèles numériques 3D pour simuler le boulonnage au front. La méthode de Peila (1994), par exemple, simule le boulonnage par une pression fictive équivalente au front. L'inconvénient de cette méthode est qu'en général elle tend à surestimer l'effet du boulonnage. Comme expliqué par Dias (2011), il est en effet difficile « a priori » de prévoir les efforts dans les boulons et dans le sol qui seront réellement mobilisés.

L'objectif de cette étude, qui a été menée dans le cadre d'une thèse professionnelle du mastère tunnels et ouvrages souterrains (INSA/ENTPE), a été de développer une méthode de calcul numérique 3D aux éléments finis « simplifiée » permettant d'évaluer l'impact du boulonnage sur les déplacements du massif, en simulant les boulons de façon explicite.

2. Présentation de la méthode One-Step

La méthode One-Step est une méthode numérique 3D « simplifiée » qui se base sur le concept de la « cuvette longitudinale instantanée de tassements ». Cette approche, déjà développée pour simuler le creusement au tunnelier (Möller 2006 ; Dano 2014 ; Janin 2017), repose sur les principes suivants :

- Le creusement au tunnelier est un processus répétitif : passe d'excavation correspondant à la longueur des voussoirs, pose des voussoirs de la passe d'excavation précédente ;
- A chaque avancement, une cuvette longitudinale « instantanée » de tassements se génère en surface. Chaque passe d'excavation génère la même cuvette longitudinale instantanée décalée longitudinalement de la longueur de la passe d'excavation (à parité d'autres facteurs tels que la vitesse, les pressions de confinement...) ;
- En sommant les cuvettes instantanées de tassements il est possible d'obtenir le profil en long de tassements et la cuvette transversale stabilisée.

La difficulté qui se pose dans le cas d'un creusement en méthode conventionnelle avec boulonnage au front est que le processus d'excavation n'est pas répétitif. En effet, la longueur des boulons varie avec l'avancement du front. Les cuvettes longitudinales instantanées générées en surface ne sont pas ainsi identiques les unes avec les autres.

3. Présentation du chantier

Le prolongement de la L11 s'étend sur 6 km de Mairie des Lilas jusqu'à Rosny-Bois-Perrier. Le lot GC03 correspond à un tunnel de 250 m creusé en méthode conventionnelle entre l'actuel terminus Mairie des Lilas et la future station Serge Gainsbourg.

3.1. Présentation de la galerie du lot GC03

La galerie du lot GC03 a été creusée à partir de deux attaques partant de l'ouvrage Calmette: vers l'Atelier Mairie Tunnel (AMT) et vers la future Station Serge Gainsbourg.

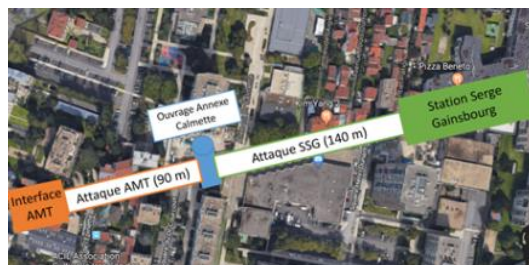


Figure 1. Localisation du projet, Lot (GC03)

L'ouvrage Calmette a également été utilisé en tant que puits et galerie d'essai permettant d'étudier la réponse du massif lors des travaux.

La rétro-analyse présentée dans cet article concerne le tunnel côté AMT. Les principales caractéristiques de la galerie sont données dans le Tableau 1 :

Tableau 1. Caractéristiques principales de la galerie.

Géométrie	Section en fer à cheval contre-voûtée (H = 8.1 et L = 6.61 m intrados), longueur de la galerie de 90 m.
Excavation	En pleine section, par passes de 1 m.
Présoutènement	Voûte parapluie (L=16 m), renouvelée tous les 12m. Boulons en fibre de verre au front renouvelés tous les 12 m (L=17 m).
Soutènement	Cintres HEB 180 + béton projeté (18 cm + 5 cm de remplissage).

3.2. Contexte géologique et géotechnique

Le projet se situe sur le plateau de Romainville. La stratigraphie est composée par les remblais, les Limons de plateau, deux couches de Calcaire de Brie (supérieur et inférieur), les Argiles Vertes, les Marnes de Pantin et les Marnes d'Argenteuil.

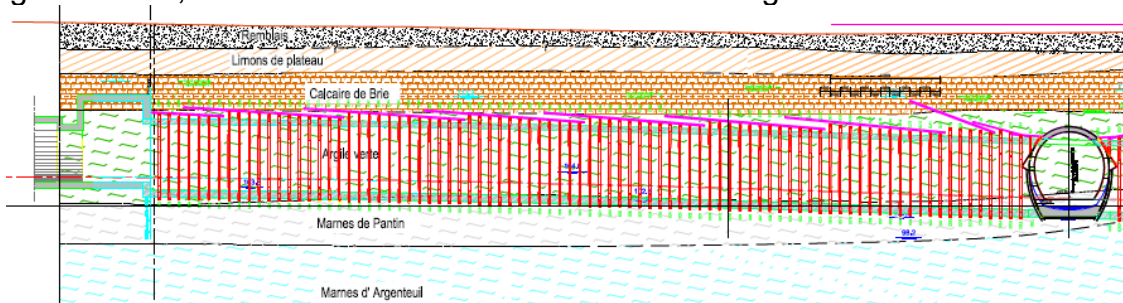


Figure 2. Profil en long DCE, Lot (GC03) – attaque AMT

Le creusement de la galerie côté AMT s'est effectué en front mixte dans les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin. Les Argiles Vertes sont des argiles assez homogènes, très plastiques ($WL > 50\%$), globalement saturées (S_r de 98%) et très peu perméables.

Deux nappes ont pu être identifiées au droit du projet :

- La nappe des Calcaires de Brie, une nappe superficielle, de circulation de fissures, bloquée par le niveau imperméable des Argiles Vertes. Elle est située au niveau + 113,9 NGF, niveau moyen relevé par les piézomètres avant le creusement ;
- La nappe des Marnes de Pantin, peu puissante, peu alimentée et confinée par la couche imperméable des Marnes d'Argenteuil. En phase chantier, les venues d'eau ont été très faibles et localisées au niveau du radier situé à environ + 99,45 NGF.

3.3. Instrumentation

Un système d'auscultation a été mis en place avant le démarrage des travaux pour suivre l'évolution des déplacements du massif. Il était principalement composé de :

- Des cibles X, Y, Z en surface au niveau de la voirie et des bâtiments avoisinants ;
- Des inclinomètres et des extensomètres verticaux à proximité du puits Calmette ;
- Des extrusomètres de 22 m au centre du front (une bague tous les 1m) ;
- Deux cintres auscultés en X, Y et Z et équipés de jauges de contrainte.

4. Méthodologie adoptée pour l'étude

L'approche adoptée pour le développement des méthodes 3D simplifiées est la suivante :

- 1) Appropriation des données de chantier : phasage et calendrier des travaux, analyse des mesures d'auscultation, analyse des essais réalisés (essais de traction des boulons, essais en laboratoire...).
- 2) Calage des paramètres géotechniques sur les mesures enregistrées in situ par le biais d'une modélisation numérique 3D complète, simulant suffisamment de phases d'avancement pour atteindre l'état stationnaire des déplacements à l'arrière du front.
- 3) Développement et validation des méthodes 3D simplifiées sur les résultats obtenus avec la modélisation 3D complète.

5. Présentation du modèle numérique 3D

Le code de calcul utilisé est le code aux éléments finis PLAXIS 3D (version 2018.1).

Les éléments pris en compte dans la simulation numérique 3D sont :

- Les couches de sol avec une stratigraphie sub-horizontale. La cote de l'interface entre les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin a été déduite des levés de front ;
- Le tunnel (section moyenne excavée de 70 m²) ;
- Le soutènement (cintre, contre-cintre et béton projeté) est modélisé par un élément de plaque équivalente.

- Les boulons en fibre de verre, sont modélisés par des éléments de type « embedded pile » qui interagissent avec le sol environnant par une loi d'interface. La résistance maximale au frottement axial peut être définie sur la base des essais d'arrachement in situ ;

5.1. Description du modèle

Pour des raisons de symétrie et pour réduire significativement les temps de calcul, seule la moitié du tunnel est modélisée. Le modèle s'étend verticalement du TN, situé à la cote +118 NGF, jusqu'à l'interface entre les Marnes d'Argenteuil et les Masses et Marnes de Gypse (considéré comme le substratum), située à la cote + 87 NGF.

Le maillage est raffiné autour du tunnel. Le modèle compte environ 148 000 éléments et 222 000 nœuds.

Tous les déplacements sont bloqués à la base du modèle et les déplacements horizontaux sont bloqués sur les bords.

Le même modèle numérique a été utilisé dans un premier temps pour l'étude en rétro-analyse sur les mesures in situ par modélisation « complète » du creusement du tunnel et, ensuite, pour le développement et validation des méthodes « simplifiées ».

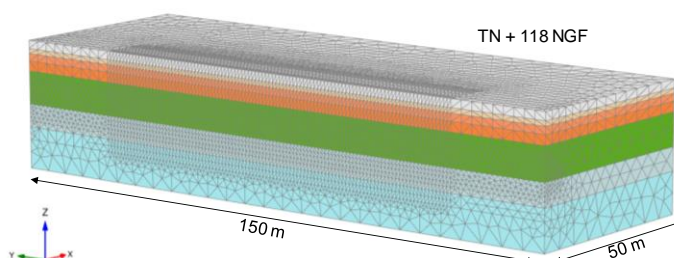


Figure 3. Modèle numérique aux éléments finis.

5.2. Simulation du comportement du sol

Le comportement des couches de sol est modélisé par la loi élasto-plastique non-linéaire avec écouissage avec critère de rupture de Mohr-Coulomb (HSM). Le paramètre de puissance « m » est considéré comme nul, ce qui annule la dépendance des modules de déformation avec l'état de contraintes.

La modélisation aux éléments finis est faite par une approche en contraintes totales pour les couches argileuses avec une très faible perméabilité ayant donc un comportement non drainé (E_{CT} et C_u) à court terme (AV, MP et MA). Les autres formations sont modélisées à l'aide des paramètres de déformabilité et de résistance au cisaillement drainés (E' , c' , ϕ').

Les paramètres géotechniques ont été choisis sur la base des résultats des essais en laboratoire (essais triaxiaux et œdométriques) et des essais pressiométriques, validés par rétro-analyse numérique sur les mesures réalisées in situ.

Tableau 2. Paramètres géotechniques « calés ».

Formation	γ [kN/m ³]	C_u [kPa]	c' [kPa]	ϕ' [°]	E_{50} [MPa]	E'_{50} [MPa]	K_0 [-]	OCR [-]
Remblais	20	-	0	25	-	5	0.5	1
Limons du Plateau	19	-	15	28	-	10	0.5	1
Calcaire de Brie supérieur	18	-	10	30	-	30	0.5	1
Calcaire de Brie inférieur	18	-	10	30	-	80	0.5	1
Argiles Vertes	18	120	-	-	30	-	0.9	2
Marnes de Pantin	18	130	-	-	120	-	0.7	1.8
Marnes d'Argenteuil	18	250	-	-	60	-	0.9	2.2

Remarques :

- Le module œdométrique est pris égal au module E_{50} .
- Le module de déchargement/rechargement est pris égal à trois fois le module E_{50} .

5.2. Phasage du calcul numérique

Le phasage du modèle numérique 3D complet est le suivant :

Tableau 3. Phasage du modèle 3D complet.

Phase initiale	Initialisation des contraintes (procédure K_0).
1	Excavation 1 ^{er} tronçon de 25 m pour s'éloigner des effets du bord (Taux de déconfinement corrigé = 0.4 selon le principe de convergence-confinement)
2	Soutènement du 1 ^{er} tronçon (Taux de déconfinement = 1).
3	Remise à zéro des déplacements + Première passe d'excavation (activation de 17m de boulons, désactivation 1m de sol, désactivation 1m de boulons « excavés »).
4 à 14	Passes d'excavation 2 à 12 du 1 ^{er} cycle : désactivation 1m de sol, désactivation 1m de boulons « excavés », activation 1m de soutènement de la passe précédente.
15 et 16	Renouvellement du boulonnage au front : désactivation des boulons du cycle précédent (Mstage = 0.1), puis activation des boulons du nouveau cycle (Mstage = 1).

Les autres 5 cycles de creusement sont modélisés de la même manière.

6. Méthodes 3D simplifiées

Les simulations numériques réalisées avec une modélisation 3D complète du creusement du tunnel ont nécessité un temps de calcul important (environ 40 h par calcul), d'où l'intérêt d'étudier des méthodes 3D simplifiées.

6.1. Méthode Macro-Step

La méthode *Macro-Step* se base sur les déplacements qui sont générés dans le massif lors **d'un cycle complet de creusement**, c'est-à-dire entre deux phases de renouvellement du boulonnage au front. Elle modélise la longueur réelle des boulons à chaque phase d'excavation. Cette longueur décroît ainsi à chaque passe d'excavation.

6.1.1. Principe

La modélisation 3D complète a simulé cinq cycles de creusement, chacun étant composé de 12 passes d'excavation de 1 m. La Figure 4 montre les cuvettes générées par chacun des cycles numériques de creusement. Il est possible de constater que les cuvettes sont globalement similaires et sont décalées d'une longueur égale à 12 m correspondant à la longueur du cycle de creusement.

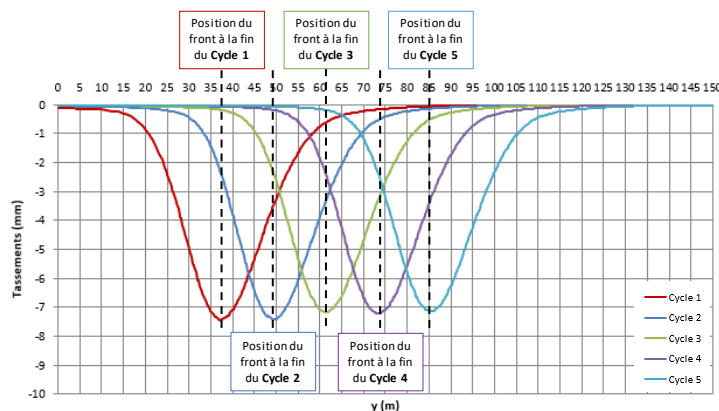


Figure 4. Macro-cuvettes longitudinales issues de la modélisation 3D complète.

Pour obtenir le profil en long de tassements il suffit de décaler la « macro-cuvette » générée lors d'un cycle de creusement de la longueur du cycle, et sommer la contribution de toutes les « macro-cuvettes » en tout point de coordonnée « y », comme le montre la figure suivante :

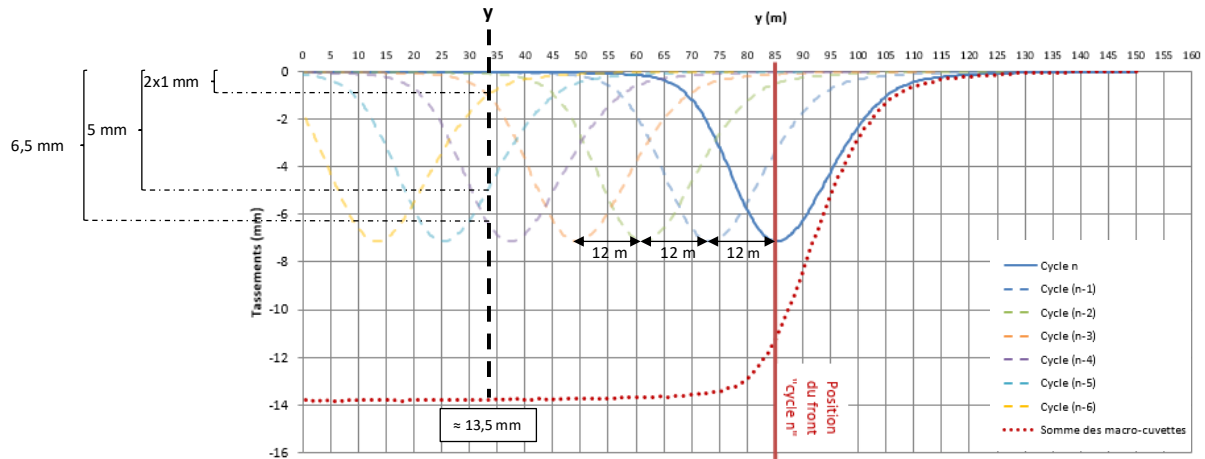


Figure 5. Principe de la somme des macro-cuvettes pour le profil en long de tassements.

Pour obtenir la cuvette transversale stabilisée il suffit d'appliquer le même principe à différentes distances de l'axe du tunnel. On obtient ainsi des valeurs de tassements stabilisées à différentes distances de l'axe du tunnel.

6.1.2. Phasage du calcul numérique

Pour le modèle numérique 3D Macro-Step, seules les phases 1 à 14 du modèle complet sont modélisées.

6.2. Méthode One-Step

La méthode *One-Step* se base sur les déplacements qui sont générés dans le massif lors d'une **seule phase d'excavation**. L'idée sur laquelle se base cette méthode est de trouver une longueur « utile » des boulons, permettant d'obtenir une cuvette instantanée « moyenne » capable de donner le profil en long de tassement stabilisé obtenu avec la modélisation complète. Le boulonnage est simulé cette fois-ci avec une longueur constante.

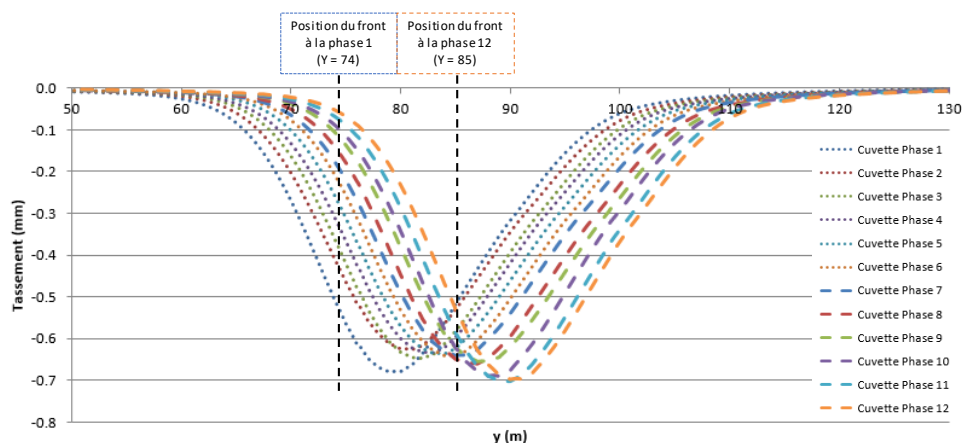


Figure 6. Cuvettes longitudinales instantanées, cycle complet (modélisation 3D complète).

6.2.1. Principe

Dans la Figure 6, apparaissent les cuvettes instantanées longitudinales de tassements générées à chaque phase d'excavation du cycle complet de creusement simulé avec la modélisation complète.

De manière générale, on observe que la valeur maximale de tassement de chaque cuvette instantanée est croissante avec l'avancement du front dans le cycle. Ceci est cohérent avec la diminution de la longueur des boulons : les tassements augmentent puisque les boulons peuvent reprendre moins d'efforts. En revanche, la première cuvette du cycle n'est pas la plus petite puisqu'au moment de l'installation, les boulons sont passifs et ils commencent à se charger qu'à partir de la première phase d'excavation.

La cuvette instantanée « moyenne » semble être en milieu de cycle, lorsque la longueur des boulons restante est de 11 m. Cette valeur correspond à la moyenne entre la longueur maximale des boulons (au moment de la mise en place, soit 17 m) et la longueur minimale des boulons (à la fin du cycle et avant le renouvellement du boulonnage, soit 5 m). La « longueur utile » est en fait la longueur moyenne des boulons au cours du cycle de creusement :

$$L_{\text{utile}} = \frac{L_{\text{max boulons}} + L_{\text{min boulons}}}{2} \quad (2)$$

Ainsi, pour déterminer la cuvette « moyenne » permettant d'obtenir les tassements stabilisés obtenus avec la modélisation complète, il est suffisant de simuler une passe d'excavation avec la longueur « utile » des boulons définie ci-dessus. Le profil en long de tassement et la cuvette transversale stabilisée pourront ensuite être déterminés en suivant les mêmes principes expliqués précédemment.

6.2.2. Phasage du calcul numérique

Pour le modèle One-Step, les phases 1 et 2 restent identiques à celles du modèle complet. A partir de la phase 3, excavation de 1 m de sol, puis activation des boulons de sorte à avoir une longueur constante de 11 m (= L_{utile}).

Il est conseillé de simuler au moins 3 passes d'excavation après la phase de mise en place du tunnel pour s'éloigner des effets de cette phase d'initialisation et obtenir une cuvette instantanée représentative.

6.3. Résultats des modélisations numériques

Dans les figures suivantes sont présentés les résultats de la modélisation complète et des méthodes simplifiées :

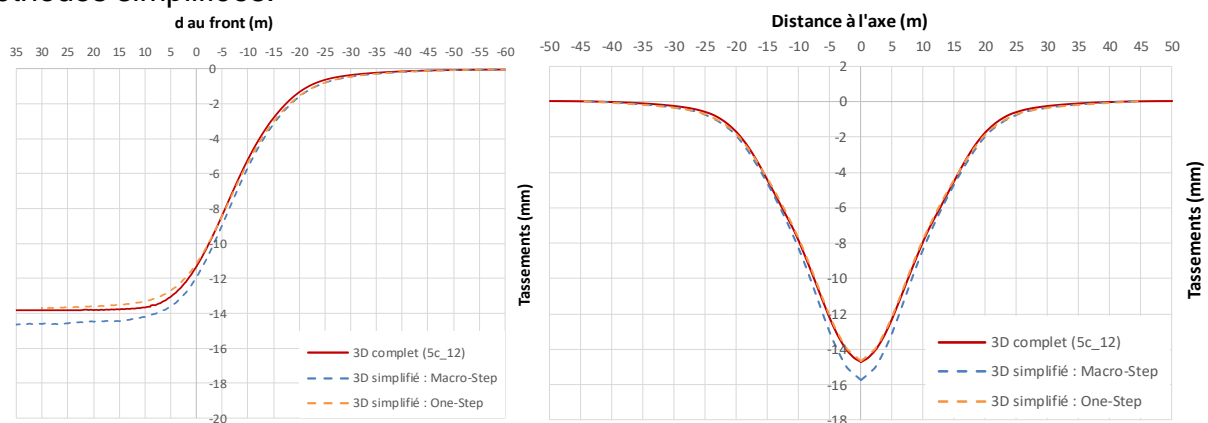


Figure 7. Profil en long de tassements (à gauche) et cuvette transversale stabilisée (à droite).

En termes d'efforts, le modèle Macro-Step permet, du fait de la modélisation de la longueur réelle des boulons au cours du cycle de creusement, d'obtenir les efforts dans les boulons et dans le soutènement avec une erreur de l'ordre de 5%. De manière générale la méthode simplifiée surestime les efforts, ce qui est dans le sens de la sécurité.

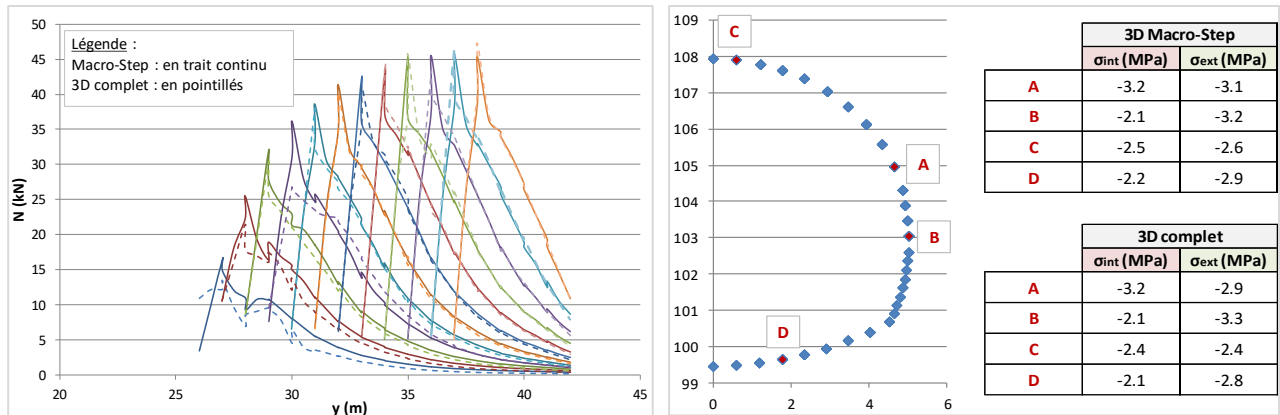


Figure 8. Effort normal N dans les boulons (phases 1 à 12) – Contraintes intrados/extrados dans le soutènement

7. Conclusions

A l'issue de cette étude, deux méthodes 3D simplifiées ont pu être développées : la méthode *Macro-Step* se basant sur les déplacements générés lors d'un cycle de creusement et la méthode *One-Step* se basant sur une phase d'excavation en considérant une « longueur utile » et constante des boulons.

Les deux méthodes se sont révélées bien efficaces puisqu'elles permettent de bien retrouver les tassements stabilisés dans le massif obtenus avec une modélisation complète. La première méthode présente l'avantage de pouvoir obtenir aussi des ordres de grandeurs en termes d'efforts dans les boulons et dans le soutènement, tout en diminuant le temps de calcul par 5 par rapport à une modélisation complète. La deuxième méthode est beaucoup plus rapide, de l'ordre de 10 fois plus rapide qu'une modélisation complète, permettant d'effectuer ainsi des calculs paramétriques concernant l'influence des paramètres du boulonnage (type de boulon, longueur, densité, etc.) sur les déplacements engendrés dans le massif.

8. Références bibliographiques

- Dano C. (2014). Etude du creusement de tunnels au tunnelier dans les argiles plastiques de la région parisienne, ligne 15 Sud–tronçon 3 du Grand Paris Express. Thèse professionnelle mastère spécialisé en tunnels et ouvrages souterrains, INSA Lyon-ENTPE.
- Dias D. (2011). Convergence-confinement approach for designing tunnel face reinforcement by horizontal bolting. *Tunnelling and underground space technology*, vol. 26, pp. 517– 523.
- Janin J.P. (2012). Tunnels en milieu urbain : prévisions des tassements avec prise en compte des effets des pré-soutènements (renforcement du front de taille et voûte-parapluie). Thèse doc. Lyon : INSA de Lyon.
- Janin J.P. (2017). Apports de la simulation numérique tridimensionnelle dans les études de tunnels. *Rev. Fr. Geotech.* 2017, 150, 3.
- Möller S. (2006). Tunnel induced settlements and structural forces in linings. Thèse Université de Stuttgart.
- Panet M. (1995). Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Serratrice J.F., Magnan J.P. (2002). Analyse et prévision des tassements de surface pendant le creusement du tunnel Nord de la traversée souterraine de Toulon. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 237, pp. 5-36.