

Conception, réalisation et pilotage des deux ouvrages d'entonnement du prolongement du RER-E sous La Défense

Design, construction and monitoring follow-up of two dividing structures on MTR line E under La Defense business district

François ASSELBORN, *Terrasol, Paris, France*

Patrick GAUTHIER, *Dodin Campenon Bernard, Paris, France*

Guillaume GEHU, *Sixense, Paris, France*

Thomas LACOUR, *VINCI Construction Grands Projets, Paris, France*

Benjamin LECOMTE, *VINCI Construction Grands Projets, Paris, France*

Samuel REYNAUD, *Setec tpi, Paris, France*

Résumé

La création de la nouvelle Gare EOLE sous le CNIT et de ses tunnels adjacents réalisés en méthode conventionnelle a nécessité d'insérer dans un contexte de bâti dense deux ouvrages d'entonnement de grandes dimensions.

Les risques de déformations trop importants sur le bâti à proximité de ces ouvrages ont été identifiés dès la conception et ont demandé de prévoir des méthodes de réalisation particulières : la méthode Crossover côté Ouest et les injections de compensation côté Est. Ces travaux ont fait l'objet par la suite d'un pilotage renforcé permettant de s'assurer de l'adéquation des solutions et des études réalisées avec la réalité du terrain.

Abstract

The creation of the new EOLE train station under the CNIT and its adjacent tunnels using conventional methods in a densely built area, require the use of two big dividing structures.

The risk of important strains on the frame next to the worksite were identified during the design phase and special methods needed to be carried out. Crossover method on the West side and injections to compensate on the East side. The work was subjected to a reinforced management to insure that the solutions and the study of the field conditions were appropriate.

Conception, réalisation et pilotage des deux ouvrages d'entonnement du prolongement du RER-E sous La Défense

Design, construction and monitoring follow-up of two dividing structures on MTR line E under La Defense business district

François ASSELBORN, *Terrasol, Paris, France*

Patrick GAUTHIER, *Dodin Campenon Bernard, Paris, France*

Guillaume GEHU, *Sixense, Paris, France*

Thomas LACOUR, *VINCI Construction Grands Projets, Paris, France*

Benjamin LECOMTE, *VINCI Construction Grands Projets, Paris, France*

Samuel REYNAUD, *Setec tpi, Paris, France*

1 Introduction : Conception générale des Tunnels sur le projet EOLE – La Défense

Dans le cadre du projet EOLE, qui prolonge la ligne du RER E parisien vers l'Ouest, les tunnels permettant la traversée du quartier d'affaires de "La Défense" et la desserte de la gare sous le CNIT sont réalisés en méthode conventionnelle et présentent de nombreuses contraintes d'insertion liées aux structures existantes.

Le choix s'est porté sur la réalisation de 2 tunnels à 1 voie de section réduite (52 m²) à une profondeur de 25 à 35 mètres et se connectant sur une gare à quai central. Cette configuration permet d'insérer les ouvrages de manière plus compacte dans le contexte urbain existant.

L'attaque Ouest est réalisée depuis l'extrémité de la tranchée couverte débouchant à Nanterre alors que l'attaque Est est réalisée depuis un puits d'attaque provisoire implanté au niveau de l'avenue Gambetta de Courbevoie. Ces deux attaques comportent chacune un ouvrage d'entonnement permettant de séparer les voies débouchant dans la gare.

Côté Ouest, les tunnels franchissent successivement les immeubles Triangle, les immeubles Collines de l'Arche, la Gare SNCF-Transilien et le CNIT. En particulier l'entonnement Ouest est situé à faible couverture sous l'immeuble Triangle. Il a fait l'objet d'une conception particulière, dite méthode « Crossover », développée dans cet article.

Côté Est, le monotube est situé sous l'Avenue Gambetta bordé d'immeubles. Il se prolonge par l'entonnement Est situé en partie sous l'immeuble Exaltis. Les bitubes franchissent ensuite le parking Renault, la bretelle A14 puis le CNIT. L'immeuble Exaltis comportant une multiplicité de systèmes de fondations, il a été décidé de mettre en œuvre des injections de compensation permettant de limiter fortement les déformations engendrées par les excavations de l'entonnement et des bitubes. La réalisation de l'Entonnement Est et les injections de compensation constituent la deuxième partie de cet article.

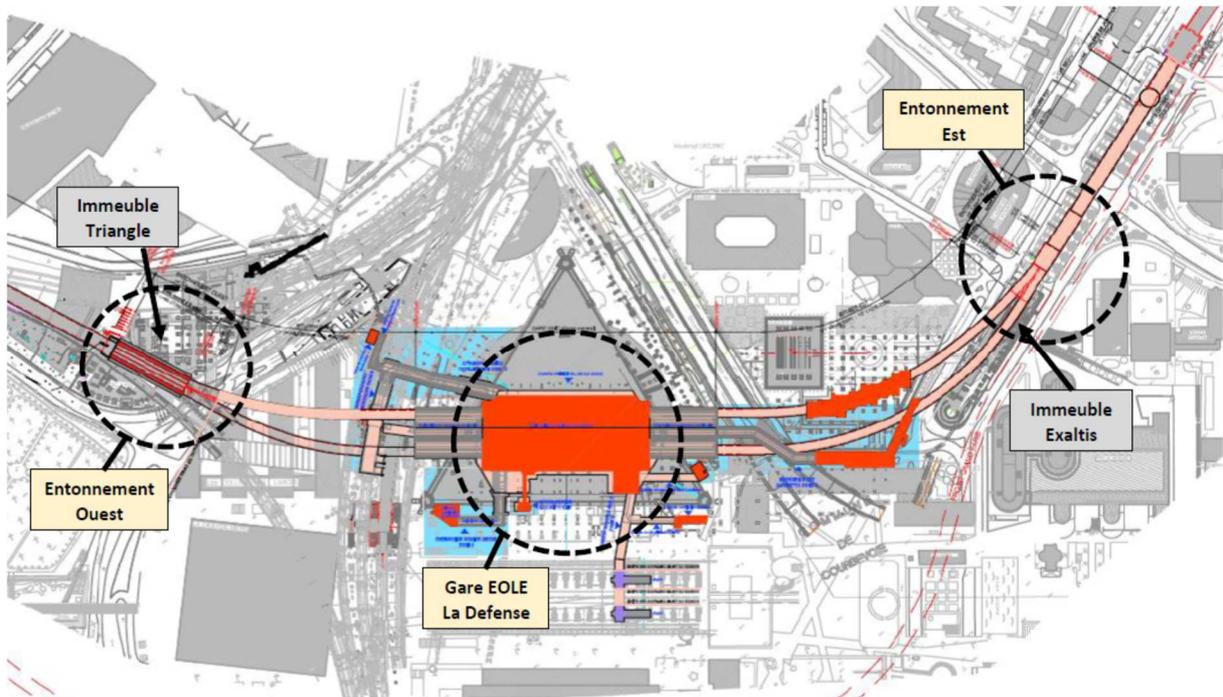


Figure 1. Vue d'ensemble du projet EOLE – La Défense

2 Contexte Géologique et Hydrogéologique

Le site s'étend sur la colline de la Défense, qui constitue une butte implantée dans une boucle de la Seine. Les terrains en place constituant le corps de la butte sont les formations du Lutétien (Marnes et Caillasses : MC et Calcaires grossiers : CG) faiblement inclinées vers l'Est.

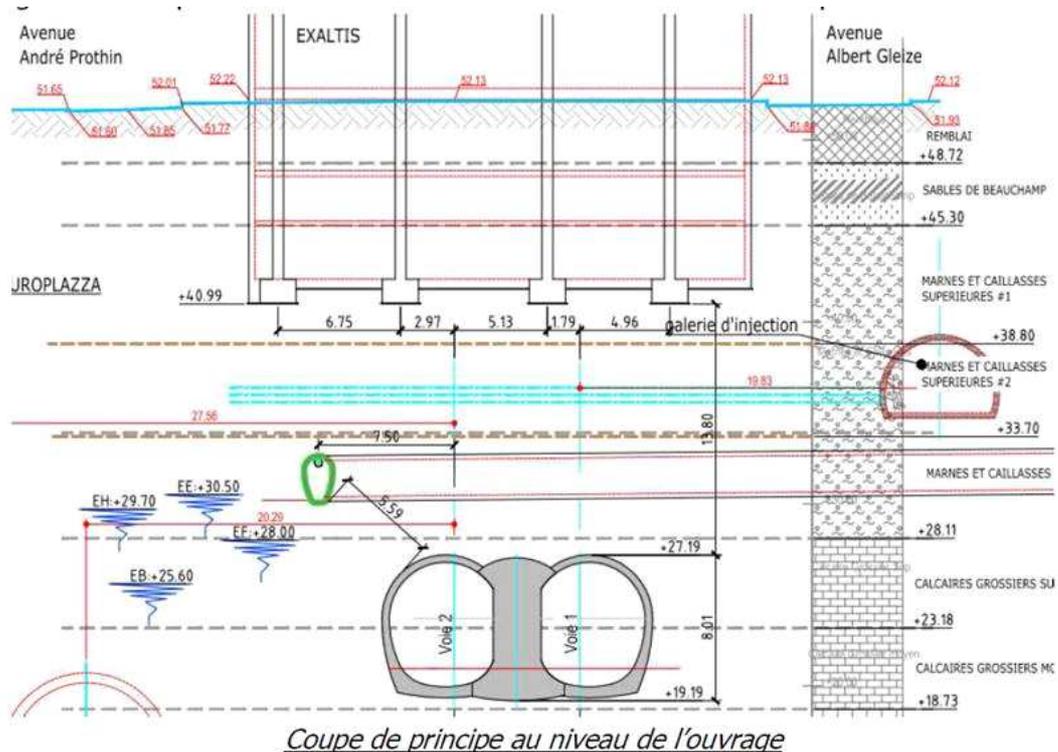


Figure 2. Coupe au niveau de l'Entonnement Est – Géologie - Hydrologie

La conception a cherché à développer le projet au maximum dans la formation du Calcaire Grossier à l'abri de la série des bancs durs à l'interface MC/CG : banc de rochette, banc de roche... Le CG se présente sous une alternance de bancs calcaires durs, marneux, et gréseux, se chargeant en minéraux argileux vers la base ; on distingue usuellement les calcaires supérieurs (alternance de bancs marneux et de bancs durs), les calcaires moyens (calcaires gréseux homogènes) et les calcaires inférieurs (ou Calcaires Glauconieux) plus hétérogènes.

La couverture d'une vingtaine de mètres comprend (Figure 2):

- L'ensemble des MC : alternance de bancs marneux et calcaire de couleur beige à blanchâtre. Deux niveaux de compacités différentes ont été distingués : les 2/3 supérieurs de la formation sont à dominante marneuse, moins compacts que le tiers inférieur, présentant un accroissement de la fréquence de bancs calcaires indurés. L'ensemble des bâtis à l'aplomb du projet est fondé dans cette formation.
- Un reliquat de sables de Beauchamps quand il n'a pas été excavé préalablement
- Une épaisseur très variable de remblais

Des levés géologiques sont réalisés très fréquemment à l'ouverture des fronts d'excavation, ils n'ont pas mis en évidence de réels accidents géologiques. On notera :

- Une famille principale de fracturation sub-verticale avec une orientation N210-240, à peu près parallèle à la paléo-falaise « lutétienne » inclinée vers la Seine. Les espacements entre discontinuités varient mais peuvent se réduire à 1.2m localement. Au niveau de l'entonnement Ouest, la famille de discontinuités étaient rencontrés en travers bancs, contre le pendage (OR 2b) induisant un risque d'écaillage au front.
- Très rarement, les concentrations d'eau au niveau des intersections de certaines fissures et des bancs plus imperméables du CGsup ont permis le développement de karst décimétriques à métriques.

Deux nappes principales séparées par l'horizon de glauconie grossière à la base des CG ont intéressé le projet :

- La nappe de l'Yprésien abritée par les sables supérieurs n'est pas interceptée directement par le projet mais a été rabattue afin qu'elle n'induisse pas de sous-pression sous les radiers des ouvrages notamment à l'Est.
- L'aquifère du Lutétien au comportement « fissural », abrité dans les MC et CG, en relation directe avec la nappe alluviale de la Seine. Finalement, les débits d'exhaure qu'il a induits sont restés modérés à très faibles.

3 Réalisation de l'Entonnement Ouest

3.1 Contexte

Les fondations de l'immeuble Triangle (R+8/-6) constituent le principal point dur sur le tracé de l'entonnement Ouest. Il s'agit d'un bâtiment construit dans les années 1990 présentant des désordres structurels préexistants a été classé « Très sensible » par l'AMO Bâti. Son système de fondations est constitué d'une paroi moulée périphérique descendant au niveau +38.24 NGF, ainsi qu'un ensemble de semelles superficielles fondées au niveau +40.90 NGF dans les MC.

D'autres ouvrages sont également présents dans la zone. Notamment les fondations du boulevard circulaire de La Défense, ainsi que celles de la passerelle Triangle.

3.2 Conception retenue

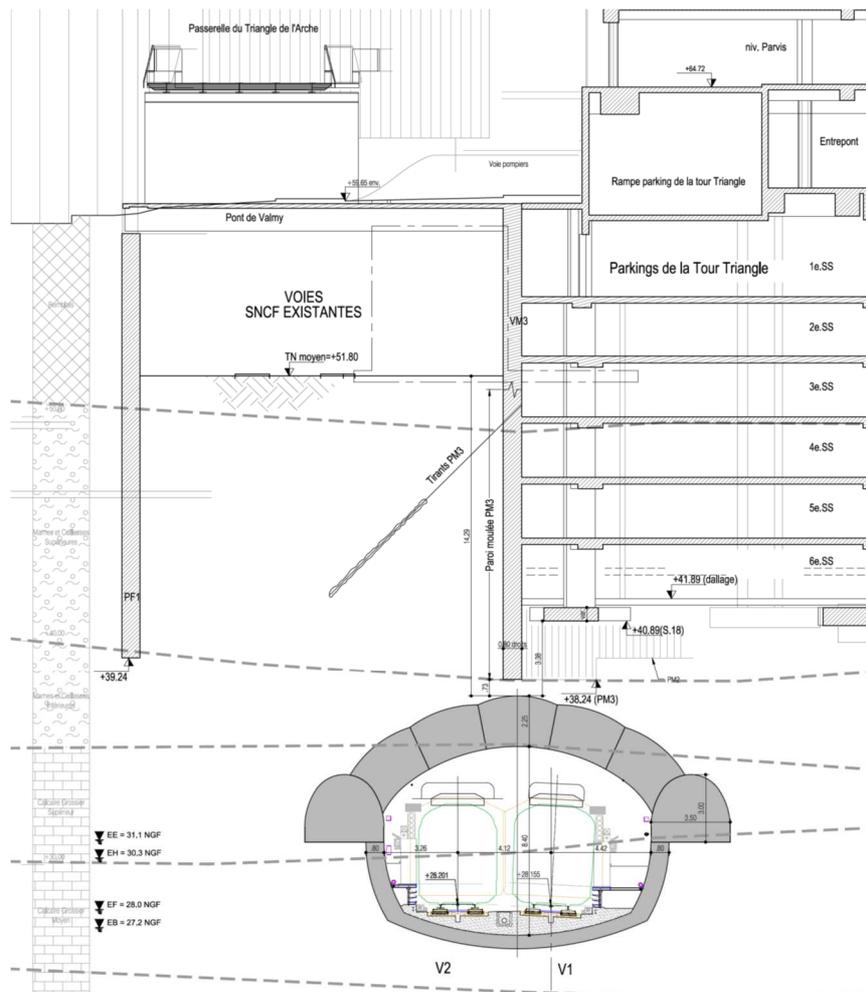
L'entonnement Ouest comporte 2 parties distinctes :

- Un tunnel rectiligne d'une longueur de 60m et de section constante (13m de large et 9m de hauteur) passant sous l'immeuble Triangle,
- Un ouvrage à pilier central d'une longueur de 25m et de section variable permettant le débranchement vers les bitubes.

En ce qui concerne le premier ouvrage, la très faible couverture existante (environ 70 cm au point le plus critique) avec la paroi moulée de l'immeuble Triangle a milité pour une conception permettant de limiter fortement les déformations. La conception de type « Crossover », encore dénommée méthode Seattle (Figure 3) a ainsi été retenue, prévoyant un phasage de réalisation séquencé de la manière suivante :

1. Réalisation d'une voûte massive à partir de 7 galeries sécantes de dimensions approximatives 3,5m x 3,0m. Ces galeries sont excavées puis remplies de béton successivement pour former finalement une voûte de 2m d'épaisseur.
2. Excavation de la demi-section supérieure à l'abri de la voûte.
3. Excavation de la partie centrale du stross.
4. Abattages latéraux et réalisation du génie civil du radier et des piédroits.

Les études menées en conception et en exécution ont permis de démontrer que les déformations totales induites sur le bâtiment Triangle restaient limitées à des valeurs entre 8 et 14mm en tassement absolu suivant les différents scenarii envisagés, avec des pentes maximales de 1,1mm/m. Ces déformations se répartissent pour moitié pendant la phase de création des galeries de voûte et pour moitié pendant



la phase d'excavation du monotube en lui-même (Demi-Supérieure, Stross, Abattages latéraux).

Figure 3. Coupe Entonnement Ouest – Ouvrage « Crossover »

L'ouvrage à pilier central est réalisé en sections divisées. Son phasage est semblable à la chambre C3 de l'Entonnement Est et sera développé dans cette partie.

Il faut noter que les deux ouvrages de l'Entonnement Ouest ont pu être réalisés en parallèle grâce au creusement préalable d'une galerie « pilote » située sous la voûte formée par les 7 galeries.

3.3 Méthodes d'exécution de l'ouvrage type « Crossover »

Les travaux des galeries sécantes ont été engagés en octobre 2018 et se sont achevés en février 2020. Tous les travaux ont été réalisés depuis le puits d'attaque Triangle. Un platelage spécifique a été mis en place préalablement permettant de mener de front les travaux des galeries type Crossover (en partie supérieure) et les excavations de la galerie pilote, de l'entonnement, des bitubes et de l'avant-gare (en partie inférieure).

Le phasage de réalisation a été défini de la manière suivante (Figure 4):

1. Réalisation en parallèle des galeries de culée 1 et 1'
2. Réalisation de la galerie de clé 5 (Figure 5)
3. Réalisation en parallèle (à front décalé) des galeries 2 et 3
4. Réalisation en parallèle des galeries 4 et 4'

Les galeries ont été excavées en méthode traditionnelle par pas de 1,0m à 1,5m suivant les phases. Les moyens matériels ont été adaptés à l'étroitesse des galeries, avec l'utilisation du Brokk 500 pour l'excavation des galeries. L'emploi de la fraise et du BRH ont été nécessaires pour permettre l'abattage des terrains composés de bancs durs (banc de roche, banc de rochette) à des franges marneuses. Le soutènement mis en place était constitué de présoutènements en voûte en boulons R32 de longueur 3,0m, de cintres réticulés, de béton projeté en voûte et radier d'une épaisseur de 21cm. Les cadences observées pour l'excavation et le soutènement de ces galeries étaient de l'ordre de 8 ml par semaine.

Les travaux d'excavation des galeries n'ont pas rencontré de problèmes techniques majeurs. Le risque de rencontrer la paroi moulée Triangle approfondie par rapport à son niveau théorique n'a pas été avéré, même si quelques traces de béton ont pu être détectées en plafond de la galerie de clé G5.

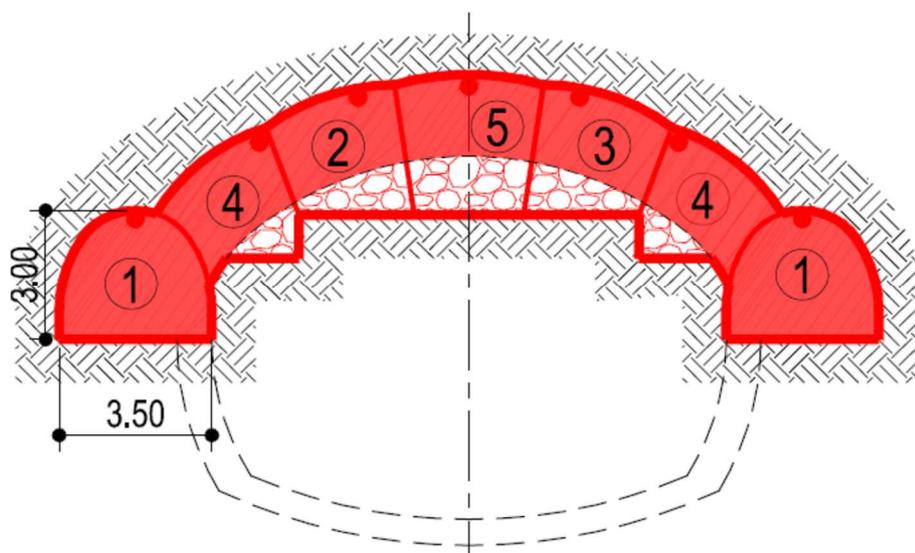


Figure 4. Phasage de réalisation de la voûte type « Crossover »

La forme de voûte béton est obtenue par la mise en place de coffrages spécifiques remplis de béton maigre et démontés lors de la phase d'excavation de la demi-section supérieure.

Les galeries sont ensuite ferrillées puis bétonnées par plot de 15m en béton autoplaçant C35/45. Une opération finale de clavage au coulis de ciment en clé de voûte est réalisée grâce aux tubes d'injections mis en place avant bétonnage. Ces opérations de remplissage nécessitaient environ 1 mois de travail par galerie.



Figure 5. Galerie de clé G5 – Voûte Crossover

L'excavation de la demi-section supérieure et du stross central sont réalisés dans une même phase réalisée en mars 2020, qui comprend également le démontage de la galerie pilote.

Les talus latéraux sont enfin abattus par plot de 3,0 m avec la mise en place d'un soutènement constitué de boulons radiaux R32 de longueur 4,50 m, de treillis soudé et de béton projeté. Les radiers et piédroits définitifs sont réalisés à l'avancement par plot de 9,0m.

3.4 Pilotage des travaux

Le contexte très chargé en avoisinant et la réalisation du monotube ont amenés à la mise en place d'une instrumentation spécifique.

Dans ce but, plusieurs types d'instruments ont été mis en œuvre (Figure 6) :

- 2 groupes de 3 CYCLOPS/CENTAURES (théodolites automatisées) permettant de suivre les mouvements au niveau du soubassement des tours ainsi que du parvis, des bâtis et de la chaussée avec un référencement hors zone d'influence théorique. **Précision : 1mm ; Fréquence d'acquisition : 1h**
- 170 tassomètres hydrauliques sur chaque fondation des tours avoisinantes. La limite de ce type de capteur étant la longueur des réseaux ainsi que le besoin d'utiliser une référence pour l'ensemble des capteurs d'un réseau, un algorithme de calcul en bloc a été développé pour l'occasion. Ce procédé a permis d'obtenir des variations d'altitudes absolues (en fait relative par rapport aux références sélectionnées) et non des mouvements relatifs par rapport à une référence potentiellement dans la zone d'influence. **Précision : 0,1mm ; Fréquence d'acquisition : 1h**
- 4 extensomètres en forage multipoints permettant de mesurer les tassements en forage à différentes profondeurs. **Précision : 0,1mm ; Fréquence d'acquisition : 1h**
- 24 fissuromètres permettant le suivi du comportement des fissures existantes. **Précision : 0,1mm ; Fréquence d'acquisition : 1h**

- Un inclinomètre en forage permettant de mesurer les mouvements latéraux de sols. **Précision : 1mm ; Fréquence d'acquisition : 1h**
- 9 électronivelles permettant le suivi des variations d'inclinaisons des voiles des bâtis. **Précision : 0,1mm ; Fréquence d'acquisition : 1h**
- 4 cellules de pression totales permettant de mettre en relation le chargement de la voûte avec les tassements observés. **Précision : 0,5mPa ; Fréquence d'acquisition : 1h**

Les capteurs susnommés sont connectés à des enregistreurs radio possédant les avantages suivants dans un contexte de bâti en exploitation :

- Une installation plus simple et plus rapide (en effet, celle-ci ne nécessite pas de tirer des câbles entre les capteurs et la centrale d'acquisition).
- Un système plus discret : Le système de surveillance est ainsi quasiment invisible pour les occupants des bâtis.

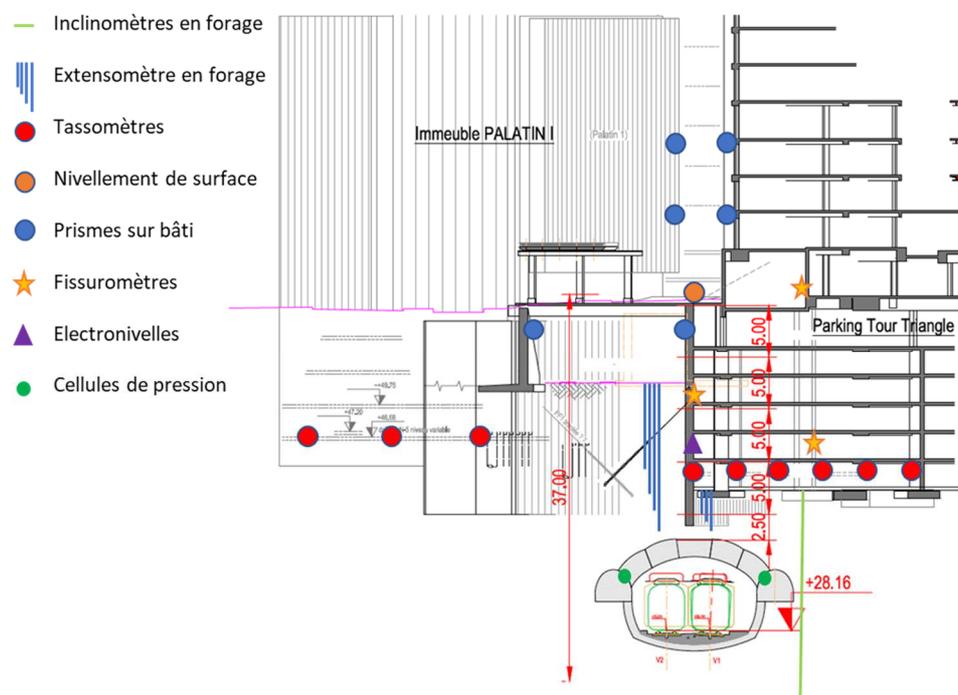


Figure 6. Coupe de principe de l'auscultation du monotube Ouest

Les données collectées sont transmises à un collecteur de données. Celui-ci récupère l'ensemble des mesures des différents enregistreurs et assure la transmission des données en temps-réel vers la base donnée Geoscope 7.

Le bâtiment Triangle a constitué le principal point d'attention dans le pilotage des travaux de l'entonnement Ouest. A janvier 2020, après réalisation de la galerie pilote et des galeries sécantes du crossover, les déformations mesurées sur le bâtiment restent cohérentes avec les valeurs issues des calculs d'exécution. Les déformations mesurées s'échelonnent entre 0 et 6mm, pour 6mm attendus à la fin de cette phase dans le scénario de référence. Il faut noter cependant que le bâtiment a eu un comportement disparate suivant les différents appuis (paroi moulée / semelles superficielles). Les déformations les plus remarquables ont été repérées durant les excavations des galeries 2 et 3 en front décalé, avec des tassements atteignant 2 à 3mm.

L'historique des déformations sur les différents tassomètres est présenté en Figure 7, ainsi que le passage des fronts des différentes galeries et les niveaux de tassements prévisionnels (nommés EXE sur le graphique). A janvier 2020 les tassements les plus importants restaient dans une fourchette entre

le seuil de vigilance (défini comme 75% du scenario de référence) et le seuil d'alerte (défini comme 125% du scenario de référence).

Les déformations relevées n'ont donc pas été de nature à renforcer le soutènement prévu. Les dispositions de présoutènement (enfilages) ont pu être allégées dans les zones éloignées des appuis du bâtiment.

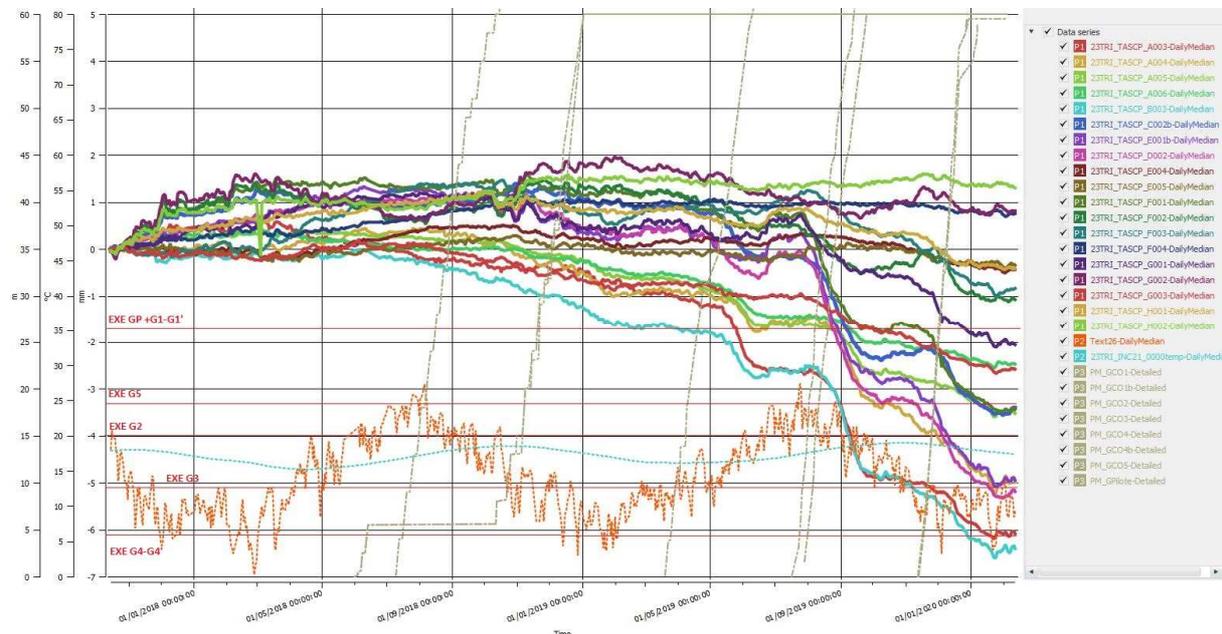


Figure 7. Suivi des déformations Parking Triangle

4 Réalisation de l'Entonnement Est

4.1 Contexte

L'entonnement Est (Figure 8) est situé sous l'avenue Gambetta à Courbevoie, composée d'une coulée verte centrale et de 2 axes de circulations bordées d'immeubles. L'immeuble Exaltis (R+16/-4) situé au droit de la chambre C3 de l'entonnement et d'une partie des bitubes constitue la principale difficulté. Il s'agit d'un immeuble de construction récente mais présentant plusieurs modes de fondations toutes ancrées dans les MC : un radier sous le noyau central du bâtiment, des semelles indépendantes et des longrines filantes reprenant des poteaux périphériques, des pieux courts en rive du bâtiment.

La couverture existante entre les tunnels créés et les fondations de la tour est d'environ 13 mètres.

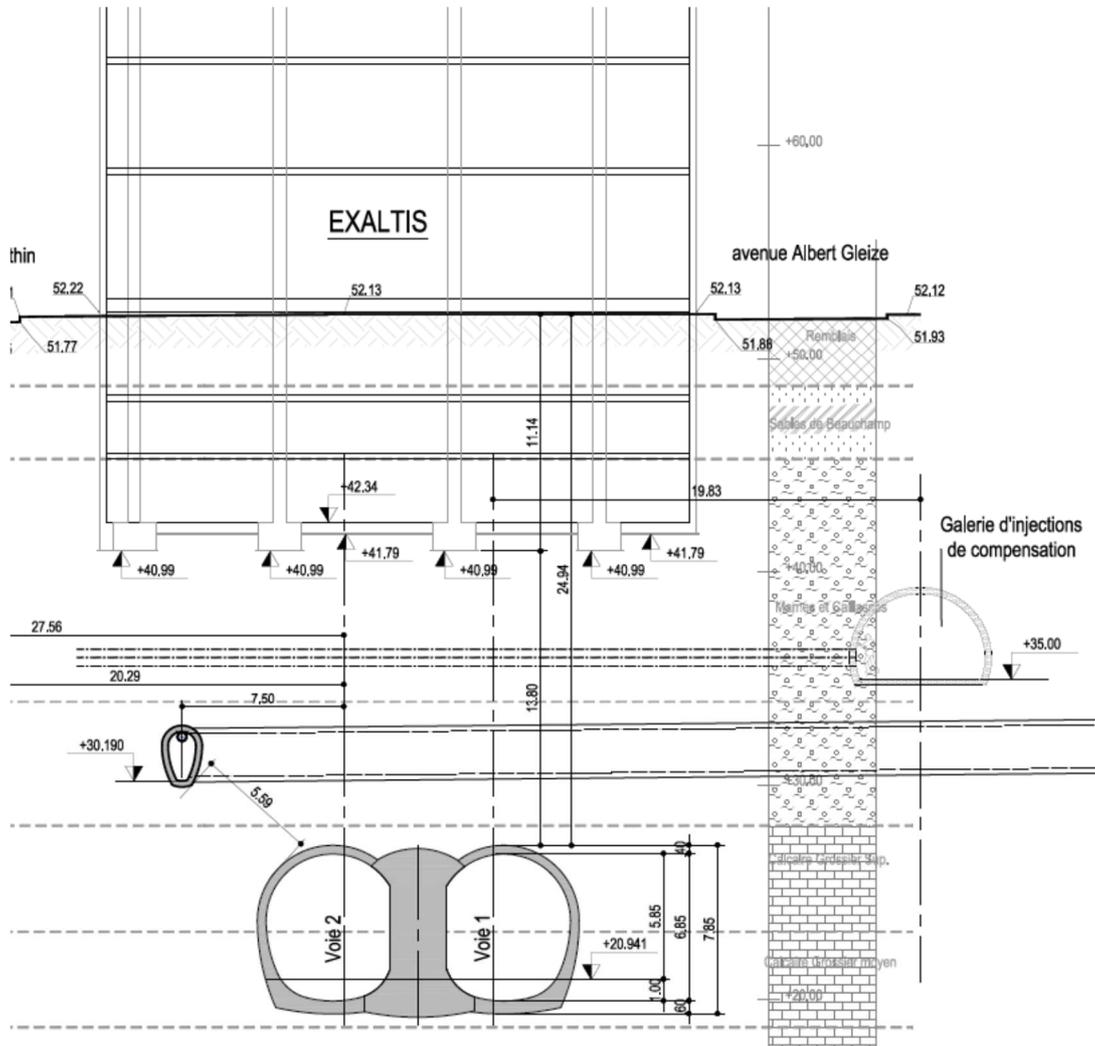


Figure 8. Coupe Chambre C3 & Injections de compensation Exaltis

4.2 Conception de l'Entonnement Est

L'entonnement Est comprend 3 ouvrages successifs appelés Chambre C1, Chambre C2 et Chambre C3. Les chambres C1 et C2, de longueurs respectives 30m et 18m, correspondent à des élargissements progressifs du monotube permettant d'augmenter la largeur du tunnel de 9,70m à 11,70m. Ces chambres sont excavées en pleine section en méthode traditionnelle, entièrement dans les calcaires grossiers.

La chambre C3 d'une longueur de 27m est réalisée en section divisée, selon le phasage suivant :

1. Excavation d'une galerie centrale en méthode traditionnelle, avec cintres lourds HEB 180 tous les 1,00m et béton projeté fibré
2. Réalisation du génie civil du radier et du pilier central
3. Excavation des galeries oreilles en méthode traditionnelle, comportant la dépose du soutènement de la galerie centrale et la mise en place d'un soutènement s'appuyant sur le pilier central (voir Figure 9)
4. Réalisation du génie civil définitif des 2 tubes accolés

Les études ont montré que les travaux de la chambre C3 pouvaient engendrer des déformations de l'ordre de 15mm et des tassements différentiels non acceptables entre les différents systèmes d'appuis de la tour. Au regard de la structure de fondations atypique de la tour Exaltis, il a été décidé de prévoir un système d'injections de compensation permettant de limiter les déformations à 2mm sur les différents appuis de la tour.



Figure 9. Excavations des galeries oreilles – Chambre C3 Entonnement Est

4.3 Injections de compensation sous l'immeuble Exaltis

Le principe des injections de compensation est d'éviter les mouvements du terrain en surface par injection de matière (coulis).

Les travaux pour la mise en œuvre du système d'injections de compensation sous la tour Exaltis ont commencé dès la fin 2017 avec la création du puits et de la galerie d'injection de 6 mètres d'ouverture. La galerie longe la tour sur une longueur d'environ 55 mètres et à une profondeur de 16 mètres, et permet de réaliser les forages perpendiculairement à la zone à traiter sous la tour Exaltis.

Les forages et le scellement des tubes à manchettes ont été réalisés sur 3 lits espacés verticalement de 0,40m, et avec un espacement horizontal entre forages de 1,50m. Les forages sont réalisés sous toute la largeur du bâtiment, soit sur une longueur d'environ 38 m avec une inclinaison de 2 à 3° par rapport à l'horizontale afin d'échapper à des pieux situés côté opposé de la tour. La disposition des tubes permet de réaliser les injections de compensation dans les terrains constitués de Marnes et Caillasses entre la voûte des tunnels et les fondations de la tour.

Les injections de conditionnement, réalisées en mars 2018, ont permis de préparer le terrain encaissant, afin d'obtenir une réaction optimale lors des injections de compensation. Elles consistent à injecter les manchettes des lits inférieurs et supérieurs jusqu'à avoir une amorce de mouvement. Les injections IRS faites avec le coulis ciment-bentonite C/E=0,3 respectent les critères d'arrêt pression/volume de 10 bars / 50 litres par passe. Des paramètres d'injection plus restrictifs ont été utilisés à proximité d'ouvrages existants (égout, pieux du bâtiment). Il est à noter qu'il n'a pas été observé de phénomène de relaxation dans les terrains. Les soulèvements successifs n'ont pas ou peu été suivis de tassements de relaxation. Un volume total de 124 270 litres de coulis a été utilisé pour les injections de conditionnement.

Les injections de pré-soulèvement sont réalisées à la suite et permettent de définir la loi de comportement (volume injecté / volume soulevé). Le programme COGNAC permet par la suite de déterminer le programme d'injections à partir des prévisions de tassements ou des tassements réels observés.

On peut noter que l'efficacité du système était variable, permettant une très bonne réactivité sur les semelles superficielles, radier et longrines, et moindre sur les files extérieures du bâtiment sur pieux. Cela a été interprété comme un problème d'effet de bord du matelas de compensation. Le retour d'expérience tend donc à démontrer que le matelas doit dans la mesure du possible être prévu avec une marge conséquente sur les appuis de rive de bâtiment à compenser. Les soulèvements lors de la phase de pré-soulèvement ont été de l'ordre de 2 à 4mm pour les zones centrales et de l'ordre de 0 à 1mm pour les zones de bordure (cf. Figure 10). Les tassements différentiels maximum entre appuis du bâtiment n'ont cependant pas excédés le seuil d'alerte de 0,9mm/m.

Le système était finalement prêt pour l'arrivée du tunnel et de la galerie centrale de la chambre C3 en septembre 2018.

Le retour d'expérience des injections dans le terrain parisien des Marnes et caillasses est donc globalement positif : les interbanco marneux se prêtent bien à l'injection, la réactivité du bâtiment aux injections est bonne quoique disparate et la relaxation faible voire inexistante.

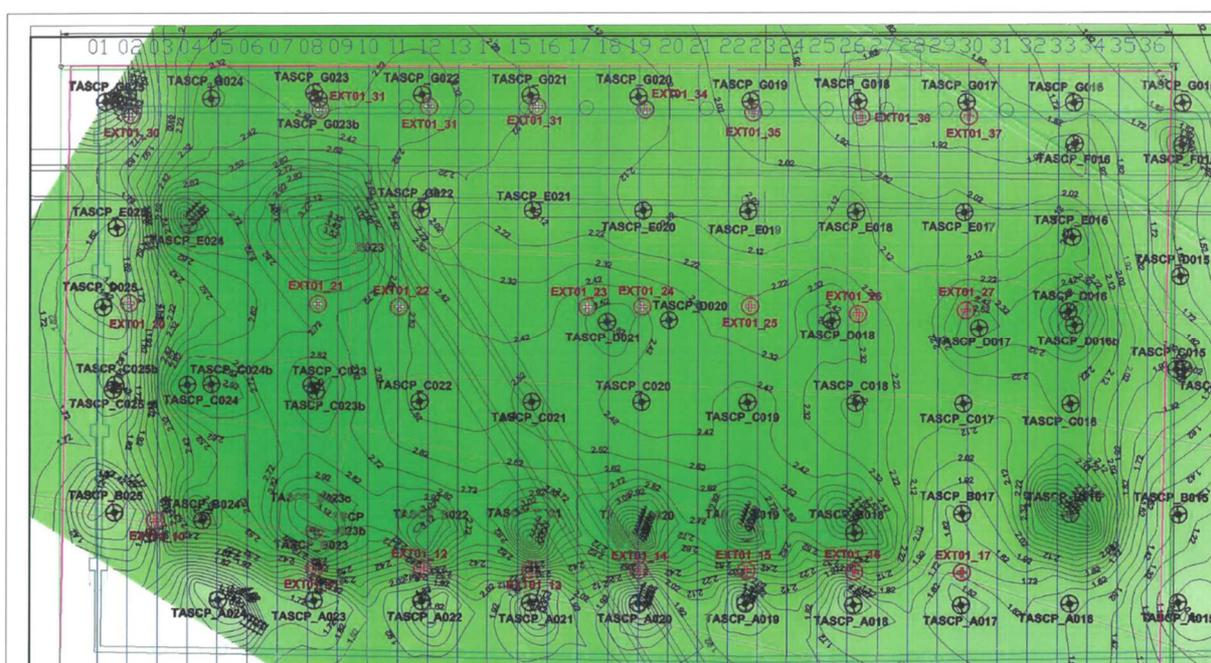


Figure 10. Isolignes des Tassomètres - Parking Exaltis – Fin du Pré Soulèvement

4.4 Pilotage des travaux

Dans le cadre de la réalisation de l'entonnement, une auscultation de haute précision était indispensable afin de contrôler les mouvements des avoisinants mais aussi de piloter les travaux.

Dans ce but plusieurs types d'instruments ont été mis en œuvre (Figure 11):

- Un groupe de 3 CYCLOPS/CENTAURES (théodolites automatisées) permettant de suivre les mouvements de surface du bâti et de la chaussée avec un référencement hors zone d'influence théorique. **Précision : 1mm ; Fréquence d'acquisition : 1h**
- 138 tassomètres hydrauliques sur chaque fondation de la tour Exaltis. Le principe de calcul en bloc décrit pour le monotube a aussi été appliqué pour cet ouvrage **Précision : 0,1mm ; Fréquence d'acquisition : 2 min**
- 23 extensomètres en forage multipoints permettant de mesurer les tassements en forage à différentes profondeurs. **Précision : 0,1mm ; Fréquence d'acquisition : 2 min**

- 3 4Dshapes installés dans des forages horizontaux foré 50 cm au-dessus des forages d'injections afin de suivre les mouvements de sols au plus proche des injections. **Précision : 1 mm ; Fréquence d'acquisition : 2 min**

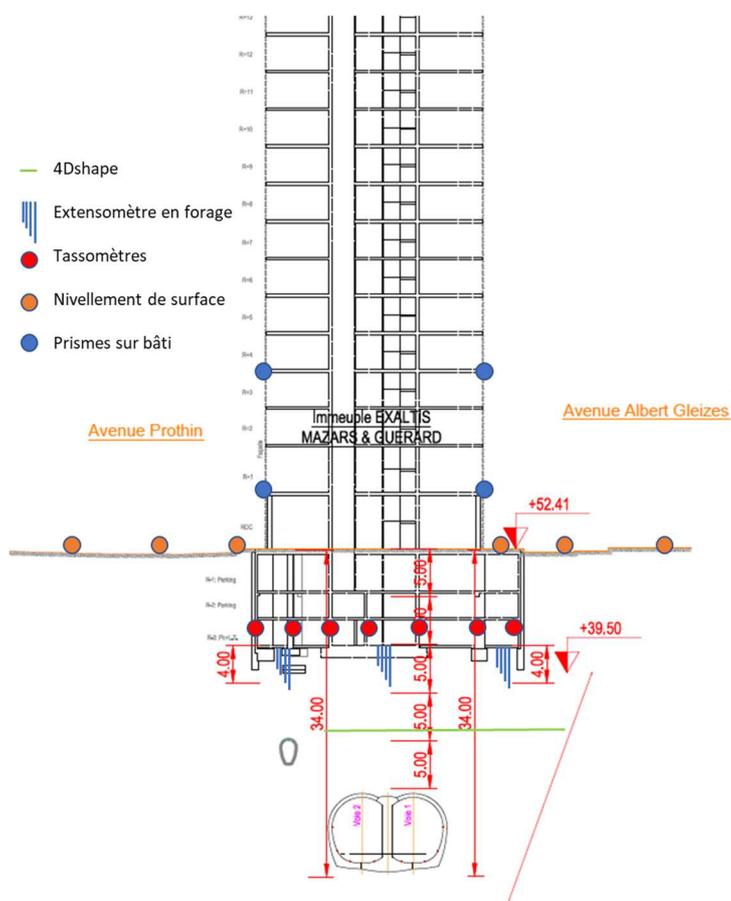


Figure 11. Coupe de principe de l'auscultation de la tour Exaltis

L'ensemble des capteurs électroniques présentés dans le chapitre est relié par voie filaire à une centrale d'acquisition. Celle-ci pilote les mesures (fréquence de mesures des capteurs) et stocke les données localement. Ces données sont ensuite intégrées dans la base de données Geoscope 7.

Le pilotage des injections de compensation s'est fait avec la considération d'un seul seuil de pilotage : le seuil contractuel de 2mm en valeur absolu au niveau des appuis du bâtiment dans la zone d'influence des injections.

L'excavation de la galerie centrale de la chambre C3 située à l'aplomb de l'immeuble Exaltis a été réalisée entre le 27/09/2018 et le 31/10/2018, sans que cela produise des déformations notables sur le bâti. Les travaux se sont poursuivis de novembre 2018 à avril 2019 par la réalisation du génie civil du monotube et de l'entonnement Est, avec notamment la réalisation du pilier central de la chambre C3.

La reprise des travaux d'excavation des galeries oreilles en avril 2019, comprenant également le démontage des cintres de la galerie centrale ont en revanche montré des effets sur le bâtiment Exaltis, avec des tassements de l'ordre de 2 mm sur certaines fondations, notamment en rive du bâtiment. Il ne fut cependant pas jugé utile de procéder à une campagne d'injections de compensation. Le passage sous le bâtiment Exaltis a pu donc se faire sans recourir aux injections de compensation. Il est intéressant de noter que les tassements réels ont été nettement inférieurs à ceux attendus dans les études d'exécution : environ 2 mm pour 15 mm attendus (cf Figure 12). Le traitement préalable des

marnes et caillasses par les coulis de ciment a certainement contribué aux limitations des déformations dans la zone de même que la position des bancs durs dans la zone de transition entre marne et caillasses inférieures et calcaires grossiers, situés au-dessus des voutes de nos galeries. L'atelier d'injection a été démobilisé en octobre 2019 et les forages rebouchés par la suite.

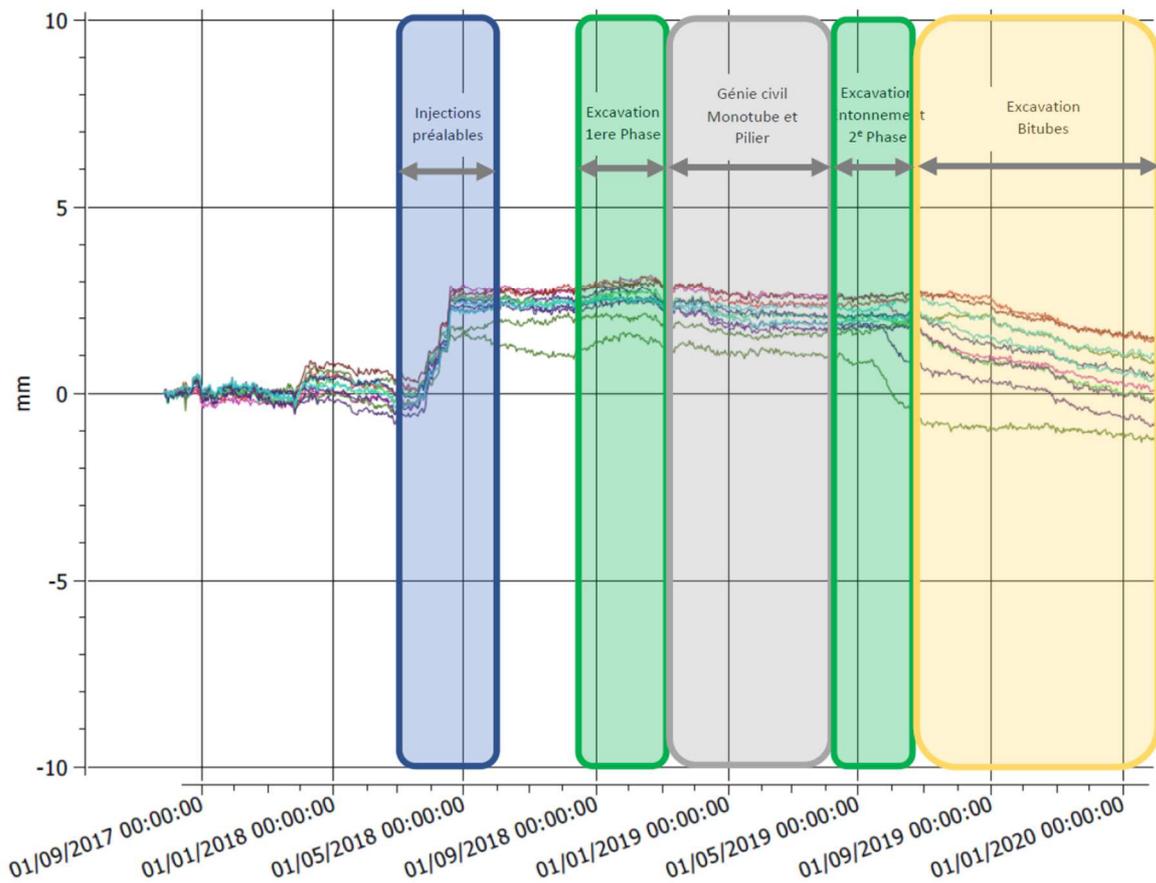


Figure 12. Suivi des déformations Parking Exaltis

5 Conclusion

La réalisation sur le projet EOLE – La Défense d'ouvrages souterrains d'entonnement de grande ouverture dans un contexte de bâti dense a nécessité de faire appel à des techniques particulières : la méthode crossover à l'Ouest et les injections de compensation à l'Est. En l'état d'avancement du projet, celles-ci ont montré qu'elles étaient une réponse appropriée aux critères de déformations qui avaient été définis, et ont permis de maîtriser les risques de désordres sur le bâti existant.