

# **Reprise en sous-œuvre de bâtiments sensibles – Méthodes et modélisation numérique 3D du Cul de Sac de la Station Chatelet de la ligne 11 du métro parisien**

## ***Underpinning of sensitive buildings – Methods and 3d numerical modelling of the Chatelet station “Cul de Sac” of Paris Metro line 11***

Cristiano ORCI, *ENSER France, Paris, France*

Gilles CHAPRON, *SETEC TERRASOL, Paris, France*

Nour-Eddine EL-KHOTRI, *SETEC TERRASOL, Paris, France*

Sebastiano BONDI, *ENSER France, Paris, France*

Pauline FIRMIN, *CHANTIERS MODERNES CONSTRUCTION, Chevilly-Larue, France*

### **Résumé**

L'exploitation de la ligne 11 du métro parisien avec 5 rames au lieu de 4 comporte la réalisation d'une niche en prolongement de la voie actuelle, pour permettre le retournement des trains au terminus de Chatelet.

La niche est réalisée avec un terrassement en puits blindé à partir de la cave d'un restaurant, situé au 5 de Rue des Lavandières Saint-Opportune. L'implantation de la niche nécessite la réalisation préalable d'une reprise en sous-œuvre des bâtiments n°5 et n°7, afin d'éviter des tassements différentiels pendant les phases des travaux. La reprise en sous-œuvre est constituée d'une poutre en béton armé appuyée sur un poteau en béton armé et sur les Alluvions Anciennes. Le poteau de la poutre de reprise en sous-œuvre est réalisé à partir du quai de la station, avec une démolition partielle du voile tampon et la construction préalable d'un linteau de renfort.

Les bâtiments concernés par la reprise en sous-œuvre, respectivement R+4 et R+5, s'appuient sur des caves voûtées en meulière. L'ouvrage, à réaliser à partir de l'arase inférieure des caves, se trouve entre les Alluvions Anciennes et les Marnes et Caillasses Supérieures, sous nappe.

Le projet, très technique, a demandé des études spécifiques en méthodes d'exécution (ENSER) et en modélisation géotechnique 3D (TERRASOL). Cela a permis de bien maîtriser chaque phase d'exécution, grâce à des résultats fiables en termes de tassements, qui ont pu être comparés lors de travaux aux mesures enregistrées in situ.

### **Abstract**

The development of line 11 of the Paris Metro with 5 trains instead of 4 includes the creation of a niche for the extension of the current track, to allow the reversal of trains at Chatelet terminus.

The niche is realized with a vertical shaft with conventional shoring system starting from a restaurant cellar, located at 5 Lavandières Saint Opportune street. The niche installation requires the prior realization of an underpinning of buildings n°5 and n°7, in order to avoid differential settlements during the construction phases. The underpinning is composed by a reinforced concrete beam lying on a reinforced concrete column and on “Alluvions Anciennes”. The column of the underpinning beam is made from the station platform, with a partial demolition of the buffer wall and the prior construction of a reinforcement lintel.

The buildings affected by the underpinning, respectively with 4 and 5 floors above ground, are based on millstone vaulted cellars. The structure must be carried out from the lower level of the cellars and is located between “Alluvions Anciennes” and “Marnes et Caillasses Supérieures”, under the groundwater.

The highly technical project has required specific studies in execution methods (ENSER) and 3D geotechnical modeling (TERRASOL). This enabled a good management of each execution phase, thanks to reliable results in terms of settlements, which could be compared during works execution to the measurements recorded in situ.

# Reprise en sous-œuvre de bâtiments sensibles – Méthodes et modélisation numérique 3D du Cul de Sac de la Station Chatelet de la ligne 11 du métro parisien

## *Underpinning of sensitive buildings – Methods and 3d numerical modelling of the Chatelet station “Cul de Sac” of Paris Metro line 11*

Cristiano ORCI, ENSER France, Paris, France

Gilles CHAPRON, SETEC TERRASOL, Paris, France

Nour-Eddine EL-KHOTRI, SETEC TERRASOL, Paris, France

Sebastiano BONDI, ENSER France, Paris, France

Pauline FIRMIN, CHANTIERS MODERNES CONSTRUCTION, Chevilly-Larue, France

### 1 Le nouvel ouvrage en arrière gare de la station Châtelet

La modification du matériel roulant permettant l'exploitation de la ligne 11 avec 5 rames au lieu de 4 a rendu nécessaire l'adaptation de la Station Châtelet, au terminus de la ligne 11. Les travaux décrits dans le présent article concernent en particulier l'arrière-station et ont consisté dans le détail en :

- La réalisation d'une niche en prolongement d'une voie sur 4,8 m de long pour permettre le retournement des trains au terminus de Châtelet avec installation d'un heurtoir à absorption ;
- Le prolongement d'une voie sur 8,5 m de long, de trottoirs et de cloisons ;
- La réalisation d'engravures sur un linéaire d'environ 115 m en naissance de voûte pour la mise au gabarit du tunnel vis-à-vis du nouveau matériel roulant.

La création de la niche a demandé la réalisation d'un terrassement très technique, réalisé depuis les caves d'un restaurant, entièrement en sous-œuvre en dessous de bâtiments sensibles. Comprise entre les niveaux +28,56 m NGF et +23,03 m NGF, elle a nécessité le terrassement de 136 m<sup>3</sup> de terrain (la niche est haute de 5,5 m, large de 4,17 m et profonde de 5,91m). La réalisation de ces travaux a été confié par la RATP à Chantier Modernes Construction, qui s'est entouré de Terrasol et Enser pour en réaliser les études.

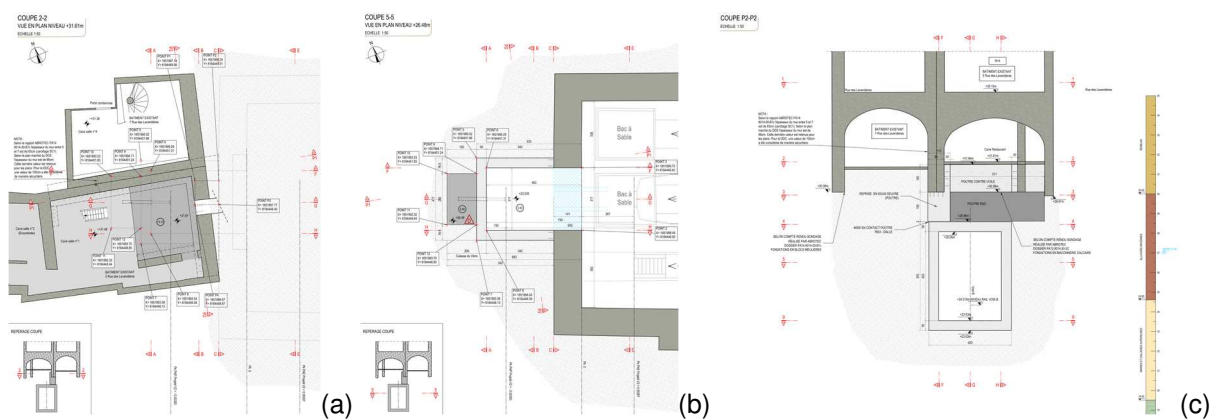


Figure 1. (a) Vue en plan niveau caves (b) vue en plan niveau niche (c) coupe transversale

### 2 Contexte géologique

Pour connaître le contexte géotechnique, l'étude s'est basée sur le profil géologique original de la ligne 11 datant de sa construction, et sur des sondages d'archives de la RATP réalisés à proximité. L'ouvrage se situe entièrement dans les Alluvions Anciennes sablo-graveleuses, sous des remblais et recouvrant les Marnes et Caillasses. La nappe est située à 8 m de profondeur (cote 27 m NGF). Des injections ont donc été réalisées avant d'entamer les travaux d'excavation afin d'étanchéifier le pourtour du puits.

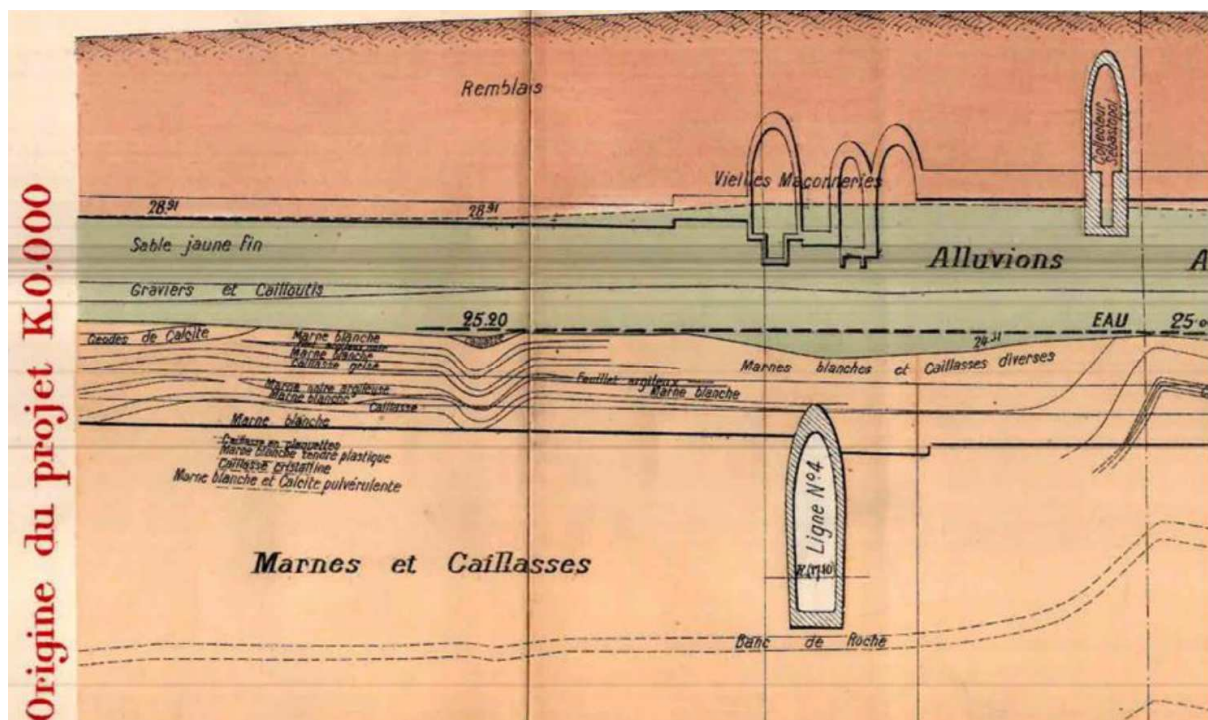


Figure 2 : Profil en long de la ligne 11, 1936 (source : archives RATP)

Le tableau suivant donne pour information les paramètres de sol qui ont été retenus pour cette étude.

Tableau 1. Paramètres de sol retenus pour cette étude

| Formation | Cote toit (NGF) | $\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $pl^*$ (MPa) | $E_M$ (MPa) | $\alpha$ (-) | $E_{50}$ (MPa) | $E_{ur}$ (MPa) | $\nu$ | $c'$ | $\phi'$ (°) |
|-----------|-----------------|---------------------------------|--------------|-------------|--------------|----------------|----------------|-------|------|-------------|
| RB        | +35             | 18                              | 0,5          | 5,0         | 2/3          | 15             | 45             | 0,3   | 0    | 28          |
| AA        | +30             | 19                              | 1,2          | 10          | 1/3          | 60             | 180            | 0,3   | 0    | 33          |
| MC sup    | +24,6           | 20                              | 1,7          | 15          | 2/3          | 45             | 135            | 0,3   | 20   | 30          |

### 3 Contraintes liées aux structures existantes

L'excavation et le génie civil de la niche sont réalisés à partir de la cave d'un restaurant situé au n°5 rue des Lavandières Ste-Opportune. Le restaurant a été fermé pendant les travaux mais les appartements situés au-dessus sont restés occupés. Les autres travaux, y compris le traitement de terrain avant réalisation de la niche, ont été réalisés depuis le tunnel existant pendant une Interruption Temporaire de la Circulation (ITC) avec une coupure du rail de traction et fermeture de la station Châtelet du 17 mars 2019 au 17 décembre 2019.

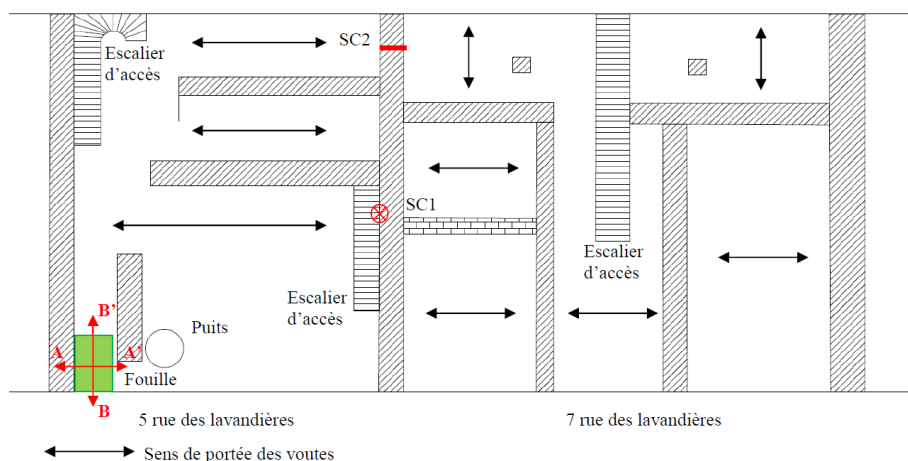
Les bâtiments concernés sont le n°5 et le n°7 de Rue des Lavandières identifiés sur la photo suivante.



Figure 3. Bâtiments 5 et 7 en Rue des Lavandières

Le bâtiment n°5, est un R+4/R-1 (le R-1 étant le niveau de la cave). Sa date de construction est 1852, l'emprise au sol est approximativement 17 m x 6 m et le système de fondation est de type superficielle (longrines de fondations). Le bâtiment au n°7 est un R+5/R-1. Il comporte, comme le bâtiment n°5, un niveau de sous-sol. La date de construction est inconnue, l'emprise au sol est approximativement 15 m x 13 m. Comme pour le bâtiment 5, le système de fondation est de type superficiel. Pour les deux bâtiments, le niveau supposé des fondations est entre 29,87 m NGF et 30,08 m NGF. Les deux bâtiments sont considérés comme très sensible aux tassements (stabilité du bâti aux déformations de niveau 4), en raison de leur époque de construction et surtout de leur état actuel.

Deux sondages carottés ont été réalisés au préalable. Un sondage incliné pour estimer l'état des fondations et leur profondeur, et un sondage horizontal pour analyser la composition du mur séparant les caves des deux bâtiments.



**Figure 4. Implantation des sondages SC1 et SC2, pré-fouille en phase d'exécution**

Les deux sondages carottés ont permis d'analyser l'état de la pierre de maçonnerie des fondations et des caves. La réalisation d'une pré-fouille en complément, sur environ un mètre de hauteur, a été essentielle pour apprécier visuellement l'état de la maçonnerie. Même si les blocs de meulière la composant n'était pas trop fracturés, il a pu être constaté l'absence de mortier entre les blocs. S'est donc posé la question de la tenue de la structure en phase de réalisation de la reprise en sous-œuvre, du fait de l'absence de capacité des fondations à supporter d'éventuels efforts de traction induits à la suite même de simples terrassements par plots.



**Figure 5. Pré-fouille d'excavation**

Par conséquent, il a été décidé dans les études de considérer les fondations, d'un point de vue mécanique, comme de la maçonnerie d'égout en meulière (typiquement sans mortier, ou avec un mortier dégradé). Sur ce type de maçonnerie, plusieurs études ont été menées et sont disponibles dans la littérature technique. De manière générale, pour l'analyse de la maçonnerie en meulière respectant les techniques de construction utilisées à l'époque du Baron Haussmann (SAADE et al. 2013) les valeurs du tableau suivant peuvent être retenues. La limite inférieure de résistance de la maçonnerie de meulière peut alors, en première approche et sans analyses supplémentaires, être définies comme l'enveloppe entre les valeurs minimales de résistance de la meulière et du mortier.

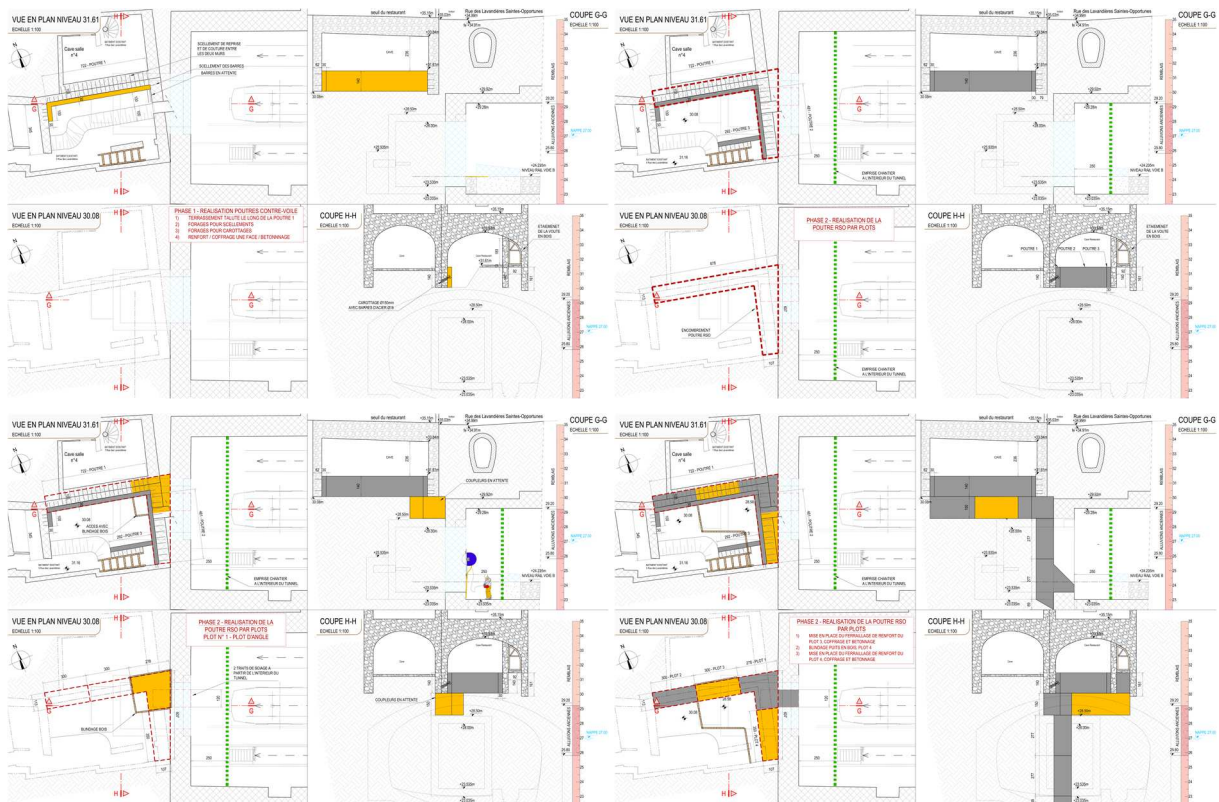
**Tableau 2. Caractéristiques mécaniques des maçonneries en meulière haussmanniennes**

| Caractéristiques                          | Meulière | Mortier | Ensemble |
|---|----------|---------|----------|
| Module d'élasticité [MPa]                 | 2500     | 6000    | 5000     |
| Résistance moyenne à la compression [MPa] | 12 à 26  | 0,9     | 5        |
| Résistance moyenne à la traction [MPa]    | 1,47     | -       | 0,4      |
| Résistance à la flexion [MPa]             | -        | 0,5     | -        |

#### 4 Méthodologie de réalisation des travaux

L'ouverture de la pré-fouille en phase de préparation a montré la nécessité de réaliser une contre-poutre contre les fondations existantes, pour sécuriser l'ensemble des caves et ne pas apporter des tassements préjudiciables pour les structures en élévation, mais surtout pour permettre la réalisation de la poutre de reprise en sous œuvre proprement dite et du poteau provisoire. La méthodologie de réalisation de la niche a été donc définie de la manière suivante :

1. Réalisation d'une contre-poutre en béton armé, dite « poutre contre-voile » le long du périmètre de la future poutre de reprise en sous-œuvre. La poutre contre-voile est scellée aux fondations des caves.
2. Création par plots alternés d'une poutre en dessous des fondations des bâtiments, dite poutre de reprise en sous-œuvre « poutre RSO ».
3. A partir de l'intérieure de la station, réalisation d'un linteau supérieure de reprise du tampon du tunnel et réalisation en deux plots successifs du poteau de reprise de la poutre RSO.
4. Injections en pourtour terrassement de la niche en méthode traditionnelle, avec un puits blindé et blindage en bois.
5. Ferrailage, coffrage et bétonnage de la niche.
6. Mise en contact entre la poutre RSO et la dalle de couverture de la niche.
7. Démolition du poteau provisoire de la reprise en sous-œuvre.



**Figure 6. Phases de réalisation de la poutre contre-voile et de la poutre RSO**

La conception de la méthodologie d'excavation s'est basée sur un contrôle de l'équilibre, afin que la descente de charge (DDC) soit toujours reprise par un système suffisamment raide (un appui direct ou une poutre à flexion mais avec une portée limitée), cela pour limiter le plus possible les tassements en surface et donc au niveau des bâtiments sensibles.

## 5 Conception et dimensionnement de la reprise en sous-œuvre

Une poutre en béton armé de 30 cm d'épaisseur et 140 cm de haut a été réalisée contre les voiles/fondations des caves existantes pour permettre l'excavation nécessaire à la réalisation de la poutre RSO. Son principe de dimensionnement est assez simple : il s'agit de soutenir le poids des fondations existantes et de reprendre la descente de charge en flexion, avec une portée définie par la largeur du plot de la poutre RSO terrassé.

Pour que la charge puisse effectivement descendre au niveau de la poutre contre-voile, étant donnée son excentricité par rapport à l'axe des voiles à soutenir, une couture avec carottes ferraillées entre la poutre contre-voile et l'existant a été prévu. Les carottages ont été faits inclinés vers le bas, pour assurer à la fois un bon remplissage du béton mais aussi pour privilégier un comportement à la traction plutôt qu'à la flexion des éléments de couture.

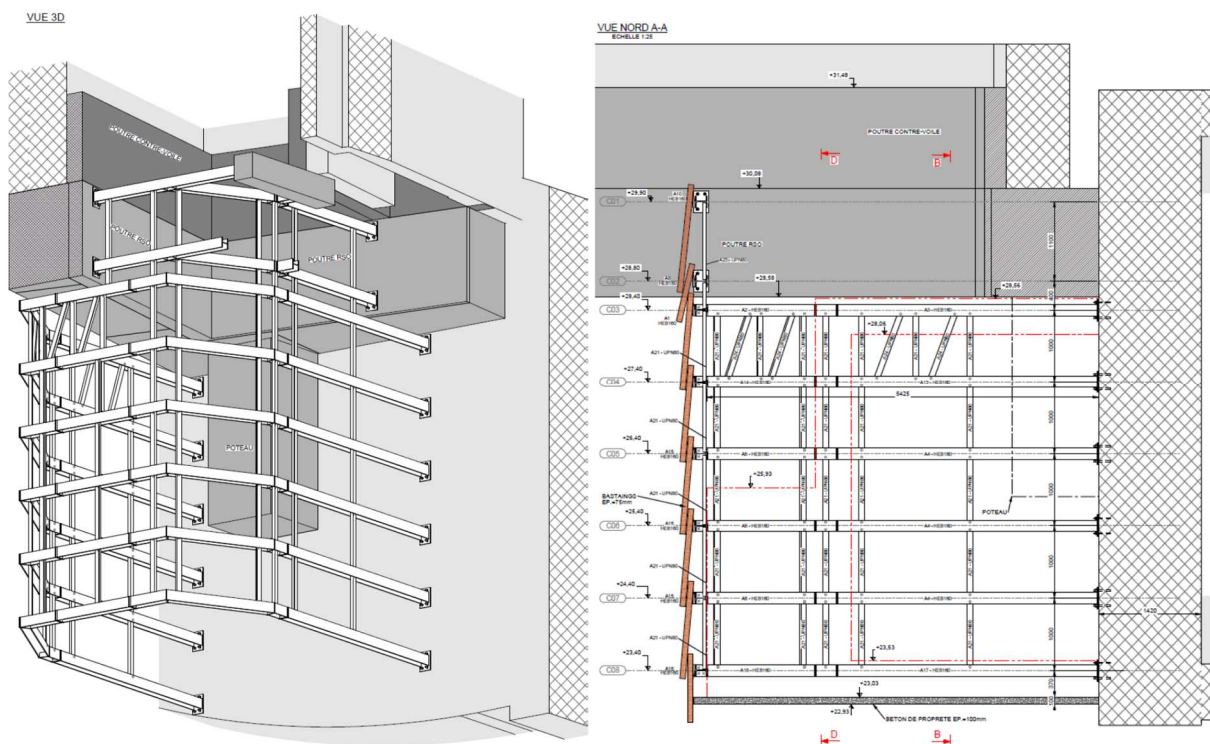


Figure 7. Vue 3D et coupe du système de poutres et du soutènement provisoires par cintres

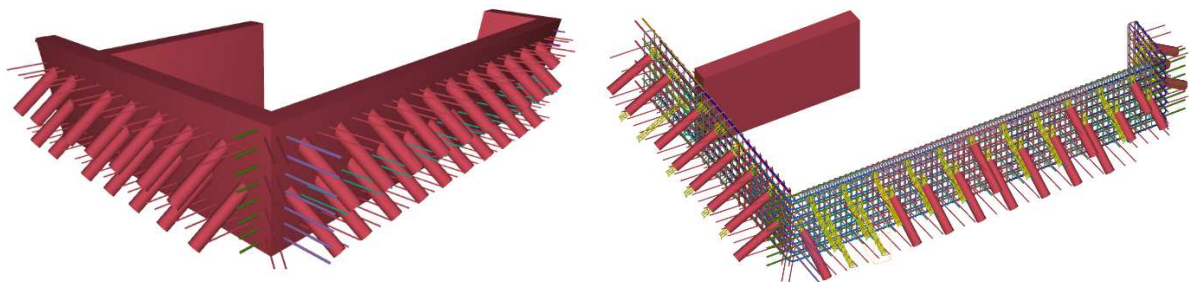
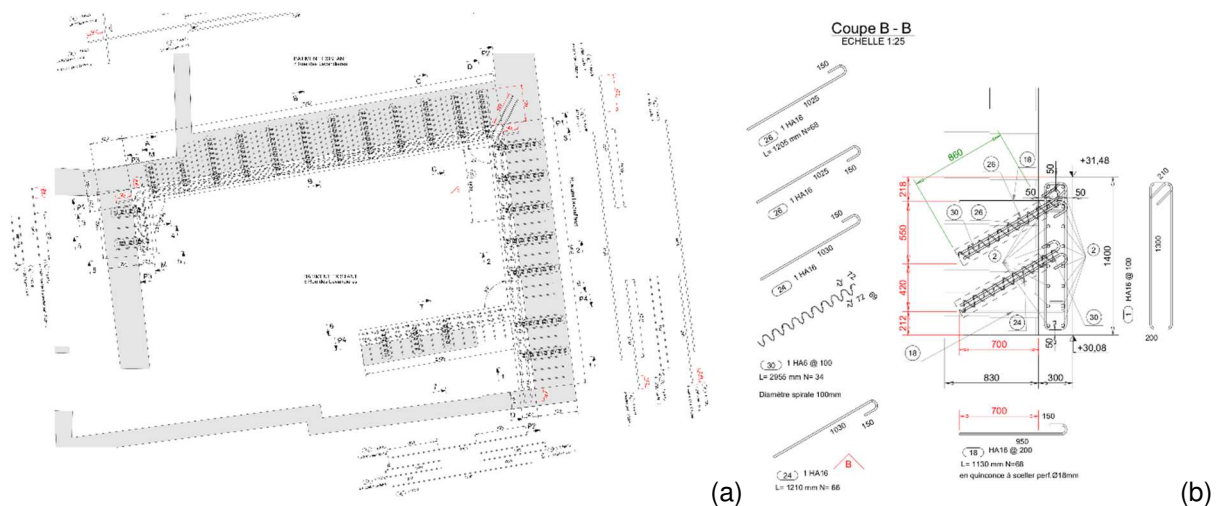
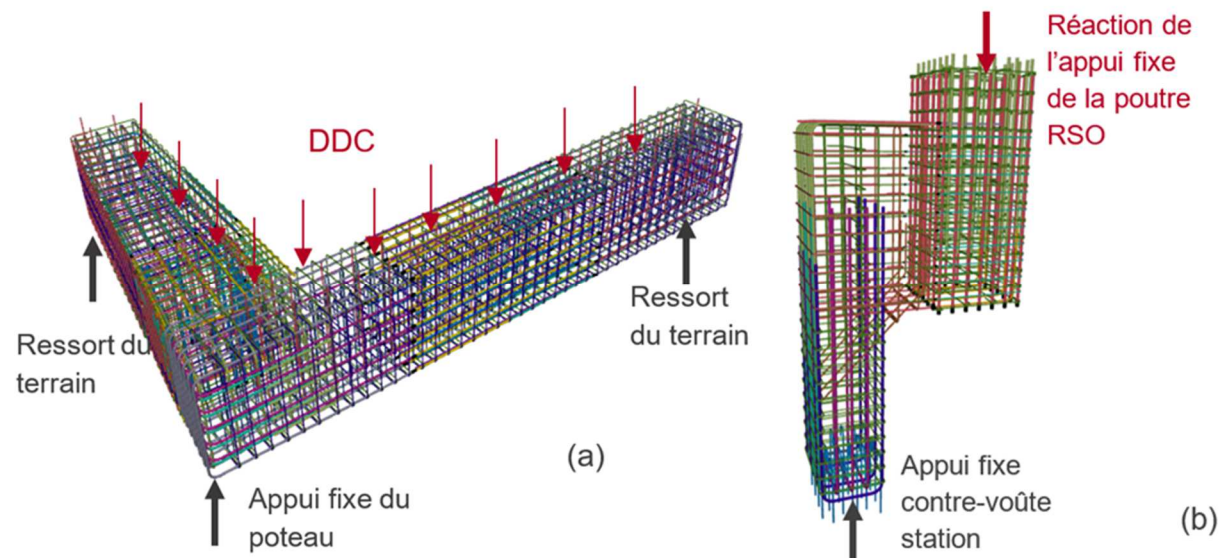


Figure 8. Vues 3D de la poutre contre-voile – Coffrage et ferrillage



**Figure 9. Vue en plan (a) et détail (b) de la couture entre la poutre contre-voile et les fondations existantes**

A la suite de la réalisation de la poutre contre-voile, la réalisation de poutre de prise en sous-œuvre proprement dite, en béton armé, dite poutre RSO a été démarré. Elle a été démarrée dans la zone d'angle, car l'étape suivante aurait été la construction du poteau, à partir de la Station. Finalement la poutre RSO est une poutre sur trois appuis, dont un quasiment fixe, au niveau de l'angle (en raison de la présence du poteau) et deux sur ressorts élasto-plastique (appui de la poutre au niveau du terrain non terrassé).



**Figure 10. Poutre RSO (a) et poteau (b)**

La poutre est bétonnée en 4 plots. L'accès en dessous des fondations des bâtiments a été fait avec des puits blindé boisés. Pendant le terrassement d'un puits, la poutre contre-voile a garantie la tenue des fondations. La continuité de ferrailage entre un plot et le suivant est assurée avec la mise en place de manchons simple écrou. Au niveau du plot d'angle, des attentes vers le bas avec manchons ont été englobés dans le bétonnage pour liaisonner la poutre RSO avec le poteau par la suite.

La poutre RSO est, en plan, l'ensemble de deux poutres : une à l'axe du voile et donc des fondations séparant les deux bâtiments, plus chargée, et une contre le voile tampon de la Station, reprenant la DDC de la façade du bâtiment n°5. La partie 2 de la poutre RSO a été très importante en phase provisoire en raison du contact horizontal assuré avec le voile tampon du tunnel existant. Ce contact a fourni un appui et donc un blocage à la rotation de la poutre (torsion induite par l'excentricité du poteau).

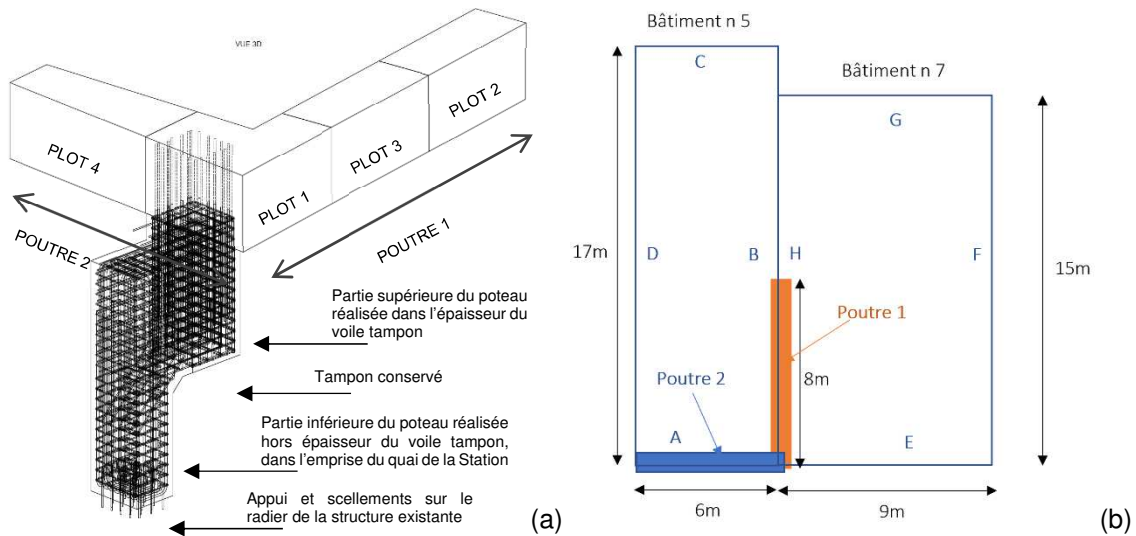


Figure 11. Décomposition par plots de la poutre RSO (a) et vue en plan de la poutre RSO avec poutre RSO 1 et poutre RSO 2 (b)

Compte tenu de la difficulté d'estimer précisément la descente de charge des bâtiments, deux schémas ont été considéré, un plus défavorable pour la poutre entre les deux bâtiments, et un plus défavorable pour la poutre en dessous de la façade du bâtiment n°5.

Tableau 2. Descente de charge sur poutre RSO

| DDC      | Poutre 1                                 |  | Poutre 2                                 |  |
|----------|--|--|--|--|
|          | Charges permanentes<br>$G_{perm}$ [kN/m] | Charges d'exploitation<br>$Q_{exp}$ [kN/m] | Charges permanentes<br>$G_{perm}$ [kN/m] | Charges d'exploitation<br>$Q_{exp}$ [kN/m] |
| Schéma 1 | 677                                      | 128  | 110                                      | 0  |
| Schéma 2 | 526                                      | 64   | 261                                      | 64   |

Le poteau est réalisé avec un décroché pour éviter les possibles venus d'eau de nappe des Alluvions Anciennes. La partie supérieure du poteau, du niveau 25, 80m NGF jusqu'à l'arase inférieure de la poutre RSO (+28,58 m NGF) ont été construite à l'aplomb de la poutre RSO avec une démolition complète du voile tampon de la Station.

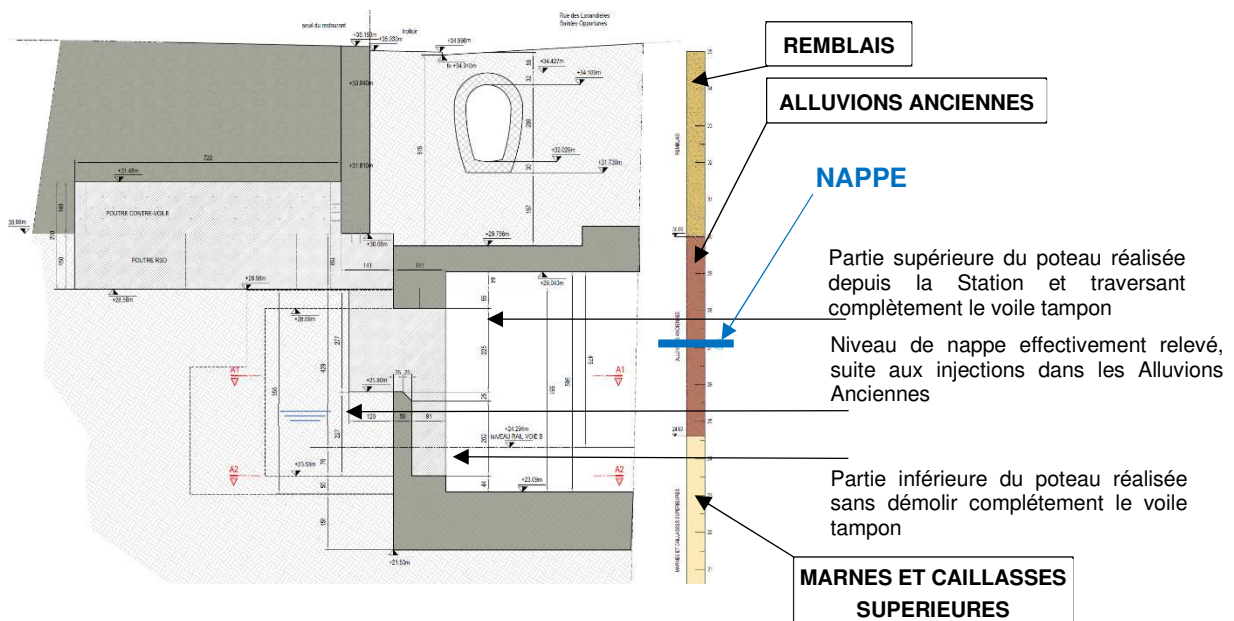


Figure 12. Vue en coupe du système de reprise en sous-œuvre



## 6 Modélisation du puits blindé de la niche

Le terrassement du puits a été effectué en méthode traditionnelle (cintres et bastaings). La sensibilité des bâtiments sus-jacents a requis la réalisation d'un modèle avancé pour évaluer l'impact en termes de tassements potentiels. La géométrie très particulière a conduit à un modèle aux éléments finis 3D réalisés avec PLAXIS. Ce modèle a par ailleurs permis d'optimiser la taille des cintres en HEB 160 après un calcul de sensibilité, ce qui a grandement facilité la manutention dans cet espace restreint.

Le comportement mécanique des couches de sol est simulé par une loi élasto-plastique non-linéaire avec écoulement avec un critère de rupture de Mohr-Coulomb (loi de type HSM). Le maillage du modèle a été réalisé en utilisant des éléments tridimensionnels à 10 nœuds. Il comprend 270 000 nœuds et 195 000 éléments environ. Le maillage a été raffiné autour de la zone de travaux de l'excavation du puits d'accès. Du fait de l'injection préalable, la nappe n'a pas été considérée pendant les phases de terrassement mais a été réintroduite en phase finale pour l'évaluation des sollicitations dans le coffrage définitif.

Le modèle comprend la modélisation de la structure de la gare (20 derniers mètres) et le génie civil définitif de la niche. Les voiles des caves des bâtiments ont également été modélisés de façon simplifiée. Le poids des bâtiments a été intégré sous forme de surcharge pour simplifier, la rigidité apportée par les voûtes n'a pas été prise en compte.

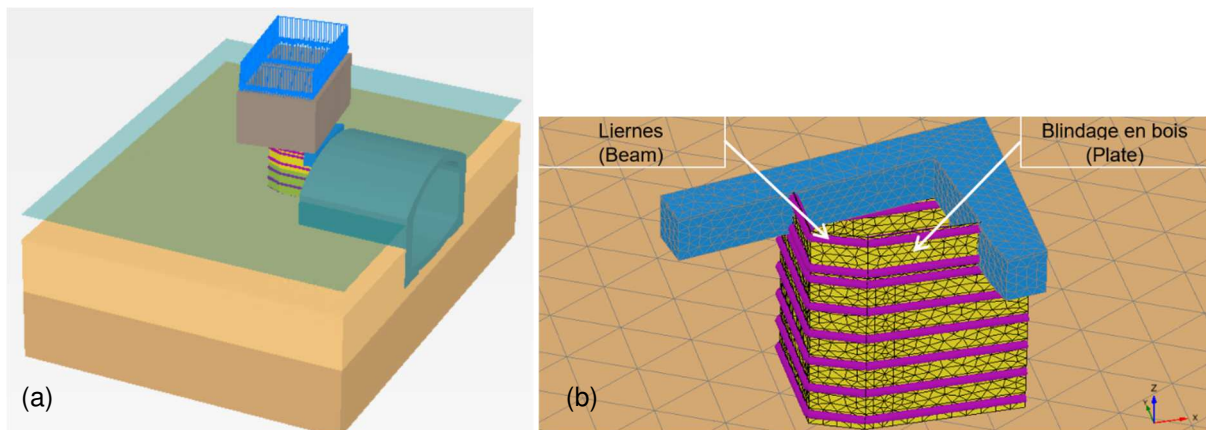


Figure 13. Vue des différents éléments du modèle (a) et modélisation du blindage (b)

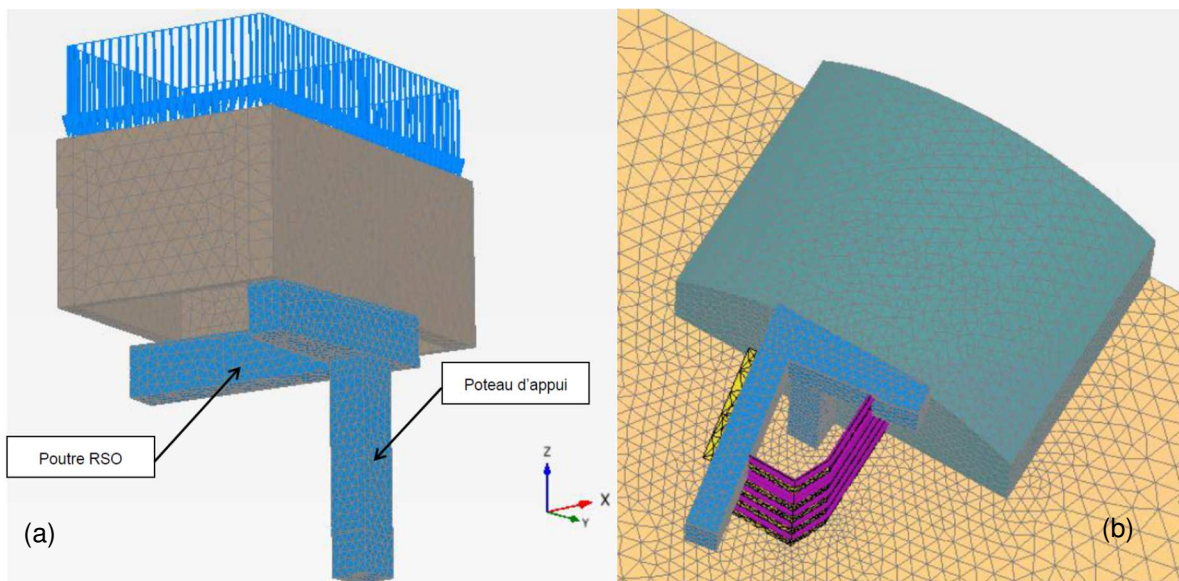


Figure 14. Vue du système RSO et simplification des structures sus-jacentes (a) et vue en phase finalement de terrassement (b)

En fin de travaux, les tassements calculés en surface restent limités à une valeur maximale un peu supérieure à 2 mm et restent admissibles. Les cuvettes de tassements en surface reflètent bien la forte dissymétrie du modèle.

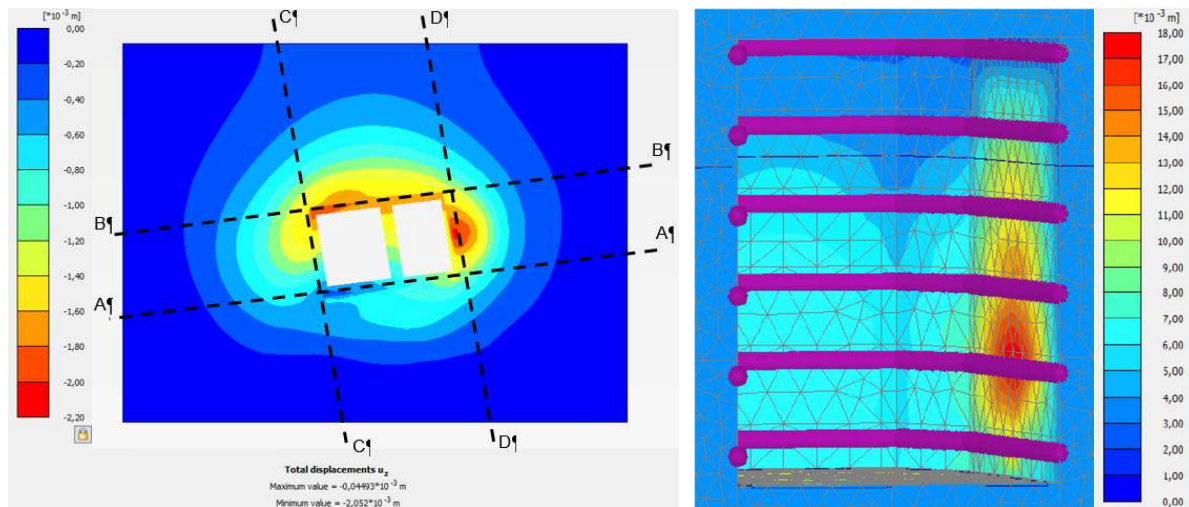


Figure 15. Cartographie des tassements en surface et déplacement des soutènements en phase finale

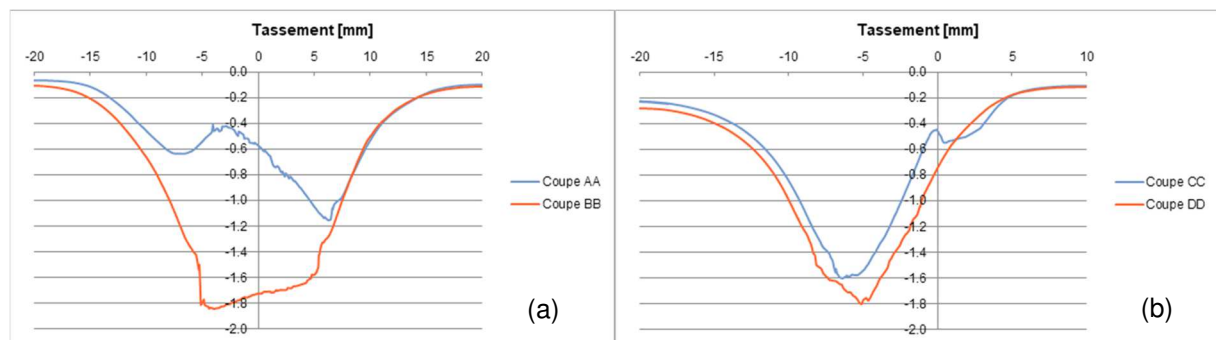


Figure 16. Cuvette de tassements des coupes : a) AA et BB (direction perpendiculaire à l'axe du tunnel) b) CC et DD (direction de l'axe du tunnel)

Concernant les structures, les déplacements calculés sont inférieurs au mm pour le revêtement de la station et de 4 mm pour les murs des deux bâtiments.

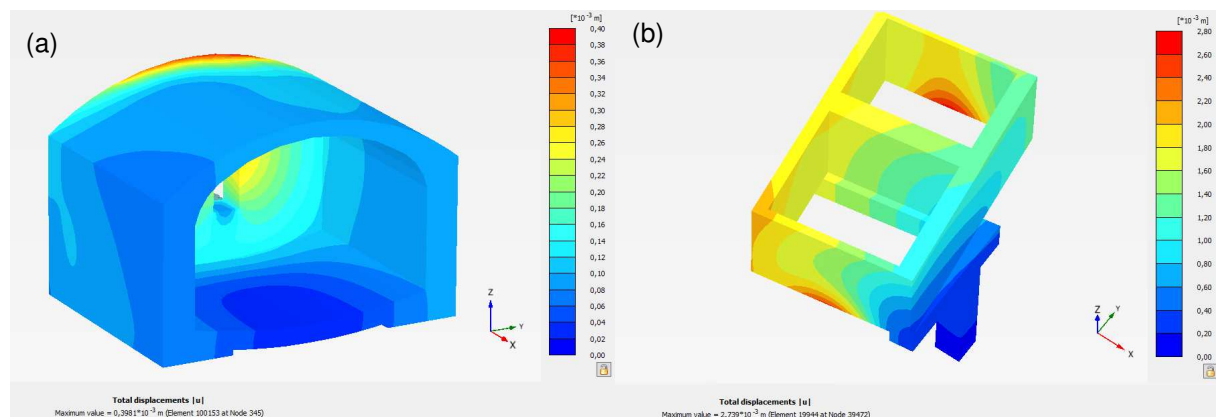


Figure 17. Champs de déplacement : a) dans le tunnel existant, b) dans les murs, poutre RSO et le poteau d'appui

Les déplacements calculés compte tenu des poussées appliquées sur les cintres sont limités à 18 mm. Les sollicitations tangentiales pour les portées les plus grandes 240 MPa. Compte tenu des simplifications effectuées et incertitudes sur ce genre de modèle complexe, la nuance supérieure pour les cintres a été retenue (S355). Des bastaings de 63 mm d'épaisseur ont pu par ailleurs être justifiés.

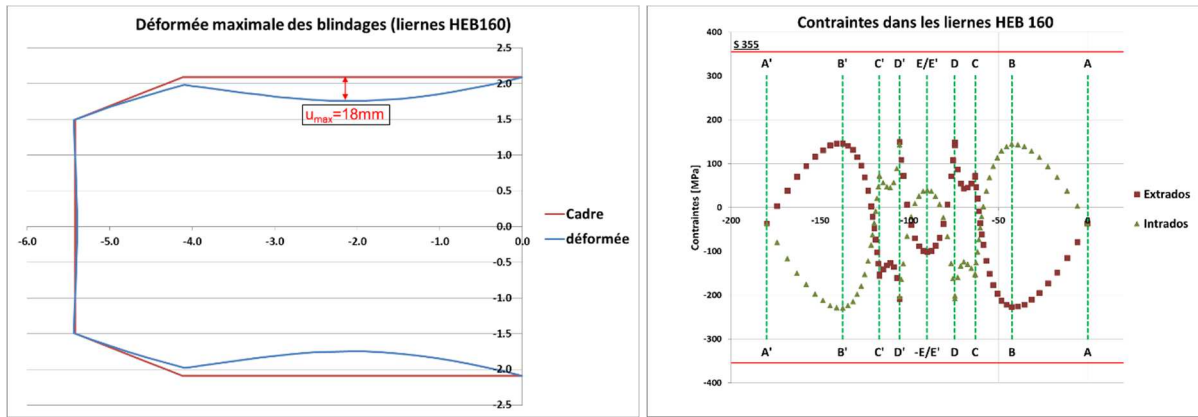


Figure 18. Déformée maximale des liernes et sollicitations

## 7 Revêtement définitif en béton armé et découpe du poteau RSO

La niche a été complétée avec un revêtement définitif en béton armé. Cette structure a d'abord englobé le système de reprise en sous-œuvre en phase provisoire et, un fois le poteau découpé, a assuré la tenue de la charge provenant des bâtiments existants. La mise en contact entre la dalle de couverture et l'arase inférieure de la poutre RSO avant la découpe du poteau a permis une mise en charge quasiment immédiate de la structure lors de la démolition du poteau, sans constater de tassements significatifs au niveau des bâtiments.

Les dalles et les voiles ont été modélisés dans leur plan moyen par l'intermédiaire d'éléments de type « shell » (éléments coque avec comportement en accord avec la théorie de Mindlin). Le logiciel aux éléments finis utilisé est SOFISTIK 2018, développé par SOFISTIK AG.

Le terrain a été modélisé avec des ressorts élastiques de raideur  $K_s$  réagissant seulement lorsque le sol est comprimé. Les charges appliquées sont celle tirées du modèle PLAXIS 3D.

L'épaisseur des éléments est de 50 cm. Le massif du heurtoir a été modélisé comme un voile de 150 cm d'épaisseur, solidarisé avec le voile de 50 cm au bout du cul de sac (liens en jaune dans l'illustration ci-dessous).

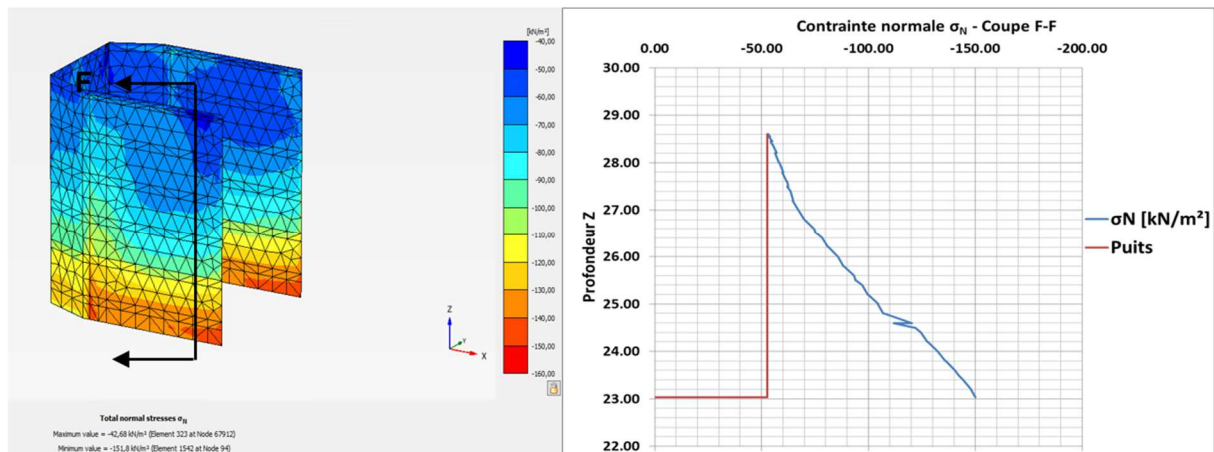


Figure 19. Poussées tirées du modèle PLAXIS 3D sur le revêtement définitif

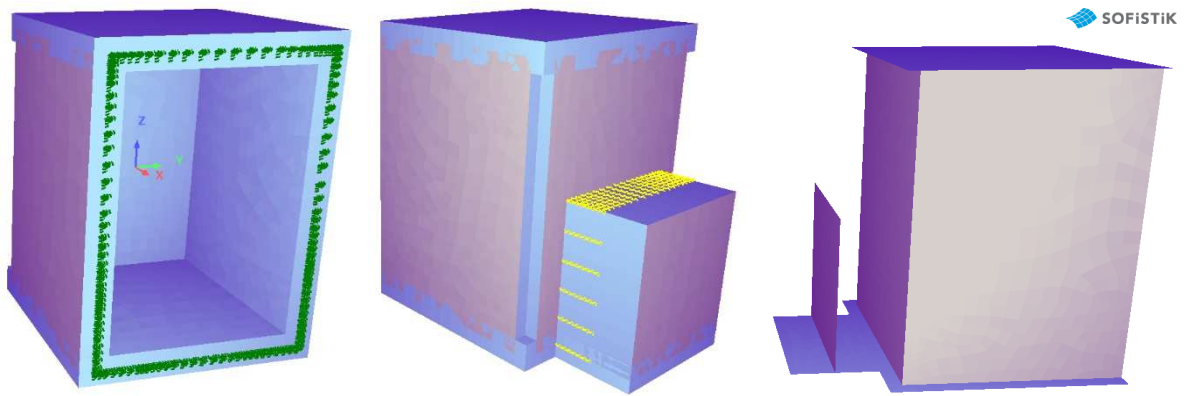


Figure 20. Modélisation 3D du revêtement définitif en béton armé

## 8 Suivi des tassements en phase travaux

Des auscultations ont été suivies de façon quotidienne du début à la fin des travaux, entre début juillet et fin août 2019. Une fois la structure RSO réalisée, le terrassement sous soutènement traditionnel a été rapide à la mise en œuvre, avec une passe de terrassement suivi de la pose des profilés par jour. Les photos suivantes illustrent cette phase de terrassement fin juillet 2019.



Figure 21. Photos du chantier lors du terrassement le 23/07/2019.

Les résultats des auscultations ont été recensés sur une plateforme permettant de suivre leur évolution quotidiennement et de vérifier ainsi le bon déroulement des travaux et le respect des seuils d'alarmes défini dans la procédure. Elles étaient composées de 5 types d'instruments :

- ✦ 11 points de nivellement pour mesurer les tassements ;
- ✦ 5 géophones pour mesurer les vibrations ;
- ✦ 3 inclinomètres pour mesurer les déplacements horizontaux ;
- ✦ 1 théodolite pour mesurer les convergences et tassement de la voute du tunnel ;
- 1 piézomètre pour mesurer le niveau d'eau en temps réel.

3 inclinomètres biaxiaux avaient par ailleurs été placés sur chaque façade des bâtiments n°3, 5 et 7 de afin de mesurer les déplacements de la façade suivant l'axe du bâtiment et suivant l'axe perpendiculaire au bâtiment.

Pour l'ouvrage très sensible du bâtiment n°5 rue des Lavandières, le seuil de vigilance en tassement absolu était de 5 mm et le seuil de vigilance en tassement différentiel était de 1 mm/m.

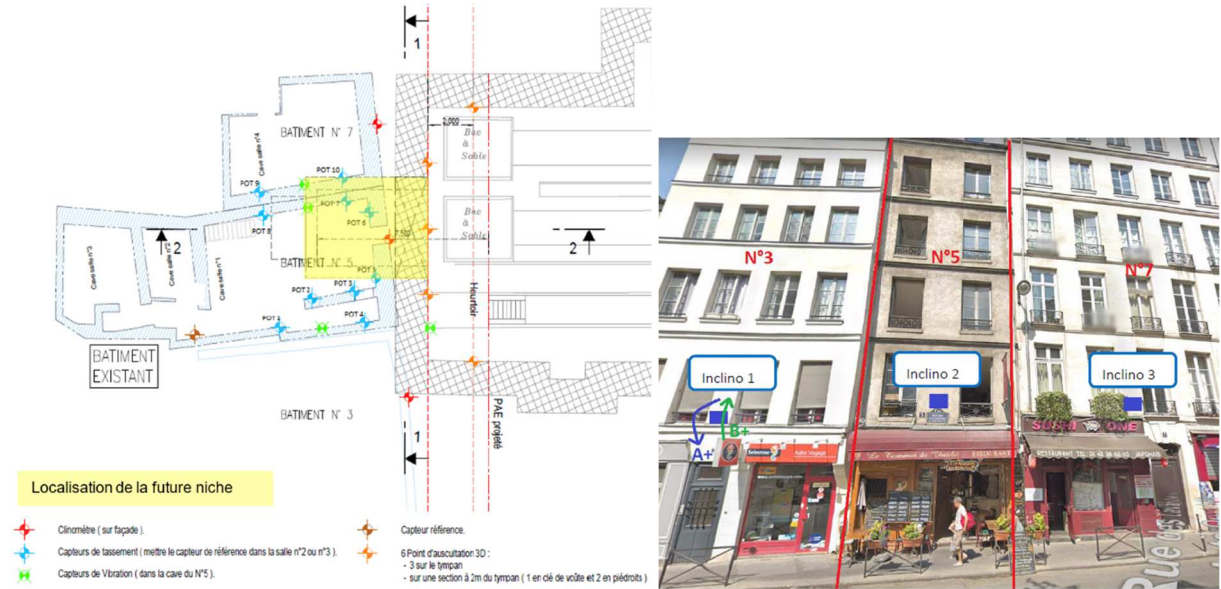


Figure 22. Position de l'instrumentation mise en place.

Quelques graphiques sont présentés ci-après à titre d'exemple. Ils illustrent le fait que pour les inclinomètres, les mesures sont restées largement en dessous des seuils, avec 0,04° pour le bâtiment n°3 (pour un seuil de vigilance fixé à 0,1°). On remarque au passage que la fluctuation de température des façades n'a pas eu d'impact sur ces basculements.



Figure 23. Mesures inclinométriques (a) et des cibles de nivellement sur structures des bâtiments (b).

Concernant le suivi des cibles sur structures, le tassement s'est élevé au maximum à 4,1 mm pour une cible située dans la fosse elle-même. Seule cette cible a présenté au final d'importantes variations et montre que le tassement augmente entre 18h et minuit, et diminue entre 6h et 18h. Le tassement augmente juste après excavation et pose du blindage ; régime permanent est atteint au bout de 6h environ après le terrassement. Les autres cibles ne présentent des variations que de l'ordre de 0,5 mm. L'ensemble est resté assez largement inférieur aux seuils sur toute la durée des terrassements.

En termes de tassements différentiels : hormis les valeurs douteuses de tassements différentiels relatifs au point 7 dont la variation temporelle de tassement absolu varie significativement, et ceux relatifs au point 8 dont la valeur de tassement absolu est liée une erreur de calibrage de l'appareil, l'écart maximal de tassements enregistré entre les différents pots de mesures et celui entre le point 1 et le point 2 avec un tassement différentiel maximal de 0,9 mm/m. Cette valeur reste toutefois inférieure au seuil défini de 1 mm/m.

Enfin, la structure de la station existante était également auscultée avec des cibles sur la voûte et sur le tympan. L'instrumentation a permis de montrer que les travaux n'ont pas eu d'impact significatif sur ces ouvrages.

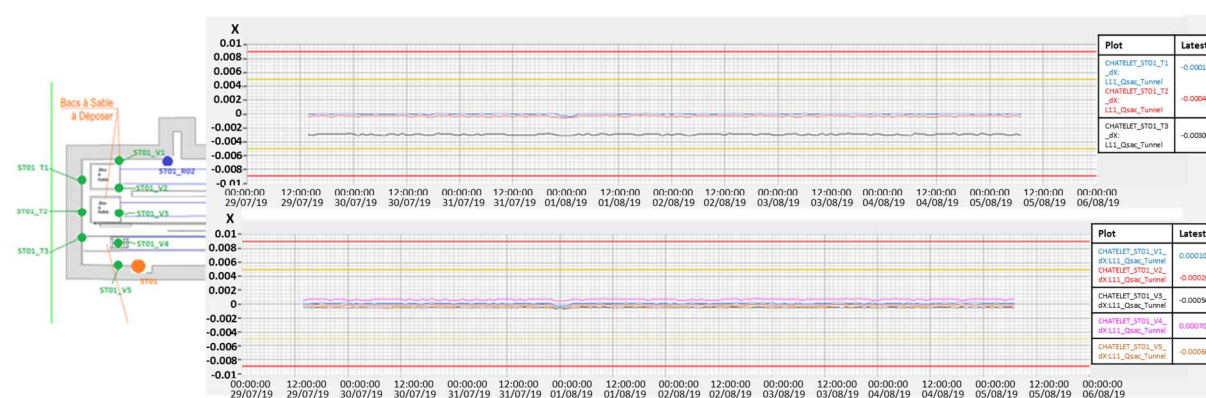


Figure 24. Mesures des cibles en voûte et au tympan de la station.

## 9 Conclusion

Le présent article s'est attaché à présenter le retour d'expérience d'un chantier de reprise en sous-œuvre certes de petites dimensions, mais à la haute technicité du fait des conditions de réalisation et de l'environnement contraint et particulièrement sensible.

Les études d'exécution réalisées en amont par Terrasol et Enser avaient pour objectif de réduire au maximum l'impact sur ces avoisinants, et de permettre également d'optimiser le soutènement du puits pour faciliter les manutentions du fait des accès. Du fait de la géométrie particulière, le calcul 3D d'interaction sol-structure et des calculs structures également 3D ont permis ces justifications et optimisations.

Chantier Modernes Construction a réalisé avec un planning contraint ces travaux en maîtrisant ces contraintes et avec au final des déplacements extrêmement contenus, n'engageant pas la vulnérabilité des bâtis sus-jacents.

## 10 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