

# **Méthodes 3D simplifiées pour évaluer l'impact du boulonnage au front : REX du chantier du prolongement 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***

Daniela ZAPATA FRANCO, *Terrasol, Lyon, France*

Jean-Pierre JANIN, *Terrasol, Lyon, France*

Charline DANO, *Terrasol, Paris, France*

Hervé LE BISSONNAIS, *Terrasol, Paris, France*

Freddy FALCONI, *Spie batignolles, Neuilly-sur-Seine, France*

Cécile GERARDIN, *RATP, Paris, France*

### **Résumé**

Dans les années 1980, la technique du pré-soutènement au niveau du front de taille a été développée pour le creusement de tunnels dans des terrains difficiles. Aujourd'hui, la technique du boulonnage au front est très souvent utilisée pour le creusement de tunnels en méthode conventionnelle en site urbain, où les tassements doivent être maîtrisés. Pour évaluer l'effet du boulonnage sur les déplacements, la modélisation numérique 3D est la méthode qui permet de mieux considérer le problème complexe qu'est le creusement d'un tunnel et d'estimer les déplacements engendrés dans le massif. Néanmoins, les modélisations numériques 3D nécessitent un temps de préparation et de calcul important.

Dans cet article, deux méthodes numériques 3D simplifiées, prenant en compte le boulonnage au front, sont présentées. Celles-ci ont été développées sur la base d'études en rétro-analyse numérique sur les déplacements mesurés lors du creusement d'un tunnel faisant partie du prolongement de la ligne 11 du métro parisien (lot GC03). Les approches numériques développées reposent sur le concept des cuvettes instantanées longitudinales engendrées en surface par le creusement du tunnel. Elles permettent d'étudier l'apport du boulonnage en termes de stabilité au front, d'extrusion et de tassements dans le massif, en réduisant significativement les temps de calcul par rapport à une modélisation 3D complète. Ce gain de temps rend ces approches particulièrement intéressantes en phase de conception, d'exécution et pour des calculs paramétriques.

### **Abstract**

In the 1980s, the pre-supporting technique at the tunnel face was developed for tunnel excavation in difficult soils. Today, the technique of tunnel face bolting is very often used in the excavation of tunnels with conventional methods in urban areas, where settlements must be controlled. To evaluate the effect of face bolting on the soil's displacement, it has been shown that 3D numerical modelling is the method that better considers the different phenomenon that take place in a tunnel's excavation. Nevertheless, 3D numerical models are long to prepare and to calculate.

In this article, two simplified 3D numerical methods considering the face bolting of the tunnel, have been developed. The approach was based on 3D numerical back-analysis with a finite element model, fitted on the displacement values measured during the excavation of a tunnel as part of the extension of line 11 in Paris (lot GC03). The simplified methods are based on the concept of the « longitudinal phase displacements » generated by the excavation of a tunnel in the surface. These simplified methods make possible to study the impact of the face bolting in terms of front stability, extrusion and settlements, with a considerable reduction of time calculation compared to the complete 3D model. This time reduction makes de the simplified 3D methods very interesting during the design phases and for parametric calculations.

# Méthodes 3D simplifiées pour évaluer l'impact du boulonnage au front : REX du chantier du prolongement 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***

Daniela ZAPATA FRANCO, *Terrasol, Lyon, France*

Jean-Pierre JANIN, *Terrasol, Lyon, France*

Charline DANO, *Terrasol, Paris, France*

Hervé LE BISSONNAIS, *Terrasol, Paris, France*

Freddy FALCONI, *Spie Batignolles, Neuilly-sur-Seine, France*

Cécile GERARDIN, *RATP, Paris, France*

### **1 Introduction**

L'objectif de cette étude, qui a été menée dans le cadre de la thèse professionnelle du Mastère Tunnels et Ouvrages Souterrains (INSA/ENTPE), était de développer une méthode de calcul numérique 3D aux éléments finis « simplifiée » permettant d'évaluer l'impact du boulonnage sur les déplacements du massif.

Il existe différentes méthodes pour évaluer les tassements en surface. 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).

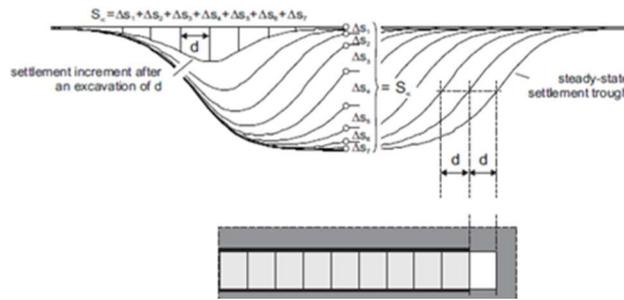
Toutefois, la modélisation numérique 3D est la méthode qui permet de mieux prendre en compte le problème complexe qu'est le creusement d'un tunnel (géométrie, phasage, interaction les ouvrages existants), et d'étudier l'effet des présoutènements (Janin, 2017). Cependant, les modélisations numériques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

D'autre part, il existe différentes 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 surestime 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.

### **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 tassement 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 ;



**Figure 1. Principe de détermination du profil en long de tassement à partir de la cuvette instantanée (Möller, 2006)**

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.

En ce qui concerne les tunnels creusés en méthode conventionnelle, on retrouve dans la bibliographie une approche de la cuvette instantanée par « tronçons ». Les cuvettes instantanées étudiées par Serratrice et Magnan (2002) sont des cuvettes générées par des macro-plots de 15 m d'avancement, qui correspondait à un tronçon excavé. Cette méthode a été adoptée, à partir de 1998, comme méthode de prévision de tassements à l'avancement. Par la suite, cette méthode a été également utilisée pour le tube Sud de la traversée de Toulon par Janin (2012), pour donner des renseignements sur la prévision des tassements. A partir des mesures situées le long de l'axe du tunnel, il a déterminé les cuvettes instantanées pour des tronçons de 9 m correspondant au renouvellement de la voûte parapluie.

### 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 2. 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 faite dans cet article concerne le tunnel côté AMT. Les principales caractéristiques de la galerie sont :

- La géométrie est une section en fer à cheval contre-voûtée de 8,1 m de hauteur et 6,61 m de largeur intrados.
- L'excavation a été faite en pleine section par passes de terrassement de 1 m.
- Le présoutènement est composé de tubes pétroliers injectés pour la voûte parapluie (L=16 m), et des boulons en fibre de verre au front de 17 m de long, renouvelés tous les 12m.

- Le soutènement a été fait au moyen de cintres HEB 180 et de béton projeté (18 cm + 5 cm de remplissage).
- Le revêtement a été coulé à la fin du creusement après la mise en place d'une nappe d'étanchéité.

Le cycle de creusement a eu une longueur totale de 12 m, composé de 12 passes d'excavation 1 m de longueur. A la fin du cycle a lieu une phase d'arrêt du front, permettant le renouvellement du pré-soutènement.

### 3.2 Contexte géologique et géotechnique

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

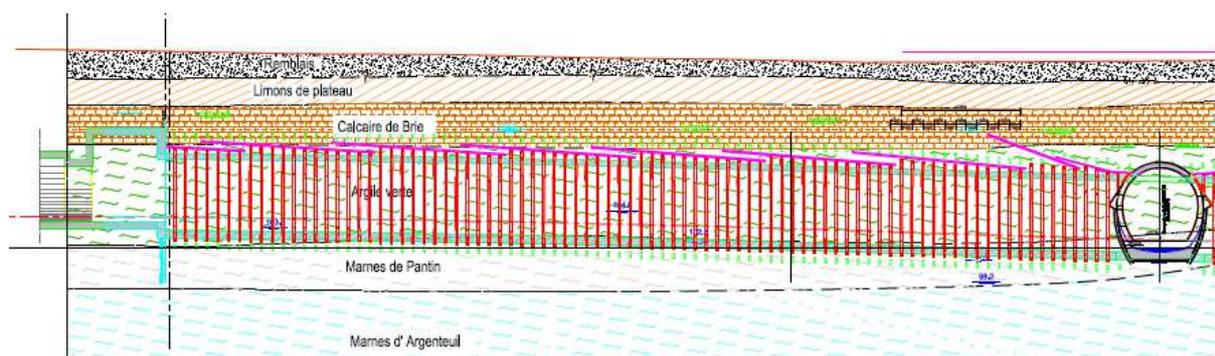


Figure 3. Profil en long DCE, Lot (GC03) - attaque AMT

Le creusement de la galerie côté AMT s'est effectué en front mixte dans les Argiles Vertes et les Marnes de Pantin (environ 2/3, 1/3 respectivement). Les Argiles Vertes sont des argiles assez homogènes, très plastiques (WL>50%), globalement saturées (Sr de 98%) et peu perméables.

Deux nappes ont pu être identifiées au droit du projet :

- La nappe des Calcaire de Brie, une nappe superficielle, de circulations 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 début du 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 la cote moyenne + 99,45 NGF.

Les paramètres géotechniques donnés au marché ont été déduits de différents essais in situ, de laboratoire et de la rétro-analyse du puits et galerie d'essai Calmette (Tableau 1).

Tableau 1. Paramètres géotechniques du marché pour le lot GC03

Formation	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$C_u$ [kPa]	$c'$ [kPa]	$\phi'$ [°]	$E$ [MPa]	$E'$ [MPa]	$K_0$ [-]	OCR [-]
Remblais	20	-	0	25	-	5	0.5	1
Limons du Plateau	19	-	15	28	-	20	0.5	1
Calcaire de Brie supérieur	18	-	10	30	-	15	0.5	1
Calcaire de Brie inférieur	18	-	10	30	-	30	0.5	1
Argiles Vertes	18	70	-	-	20	-	0.6	1
Marnes de Pantin	18	-	14	25	-	150	0.6	1
Marnes d'Argenteuil	18	90	-	-	65	-	0.7	1

### 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 1 m) ;
- Deux cintres auscultés en X, Y et Z et équipés de jauges de contrainte.

### 3.4 Analyse des mesures

#### 3.4.1 Tassements en surface

A la fin du creusement de la galerie côté AMT, les tassements en surface ont atteint une valeur stabilisée comprise entre 15 et 20 mm en voirie, et d'environ 12 mm au niveau du bâti. Les tassements mesurés ont été inférieurs aux seuils de tassements imposés au marché, qui étaient de 35 mm en voirie et 25 mm au niveau du bâti.

Des phénomènes de consolidation ont pu être mis en évidence lors des phases d'arrêt prolongés (renouvellement des boulons). Cela peut être expliqué par le fait que le passage du front provoque une zone de compression par effet voûte au niveau des piédroits, mettant en compression l'eau dans des formations peu perméables comme les Argiles Vertes. Une fois le front passé, ces surpressions interstitielles se sont dissipées et ont provoqué une augmentation des tassements allant de 3 à 5 mm.

Par ailleurs, des phénomènes de soulèvement ont pu être observés avant le début du creusement lors des phases d'étanchement de la base des Calcaire de Brie (jusqu'à 50 mm en voirie et 35 mm sur le bâti), et lors de l'injection de certaines voûtes parapluie (de l'ordre de 5 mm).

#### 3.4.2 Extrusion

Pendant le creusement de la galerie, l'extrusion a été mesurée avec un extrusomètre de 22 m de longueur en partie centrale du front, au niveau des Argiles Vertes (bagues tous les 1m). Les valeurs d'extrusion ont été relativement stables et étaient en moyenne de l'ordre de 10mm à un mètre du front.

Contrairement aux tassements en surface, il n'y a pas eu d'augmentation remarquable de l'extrusion pendant les phases d'arrêt prolongés.

## 4 Méthodologie adoptée

La méthodologie qui a été adoptée pour l'étude des méthodes 3D simplifiées est la suivante :

- 1) Appropriation des données de chantier. Il en résulte l'analyse des mesures de déplacement pendant la phase de creusement et la détermination des mesures de référence pour la rétro-analyse.

Les mesures de référence ont été déduites à partir de :

- Les cibles en voirie et bâti entre les PM35 et PM65 pour s'éloigner du puits Calmette et du tympan d'arrivée ;
- Les soulèvements dus aux injections dans le Calcaire de Brie, lors de la mise en place des présoutènements, ainsi que les tassements dus au rabattement de la nappe n'ont pas été considérés ;
- Les mesures d'extrusion de référence ont aussi été prises entre les PM35 et PM65.

- 2) Rétro-analyse sur les mesures de déplacements observés en chantier avec un modèle 3D complet, afin de caler les paramètres géotechniques.

Les paramètres suivants ont été réévalués dans un premier temps sur la base des essais in situ, des essais en laboratoire et des corrélations usuelles :

- Frottement latéral des boulons en fibre de verre. Quatre essais d'arrachement dans les Argiles Vertes et trois essais dans les Marnes de Pantin ont été réalisés au démarrage du creusement, sur des boulons en fibre de verre identiques à ceux mis en place lors du creusement.

- Coefficient des terres au repos  $K_0$ . A partir d'essais triaxiaux, des essais pressiométriques avec l'abaque de Bjerrum, et des essais œdométriques.
- Paramètres de résistance au cisaillement ( $C_u, c', \varphi'$ ). Pour la cohésion apparente non drainée  $C_u$ , l'approche de Cassan (2005) à partir des essais pressiométriques, la corrélation de Cordary et l'approche de Skempton à partir des essais triaxiaux ont été considérées. Les paramètres drainés ont été déduits des essais triaxiaux.
- Modules de déformation. Réévaluation à partir des caractéristiques pressiométriques. Les valeurs du coefficient  $\alpha$  ont été réévaluées en fonction du rapport  $E_M/p_l^*$  (d'après la norme NF P94-262).

Le module de déformation  $E_{50}$  est calculé avec la formule suivante :

$$E_{50} = k \cdot E_M / \alpha \quad (1)$$

Avec,  $k = 1.5$  pour toutes les formations.

Les paramètres ainsi déterminés ont été ensuite validés par comparaison du modèle 3D sur les observations in situ.

- 3) Une fois les paramètres géotechniques validés, calage des méthodes 3D simplifiées sur les résultats du modèle 3D complet.

## 5 Modèle numérique 3D complet

Le modèle 3D complet permet d'obtenir les tassements stabilisés après un certain nombre de cycles d'excavation, un cycle étant composé ici de 12 phases d'excavation, chacune de 1 m.

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

Les éléments pris en compte dans l'étude 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 relevés du front pendant le creusement ;
- Le tunnel (section moyenne excavée de 70 m<sup>2</sup>) ;
- Le présoutènement par boulonnage du front ;
- Le soutènement espacé de 1 m (cintre, contre-cintre et béton projeté) ;
- Le cycle d'excavation avec le renouvellement du boulonnage au front.

Les éléments suivants n'ont pas été pris en compte dans le modèle :

- La voûte parapluie. En effet, il a été montré par Janin (2012) que l'effet de la voûte parapluie sur la diminution des tassements est de l'ordre de 6 % pour des tubes inclinés de 6°. Dans le cas ici étudié, compte tenu de l'inclinaison des tubes (~8°), l'effet de la voûte parapluie sur les tassements calculés peut être négligé.
- Le béton projeté au front. Ce béton projeté mis à la fin de la passe d'excavation d'une épaisseur de 5 cm environ, sert comme béton de confinement et de protection du front. L'épaisseur étant assez faible, le béton projeté au front n'a pas été modélisé.
- La surcharge en surface. Le tunnel ayant été creusé sous une voirie, la surcharge en surface est considérée comme étant faible. La surcharge des bâtiments a été négligée, étant donné qu'ils se trouvent assez loin de l'axe de la galerie (10 m environ).
- Variation de la profondeur du tunnel. L'attaque s'est faite de manière ascendante, en commençant avec une couverture de 13 m et en finissant avec une couverture de 9 m. Une couverture moyenne de 11 m a été prise en compte dans l'étude.

### 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 avec 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 ».

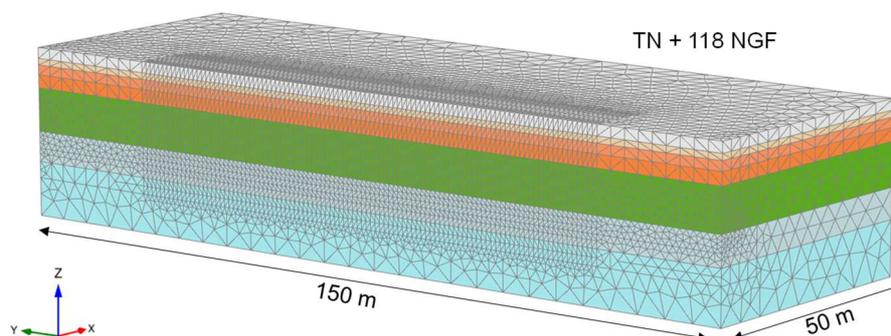


Figure 4. Modèle 3D complet (PLAXIS 3D)

## 5.2 Modèle de comportement du sol

Le comportement des couches de sol est modélisé par la loi élasto-plastique non-linéaire avec écoulement avec critère de rupture de Mohr-Coulomb (HSM). Cette loi présente l'avantage de distinguer le module de chargement de celui de déchargement/rechargement. De plus, elle permet un écoulement plastique avant la rupture au lieu d'un comportement purement élastique comme dans la loi de comportement Mohr-Coulomb. 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 et MA dans un premier temps). Les autres formations sont modélisées à l'aide des paramètres de déformabilité et de résistance au cisaillement drainés ( $E'$ ,  $c'$ ,  $\varphi'$ ).

## 5.3 Modélisation du présoutènement et du soutènement

Les boulons en fibre de verre sont modélisés explicitement par des éléments de type « embedded pile ». Ces éléments peuvent résister à des efforts axiaux et de flexion, et interagissent avec le sol par une loi d'interface (voir Tableau 2). La condition en tête de boulon est considérée comme étant « libre », c'est-à-dire que la tête du boulon peut bouger librement par rapport au massif.

La position des boulons au front est modélisée sur la base de la position « réelle » lors de la phase chantier. Au total 14 boulons sont modélisés dans les Argiles Vertes et 6 boulons dans les Marnes de Pantin, correspondant à une densité d'environ 0,6 b/m<sup>2</sup> et 0,4 b/m<sup>2</sup> respectivement.

Tableau 2. Valeurs de frottement latéral unitaire

Formation	$T_{skin}$ DCE [kN/m]	$T_{skin}$ réévalué [kN/m]
Argiles Vertes	26	31
Marnes de Pantin	43	72

Le soutènement provisoire composé de cintres HEB 180 et de 23 cm de béton projeté (18 cm de remplissage de la hauteur du cintre + 5 cm de recouvrement), est modélisé par un élément plaque équivalente.

## 5.4 Phasage du calcul numérique

Le phasage général du modèle numérique 3D complet apparaît dans le Tableau 3.

Tous les cycles et les phases de renouvellement des boulons ont été modélisés de la même manière.

Pour obtenir les déplacements stabilisés dans le massif il a fallu modéliser 5 cycles de creusement, pour un total de 71 phases de calcul. Ainsi, le temps de calcul total du modèle était d'environ 40 h.

**Tableau 3. Phasage du modèle 3D complet**

Phase de calcul	
Phase initiale	Initialisation des contraintes (procédure $K_0$ )
1	Excavation 1 <sup>er</sup> tronçon de 25 m (Taux de déconfinement corrigé = 0.4)
2	Soutènement du 1 <sup>er</sup> 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 <sup>er</sup> cycle : désactivation 1m de sol, désactivation 1m de boulons « excavés », activation 1m de soutènement de la passe précédente.
15 et 16	Renouvellement des boulons : Désactivation des 5m de boulons restants avec un taux de déconfinement très petit Activation des 17m de boulons avec un taux de déconfinement égal à 1
17 à 28	Excavation deuxième cycle de creusement
...	...

Les phases 1 et 2 permettent de s'éloigner du bord initial en une seule passe d'excavation. Lors du creusement de ce premier tronçon, un déconfinement partiel est appliqué sur le volume excavé calculé à partir de la méthode convergence-confinement en prenant en compte le soutènement (méthode implicite), et en le corrigeant pour prendre en compte l'effet du présoutènement (Janin, 2012).

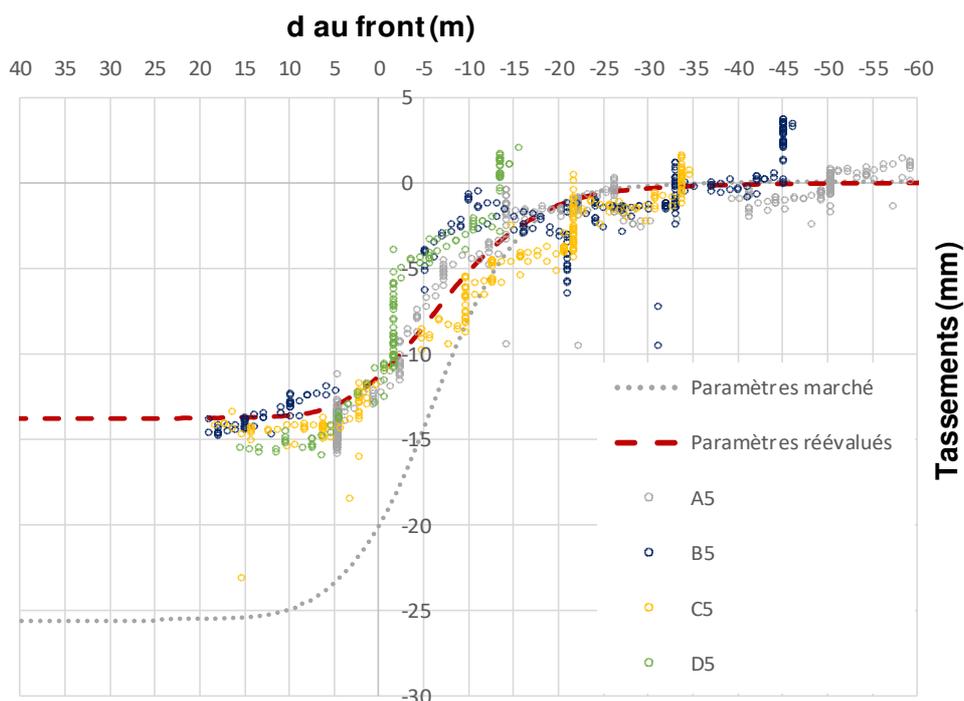
### 5.5 Résultats de la modélisation

La méthodologie adoptée pour caler les paramètres géotechniques est progressive. Plusieurs calculs ont été faits mais dans cet article seront présentés les calculs principaux.

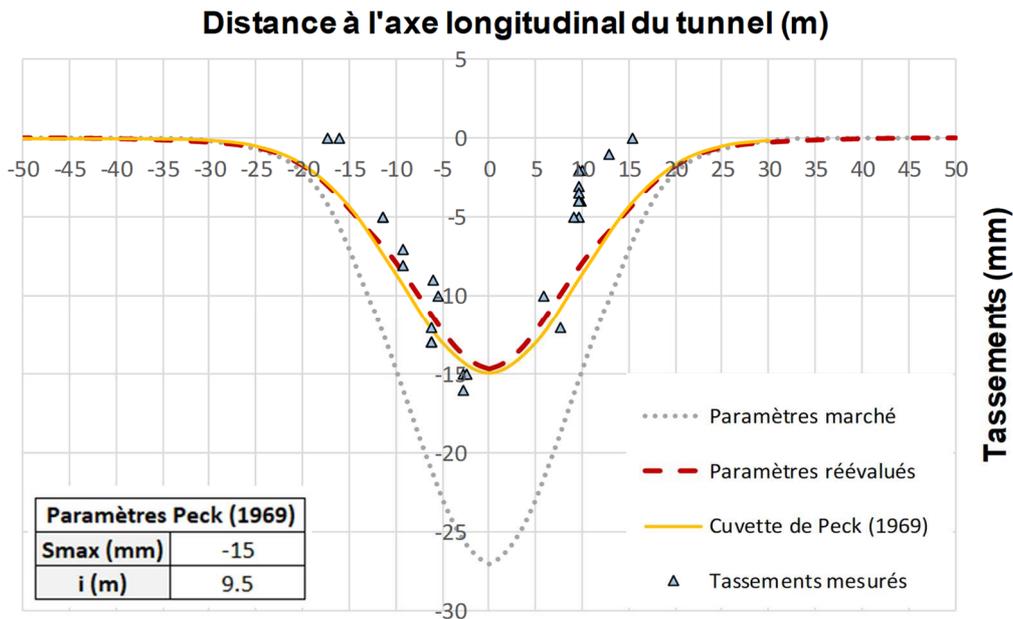
**Tableau 4. Calculs effectués avec le modèle 3D complet**

Calcul	Caractéristiques
1	Paramètres du marché (frottement latéral des boulons et paramètres géotechniques du marché)
2	Paramètres de sol réévalués

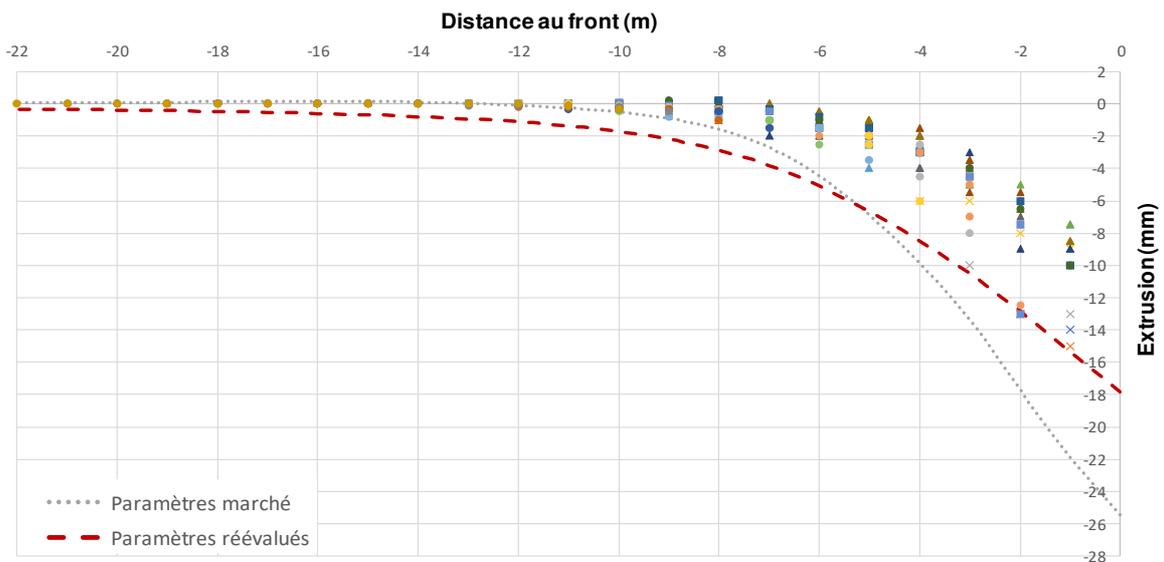
Les figures 5, 6 et 7 présentent les mesures sur chantier de tassement et d'extrusion, ainsi que les résultats des calculs avec le modèle 3D complet.



**Figure 5. Profil en long des tassements (valeurs mesurées in situ avec des cercles)**



**Figure 6. Cuvette transversale des tassements**



**Figure 7. Extrusion au centre de la section (dans les Argiles Vertes)**

Avec les paramètres du marché nous avons pu conclure que :

- Les paramètres de sol sont sous-estimés et ne permettent pas de retrouver les valeurs de déplacements dans le massif qui ont été mesurés en phase de chantier ;
- Le comportement « drainé » pour les Marnes de Pantin ne semble pas correspondre à son comportement réel. Ce premier calcul a montré qu'un coin de rupture se forme dans cette formation au niveau du front. Cependant, aucune instabilité de front n'a été repérée dans cette formation pendant la phase de creusement et les venues d'eau ont été très faibles. Un comportement « non drainé » semble mieux correspondre aux Marnes de Pantin.

Avec les paramètres de sol réévalués en modélisant les Marnes de Pantin avec un comportement non drainé, nous avons pu conclure que :

- La modélisation, avec un comportement non drainé des Marnes de Pantin, semble être plus en accord avec le comportement qui a été observé pendant la phase de chantier ;
- Les nouveaux paramètres géotechniques (résistance de cisaillement et coefficient des terres au repos  $K_0$ ), ont permis de diminuer en particulier les valeurs de tassements dans le massif et de les rapprocher des tassements observés in situ ;

- L'approche pressiométrique pour la détermination des modules de déformabilité des différentes formations dans le massif semble être assez appropriée et permet de retrouver les mesures de tassements en surface mesurés en phase de chantier ;
- Le profil longitudinal des tassements trouvé par le calcul numérique semble bien s'adapter aux mesures de référence en termes d'amorce des tassements (35 m), et de distance de stabilisation des tassements à l'arrière du front (20 m) ;
- La cuvette transversale de tassements obtenue avec la modélisation numérique est plus large (demi-largeur 25 m), que celle obtenue en phase de chantier. Cela peut provenir du fait que les mesures de référence mélangent des points en voirie et des cibles sur bâti qui ont une rigidité plus importante et qui se déforment moins ;
- L'extrusion mesurée sur chantier est inférieure à celle obtenue par le calcul numérique, même si les allures sont cohérentes. Cette différence peut provenir d'une part, à un phénomène de succion qui crée un effet positif au front en diminuant l'extrusion, et d'autre part, à la présence de béton projeté au front, jouant le rôle de confinement, qui n'a pas été modélisé dans le calcul numérique.

A l'issu du calcul de retro-analyse, par le biais du modèle 3D complet, nous avons retenu les paramètres géotechniques suivants :

**Tableau 5. Paramètres géotechniques « calés »**

Formation	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$C_u$ [kPa]	$c'$ [kPa]	$\Phi'$ [°]	$E_{50}$ [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 considéré égal à trois fois le module  $E_{50}$ .

## 6 Méthodes numériques 3D simplifiées

La rétro-analyse numérique réalisée par un modèle 3D complet a permis de caler les paramètres géotechniques qui seront utilisés pour les modèles simplifiés (Tableau 5). Le modèle 3D complet a nécessité un temps de calcul important (environ 40 h par calcul), d'où l'intérêt d'étudier des méthodes 3D simplifiées.

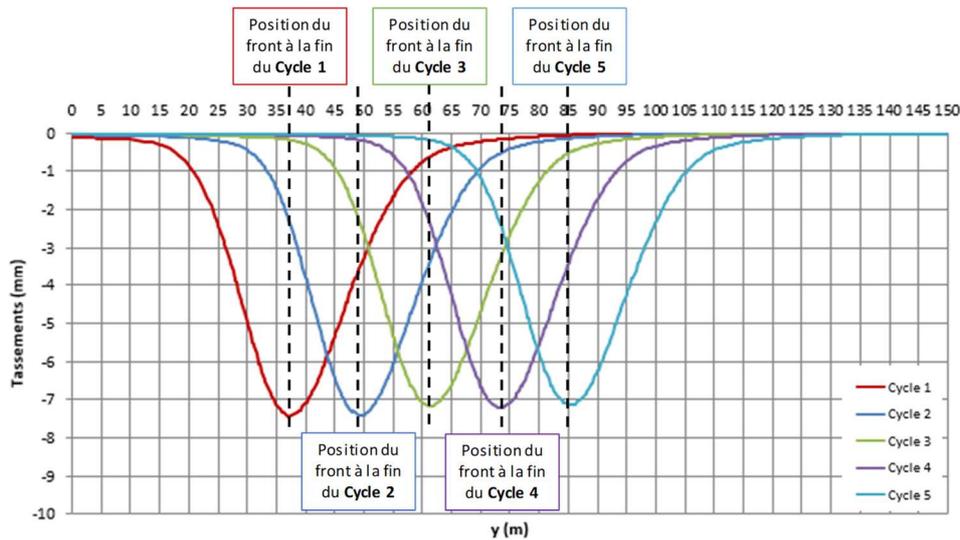
### 6.1 Méthode Macro-Step

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

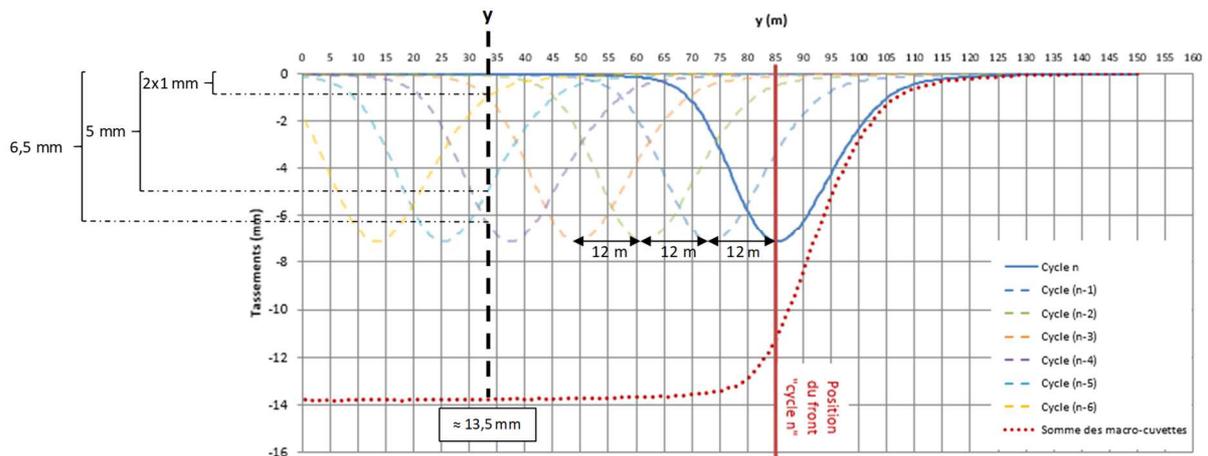
Le modèle numérique complet, présenté précédemment, a simulé cinq cycles de creusement, chacun étant composé de 12 passes d'excavation de 1 m.

La Figure 8 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 12m correspondant à la longueur du cycle de creusement.



**Figure 8. Macro-cuvettes longitudinales issues du modèle 3D complet (Calcul 4)**

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 9. Principe de la somme des macro-cuvettes pour le profil en long de tassements**

Ce même principe peut être appliqué pour des « macro-cuvettes » obtenues à différentes distances de l'axe du tunnel. On obtient ainsi différents profils en long de tassement à différentes distances de l'axe du tunnel. La cuvette transversale de tassements finale est obtenue en associant la valeur de tassement finale stabilisée après la somme des « macro-cuvettes », à différentes distances de l'axe du tunnel.

L'extrusion générée pendant un cycle de creusement, appelée « macro-extrusion », est décalée de la longueur du cycle d'excavation. L'extrusion totale en un point « y » donné correspond à la somme des macro-extrusions décalées à ce « y » donné, comme le montre la figure suivante.

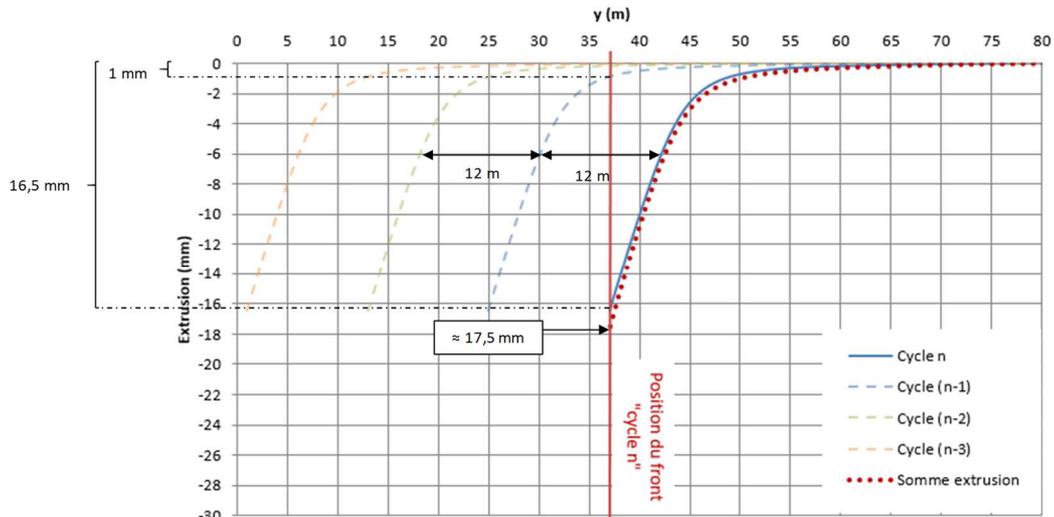


Figure 10. Principe de la somme des macro-extrusion pour l'extrusion stabilisée

### 6.1.2 Modèle numérique

Le modèle numérique utilisé pour la méthode *Macro-Step* est identique à celui utilisé pour le modèle complet en termes de taille, stratigraphie, géométrie, modélisation des éléments (boulons et soutènement), et maillage.

Le phasage de calcul est le même que celui du modèle 3D complet, mais qui s'arrête à la fin du creusement du premier cycle (phase 14). Au total ce modèle comporte 15 phases de calcul et met environ 8h à calculer (soit 5 fois moins que le modèle 3D complet).

## 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 les déplacements stabilisés du massif obtenus avec la modélisation complète. Le boulonnage est simulé cette fois-ci avec une longueur constante

### 6.2.1 Principe

Dans la figure suivante, apparaissent les cuvettes instantanées longitudinales de tassements générées à chaque phase d'excavation du dernier cycle du modèle complet (cycle 5).

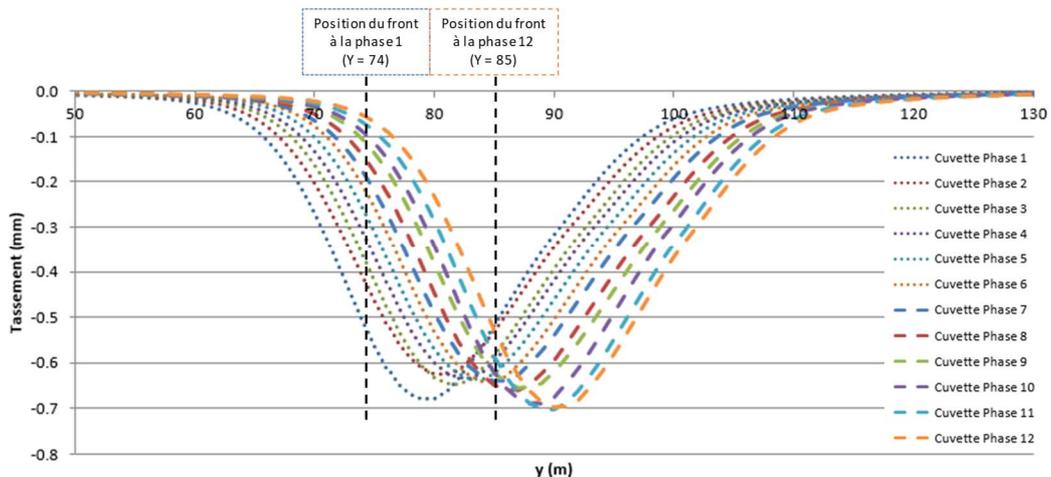


Figure 11. Cuvettes longitudinales instantanées, cycle 5 (modèle 3D complet « calé »)

De manière générale, on observe que la valeur maximale des cuvettes instantanées est croissante avec l'avancement du front. Cela 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 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. En effet, 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 » des boulons, peut être définie comme suit :

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

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.

Comme dans la méthode précédente, celle-ci consiste à sommer en tout point « y » (direction du creusement), le tassement à ce « y » de toutes les cuvettes décalées du pas d'excavation. Le même principe peut être appliqué pour obtenir l'extrusion finale.

Pour obtenir la cuvette transversale de tassements le principe est le même que pour la méthode précédente, avec la différence qu'on considère les cuvettes longitudinales instantanées issues d'une phase d'excavation.

### 6.2.2 Modèle numérique

Le modèle numérique utilisé pour la méthode *One-Step* est identique à celui utilisé pour le modèle complet en termes de taille, stratigraphie, géométrie, modélisation des éléments (boulons et soutènement), et maillage.

Le phasage de calcul est le suivant :

**Tableau 6. Phasage du modèle 3D simplifié, One-Step**

Phase de calcul	
Phase initiale	Initialisation des contraintes (procédure $K_0$ )
1	Excavation 1 <sup>er</sup> tronçon de 25 m (Taux de déconfinement corrigé = 0.4)
2	Soutènement du 1 <sup>er</sup> tronçon (Taux de déconfinement = 1)
3	Excavation de 1m de sol + Activation de 11m de boulons ( $L_{\text{utile}}$ dans ce cas d'étude)
4 à 6	Autres phases d'excavation de 1m : Désactivation de 1m de sol et de 1m de boulons « excavés » Activation de 1m de boulons à l'avant du front (longueur constante de boulons) Activation de 1m de soutènement de la passe d'excavation précédente

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.

Au total, ce modèle comporte 7 phases de calcul et met environ 4h à calculer (soit 10 fois moins que le modèle 3D complet).

### 6.3 Résultats des modélisations numériques 3D simplifiées

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

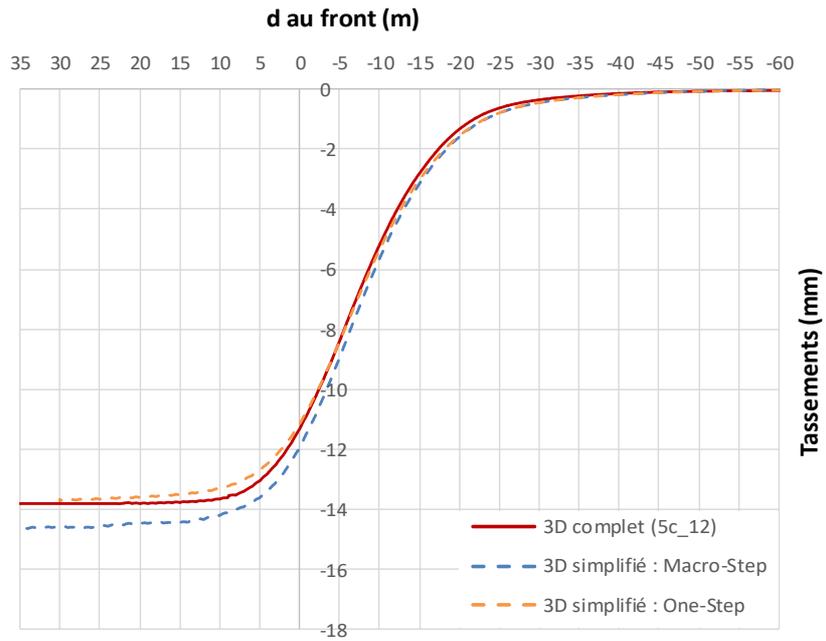


Figure 12. Profil en long de tassements

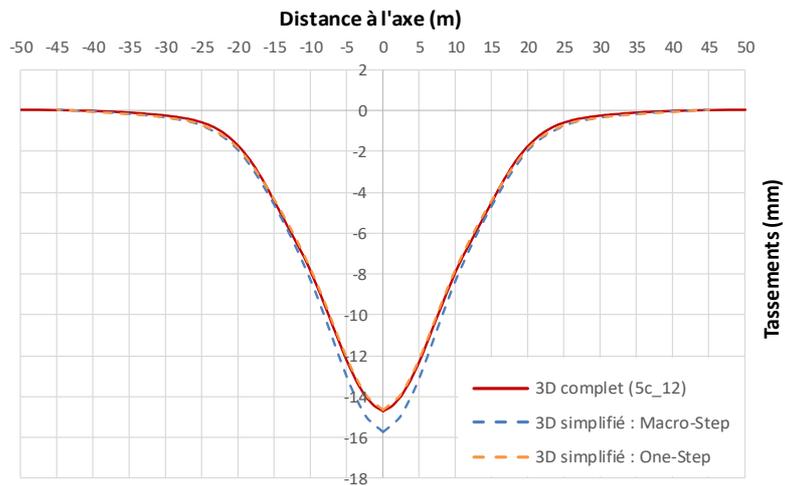


Figure 13. Cuvette transversale de tassements

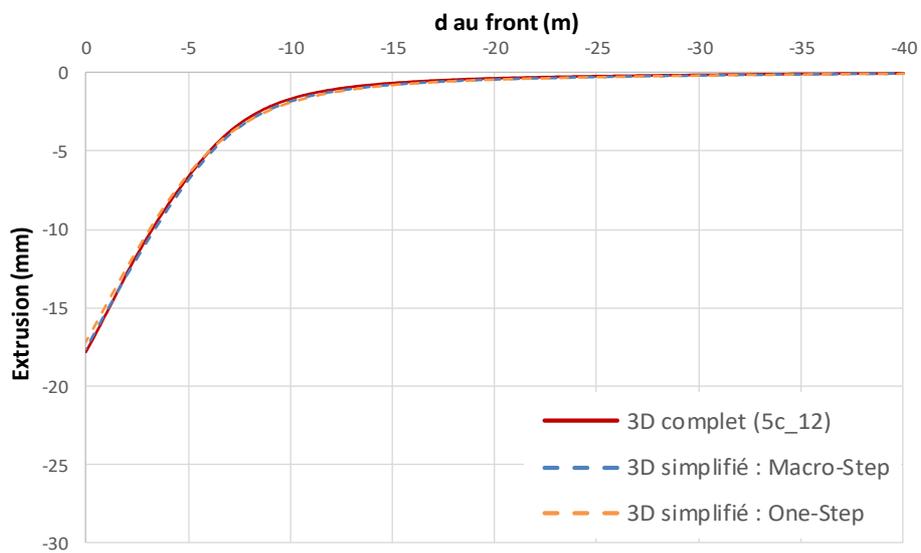


Figure 14. Extrusion finale

Par ailleurs la méthode Macro-Step permet, dépendant des formations en place, de la rigidité du soutènement et de la longueur du cycle de creusement, des ordres de grandeurs des efforts dans les boulons et dans le soutènement peuvent être obtenus avec cette méthode. Dans le cas ici étudié, le calcul d'un seul cycle de creusement permettrait de récupérer les efforts dans les boulons et dans le soutènement avec une erreur de l'ordre de 5% par rapport au modèle complet.

## 7 Conclusion

L'analyse des mesures d'auscultation du creusement côté AMT a montré que les paramètres géotechniques du DCE étaient globalement sécuritaires, ce qui tout à fait usuel dans le cadre de projets en site urbain sensibles où la maîtrise des déformations et, en particulier, des tassements est un paramètre dimensionnant.

La rétro-analyse numérique faite par le biais d'une modélisation 3D complète a permis de retrouver les ordres de grandeur des déplacements mesurés en phase de chantier. L'étude s'est faite de manière progressive en réévaluant différents paramètres géotechniques qui peuvent influencer les tassements.

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 déplacements stabilisés dans le massif. 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 un modèle complet. La deuxième méthode est beaucoup plus rapide, de l'ordre de 10 fois plus rapide qu'un modèle complet, et permettrait 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.

Toutefois, afin de les vérifier ces méthodes simplifiées, il est important de pouvoir les appliquer dans un autre projet avec une géométrie et géologie différentes.

## 8 Références

- AFNOR, Juillet 2012. Norme NF P94-262, "Norme d'application de l'eurocode 7 - Fondations profondes".
- Bourgeois E. Analyse numérique tridimensionnelle des tassements provoqués par le creusement d'un tunnel par la technique de prédécoupage mécanique. Application à la traversée souterraine de Toulon, dans "Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées", mars - avril 2002, n. 237, pp. 37-57.
- 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.
- Peck R.B. Deep excavations and tunnelling in soft ground. In: *Proceeding of the 7th International Conference on Soil Mechanism Foundation Engineering*, 1969, Mexico, vol. 3, pp. 255-290.
- Peila D. A theoretical study of reinforcement influence on the stability of a tunnel face. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1994, vol. 12, pp. 145–168.
- 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.