

Suzanne Fauriel, docteur ès sciences, CSD Ingénieurs SA, Lausanne/CH
 Nicolas Dupriez, ingénieur, CSD Ingénieurs SA, Lausanne/CH
 Olivier Müller, ingénieur, CSD Ingénieurs SA, Lausanne/CH

Prévisions de tassements d'un tunnel urbain

Le tunnel de la route des Nations à Genève

Cet article présente la méthodologie et les résultats du dimensionnement du tunnel de la route des Nations à Genève, Suisse. Ce tunnel urbain d'un diamètre de 12 m est excavé en méthode traditionnelle sous une couverture variant entre 6,5 et 18 m dans de la moraine glaciaire hétérogène contenant de multiples aquifères confinés. Ce contexte exige que l'on apporte un grand soin à la prévision des tassements.

Settlement Prediction of an Urban Tunnel

Route des Nations Tunnel in Geneva

This paper presents the methodology and results from the construction design analysis of the Route des Nations 491 m tunnel in Geneva, Switzerland. This high-visibility, 12 m diameter urban tunnel is being excavated using conventional tunnelling methods under 6.5 to 18 m cover, within heterogeneous glacial till containing multiple confined aquifers, requiring cautious predictions of settlements.

1 Introduction

Les tassements de surfaces sont parmi les principaux problèmes liés à la réalisation de tunnels en environnement urbain. Des prévisions fiables des tassements dus au creusement sont donc un élément clé dans le projet de tout tunnel urbain.

Les tassements de surface sont difficiles à prédire par des méthodes d'analyse conventionnelles à cause du comportement complexe du terrain et du phasage des travaux. Des analyses numériques comme la méthode des éléments finis sont par conséquent souvent employées.

La plupart des méthodes d'analyse utilisées à ce jour sont bidimensionnelles. Cependant, ce type d'analyse ne permet pas de tenir compte de nombreux événements se produisant lors de l'excavation d'un tunnel, comme le creusement de galeries de piédroit latérales à différentes vitesses d'avancement ou encore le boulonnage du front. De plus, le déconfinement du terrain avant l'installation du soutènement provisoire ne peut être modélisé explicitement avec une analyse bidimensionnelle. Ces aspects du phasage des travaux doivent être reproduits par d'autres moyens, à l'aide d'hypothèses simplificatrices.

Sur la base des études d'exécution du tunnel de la route des Nations, cet article se propose d'identifier les hypothèses importantes retenues dans les analyses bidimensionnelles. En outre, l'impact de ces hypothèses sur les prévisions des déformations du terrain à court terme est évalué.

1 Introduction

Surface settlement is one of the main issues of tunnelling in an urban environment. An accurate prediction of the tunnelling-induced displacements is hence a key element of the design studies of any urban tunnel.

Surface settlement is difficult to predict using conventional analysis methods owing to the complex soil behaviour and construction sequence. Numerical analysis such as the finite element method is therefore often employed.

Most of the analysis models currently used are mainly two-dimensional. However, such analysis may not accurately account for many of the events which occur during tunnelling, such as the excavation of twin lateral adits with different excavation rate and face bolting. Furthermore, stress release of the ground before installation of ground support cannot be precisely reproduced in two-dimensional analyses. Such aspects of the construction phase are considered through other means.

Using the design undertaken for the Route des Nations tunnel in Geneva, this paper identifies the important assumptions made in the two-dimensional analyses undertaken for the tunnel. Furthermore, the impact of these assumptions on the short-term settlement predictions is assessed.

1.1 General Description

The Route des Nations tunnel in Geneva, Switzerland, is a 491 m long urban tunnel. The longitudinal profile is char-

Setzungsprognose für einen Stadttunnel

Am Beispiel des Route-des-Nations-Tunnels in Genf

Die Route des Nations ist ein neues Strasseninfrastrukturprojekt mit dem Ziel der Autobahnbindung zu den Hauptsitzen der wichtigsten internationalen Organisationen in Genf. Parallel dazu wird das Bundesamt für Strassen (ASTRA) die Autobahnanschlussstelle Grand-Saconnex (JAG) umbauen. Eigentümer des Route-des-Nations-Tunnels ist der Kanton Genf, Ministerium für Infrastruktur, Tiefbauamt. Die Planung und Bauleitung übernimmt das Joint Venture NATIF. Die Bauarbeiten werden von der Marti Tunnel AG ausgeführt.

1.1 Description générale du projet

Le tunnel de la route des Nations à Genève en Suisse est un tunnel urbain de 491 m de long. Le profil longitudinal se caractérise par une pente constante de 4,88%, descendante vers le nord sur toute la longueur. En coupe, le rayon d'intrados de la voûte est de 5,26 m, centré à 1,59 m au-dessus de l'axe de la chaussée. Deux voies de circulation de 3,75 m y sont prévues pour le trafic bidirectionnel, ainsi que deux banquettes d'environ 1,2 m de largeur.

1.2 Contexte

La route des Nations est une nouvelle infrastructure routière, construite dans sa plus grande partie en tranchée couverte, mais aussi en tunnel. Elle permettra un accès direct depuis

Previsione di assestamento di una galleria urbana

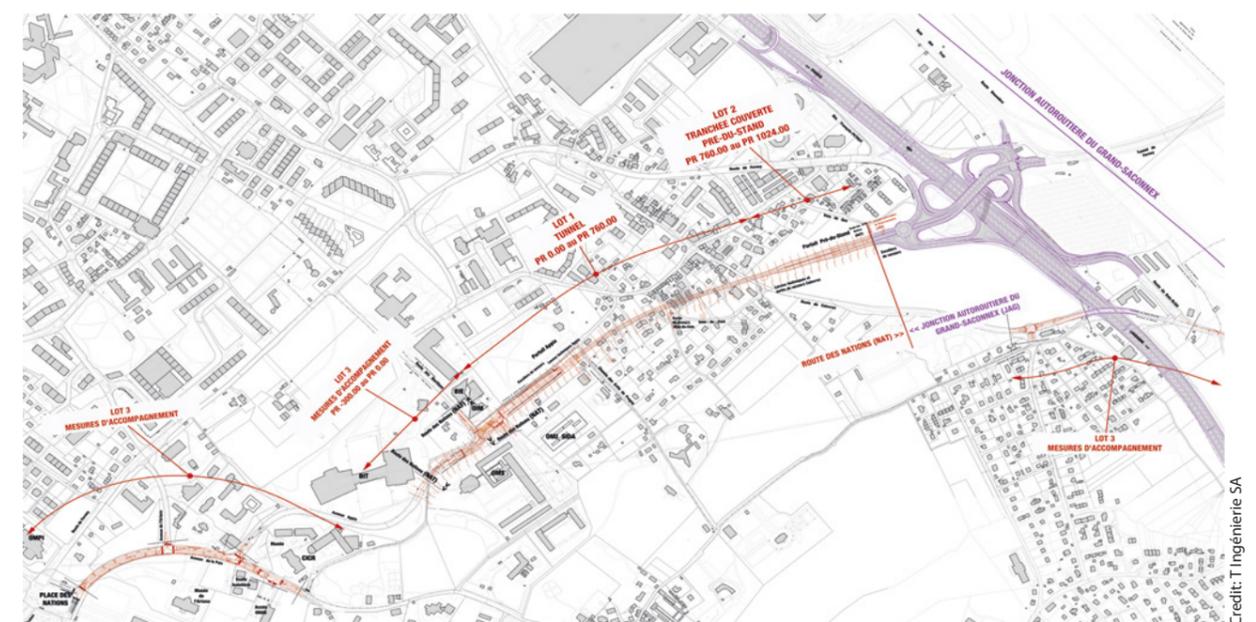
Galleria Route des Nations a Ginevra

La Route des Nations è una nuova infrastruttura viaria che permetterà l'accesso diretto dall'autostrada alle sedi delle principali organizzazioni internazionali. In parallelo, l'Ufficio federale delle strade (USTRA) adatterà lo svincolo autostradale di Grand-Saconnex (JAG). La galleria Route des Nations è di proprietà di Repubblica e Cantone di Ginevra, dipartimento delle infrastrutture (DI), ufficio cantonale del genio civile. La progettazione e la supervisione del cantiere sono gestite dalla Joint Venture NATIF, mentre i lavori sono svolti dalla Marti Tunnel AG.

acterised by a 4.88% constant slope. The intrados radius is 5.26 m, centred at 1.59 m above the axis of the road surface. The tunnel is to provide two 3.75 m wide traffic as well as two 1.20 m wide utility corridors.

1.2 Context

The Route des Nations is a new road infrastructure, built mainly underground (part tunnel and part cut and cover). It will allow direct access from the motorway to the headquarters of the most important international organisations (see Fig. 1). Thanks to the construction of the Route des Nations, the surface area will be freed, the Grand-Saconnex will be able to develop new infrastructures and create a pleasant urban centre for its residents.



1 Situation générale du tunnel de la route des Nations
 General situation of the Route des Nations tunnel

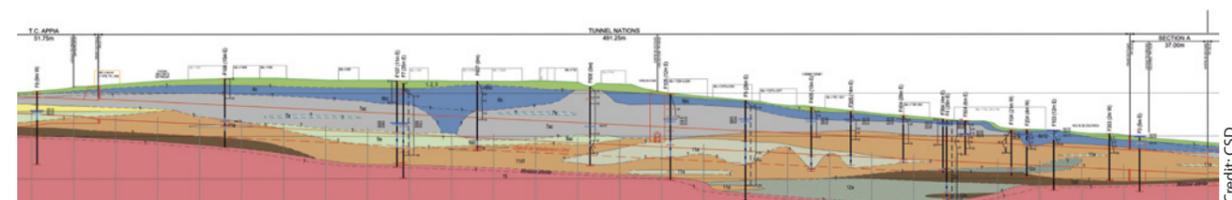
l'autoroute aux sièges des plus importantes organisations internationales (voir fig. 1). Grâce à la construction de la route des Nations, l'espace en surface sera libéré. Le Grand-Saconnex va ainsi pouvoir aménager de nouvelles infrastructures et créer un centre urbain agréable pour ses riverains.

En parallèle, l'Office fédéral des routes (OFROU) va adapter la jonction autoroutière du Grand-Saconnex (JAG). Cela nécessitera la démolition et la reconstruction de plusieurs ouvrages d'art, dont le passage supérieur sur l'actuelle route de Ferney qui relie Ferney-Voltaire aux portes de Genève. Il sera remplacé par un nouvel ouvrage d'art, un pont haubané asymétrique à suspension centrale qui franchira l'autoroute. La mise en service de la nouvelle jonction autoroutière est prévue en même temps que la route des Nations.

1.3 Conditions du site

Le tunnel de la Route des Nations, situé dans les moraines rissienne et würmienne, ainsi que dans des alluvions anciennes, est creusé sous une couverture sur la clef de voûte allant de 6,5 m environ au front d'attaque nord (Colovrex) à 18 m environ au passage sous la sortie de secours Voie-du-Coin, puis diminuant pour atteindre 6,5 m environ au front d'attaque sud (Appia).

Les formations graveleuses sont le siège d'aquifères libres et/ou captifs, alimentés principalement par infiltration des eaux météoriques et par des circulations d'eaux souterraines entre les corps aquifères mis au jour. L'ouvrage est situé partiellement sous la nappe.



2 Profil hydrogéologique longitudinal du tunnel de la route des Nations
Longitudinal hydro-geotechnical profile of the Route des Nations tunnel

Le tunnel est situé dans un contexte urbain assez dense comprenant des bâtiments qui sont pour la grande majorité des habitations en maçonnerie ou en béton armé dans un bon état de conservation sans éléments sensibles particuliers. Il faut également souligner la présence d'une habitation dans un état de conservation moyen et d'une église en maçonnerie du début du XX^e siècle ayant une valeur historique non négligeable.

Par conséquent, les tassements engendrés par le creusement du tunnel sont une problématique importante dans l'étude de ce projet.

1.4 Construction et excavation

Étant donné la présence de multiples aquifères confinés dans l'emprise du projet, le rabattement des aquifères principaux jusqu'à 5 m en dessous de la base du tunnel est prévu.

In parallel, the Federal Office of Roads (FEDRO) will adapt the motorway junction Grand-Saconnex (JAG), which will require the demolition and reconstruction of several structures including, in particular, the overpass on the current road from Ferney that connects Ferney-Voltaire to the gates of Geneva. It will be replaced by a new structure, an asymmetric cable-stayed bridge with central suspension, which will cross the highway. The new motorway junction will be put into service at the same time as the Route des Nations.

1.3 Site Conditions

The Route des Nations tunnel is excavated under a varying ground cover, ranging from about 6.5 m at the northern portal (PR 723) to about 18 m at the passage under the Voie-du-Coin surface road (PR 480), then decreasing back to 6.5 m at the southern portal (PR 232), all measured from the tunnel crown.

The tunnel is entirely located in heterogeneous glacial till containing multiple confined aquifers. Their geotechnical properties consist of compact gravelly silts, compact clay silts and sandy-silty gravels.

The tunnel is located in a dense urban environment consisting mainly of brick or concrete houses. In particular one of these buildings, a historical old brick church from the early 20th century had to be taken special care of. Settlements induced by the tunnel excavation were thus an issue of high importance which had to be considered in the design studies.

1.4 Construction and Excavation Sequence

Given the presence of multiple confined aquifers in the area of the tunnel, dewatering of the main aquifers had to be considered to 5 m below the tunnel invert.

The initial general construction method involves excavating two lateral adits, both used for exploration and for the foundations of the top heading's temporary support. The top heading is then excavated before undertaking the bench and the invert excavation. Pipe umbrella and face bolts are installed to serve as ground improvement to enhance the stability and ensure the safety of the work area.

The temporary support of the adits and of the tunnel consists of steel arches, bolts and shotcrete.

La méthode de construction en section divisée consiste en l'excavation initiale de deux galeries de piédroits parallèles sur toute leur longueur depuis le portail provisoire nord, en attaque montante. Ces galeries sont utilisées aussi bien pour les reconnaissances que pour créer les fondations du soutènement provisoire de la calotte.

La calotte est ensuite excavée avant de procéder à l'excavation du stross et du radier.

Les soutènements provisoires des galeries de piédroit et du tunnel sont composés de cintres métalliques et de béton projeté. Le front de taille est renforcé par un boulonnage de front associé à un béton projeté. Une voûte parapluie est également réalisée pour protéger l'excavation de la calotte.

Enfin, une fois l'étanchéité effectuée et le revêtement définitif bétonné, les aménagements intérieurs peuvent être construits.

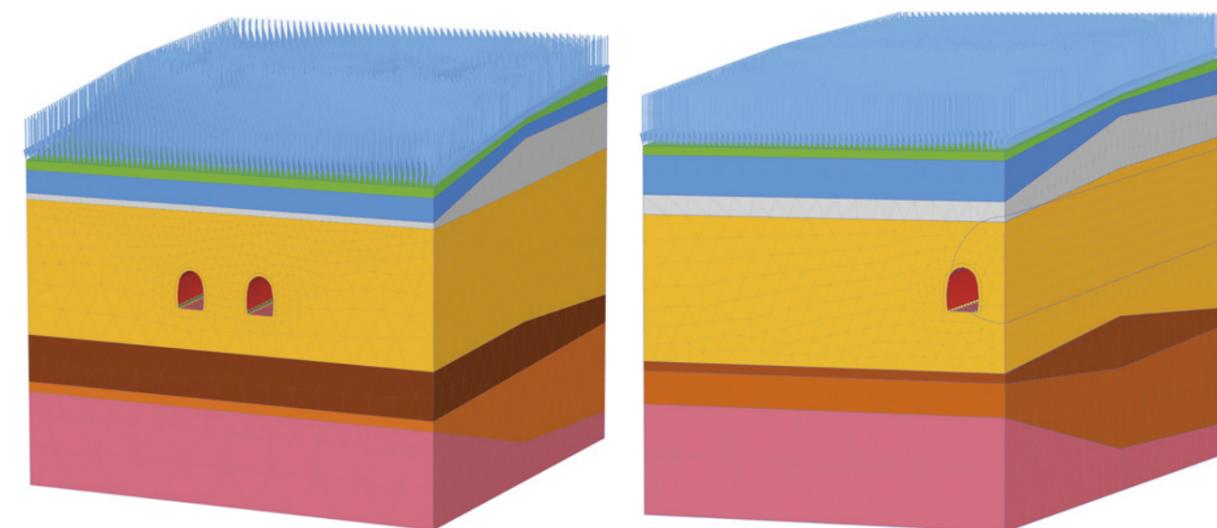
2 Méthodologie

2.1 Modèles d'éléments finis 3D

2.1.1 Géométrie et maillage

Les prévisions par éléments finis de l'excavation des galeries de piédroit latérales et du tunnel ont été effectuées avec le logiciel Plaxis 3D. Deux modèles tridimensionnels différents ont été utilisés :

- Modèle A: Modèle complet des deux galeries de piédroit latérales pour étudier l'effet de différentes vitesses d'avancement et du type de modélisation du boulonnage de front;
- Modèle B: Modèle demi-symétrique des étapes d'excavation du tunnel pour étudier le déconfinement et l'effet du type de modélisation du boulonnage de front.



3 Modèles d'éléments finis 3D A – Excavation des galeries (à gauche) et B – Excavation complète du tunnel (à droite)
3D finite element model A – adits excavation (to the left) and B – complete tunnel excavation (to the right)

The final lining is concreted after waterproofing and lastly, the interior structures are constructed.

2 Methodology

2.1 3D Finite Elements Models

2.1.1 Geometry and FE Mesh

The finite element predictions of the lateral adits excavation and of the whole tunnel were performed using the software Plaxis 3D. Two distinct three-dimensional models were used:

- Model A: full model of the two lateral adits to investigate the effect of twin tunnelling with symmetrical and with offset tunnel faces, including face-bolting.
- Model B: half-symmetrical model of the complete tunnel excavation cycle to investigate stress release and face-bolting effects in the top heading.

Model A is 60 m long (y axis), 60 m wide (x axis) and 45 m high (z axis). The mesh is refined in the vicinity of the lateral adits. The mesh is composed of 84,654 elements and 143,184 nodes.

Model B is 80 m long (y axis), 45 m wide (x axis) and 45 m high (z axis). The mesh is refined in the vicinity of the lateral adits. The mesh is composed of 84,230 elements and 137,905 nodes.

A reference section located at the centre of each of the two models was determined. This section corresponds to PR 640 of the tunnel.

2.1.2 Modelling of Temporary Support

Soil reinforcement ahead of the face by a pipe umbrella is not modelled. Face bolting is modelled in two alternative ways as illustrated in Fig. 4:

- Explicitly by embedded piles.

Le modèle A fait 60 m de long (axe y), 60 m de large (axe x) et 45 m de hauteur (axe z). Le maillage raffiné à proximité des galeries latérales est composé de 84 654 éléments et 143'184 nœuds.

Le modèle B fait 80 m de long (axe y), 45 m de large (axe x) et 45 m de hauteur (axe z). Le maillage est raffiné à proximité des galeries latérales est composé de 84 230 éléments et 137 905 nœuds.

Une section de référence située au centre de chacun des deux modèles a été retenue. Celle-ci correspond au PR 640 du tunnel.

2.1.2 Modélisation des supports temporaires

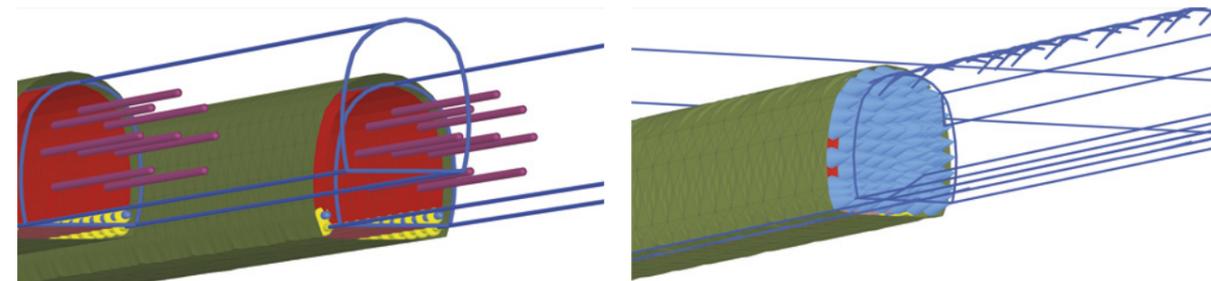
Le pré-soutènement par voûte parapluie n'est pas modélisé. Le boulonnage de front est modélisé de deux façons comme montré en fig. 4:

- Explicitement par des « pieux intégrés »;
- Implicitement par une pression équivalente appliquée sur le front et déterminée selon Peila (1994).

Les « pieux intégrés » sont capables de prendre en compte l'interface sol-boulon pour reproduire le comportement du renforcement de façon appropriée.

La pression équivalente est calculée comme la somme des forces normales dans les boulons distribuée sur la surface du front.

Enfin, le soutènement provisoire composé de cintres métalliques et de béton projeté est modélisé par des éléments de type « plaques » d'inertie et de rigidité équivalentes.



4 Modélisation des ancrages du front d'attaque du modèle A (à gauche) et du modèle B (à droite)
Model of face bolting in model A (to the left) and in model B (to the right)

2.1.3 Phases de calcul

Les phases de calcul sont les suivantes:

- Initialisation de l'état de contraintes;
- Rabattement des aquifères.

Excavation des galeries de piédroit latérales avec un décalage de respectivement 30 m et 0 m entre les deux fronts d'attaque des galeries:

- Boulonnage du front;

- Implicitement by an equivalent face retaining pressure determined according to Peila (1994).

The "embedded piles" are able to take into account the soil-bolt interface to closely reproduce the behaviour of the reinforcement.

The equivalent face retaining pressure is calculated as the sum of the normal forces mobilised in the bolts over the section of the face.

Finally, temporary support consisting of centring and shotcrete is modelled by means of plate elements of equivalent inertia and rigidity. The bolts were not considered for use.

2.1.3 Modelling of Temporary Support

The calculation phases are as follows:

- Initialisation of stress state.
- Dewatering aquifers.

Excavation of the lateral adits with an offset of 30 m, respectively 0 m between the two excavation faces:

- Face bolting.
- Excavation by steps of 1 m.
- Installation of primary support by steps of 1 m.
- Construction of the lateral foundations for the header's temporary support.

Excavation of the header:

- Face bolting.
- Excavation by steps of 1 m.
- Installation of primary support by steps of 1 m.

Excavation of the bench and the invert:

- Face bolting.
- Excavation by steps of 1 m.
- Installation of primary support by steps of 1 m.

2.2 3D Finite Element Models

2.2.1 Modelling of Temporary Support

The two-dimensional finite element predictions of the tunnel excavation were performed using the software Plaxis 2D in plane strain conditions.

- Excavation par étapes de 1 m;
- Installation du soutènement provisoire par étapes de 1 m;
- Construction des massifs d'appuis en béton armé dans les galeries de piédroit latérales pour servir de fondation au soutènement provisoire de calotte.

Excavation de la calotte:

- Boulonnage du front;
- Excavation par étapes de 1 m;
- Installation du soutènement provisoire par étapes de 1 m.

Excavation du stross:

- Boulonnage du front;
- Excavation par étapes de 1 m;
- Installation du soutènement provisoire par étapes de 1 m.

2.2 Modèles d'éléments finis 2D

2.2.1 Géométrie et maillage

Les prévisions par éléments finis de l'excavation du tunnel ont été effectuées avec le logiciel Plaxis 2D dans des conditions de déformations planes.

De nombreux modèles d'éléments finis bidimensionnels ont été utilisés dans l'étude de projet du tunnel de la route des Nations. L'un d'eux est représentatif de la coupe de référence des modèles tridimensionnels (PR 640) et seul celui-ci sera présenté dans cet article.

La largeur totale de ce modèle est de 90 m, et sa hauteur est d'approximativement 50 m. Le maillage est raffiné à proximité du tunnel et consiste en 2920 éléments et 24 251 nœuds.

2.2.2 Modélisation des supports temporaires

Le soutènement provisoire composé de cintres métalliques et de béton projeté est modélisé au moyen d'éléments « poutres », d'inertie et rigidité équivalentes.

2.2.3 Phases de calcul

Les phases de calcul sont les suivantes:

- Initialisation de l'état de contraintes;
- Rabattement des aquifères.

Excavation des galeries de piédroit latérales:

- Excavation en utilisant le taux de déconfinement;
- Installation du soutènement provisoire;
- Construction des massifs d'appuis en béton armé dans les galeries de piédroit latérales pour servir de fondation au soutènement provisoire de calotte.

Excavation de la calotte:

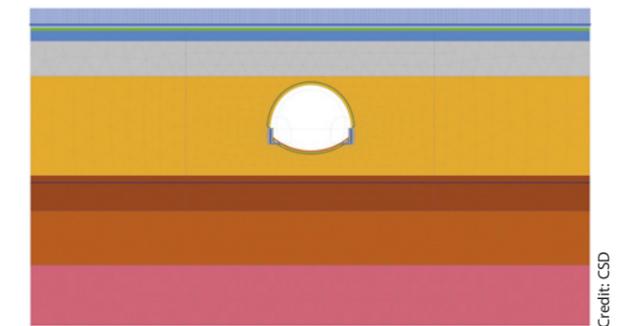
- Excavation en utilisant le taux de déconfinement;
- Installation du soutènement provisoire.

Excavation du stross:

- Excavation en utilisant le taux de déconfinement;
- Installation du soutènement provisoire.

Several two-dimensional finite element models were used in the Route des Nations tunnel design studies. One of these is representative of the midsection of the three-dimensional models (PR 640) and only this one will be presented for the purpose of this paper.

The total width of the model is 90 m and its height approximately 50 m. The mesh is refined in the vicinity of the tunnel. It consists of 2,920 elements and 24,251 bolts.



5 Modèle d'éléments finis 2D correspondant aux modèles d'éléments finis 3D
2D finite element model in correspondence to the 3D finite element models

2.2.2 Modelling of Temporary Support

Temporary support consisting of steel arches and shotcrete is modelled by means of beam elements of equivalent inertia and rigidity. The bolts were not considered for use.

2.2.3 Calculation Phases

The calculation phases are as follows:

- Initialisation of stress state.
- Dewatering aquifers.

Excavation of the lateral adits:

- Excavation using a stress relaxation factor.
- Installation of primary support.
- Construction of the lateral foundations for the header's temporary support.

Excavation of the header:

- Excavation using a stress relaxation factor.
- Installation of primary support.

Excavation of the bench and the invert:

- Excavation using a stress relaxation factor.
- Installation of primary support.

3 Results and Discussion

3.1 Parallel Tunnelling of the Lateral Adits

As part of the design studies of the Route des Nations tunnel, the prediction of tunnelling-induced ground movements during excavation of the twin adits was carried out with numerical methods. The study allowed the effect of one

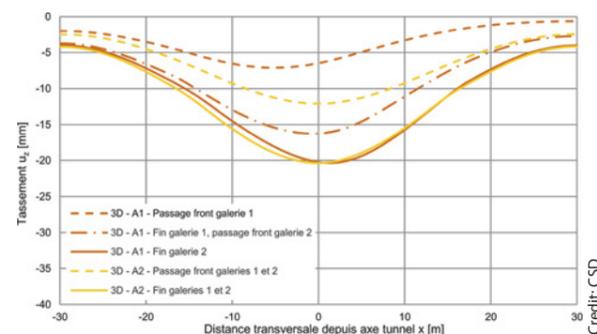
3 Résultats et discussion

3.1 Avancement des galeries latérales

Les prévisions de déformations du terrain induites durant l'excavation des deux galeries de piédroit latérales ont été effectuées par des méthodes numériques. L'étude a permis d'établir l'effet de l'avancement plus rapide d'une galerie par rapport à l'autre. Deux simulations ont ainsi été effectuées :

- Simulation A1 : Excavation de la galerie 2 avec un décalage de 30 m par rapport à la galerie 1 ;
- Simulation A2 : Excavation des galeries 1 et 2 en parallèle.

Les profils des tassements de surface à la section PR 640 obtenus avec le modèle A, simulations A1 et A2, sont montrés en fig. 6. Les profils de tassement en surface sont donnés lorsque le front des galeries franchit la section de référence, ainsi qu'à la fin de l'excavation de chacune des galeries. La fig. 7 montre les profils de tassement de surface longitudinaux pour chacune des simulations A1 et A2. Enfin, les tassements de surface maximaux en fonction de l'avancement du front par rapport à la section de référence PR 640 sont montrés à la fig. 8 pour les simulations A1 et A2.



6 Profils transversaux des tassements de surface au PR 640 obtenus avec le modèle A (simulations A1 et A2)
Transverse profiles of surface settlement at PR 640 obtained with model A (simulations A1 and A2)

Il est possible de voir sur les figures ci-dessus que les profils de tassement en surface à la fin de l'excavation ne sont pas influencés de manière notable par une différence de vitesse d'avancement des deux galeries de piédroit. Le tassement de surface maximal atteint en effet 20,4 mm dans les deux simulations. Il y a cependant une légère translation des profils de tassement vers la galerie 2 dans la simulation A1.

3.2 Ancrages du front d'attaque

L'impact du type de modélisation utilisés pour le boulonnage de front a été étudié en effectuant les simulations suivantes pour les modèles A et B :

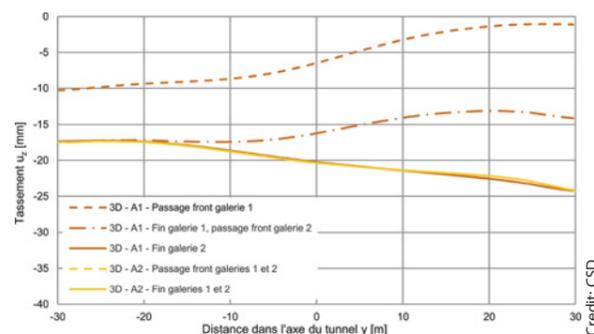
- Simulation A2 : Le boulonnage de front est modélisé explicitement par des éléments de type « pieux intégrés » ;
- Simulation B : Le boulonnage de front est modélisé implicitement par une pression équivalente du front déterminée selon Peila (1994).

adit being excavated faster than the other to be assessed. Two simulations were performed:

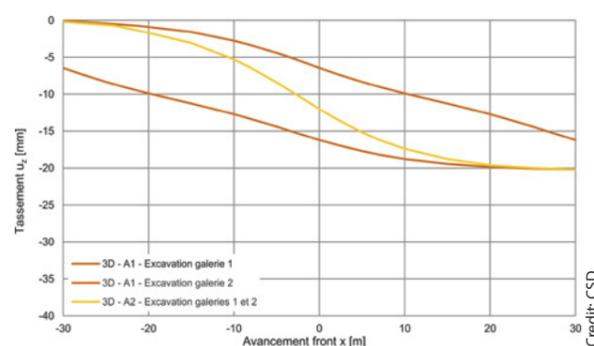
- Simulation A1: excavation of adit 2 with a delay of 30 m with respect to adit 1.
- Simulation A2: excavation of adits 1 and 2 in parallel.

The profiles of surface settlement at section PR 640 obtained with model A simulations A1 and A2 are shown in Fig. 6. The surface settlement troughs are given as the adit front passes the reference section and at the end of the excavation. Fig. 7 shows the longitudinal surface settlement profiles for both simulations A1 and A2. Finally, the maximum surface settlement as a function of the advancement of the excavation front with respect to reference section PR 640 is shown in the Fig. 8 for simulations A1 and A2.

From the above, it can be seen that the surface settlement troughs at the end of excavation are not notably influenced by a difference in productivity of the two adits and the maximum surface settlement reaches 20.4 mm in both simulations. There is however a slight translation of the surface settlement trough towards adit 2 in simulation A1.



7 Profils longitudinaux des tassements de surface obtenus avec le modèle A (simulations A1 et A2)
Longitudinal profiles of surface settlement obtained with model A (simulations A1 and A2)



8 Tassements maximaux de surface en fonction de l'avancement de l'excavation du front d'attaque obtenus avec le modèle A (simulations A1 et A2)
Maximum surface settlement as a function of excavation face advancement obtained with model A (simulations A1 and A2)

La comparaison des résultats entre ces deux modèles a été effectuée sur la base de l'extrusion du front.

L'impact de la modélisation des ancrages du front d'attaque sur l'extrusion du tunnel est montré ci-dessous.

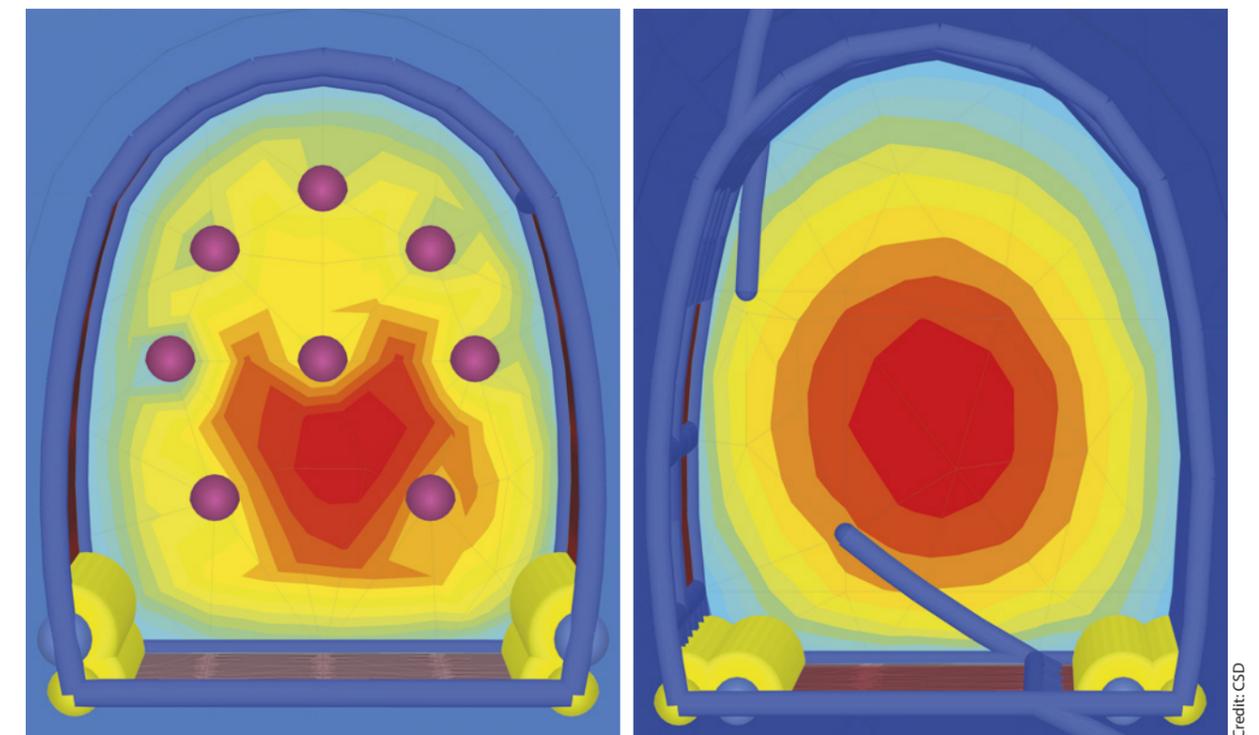
Il apparaît que le choix de la modélisation du boulonnage de front a un effet notable sur l'extrusion maximale du front. En revanche, la cuvette de tassement en surface n'est que faiblement impactée.

3.3 Calibration du modèle bidimensionnel

La section de référence des profils de tassements tridimensionnels a été simulée par une analyse bidimensionnelle.

La méthode convergence-confinement a été utilisée dans la mesure où le soutènement provisoire est installé après un certain déconfinement du terrain. Les contraintes initiales sont ensuite complètement réduites, ce qui induit un chargement du soutènement provisoire. La valeur du taux de déconfinement dans l'analyse bidimensionnelle est attribuée en supposant que l'aire de section dA du profil de tassement est égale au volume par mètre dV/d d'une étape d'excavation donnée, calculée en utilisant le profil de tassement longitudinal.

La fig. 10 montre les profils bidimensionnels longitudinaux des tassements en utilisant 0,40 comme taux de déconfinement pour l'excavation des galeries et 0,20 pour l'excavation de la calotte et du stross du tunnel.



9 Comparaison de l'extrusion du front du modèle A2 (à gauche) avec le modèle B (à droite)
Front extrusion comparison in model A2 (to the left) and model B (to the right)

Modèle Model	Extrusion maximale [mm] Maximum Extrusion [mm]
Modèle A, simulation 2 Model A, simulation 2	10.8
Modèle B / Model B	50.8

Table 1 Comparaison de l'extrusion maximale du front

Table 1 Comparison of maximum face extrusion

De la figure ci-dessus, il est possible de voir que les profils de tassement bi- et tridimensionnels obtenus sont presque identiques en utilisant la méthode convergence-confinement. Cependant, la valeur du taux de déconfinement obtenue est dépendante de la phase d'excavation. De plus, force est de constater que cette valeur est significativement plus haute pour l'excavation des galeries latérales en raison de la plus faible rigidité du soutènement provisoire et de la taille plus petite de la section excavée pour un même pas d'excavation.

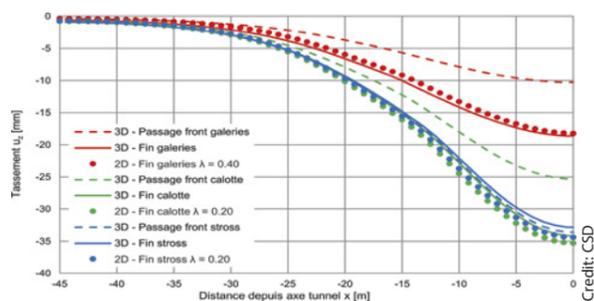
3.4 Procédure de surveillance

Selon la méthode précédemment présentée, les profils de tassement ont été déterminés pour six sections critiques bidimensionnelles distribuées sur toute la longueur du tunnel. Les résultats obtenus ont été utilisés pour déterminer les seuils de la procédure de surveillance.

Dans les faits, de nombreuses études (Peck 1969 et autres) ont prouvé que les tassements peuvent être décrits avec une bonne approximation en utilisant une fonction de probabilité normale de Gauss. Cette fonction a été calibrée sur les profils de tassement numériques par la méthode des moindres carrés selon l'approche de Peck. Cette approche a été prouvée comme reproduisant correctement les profils de tassement numériques.

Les tassements totaux et différentiels ainsi obtenus au droit de chaque bâtiment critique ont ensuite été utilisés pour déterminer respectivement leurs niveaux de risque et les seuils pour leurs procédures de surveillance.

Durant les travaux d'excavation, une surveillance continue des déformations dans le tunnel et en surface est effectuée.



10 Profils transversaux des tassements de surface au PR 640 obtenus avec le modèle tridimensionnel B et le modèle bidimensionnel
Transverse profiles of surface settlement at PR 640 obtained with three-dimensional model B and the two-dimensional model

The beta value in the two-dimensional analyses is assigned by assuming that the section area dA of the two-dimensional settlement trough is equal to the volume per meter dV/d of a given excavation step, calculated using the longitudinal settlement trough.

Fig. 10 shows the two-dimensional transversal settlement profiles using beta values of 0.40 for the excavation of the adits and 0.20 for the excavation of the header, bench and invert.

The above shows that the obtained three-dimensional and two-dimensional settlement troughs are almost identical using the beta method. The obtained beta value is however dependent on the excavation phase and it was found to be significantly higher for the excavation of the lateral adits due to the temporary support being more flexible.

3.4 Monitoring Procedure

Based on the previously discussed analysis, the settlement troughs were determined for six critical two-dimensional sections over the length of the tunnel. The obtained results were used in determining thresholds in the surface settlement monitoring procedure.

In fact, numerous studies (Peck 1969 and others) proved that the settlements can be described with a good approximation using a normal-probability Gaussian function. This function was calibrated on the numerical settlement troughs by being optimised with the least-squares method as per Peck's approach. The Peck approach was proven to correctly reproduce the numerical settlements troughs.

The obtained total and differential displacements at each critical building were used to determine their risk level and the thresholds for the monitoring procedure.

During the excavation works, continuous monitoring of the displacements in the tunnel and at the surface is carried out. The observed ground response is compared to the predicted one and the necessary modifications are planned to guarantee the excavation stability and limit the surface settlements.

4 Conclusion

From the numerical modelling performed during the design studies relating to the Route des Nations tunnel in Geneva, the following conclusions can be drawn:

The specific simplifying assumptions relating to the adits being excavated with differing productivity did not have any notable influence in the surface settlement trough.

The Peila approach to considering the face bolts did have an impact on the short-term settlement predictions. The mod-

elled front extrusion obtained by using this approach was lower than that obtained by explicitly modelling the face bolts.

The beta method was successfully used to calibrate the two-dimensional models.

Implementation of the determined thresholds in the surface settlement monitoring procedure was finally discussed.

The authors would like to thank Andrew Bourget for his guidance and contribution to the design studies of the Routes des Nations tunnel. They would also like to acknowledge the joint venture NATIF and the owner, République et Canton de Genève, Département des infrastructures (DI), Office cantonal du génie civil, Project manager Jorge Canameras.

The authors would like to thank Andrew Bourget for his guidance and contribution to the design studies of the Routes des Nations tunnel. They would also like to acknowledge the joint venture NATIF and the owner, République et Canton de Genève, Département des infrastructures (DI), Office cantonal du génie civil, Project manager Jorge Canameras.

References

- [1] Anagnostou, G. & K. Serafeimidis, K. 2007. The Dimensioning of Tunnel Face Reinforcement. Under-Ground Space – The 4th Dimension of Metropolises, ITW World Tunnel Congress 2007.
- [2] Panet, M. 1995. Calcul des Tunnels par la Méthode Convergence-Confinement. Ponts et Chaussée, Paris.
- [3] Peck, R.B. 1969. Deep Excavation and Tunnelling in Soft Ground. 7th ICSMFE State of the Art Volume: 225–290.
- [4] Peila, D. 1994. A Theoretical Study of Reinforcement Influence on Stability of Tunnel Face. Geotechnical and Geological Engineering 12(3):145–168.
- [5] Ramoni, M. & G. Anagnostou, G. 2014. Face Anchoring, Static Method of Working and Dimensioning. Swiss Tunnel Congress.

4 Conclusion

Des conclusions peuvent être tirées sur la base des études d'excavation du tunnel de la route des Nations à Genève.

Les hypothèses simplificatrices sur les galeries étant excavées à des vitesses d'avancement différentes n'ont pas d'influence sur les profils de tassements de surface.

L'approche selon Peila en ce qui concerne le boulonnage de front n'a pas d'influence notable sur les prévisions de tassement à court terme. En revanche, l'extrusion du front obtenue en utilisant cette approche est plus faible que celle obtenue en modélisant explicitement les boulons de front.

La méthode convergence-confinement a été utilisée avec succès pour calibrer les modèles bidimensionnels.

L'intégration de seuils déterminés dans la procédure de surveillance des tassements de surface a été finalement abordée.

Les auteurs voudraient remercier Andrew Bourget pour sa contribution aux études du projet du tunnel de la route des Nations. Ils voudraient aussi manifester leur gratitude envers le groupement NATIF et le maître d'ouvrage, l'office cantonal du génie civil du Département des infrastructures (DI) de la République et canton de Genève, représenté par Jorge Canameras, chef de projet.

DONNÉES DE PROJET		PROJECT DATA	
Région	Genève, Grand-Saconnex et Pregny-Chambésy	Region	Geneva, Grand-Saconnex and Pregny-Chambésy
Client	République et canton de Genève, Département des infrastructures (DI), Office cantonal du génie civil	Client	République et Canton de Genève, Département des infrastructures (DI), Office cantonal du génie civil
Conception, supervision du site et gestion générale des travaux	Groupement NATIF (ingénieurs civils T Ingénierie et CSD SA)	Design, site supervision and general construction management	Joint venture NATIF (civil engineers T Ingénierie and CSD SA)
Exécution	Marti Tunnel AG	Excavation	Marti Tunnel AG
Données clés	Période des travaux: juin 2018 – octobre 2020 (creusement du tunnel)	Key data	Construction Period: June 2018–October 2020 (excavation)
	Début des travaux: juin 2018		Start of Operations: June 2018
	Coût des travaux: 128 Mio.		Construction Costs: 128 million Swiss francs
	Longueur: 491 m		Length: 491 m
	Section excavée: app. 120 m ²		Excavated Cross Section: app. 120 m ²
Caractéristiques particulières	Tunnel, environnement urbain, sols meubles, tassements de surface, modélisation numérique	Special features	Tunnel, urban environment, soft soils, surface settlement, numerical modelling