

Approche 3D pour l'analyse géotechnique d'ouvrages souterrains complexes dans un environnement urbain : le cas du nouvel accès à la station de Mairie des Lilas de la ligne 11 du métro parisien

3D approach for the geotechnical analysis of complex underground structures in an urban environment: the case study of the new access to the Mairie des Lilas station of 11 Paris metro line

Cristiano ORCI , *ENSER France, Paris, France*

Federica DE MATTEIS , *ENSER France, Paris, France*

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

Celine RESCOURIO , *Chantiers Modernes Construction , Chevilly-Larue, France*

Armand GAUVIN , *Chantiers Modernes Construction , Chevilly-Larue, France*

Résumé

Dans le cadre du prolongement de la ligne 11 du métro parisien vers Rosny-Bois-Perrier, l'actuel terminus à Mairie des Lilas a fait l'objet d'un projet d'aménagement prévoyant la construction de deux accès aux personnes à mobilité réduite et d'un accès secondaire avec salle de billets, réalisé par Chantiers Modernes Construction.

Le nouvel accès secondaire, reliant le niveau de voirie avec le niveau quai passagers de la station existante, comporte l'excavation d'environ 3000m³ de terrain, en méthode traditionnelle. Le terrassement prévoit la réalisation de puits blindés ainsi que le creusement de galeries dans les formations géologiques du plateau de Romainville, notamment les Marnes à Huitres, le Calcaire de Brie, les Argiles Vertes et les Marnes Supragypseuses. La particularité de l'ouvrage, qui repose sur la voûte du tunnel existant de la ligne 11, a demandé une analyse particulièrement précise de l'évolution des tassements en voirie et des déformations des ouvrages existants. Une modélisation numérique 3D complexe a été réalisée dans le cadre de la mission G3 étude (ENSER), suite à la définition préalable des méthodes de terrassement et des prédimensionnements. Dans le cadre de la méthode observationnelle et la mission G3 suivi (TERRASOL), les résultats numériques ont été ensuite comparés aux mesures d'auscultation réalisées sur chantier. Ceci a permis de vérifier les choix constructifs et le respect des seuils contractuels.

Abstract

Within the extension of Paris metro line 11 towards Rosny-Bois-Perrier, the current terminus at Mairie des Lilas was the subject of a major adaptation project which included the construction of two accesses for people with reduced mobility and a new secondary access with a ticket office.

The new secondary access of the Mairie de Lilas station, connecting the road level with the passenger platform level of the existing station, involves the excavation of approximately 3000m³ of soil, in a traditional method. The work excavation is characterized by execution phases of "puits blindés" and tunnels in the geological formations of "Plateau de Romainville", in particular "Marnes à Huitres", "Calcaire de Brie", "Argiles Vertes" and "Marnes Supragypseuses". Given the susceptibility of the structure, that rests on the vault of line 11 existing tunnel, a very precise analysis of the development of road surface settlements and deformations of existing structures was carried out. A complex 3D numerical modelling was carried out within the G3 mission (ENSER), after the definition of excavation and calculation methods. Within the observational method and the G3 monitoring mission (TERRASOL), the numerical results were then compared with the monitoring realized on site. This procedure allows to verify the constructive choices and their compliance with the contractual requirements.

Approche 3D pour l'analyse géotechnique d'ouvrages souterrains complexes dans un environnement urbain : le cas du nouvel accès à la station de Mairie des Lilas de la ligne 11 du métro parisien

3D approach for the geotechnical analysis of complex underground structures in an urban environment: the case study of the new access to the Mairie des Lilas station of 11 Paris metro line

Cristiano ORCI , *ENSER France, Paris, France*

Federica DE MATTEIS , *ENSER France, Paris, France*

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

Celine RESCOURIO , *Chantiers Modernes Construction , Chevilly-Larue, France*

Armand GAUVIN , *Chantiers Modernes Construction , Chevilly-Larue, France*

1 Le prolongement de la ligne 11 vers Rosny-Bois-Perrier - le projet

Le projet de prolongement de la ligne 11 du métro parisien à l'est, vers Rosny-Bois-Perrier prévoit l'exploitation de la ligne avec une voiture de plus par rame (5 voitures au lieu des actuelles 4). Cet allongement comporte une adaptation des infrastructures existantes pour assurer la conformité réglementaire en termes d'évacuation des usagers.

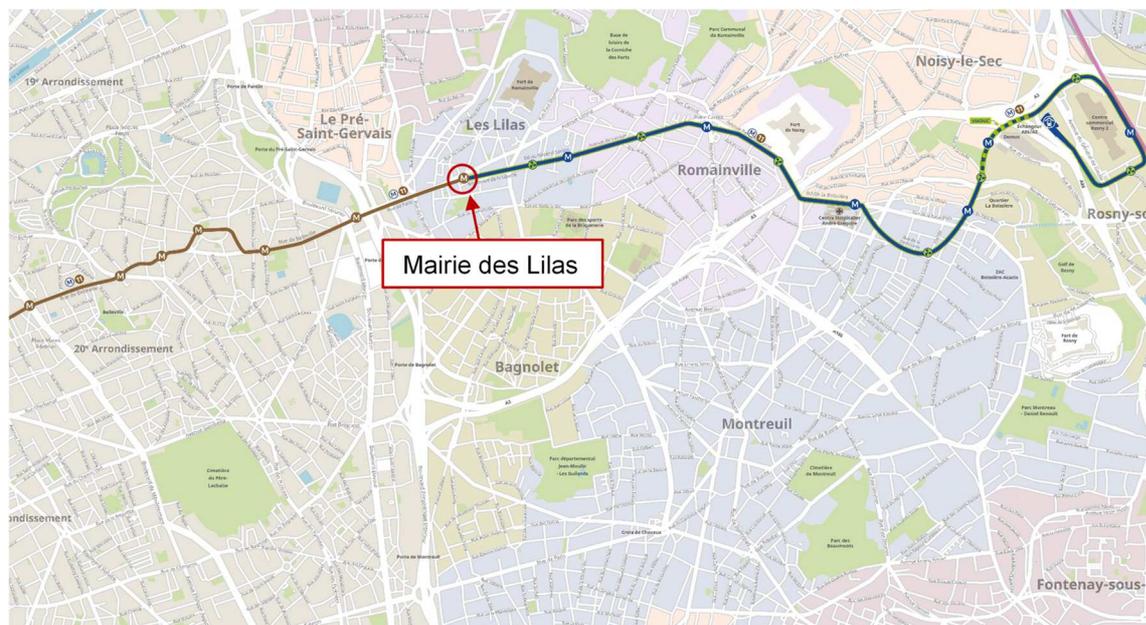


Figure 1 : Prolongement à l'Est de la ligne 11 du métro parisien

La station Mairie des Lilas, actuel terminus de la ligne 11 mise en service en 1937, est une station voûtée avec un niveau de quai se situant 17 m environ sous le Boulevard de la Liberté. La salle d'accueil et les couloirs sont situés sous la place du Colonel Fabien. L'arase inférieure de la station, réalisée en souterrain, s'inscrit dans la formation des Argiles Vertes. Le projet d'aménagement de la station prévoit la réalisation de deux ascenseurs accessibles aux personnes à mobilité réduite (PMR) et d'un nouvel accès.

Les deux ascenseurs sont insérés dans l'actuel accès principal et constituent les nouveaux accès Nord et Sud desservant la salle des billets existante et respectivement, le quai direction Châtelet et le quai direction Rosny-Bois-Perrier.

L'accès secondaire Est, composé de deux escaliers fixes, qui seront respectivement l'un en queue de quai direction Châtelet et l'autre en tête de quai direction Rosny-Bois-Perrier sur le trottoir côté impair du Boulevard de la Liberté, est un nouvel accès à la station.

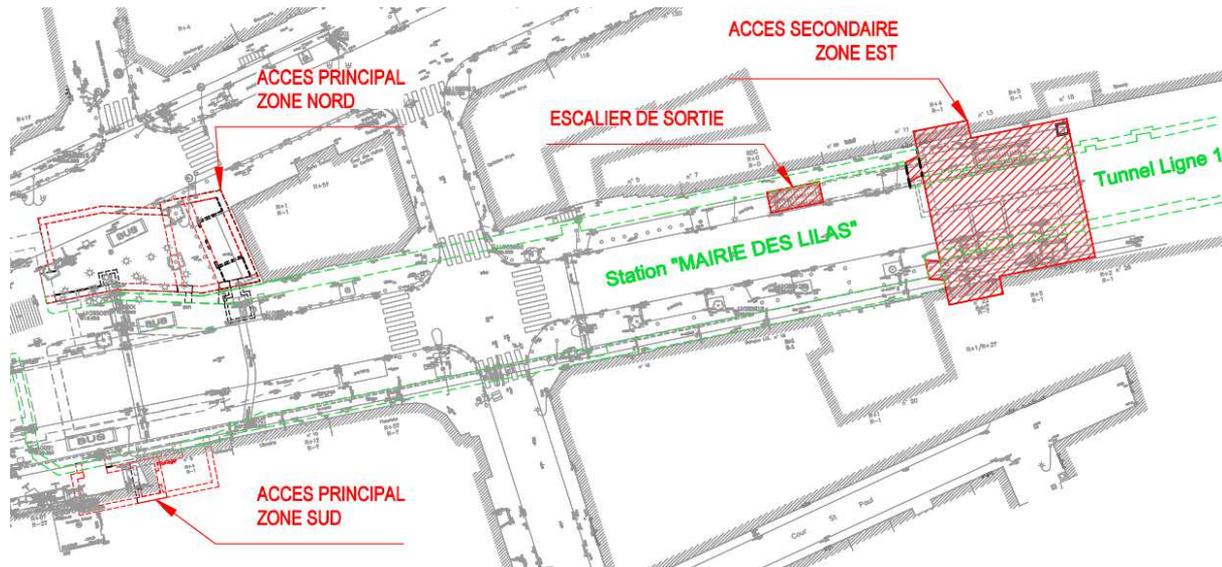


Figure 2 : Implantation des accès Nord, Sud et EST de la Station Mairie des Lilas

2 Le contexte géologique

Le projet se situe sur le plateau de Romainville qui surplombe la vallée de la Marne au sud, la vallée de la Seine au sud-ouest et la Plaine Saint-Denis au nord.

D'après la carte géologique de Paris au 1/25000 éditée par le BRGM et le profil en long d'archive fourni par la RATP, les formations du Stampien et du Ludien caractérisent le profil géologique du site. La stratigraphie attendue est la suivante, avec de haut en bas :

- Remblais : il s'agit d'un sol hétérogène, plutôt sableux mais avec présence de blocs calcaires, de brique et d'enrobé. Il est difficile de le distinguer des Sables de Fontainebleau sous-jacents. L'épaisseur est de 1,50 m environ.
- Sables de Fontainebleau : sable fin beige-marron rencontré jusqu'à des profondeurs de 6,80 m ; l'épaisseur est de 3 à 5 m environ.
- Marnes à Huîtres : marnes argileuses de couleur gris-bleu-verdâtre, rencontrées entre 3,90 m et 11,75 m de profondeur. Cette formation représente le mur imperméable qui limite l'aquifère dans les Sables de Fontainebleau. Epaisseur de 4 à 5 m environ.
- Calcaires de Brie : marno-calcaires hétérogènes. L'épaisseur est de 4 m environ.
- Argiles Vertes : argile marneuse verte-bleu, représente le mur imperméable qui limite l'aquifère dans le Calcaire de Brie. Epaisseur de 7 à 9 m environ.
- Marnes Marno-Calcaires de Pantin : marnes beiges à verdâtres avec épaisseur de 3 à 5 m environ.
- Marnes d'Argenteuil : argile et marne grise-verdâtre. Cette formation représente le mur imperméable qui limite l'aquifère dans les Marno-Calcaires de Pantin en partie inférieure. L'épaisseur est de 10 m environ ;
- Masses et Marnes du Gypse : Gypse en plaquettes saccharoïde en dessous des Marnes supra-gypseuse.

Du point de vue hydrogéologique, les nappes suivantes sont potentiellement présentes :

- La nappe dans les Sables de Fontainebleau, limitée par le mur imperméable des Marnes à Huîtres.

- La nappe dans le Calcaire de Brie, limitée par le mur imperméable des Argiles Vertes (nommées aussi Marnes Vertes dans ce rapport).
- La nappe dans les Marno-Calcaires de Pantin, limitée par le mur imperméable des Marnes d'Argenteuil.

3 L'aménagement du terminus actuel à Mairie des Lilas

La station existante de Mairie des Lilas a été construite en 1936. L'ouvrage, réalisé en souterrain, présente les éléments voutés en maçonnerie de meulière, les piédroits et le radier en gros béton. Le terrain naturel (TN) se situe à environ 120m NGF (Nivellement Générale de France), le niveau du rail est à 101m NGF soit à environ 19m sous le TN. L'actuelle salle de billets est à 105m NGF et le niveau du quai, permettant aujourd'hui de prendre uniquement la direction « Chatelet », est à 102m NGF.

L'ouvrage à créer comporte une interface avec les structures existantes, notamment en ce qui concerne les raccordements et les pénétrations. Des valeurs de résistance de la maçonnerie en meulière typique des ouvrages de début du vingtième siècle ont été retenues.

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques adoptées de maçonnerie en meulière et du gros béton

CARACTERISTIQUES	Maçonnerie en meulière	Gros béton
Module d'élasticité [GPa]	5	12
Résistance maximale à la compression $\sigma_{c,m}$ [MPa]	10	10
Résistance maximale à la traction $\sigma_{t,m}$ [MPa]	0,5	1,5
Coefficient de Poisson	0,1	0,15
Poids spécifique [kN/m ³]	21,5	22

3.1 Les deux accès NORD et SUD à la station existante

L'accès principal zone NORD se situe dans l'îlot entre rue de Paris et le Boulevard de la Liberté. Il est prévu l'installation de deux ascenseurs devant le bâtiment avec le mur dessiné au 114 rue de Paris. Cet accès doit permettre de desservir à la fois la salle des billets existante, en perçant un de ses voiles, et également le quai direction Châtelet, avec un percement dans le piédroit de la station juste avant les escaliers existants.

Un puits qui fait 21 mètres de profondeur a été terrassé pour la réalisation des ascenseurs. Une galerie avec 13 m de long a été excavée afin de relier l'accès à l'actuelle salle des billets. La galerie a été excavée en section pleine, qui fait 61m² environ, après mise en place d'une voûte parapluie de présoutènement en tubes pétroliers. La partie inférieure de la galerie se situe dans la couche des Argiles Vertes, susceptibles de gonfler.

L'accès principal zone SUD se situe en souterrain partiellement au-dessous d'un bâtiment R+8 / R-1, la poste, (en béton d'après la fiche bâti) et à proximité d'un bâtiment R+5 / R-1. Le bâtiment R+8 / R-1 repose sur un radier et sur des fondations de type semelles filantes.

L'accès SUD prévoit l'installation d'un ascenseur qui desservira à la fois la salle des billets existante et le quai direction Rosny-Bois-Perrier, en perçant les piédroits respectifs. L'ouvrage ne prévoit pas d'entrée/sortie superficielle, mais il consiste seulement en une connexion entre la salle des billets et le quai pour la direction future à Rosny-Bois Perrier.

Les travaux comprennent l'excavation d'un puits blindé qui fait 18m de long, avec un élargissement réalisé en sous-œuvre au-dessous de la poste. Une galerie supérieure de 9m de long et une galerie inférieure de 5m de long départent du puits jusqu'au quai.

3.2 Le nouvel accès secondaire EST

L'accès secondaire zone EST se situe sur le trottoir côté impair du Boulevard de la Liberté. Il permettra d'accéder, par le biais de deux escaliers fixes, aux quais direction Châtelet et direction Rosny- Bois-Perrier. Ceci implique la démolition, de part et d'autre du tunnel, du tympan de la station existante. Les deux escaliers vont rejoindre d'abord un escalier fixe donnant sur la ligne de contrôle et ensuite deux escaliers fixes débouchant sur le trottoir.

Cet accès est réalisé en puits blindés et en méthode conventionnelle, en souterrain, pour les parties restantes. Les reconnaissances réalisées au niveau des bâtiments à proximité des travaux indiquent que ceux-ci sont sur des fondations superficielles (principalement semelles filantes). Les bâtiments situés au 11 et 13 Boulevard de la Liberté (R+4 et R+3) seront repris en sous-œuvre par un rideau de micropieux liaisonnés à une longrine.



Figure 3 : Vue du haut de l'accès secondaire EST

4 La conception en phase d'exécution de la méthode de terrassement

En phase d'exécution la méthodologie de terrassement de l'accès EST a été revue par rapport aux préconisations de la phase projet (PRO). Cela en raison de l'expérience faite au niveau des ouvrages de l'accès principale, les accès NORD et SUD, et la meilleure connaissance du terrain.

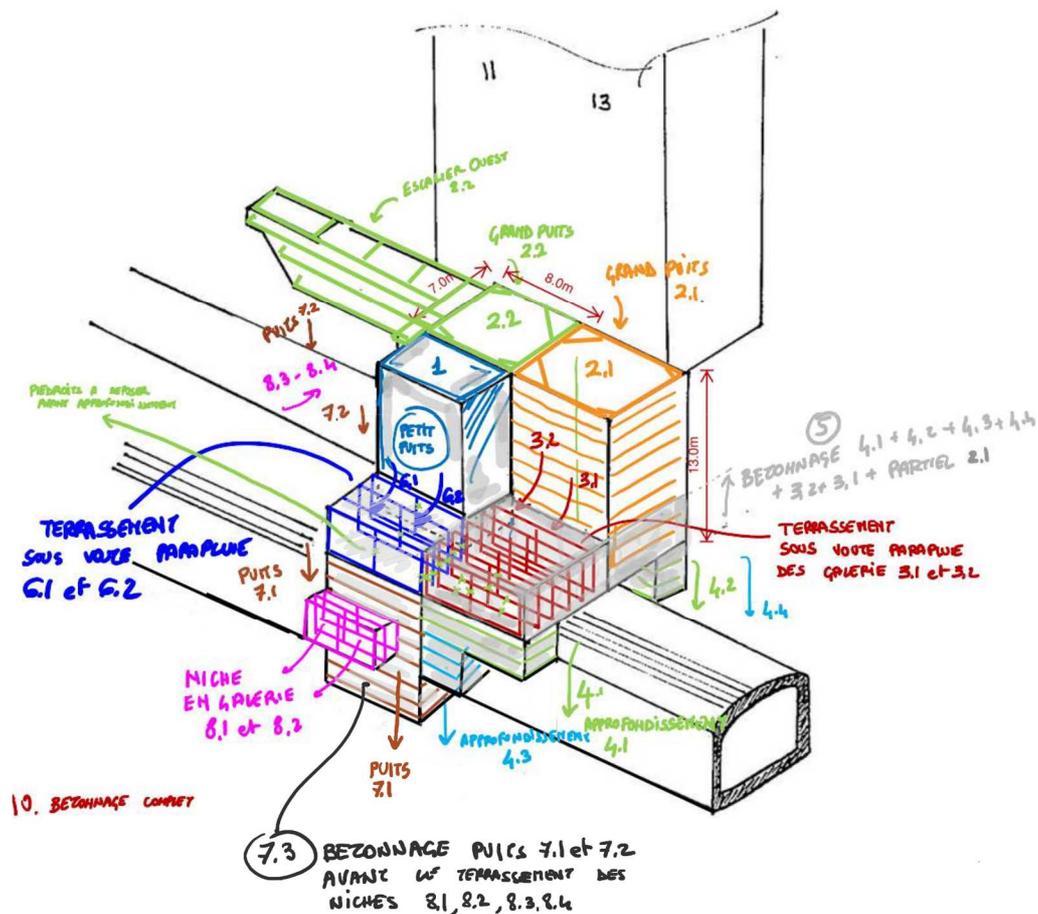


Figure 4 : Croquis méthode échangé en phase d'exécution

L'idée de base a été celle de découper l'ouvrage en trois zones. La première zone est celle de l'escalier ouest, assez indépendante du reste de la structure et superficielle. La deuxième et la troisième zone concernent la majorité de l'ouvrage et sont terrassées à partir de deux puits d'accès, le grand puits 2.1 (GP2.1), de la zone est et le grand puits 2.2 de la zone ouest (GP2.2). La première zone de terrassement est cependant la deuxième zone, avec la réalisation d'un puits (Petit Puits PP) devant le futur puits d'accès GP2.2. Ce puits est terrassé et son génie civil réalisé avant d'attaquer les terrassements des puits GP2.1 et GP2.2.

Suite à la réalisation du Petit Puits, le terrassement a concerné d'abord la zone est, avec le terrassement du GP2.1 pour une profondeur de 13m et 820m³ de volume terrassé. Au fond du puits, après avoir réalisé un cadre de renfort, la galerie 3 est terrassée en deux sections de 16,2m² pour 7,5m de longueur, en dessous d'une voute parapluie. A la fin de la galerie, l'excavation poursuit avec un approfondissement (Approfondissements 4) de 5.2m aux deux côtés du tunnel de la ligne 11.

Le principe de terrassement de la zone du GP2.2 est similaire, avec la particularité du terrassement de 2 niches en sous-œuvre lors des approfondissement 7.

5 Le modèle 3D aux élément finis

Une modélisation 3D aux éléments finis (MEF) de la cinématique travaux prévue pour le terrassement de l'Accès Secondaire EST a été réalisée pour analyser les effets des travaux sur les structures existantes et valider la procédure d'exécution. En particulier, on a évalué les effets en termes de déplacements dans la station de Mairie des Lilas, le tunnel de la ligne 11, les bâtiments avoisinants et la voirie. Une analyse des contraintes dans les structures existantes a été également faite, ainsi qu'une prévision des déplacements et des efforts attendus dans les ouvrages de soutènement provisoires réalisés.

Le modèle a été réalisé au moyen du logiciel PLAXIS 3D. Le domaine s'étend de 140m dans la direction de l'axe du tunnel de la ligne 11 et de 90 m dans la direction perpendiculaire afin d'éviter des effets de bord.

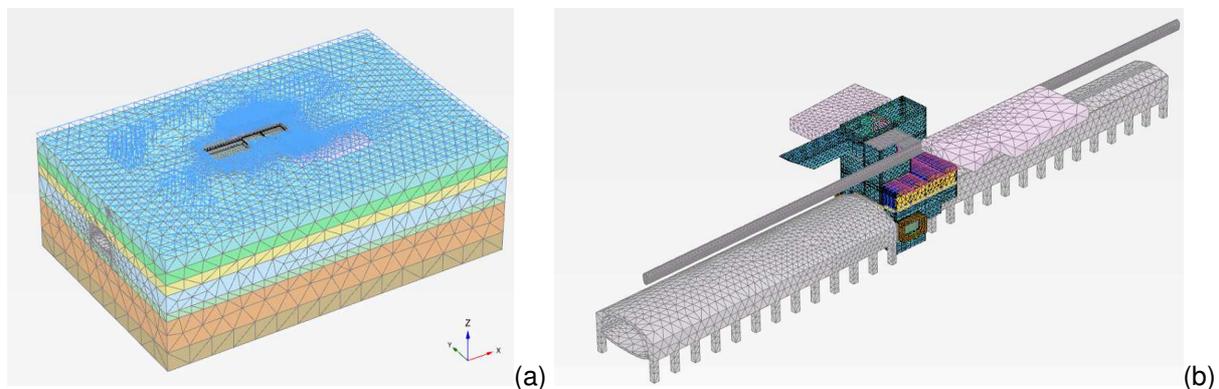


Figure 5 : (a) Vue générale du modèle MEF (b) Vue des structures existantes et projetées dans le modèle MEF

Pour simuler le comportement des couches de sol on a considéré une loi élasto-plastique non-linéaire avec écoulement et avec un critère de rupture de Mohr-Coulomb (loi de type Hardening Soil Model - HSM). La modélisation est conduite en contraintes totales et en l'absence de nappe. Néanmoins, afin de ne pas négliger la poussée de la nappe, on considère une correction du coefficient de poussée K_0 pour l'initiation des contraintes.

5.1 Modélisation des ouvrages existants

La station existante et le tunnel de la ligne 11 ont été modélisés par des éléments volumiques suivant un comportement élastique linéaire. Les caractéristiques retenues sont celles qui ont été montrés en Tableau 1.

Les bâtiments avoisinants ont été modélisés par des charges réparties en surface. Pour les bâtiments qui sont principalement concernés par les travaux, les étages sous-sol ont été également modélisés par un élément de volume très rigide avec comportement élastique linéaire.

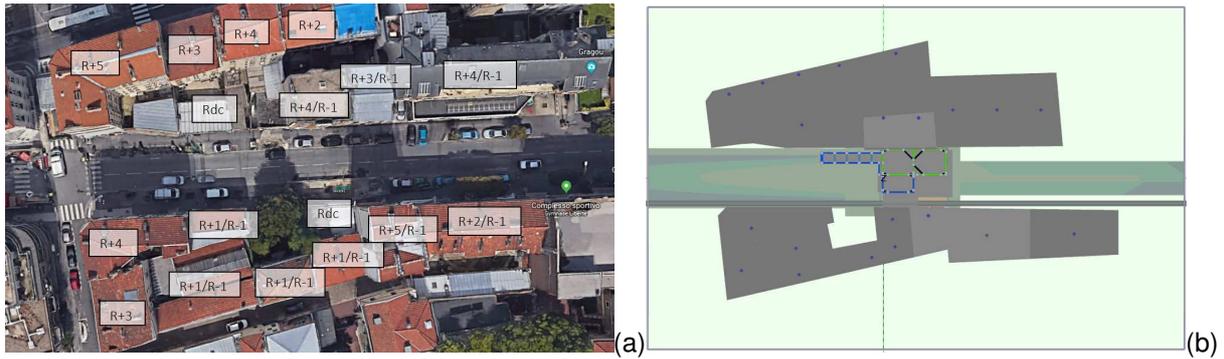


Figure 6 : (a) Vue des bâtiments impactant les travaux (b) Modélisation des bâtiments avoisinants

5.2 Modélisation des ouvrages à construire

Comme décrit ci-avant, les travaux comprennent le terrassement de trois puits blindés, quatre galeries, quatre approfondissements en puits blindés et deux niches.

En ce qui concerne les puits blindés, les cadres métalliques et les cintres des galeries sont modélisés au moyen des éléments poutre, alors que le soutènement secondaire en béton projeté ou en bois est modélisé à l'aide des éléments plaque.

5.3 Résultats obtenus pour les ouvrages à réaliser

Les efforts et les déplacements dans les ouvrages de soutènement provisoires réalisés ont été utilisés pour valider le dimensionnement des structures qui avait été fait à l'aide d'un calcul aux réactions hyperstatiques.

A titre d'exemple, les figures 7 et 8 montrent les déplacements dans le revêtement en béton projeté des grands puits et des approfondissements avec les niches.

Les figures 9 et 10 montrent les déplacements verticaux et horizontaux dans les cintres de la galerie 3.

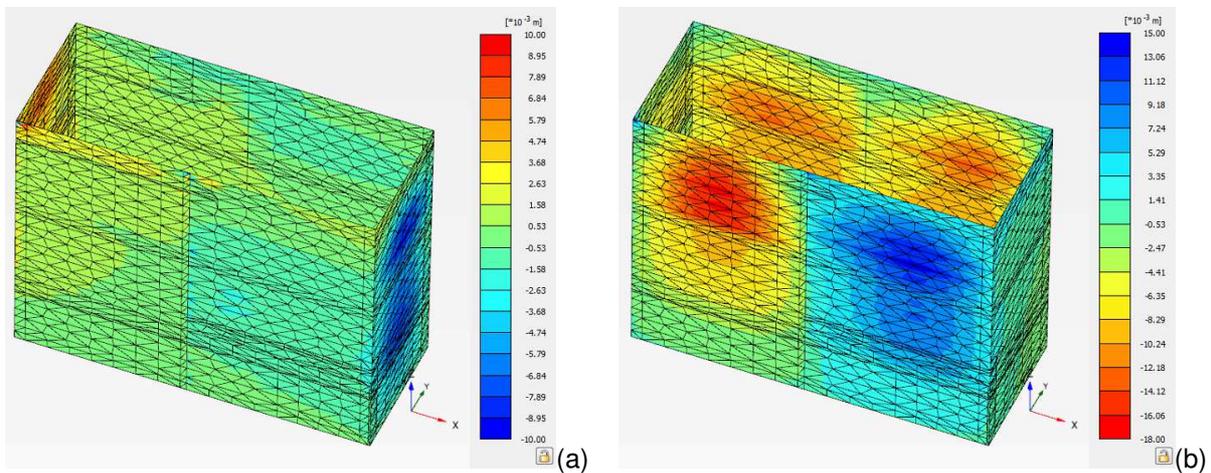


Figure 7 : (a) Déplacements horizontaux dans le revêtement en béton projeté des grands puits (b) Déplacements verticaux dans le revêtement en béton projeté des grands puits

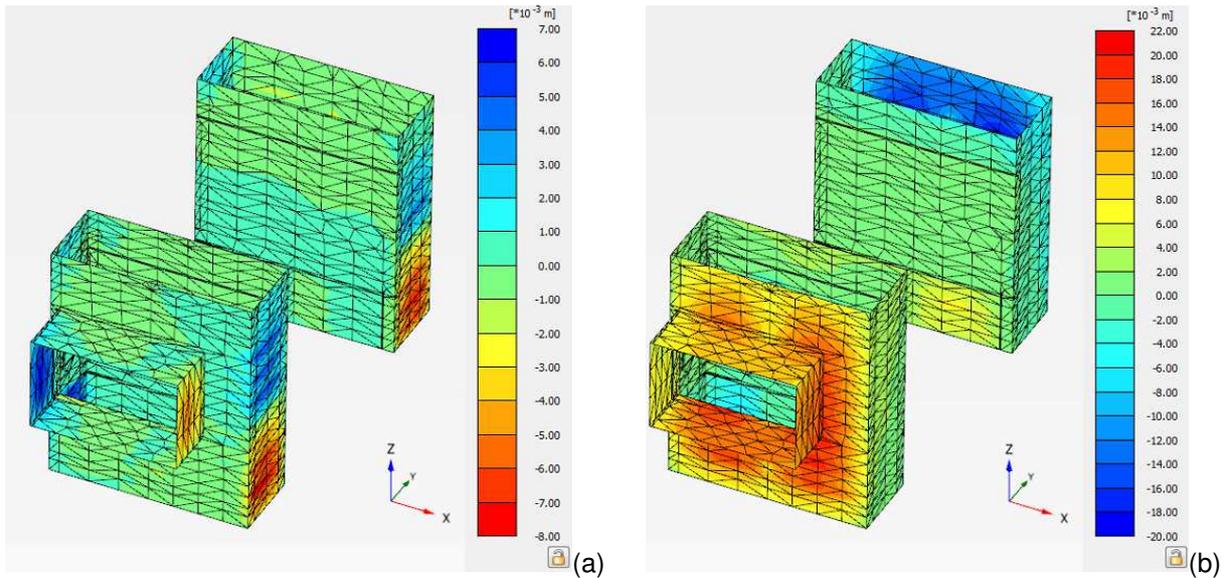


Figure 8 : (a) Déplacements horizontaux dans le revêtement en béton projeté des approfondissements et des niches (b) Déplacements verticaux dans le revêtement en béton projeté des approfondissements et des niches

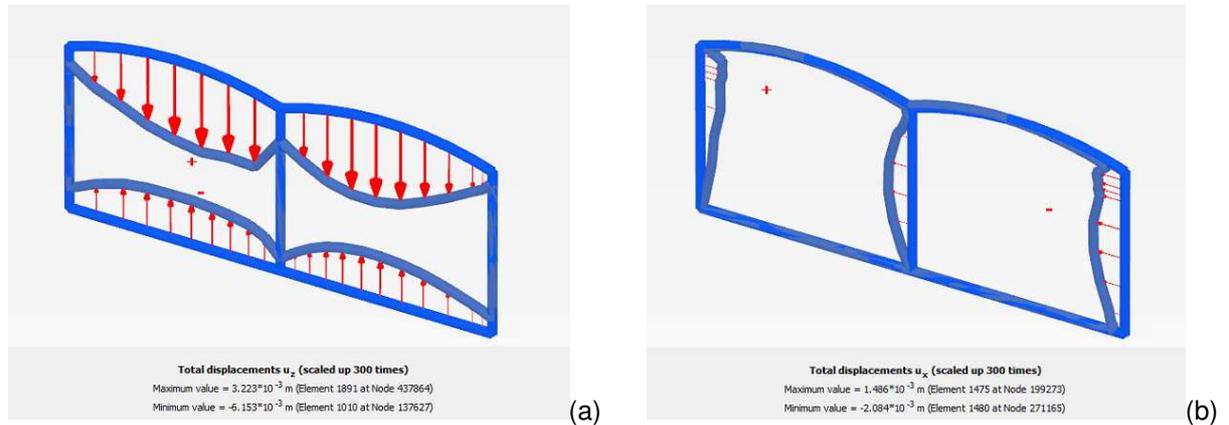


Figure 9 : (a) Déplacements verticaux dans le cintre typique de la galerie 3 (b) Déplacements horizontaux dans le cintre typique de la galerie 3

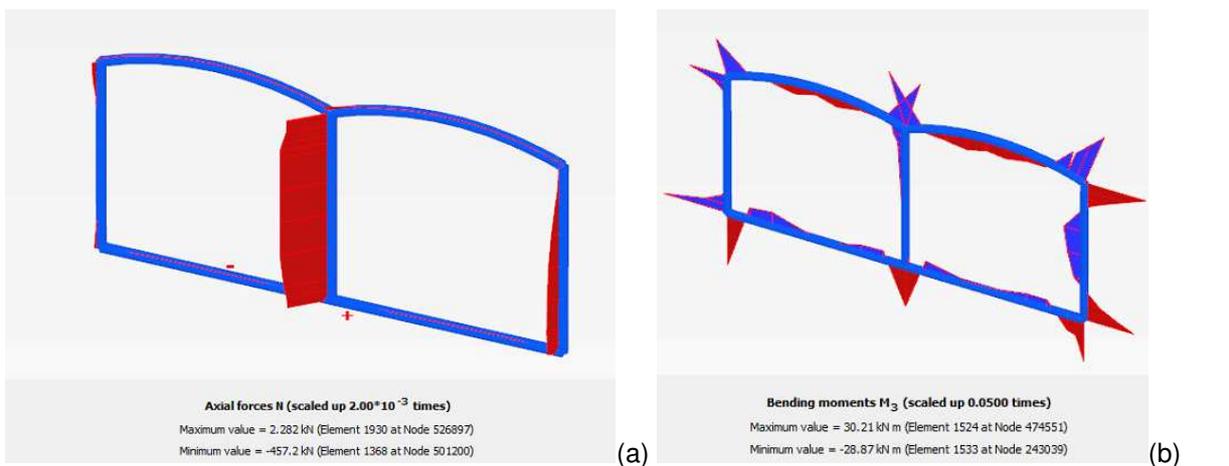


Figure 10 : (a) Efforts normaux dans le cintre typique de la galerie 3 (b) Moment fléchissant dans le cintre typique de la galerie 3

5.4 Résultats obtenus pour les structures existantes

Pour ce qui concerne les effets des travaux sur la station et le tunnel existants, les déplacements ainsi que la variation de l'état de contrainte ont été analysés.

Le terrassement des puits ainsi que celui des galeries, provoquent un soulèvement de la voûte du tunnel de la ligne 11 jusqu'à la valeur maximale de 3,5mm environ ; la station a néanmoins un déplacement vers le bas très faible (0,2mm environ). La réalisation des approfondissements et des niches engendre un affaissement de la voûte du tunnel et de la station ; en ce qui concerne le tunnel cela se traduit par une réduction du soulèvement. La valeur maximale de déplacement vers le bas est obtenue dans la voûte de la station et vaut 3,4mm environ. Les déplacements horizontaux atteignent la valeur maximale de 1,2mm à la suite du terrassement des approfondissements 7 et des niches.

L'évolution des déplacements horizontaux u_y et verticaux u_z dans la voûte du tunnel de la ligne 11 et de la station existante est montrée ci-après. L'emplacement des points de mesures est montré en Figure 11.

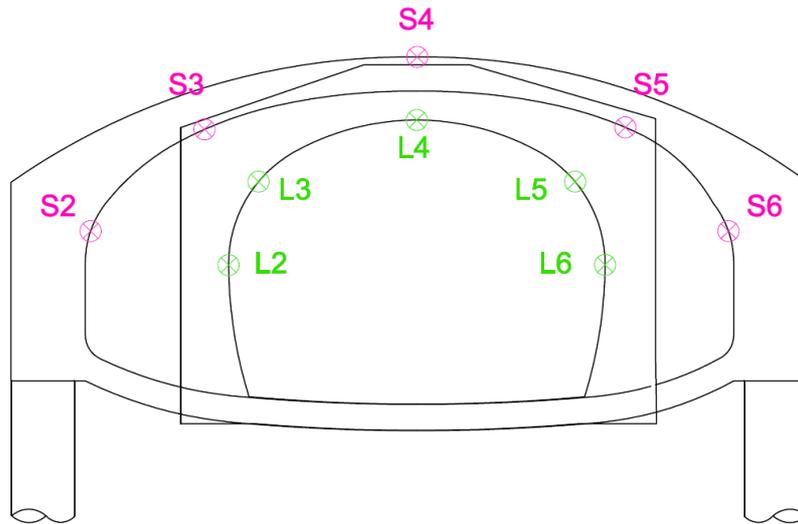


Figure 11 : Repérage des points de mesure des déformations du revêtement de la station et de la L11

En ce qui concerne le tunnel de la ligne 11, l'évolution des déplacements verticaux et horizontaux obtenue pendant les différentes phases est montrée dans le Figure 12 et 13.

La Figure 12 montre en particulier les déplacements verticaux et elle montre que, pour les points considérés, notamment pour le L2, les déplacements de soulèvement montrent une augmentation importante pendant le terrassement de la galerie 3. En particulier il s'agit des phases où la largeur de terrassement est doublée.

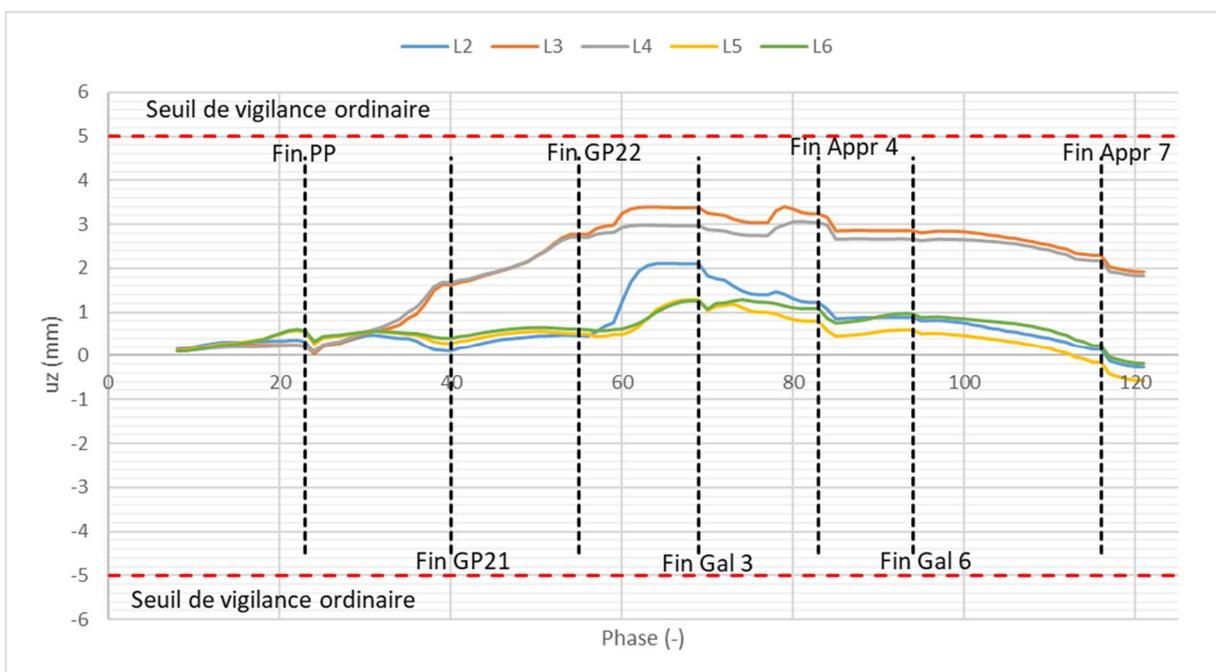


Figure 12 : Evolution des déplacements verticaux dans les points de mesure du tunnel de la ligne 11

La Figure 13 ci-dessous montre que pendant le terrassement des puits les déplacements horizontaux sont positifs, donc vont vers le Nord (qui est la zone déchargée) ; le terrassement de la galerie et des approfondissements 4.1+4.3 provoquent une réduction de ces déplacements car la zone au Sud est également déchargée. Il est aussi évident que le terrassement des approfondissements 4.2+4.4 provoque une fois encore des déplacements vers le Nord, les déplacements u_y montrent en effet une augmentation à partir la phase de début du terrassement des approfondissements 4.2+4.4.

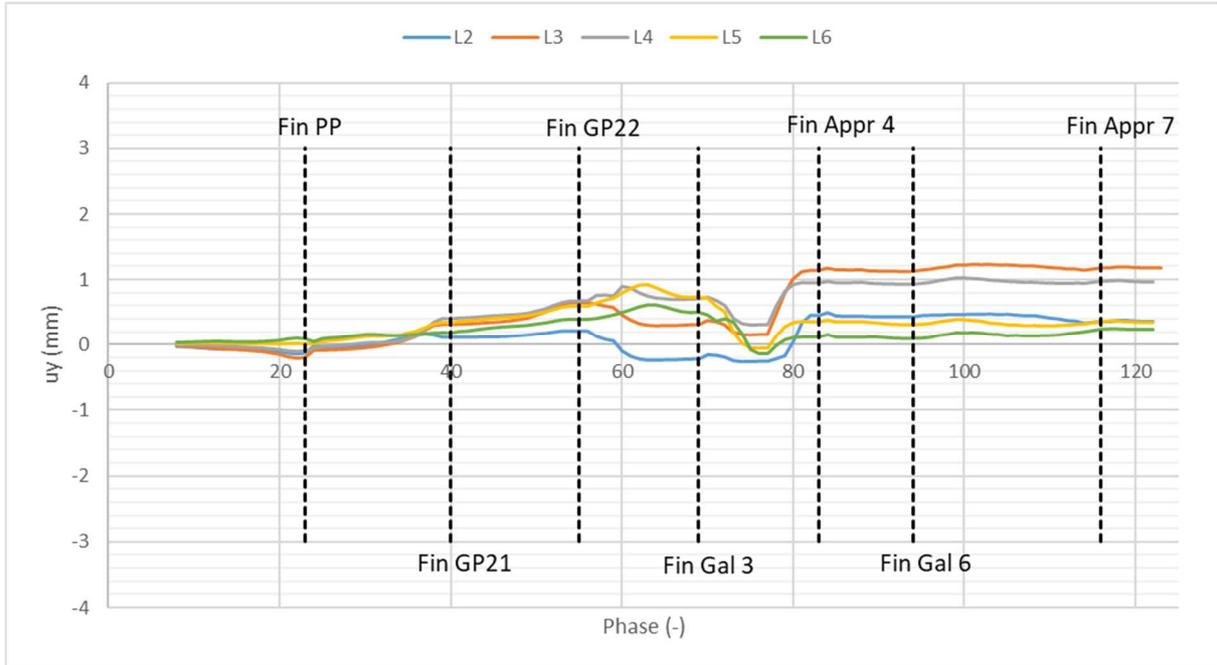


Figure 13 : Evolution des déplacements horizontaux u_y dans les points de mesure du tunnel de la ligne 11

En ce qui concerne la station existante, l'évolution des déplacements verticaux et horizontaux obtenue pendant les différentes phases est montrée dans le Figure 14 et 15 respectivement.

En clé de voute un tassement est enregistré, alors que le terrassement des puits est des approfondissements amène un soulèvement au niveau des reins côté Nord, comme montré par la Figure 14.

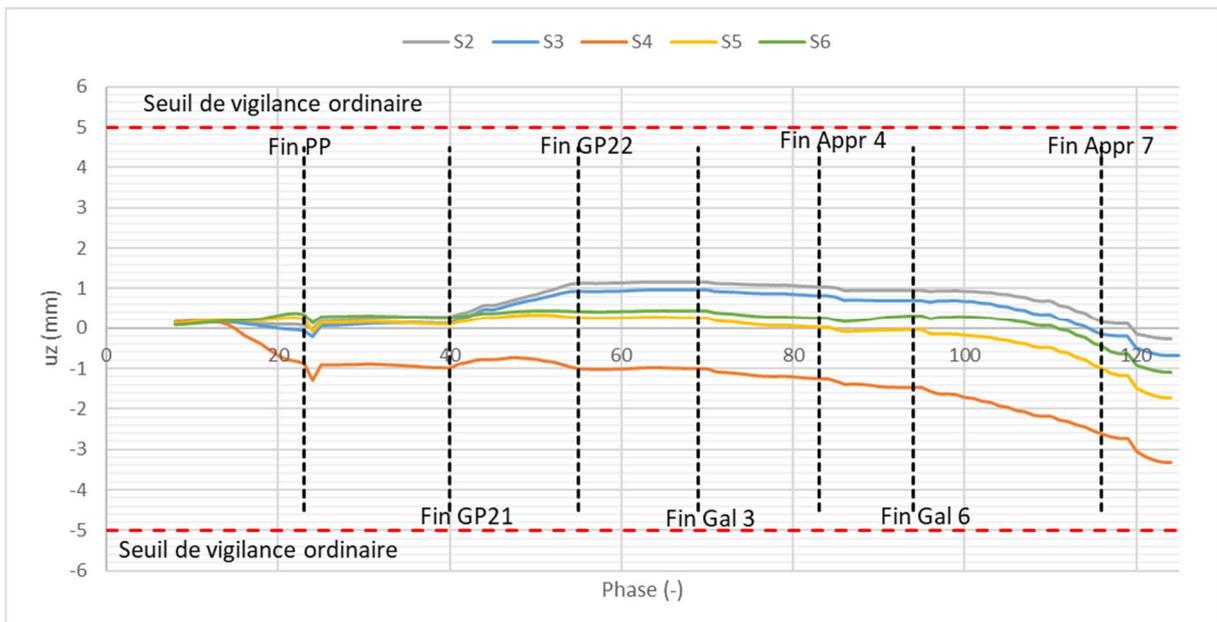


Figure 14 : Evolution des déplacements verticaux dans les points de mesures de la station existante

De la même façon que pour le tunnel de la ligne 11, dans la station existante des déplacements vers le Nord sont également attendus.

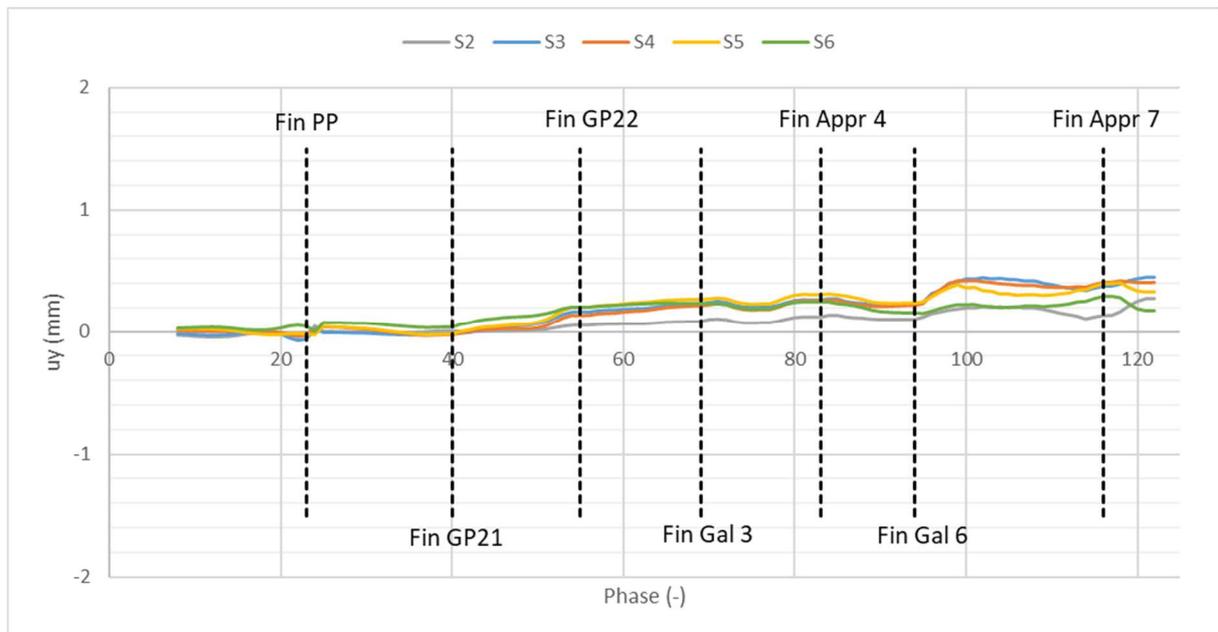


Figure 15 : Evolution des déplacements horizontaux u_y dans les points de mesures de la station existante

Le chapitre 6 montre une comparaison entre les valeurs prévues de déplacements dans les structures existantes et les valeurs mesurées dans un suivi d'auscultation.

Pour ce qui concerne l'effet en termes de contrainte dans les structures existantes, un raisonnement en termes de variation de contrainte a été fait, plutôt qu'une analyse en termes de valeurs absolues. En effet, l'état actuel de contrainte n'est pas connu avec précision parce qu'il dépend strictement du phasage effectif de réalisation des ouvrages. Dans la modélisation numérique, dans un souci de simplification et vues les nombreuses incertitudes, le terrassement du tunnel de la ligne 11 et de la station existante n'a été pas simulé exactement.

L'augmentation des contraintes de traction qui a été obtenue au moyen du modèle numérique était faible et pourtant a été retenue acceptable.

6 La campagne d'auscultation et la comparaison entre les tassements attendus et ceux relevés

6.1 Description du suivi d'auscultation

Compte tenu de la sensibilité des travaux, liée à la présence des bâtiments avoisinants et des structures existantes, l'application de la méthode observationnelle a été nécessaire. Les conditions géologiques doivent être contrôlées et surveillées étape par étape pendant les travaux, notamment la stabilité des fronts de taille, le profil lithologique, les venues d'eau, l'installation correcte des soutènements.

Un programme d'auscultation a été activé pendant les travaux pour mesurer les tassements en surface, les déplacements des fondations des bâtiments, les déformations et les contraintes dans les structures existantes (à savoir la station existante et le tunnel de la ligne 11) et les déformations dans les ouvrages de soutènement réalisés.

Une station totale avec des prismes d'auscultation a été installée pour le suivi d'auscultation en voirie et en fondation des bâtiments. De la même façon une station totale avec différents prismes a permis les mesures dans le tunnel et dans la station existante.

Les déplacements ont été monitorés également dans un certain nombre de cadres des puits blindés.

La périodicité des auscultations était paramétrable en fonction des mouvements constatés. Normalement l'auscultation avait une fréquence de deux heures.

6.2 La comparaison entre les tassements prévus et les mesures d'auscultation

En phase d'exécution le phasage des travaux a été en partie modifié par rapport à la conception initiale qui a été considérée dans le modèle aux EF. Précisément, grâce à l'application de la méthode observationnelle, le terrassement des deux puits principaux (GP2.1 et GP2.2) n'a pas été fait en succession mais les deux puits ont été terrassés simultanément.

En raison de ces différences de procédure, une comparaison précise entre les résultats obtenus et les mesures relevées sur le chantier n'est pas possible. C'est quand même intéressant de faire une comparaison entre les tassements attendus et ceux relevés à la fin des phases les plus significatives.

En ce qui concerne les déplacements de la voûte du tunnel, une bonne comparaison peut être faite en termes de soulèvement en clé de voûte à la fin des phases les plus significatives jusqu'à l'état actuel, c'est-à-dire en phase de terrassement des approfondissements 7. Comme on peut le voir dans la Figure 16, le terrassement du petit puits de phase 1 a engendré un soulèvement léger de la voûte. Ce déplacement a été compensé par la réalisation du génie civil du puits. Les travaux de terrassement suivants ont engendré à nouveau un soulèvement de la voûte qui est comparable selon les auscultations et selon les prévisions numériques. La seule différence la plus significative est enregistrée pendant le terrassement des grands puits, où le phasage d'exécution s'est écarté de manière plus considérable par rapport au phasage modélisé.

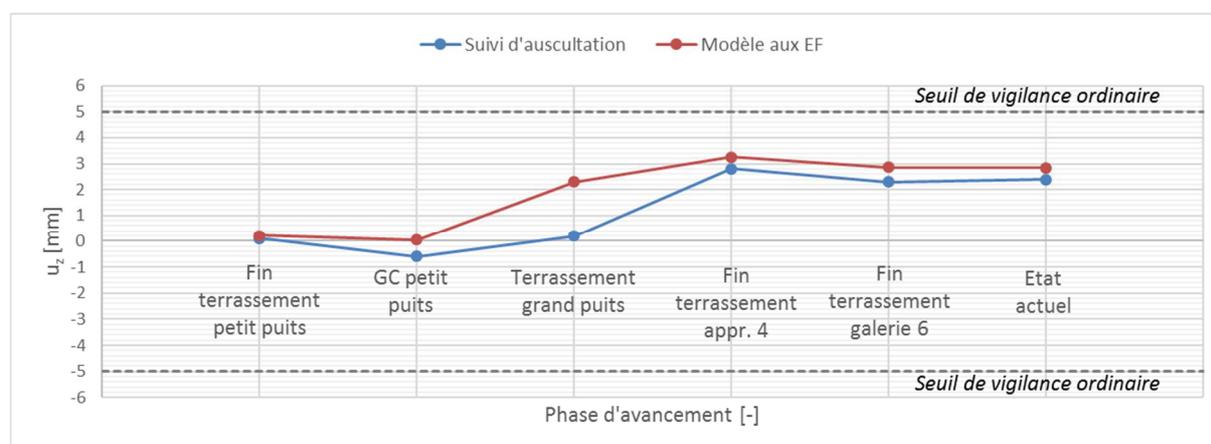


Figure 16 : Evolution des déplacements en clé de voûte du tunnel de la ligne 11 selon le suivi d'auscultation et selon la modélisation numérique aux EF

Les déplacements horizontaux de convergence ou divergence du revêtement de la voûte s'écartent légèrement en raison de la différence de phasage entre le modèle numérique et la procédure effectivement suivie. Dans la simulation numérique, les approfondissements 4 sont terrassés en succession, alors que dans la réalité ces travaux ont été faits en parallèle. La modélisation numérique a donc montré un déséquilibre de déformée en direction Nord, où le tunnel et la station existants sont principalement déchargés lors du terrassement des puits et des approfondissements côté Nord. Les terrassements côté Sud ont impliqué une réduction de la divergence au niveau des reins Nord plutôt qu'une convergence. Le terrassement en parallèle a en revanche permis un déchargement plus équilibré qui a engendré une convergence du revêtement dans les deux côtés du tunnel.

Il est également intéressant de comparer les déplacements des bâtiments qui sont principalement concernés par le projet.

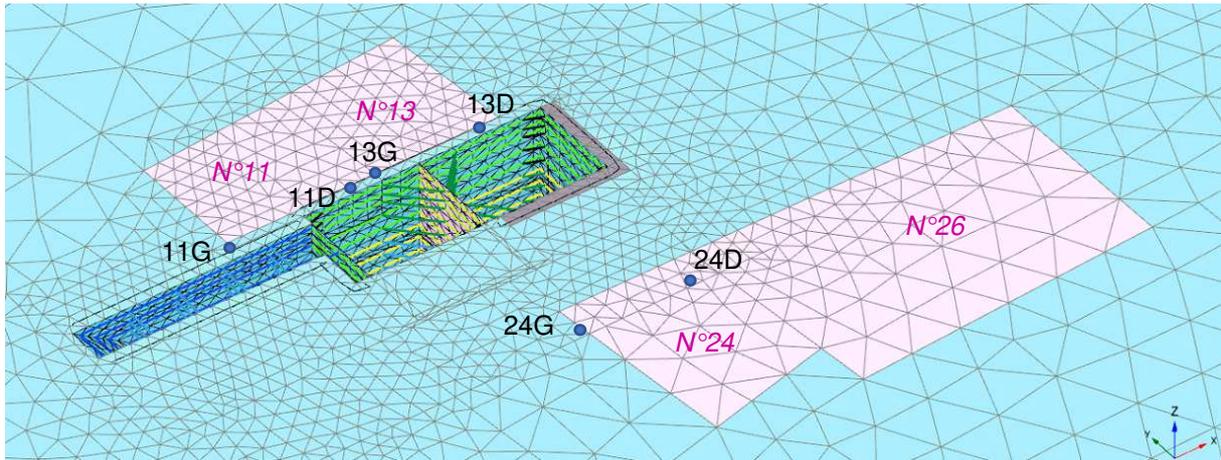


Figure 17 : Position des bâtiments plus impactés par le projet dans le modèle aux EF et emplacement des points de mesure

Les bâtiments n°11 et n°13 qui se situent au Nord des ouvrages réalisés, donnent des déplacements qui ne sont pas strictement comparables avec les déplacements attendus sur la base du modèle aux EF. Cela dépend du fait qu'une microberlinoise de reprise en sous-œuvre de ces bâtiments a été réalisée, mais elle n'a pas été prise en compte dans la modélisation numérique. Ce choix a été fait afin d'avoir une évaluation sécuritaire des déplacements sachant que les micropieux devaient être découpés pour le terrassement des niches. La fondation du bâtiment n°11 est partiellement soutenue par la microberlinoise, juste pour la largeur des grands puits, alors que le bâtiment n°13 est repris pour toute sa largeur. Au niveau du point de mesure 11G un tassement d'un demi-millimètre a été enregistré pendant les travaux, alors qu'au niveau du point 11D un soulèvement d'un peu plus de 2 millimètres s'est vérifié. De la même façon le bâtiment n°13 a montré un léger soulèvement. Toutefois, sur la base de la modélisation numérique, les fondations de ces deux bâtiments sont soumises à un tassement qui varie entre 5 et 10 millimètres. Il faut souligner qu'à l'heure actuelle les micropieux n'ont pas été découpés.

La comparaison des tassements est d'ailleurs significative pour ce qui concerne le bâtiment n°24 de Boulevard de la Liberté, qui a montré les déplacements les plus importants pendant les dernières phases de terrassement.

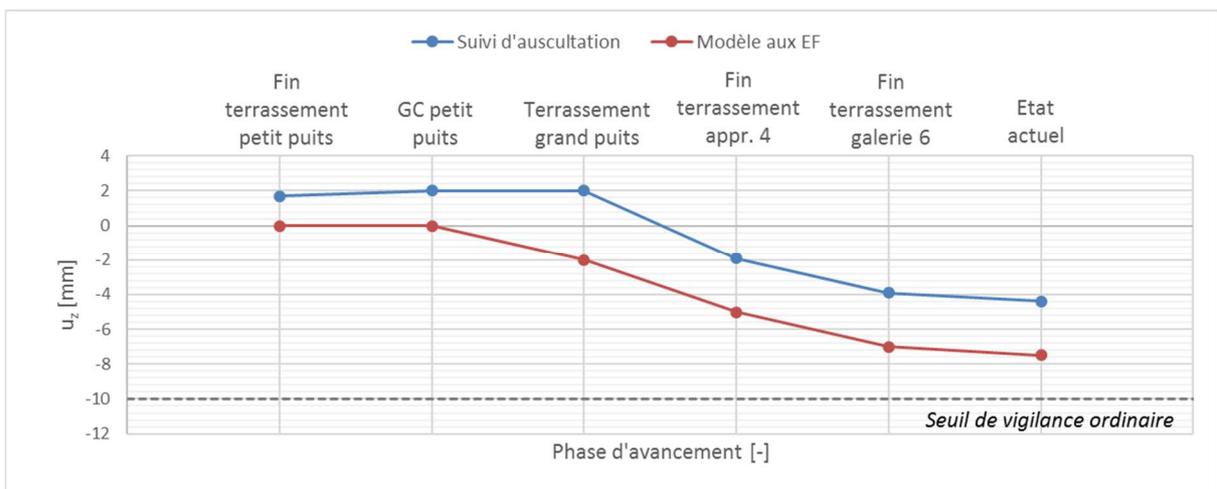


Figure 18 : Evolution des déplacements en fondation du bâtiment n°24 de Boulevard de la Liberté selon le suivi d'auscultation et selon la modélisation numérique aux EF

Les déplacements obtenus sont inférieurs aux valeurs prévues au moyen de la modélisation, mais le développement pendant les phases de terrassement côté Sud est cohérent. Le bâtiment n°24 se situe en ligne avec le front de la galerie de phase 6. Les déplacements de ce bâtiment sont donc principalement liés à l'extrusion au front de taille qui s'avère pendant le terrassement.

Dans l'ensemble, les tassements mesurés ont été compatibles avec les seuils définis. Le modèle numérique, sous réserve des différences concernant le phasage et en cohérence avec les

simplifications prises en compte dans la modélisation, a prévoit des déplacements comparables avec les valeurs relevées.

7 Conclusions

Cet article a présenté le projet d'aménagement de l'actuel terminus de la ligne 11 du métro parisien, Mairie des Lilas, dans le cadre du prolongement de cette ligne. En particulier il s'agit de la réalisation de deux accès aux personnes à mobilité réduite et d'un accès secondaire avec salle de billets.

L'étude de l'accès secondaire a demandé une étude précise et détaillé des effets des travaux sur les ouvrages existants. L'ouvrage repose en fait sur la voûte du tunnel existante de la ligne 11, en proximité de la station existante réalisé en 1936.

Une modélisation numérique aux éléments finis PLAXIS 3D a été donc réalisée pour analyser la faisabilité du phasage prévu et pour évaluer les tassements attendus au niveau des structures existantes, ainsi que la variation des contraintes. L'application de la méthode observationnelle a permis de valider le phasage de terrassement pendant les travaux et de vérifier que les déplacements mesurés étaient conformes à ceux prévus. Les déplacements mesurés sur site et ceux calculés au moyen du modèle se sont relevés comparables, sous réserve de certaines modifications du phasage qui a été effectivement suivi, par rapport au phasage considéré dans la modélisation.

8 Références

Saade M., et al. 2013. Etude du comportement des voûtes en maçonnerie renforcées par matériaux composites. 31èmes Rencontres de l'AUGC, E.N.S. Cachan, 29 au 31 mai 2013, pp 4-5

Koufache N., et al. 2007. Renforcement des ouvrages d'assainissement en maçonnerie à l'aide de matériaux composites – Etat de l'art. 25e rencontres de l'AUGC, 23-25 mai 2007, Bordeaux

Cordary M., 1994. Mécanique des sols.