

Newsletter Soletanche Bachy France - N°55 - juin 2021

Édito

À la une de cette newsletter de juin 2021, le chantier de la gare du Vert de Maisons, sur le lot T2A du Grand Paris Express.

Les excavations traditionnelles ont démarré et nous surveillons le mouvement des bâtis en surface. Des injections de compensation pourront être mises en œuvre, en cas de dépassement des seuils.

Les derniers travaux préparatoires sont également en cours, avant la congélation des Sables de Beauchamp qui devrait débiter à la fin de l'été.



Très bonne lecture,
Stéphane Monleau
Directeur commercial

À la une

Ligne 15 Sud - lot T2A, gare du Vert de Maisons

Un nouveau point d'étape a été franchi en début d'année sur le chantier de la gare du Vert de Maisons avec l'arrivée des excavations traditionnelles. Cette nouvelle activité vient s'insérer parmi les travaux toujours en cours de Génie Civil (planchers et voiles de la gare), du tunnel (creusement jusqu'à Créteil l'Echat) et des travaux spéciaux (compensation et congélation).

Les premiers creusements sont ceux des couloirs latéraux, réalisés depuis le fond de la gare, de part et d'autre du tunnel déjà passé. Il s'agit de deux couloirs de 65 m de long et de 8 m de diamètre permettant, dans un premier temps, de réaliser des piédroits de renfort pour l'excavation de la caverne (qui consiste en un réalésage du tunnel sur 70 m de long pour créer une partie des quais), puis à terme de desservir les futurs quais de la gare.





L'excavation de site dans les Marnes et Caillasses et le Calcaire Grossier, préalablement injectés depuis la surface de 2017 à 2019. Les Sables de Beauchamp, horizon non injectable situé au-dessus des Marnes et Caillasses, sont suffisamment éloignés des couloirs latéraux et ne nécessitent donc pas encore d'être congelés. Les travaux spéciaux sont tout de même sur le front, puisque le dispositif de compensation des tassements des bâtiments en surface est actif.

Le mouvement des bâtis est suivi en temps réel, afin de venir compenser au besoin, par injection de coulis à 5 m sous la surface dans les alluvions, les tassements induits par les excavations en profondeur sur le bâti en surface. À ce jour, aucune injection n'a été réalisée, ce qui est conforme avec les prévisions de tassements estimées par le calcul.

Les travaux spéciaux œuvrent également à la préparation de la congélation des Sables de Beauchamp, nécessaire pour la suite des excavations traditionnelles (excavation de la caverne, futurs quais, et des galeries d'accès aux quais). La fin des travaux se précise, mais il reste encore quelques étapes importantes.

La mise en place des congélateurs (deux tubes concentriques en inox liaisons sur site par soudure ou sertissage) au sein des tubes forés depuis la paroi Est de la boîte gare s'est terminée en fin d'année 2020. Les 192 congélateurs, représentant un linéaire d'environ 5 000 m, ont été équipés sans difficultés, notamment dans les forages contrôlés profonds de 80 m. La fin de l'équipement des congélateurs s'est poursuivie par la pose du circuit de distribution de saumure. Ce réseau calorifugé permet d'assurer le cheminement en circuit fermé du fluide frigorigène (de la saumure à -35°C) de l'installation de froid en

surface du chantier vers les congélateurs dans les différents niveaux souterrains de la gare. Le réseau est instrumenté de vannes, débitmètres, capteurs de pression et de température donnant des informations importantes pour le pilotage de la congélation. **Ces travaux sous-traités ont débuté en février et sont en passe de se terminer.**

Une dernière phase de forage est en cours :

il s'agit des forages de sondes de température depuis le tunnel. L'objectif est de forer, depuis la voûte du tunnel, 12 forages auréolaires de 10 m passant entre les forages contrôlés réalisés l'été dernier à quelques mètres au-dessus du tunnel (destinés à la congélation des Sables de Beauchamp à proximité immédiate de la future caverne). Ces forages sont des tubes perdus, équipés par la suite de capteurs de température permettant de suivre l'évolution des températures dans le massif congelé.



Le planning des travaux d'excavation de la caverne (réalésage du tunnel à l'abri de la congélation de Sables de Beauchamp) impose la mise en place de ces sondes, alors que le tunnelier est encore en creusement sur la section. Il a donc fallu concevoir une plate-forme spécifique permettant, au-dessus, la mise en place d'un atelier de forage et, en-dessous, le passage des engins et fournitures pour le fonctionnement du tunnelier.

La plate-forme de forage, assemblée préalablement en surface du site, a pu être descendue en fond de puits à travers les trémies des dalles souterraines et acheminée dans le tunnel. Les forages sous sas sont réalisés avec une MC4D configurée pour forer du bas vers le haut, avec un atelier réduit au strict minimum sur l'espace réduit de la plate-forme (40 m²). La centrale d'injection est installée dans la gare en dehors des activités traditionnelles.

Les travaux préparatoires dans le tunnel ont débuté dans le courant du mois d'avril et la perforation le 27 avril. L'environnement particulier de ces travaux (tunnel borgne) demande une formation spécifique et des dispositifs de prévention propres au tunnel pour l'ensemble du personnel. Cette activité se déroule particulièrement bien malgré l'environnement complexe, tant en termes de logistique sur la plate-forme qu'en termes de coactivité.

Enfin, il restera à installer les groupes froids en surface au droit d'une plate-forme étagée (en cours de montage), ainsi que l'ensemble des capteurs de



températures (dans les forages dédiés, le circuit de saumure et la paroi moulée) fournissant les données de température nécessaires au pilotage de la congélation.

Rendez-vous à la fin de l'été pour la mise en route de la congélation !

Nos chantiers

SNCF - Échangeur du Rondeau

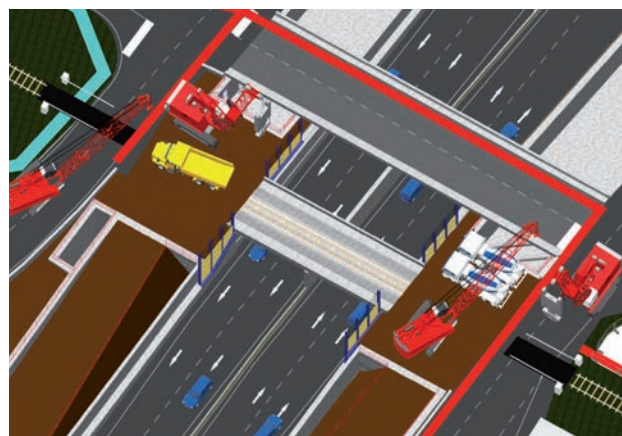
Les premiers coups de benne viennent d'être donnés sur le chantier DREAL du Rondeau à Grenoble.

Ce projet d'aménagement global permet notamment de passer de 2 x 2 voies à 2 x 3 voies une partie de la rocade Sud de Grenoble, la RN 87.

Au milieu du chantier DREAL, une voie SNCF (ligne de Lyon à Marseille via Grenoble) franchit la RN 87 ; le marché DREAL s'arrête de part et d'autre de cet ouvrage ferroviaire.

Le marché SNCF consiste à réaliser deux ouvrages de type Pont-Rail (PRA) pour permettre le franchissement inférieur de la voie ferrée par les futures bretelles routières de la RN 87.

La complexité de ce projet est forte :



- Zone de chantier étroite et contrainte (pentes)
- **Interfaces nombreuses** (techniques, planning) avec le chantier DREAL et avec la RN87 en circulation

- **Travaux spéciaux variés :**
 - o Parois moulées à 16 m (1000 m2) avec 2 ateliers KS complets en 3 postes pendant 3 week-ends de mars 2022
 - o Tirants d'ancrage
 - o Soutènement en micropieux jointifs
 - o Fond injecté
- **Génie civil** (tablier préfabriqué en poutrelles enrobées)
- **Terrassements en taupe** (sous butons et tablier), sous nappe

La SNCF a choisi l'offre du groupement Campenon Bernard Centre Est / Soletanche Bachy / Vinci Construction Terrassements) pour réaliser ces travaux.

Centre aquatique de Saint-Denis

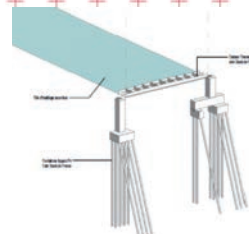
Dans le cadre des JO de Paris 2024, la ville de Saint-Denis accueillera dans le Centre Aquatique Olympique (CAO) les épreuves de natation. Ce Centre Aquatique est une conception-construction-exploitation assurée par le groupement Simbala, dont Bouygues est le mandataire. Il est situé en face du Stade de France, séparé à l'heure actuelle par l'autoroute A1 et l'avenue Wilson. Les concepteurs ont donc imaginé une passerelle piétonne permettant de relier le Stade de France et le CAO.



Projet urbain ambitieux, le centre aquatique, en configuration « olympique », répondra aux spécifications du CIO et pourra accueillir jusqu'à 6 000 spectateurs. Après les jeux, cet équipement sportif d'envergure internationale sera un lieu de rencontres et de pratique du sport accessible à tous et fera partie intégrante du paysage urbain de la Seine-Saint-Denis.

Les entités Ouvrages Publics et Travaux Publics de Bouygues Construction ont confié à Soletanche Bachy Fondations Spéciales les travaux de fondation du centre aquatique et de son ouvrage de franchissement qui enjambe l'autoroute A1.

L'ensemble reposera sur quelque 500 pieux de fondation Starsol® sur des gammes de diamètres allant de 52 cm à 102 cm. Le chantier débutera courant juin 2021 et nécessitera la mobilisation de 2 ateliers pendant 6 semaines.



Par ailleurs, Soletanche Bachy France a été retenu pour les travaux de fondation de l'une des piles de la passerelle, qui est située dans les sous-sols du Stade de France.

Au total, ce sont 24 micropieux qui serviront d'appuis à la passerelle, avec la contrainte de ne pas occasionner d'efforts parasites sur les fondations existantes du stade. Soletanche Bachy France mobilisera une foreuse Hi'drill® au mois de septembre, pour réaliser les travaux avant la reprise d'évènements festifs dans le stade.

Ouistreham



La grande écluse du port de Ouistreham est la porte de sortie vers la Manche pour l'activité céréalière de la Basse-Normandie et du port de Caen.

L'ouvrage est exploité par Ports de Normandie qui est en charge des ports de Dieppe, Caen et Cherbourg. Début 2019, un déplacement de l'écluse a été observé par Ports de Normandie, l'obligeant à réduire l'utilisation de l'écluse uniquement pendant les périodes où l'écart entre le niveau du canal et celui de la mer n'est pas trop important.

Ports de Normandie a donc chargé le groupement mené par Soletanche Bachy d'injecter le massif de l'écluse, afin de consolider les remblais existants, et de forer également 16 micropieux type 4, afin de renforcer les fondations existantes. Une auscultation automatique des déplacements de l'ouvrage fait également partie du marché.

La campagne d'injection et le micropieu d'essai (à l'extérieur de l'ouvrage) se sont déroulés durant le mois de mars.

Les micropieux sont chemisés sur la hauteur du massif de l'écluse et des argiles altérées. Equipés d'un sac séparateur, les chemisages sont scellés au massif en excluant donc la couche d'argile. Une fois les chemisages réalisés, les micropieux sont alors forés à l'intérieur de ces derniers.

SDEP Champigny



Après une phase de travaux préparatoires, le groupement fondation mené par Soletanche Bachy a démarré fin mars la paroi moulée de l'ouvrage principal de la Station de Dépollution des Eaux Pluviales de Champigny-sur-Marne.

L'ouvrage est un bilobe constitué de deux cylindres entremêlés de 36 m de profondeur et d'un refend central de 30 m de profondeur. A l'intérieur du bilobe, 20 barrettes, de 31 m de profondeur, constitueront les futurs poteaux de la station.

Le chantier mobilise une quarantaine de personnes travaillant en deux postes qui bétonnent au rythme de 1 panneau par jour (plus de 1 000 m³ de béton par semaine).

+ Le forage est assuré par deux bennes hydrauliques KS qui traversent les alluvions modernes et anciennes, une faible couche de Calcaire Grossier altéré, les sables de l'Yprésien, les Fausses Glaises, pour venir ancrer la paroi dans les Argiles Plastiques. L'équipe du chantier a pu tester le nouveau KS « intelligent » développé. Ce nouveau KS est équipé de volets hydrauliques pilotés par l'opérateur depuis sa cabine. Ces volets permettent de corriger les déviations en instantané sans avoir à remonter l'outil et déployer les volets manuellement. Ce nouveau dispositif améliore les rendements et la qualité des excavations.

Les travaux de paroi moulée et barrettes se sont achevés fin mai.

Après cet ouvrage, le groupement fondation réalisera deux ouvrages annexes en paroi moulée : l'ouvrage de prise d'eau Lénine de juin à juillet 2021 et l'ouvrage de prise d'eau La Plage de septembre à novembre 2021.

Port 2000 Phase III



Après 10 mois de travaux, dont 8 réalisés en trois postes, les équipes de Soletanche Bachy France ont achevé avec succès la paroi moulée du quai, les parois coulis de l'enceinte étanche et les puits de pompage pour le rabattement de nappe. Point non négligeable, les travaux de paroi moulée se sont achevés avec la réalisation des barrettes de fondation des deux Ducs d'Albe, comprenant des levages complexes avec près de 70 t de cages asymétriques à liaisonner pour chaque barrette.

Cette première phase de travaux représente un jalon important, qui aura permis aux équipes de génie civil de commencer leurs travaux en début d'année. Ces travaux co-traités sont maintenant à mi-chemin pour un achèvement au courant de l'été.

La deuxième phase majeure des travaux pour Soletanche Bachy vient de démarrer ce 17 mai avec le terrassement en masse sur près de 18 m de profondeur pour la réalisation du rideau arrière.

Ce rideau en palplanches sera liaisonné à la paroi moulée du quai par un double lit de tirants passifs inclinés. Ces travaux de battage sont sous-traités à Balineau dont les équipes démarreront à l'été.

En parallèle, les terrassements des 50 ha de terre-plein sont arrivés à leur fin sur les zones disponibles, les stocks de matériaux sains pour réutilisation en remblais du quai étant à leur pic. La logistique liée au tri et au réemploi des matériaux, pour éviter tout apport extérieur, continue donc sur les 2,5 millions de m³ de terres manipulées lors des travaux terrestres.



Les travaux de déconstruction de la digue d'enclosure débuteront, quant à eux, en octobre, avec la première mise en eau. Les équipes travaux préparent ainsi les travaux annexes qui permettront de lancer cette activité sereinement (digue provisoire avec noyau paroi coulis, mise en place des appareils, interfaces maritimes, ...).

Le prochain point travaux sera l'occasion d'aborder les travaux maritimes avec les dragages et la protection anti-affouillement.

Échangeur du Rondeau



L'échangeur du Rondeau qui raccorde la rocade Sud de Grenoble au barreau autoroutier A480 (Lyon-Sisteron) est bien connu des automobilistes du bassin grenoblois, comme le point dur de la circulation pendulaire, avec près de 100 000 véhicules par jour. Pour fluidifier la circulation locale et améliorer le transit à travers l'agglomération, l'Etat, la Métropole et AREA (l'opérateur autoroutier) se sont engagés dans un programme d'investissement important comprenant la mise à 2x3 voies de l'autoroute et la refonte complète de l'échangeur avec la Rociade.

Dans ce cadre, la DREAL a confié au groupement Campenon Bernard Centre-Est / Soletanche Bachy France / Soletanche Bachy Fondations Spéciales / Vinci Construction Terrassement / Sogea / Eurovia, le marché

d'aménagement de l'échangeur. Le projet prévoit de séparer du trafic local les flux de transits, en enterrant les voiries principales dans une tranchée couverte, tandis que les échanges locaux se feront sur la dalle de couverture. Cet aménagement permettra également de recréer une continuité urbaine entre les villes de Grenoble et d'Echirolles via une nouvelle esplanade paysagère et d'améliorer les axes de circulation cyclables et piétons.

Concrètement, les travaux comprennent la réalisation d'une tranchée couverte de 295 m de longueur, à l'abri de parois moulées, qui se prolonge en tranchée ouverte et recoupe trois ouvrages existants (deux ponts routiers et un ouvrage SNCF). Le marché intègre également l'assainissement des voiries (incluant un bassin d'orage en paroi moulée), les chaussées, et une partie des équipements routiers.

La paroi moulée d'épaisseur 50 cm sera réalisée au KS et descendue à une quinzaine de mètres de profondeur dans les alluvions sablo-graveleuses du Drac. Elle représente environ 21 000 m² de surface excavée.

La dalle de couverture de la tranchée couverte sera réalisée sur terre-plein avant terrassement en taupe. Dans la zone en tranchée ouverte, la paroi est appuyée par un lit d'ancrage passif. Localement, les parois moulées sont remplacées par des parois de pieux sécants pour des questions de méthodologie et de planning (4 600 m de pieux au total).

Le terrassement de l'ouvrage sera ensuite réalisé sous 2 m de charges d'eau, dans les alluvions fluviales très perméables. Un fond injecté sera donc réalisé préalablement (29 000 m de forage, 4 300 m³ de coulis).

Les travaux spéciaux mobiliseront une soixantaine de personnes en pointe et s'étaleront de manière assez continue jusqu'au printemps 2022. Les terrassements et le génie civil se poursuivront, quant à eux, jusqu'à l'été 2024.

Outre la maîtrise des terrassements sous nappe, la principale difficulté du projet réside dans le phasage du projet. Il faut en effet réaliser ces opérations tout en maintenant en permanence la circulation routière à 2x2 voies sur la rocade. Les travaux sont donc réalisés en pianotant sur une dizaine d'emprises différentes et en déplaçant les chaussées, bretelles et réseaux, au gré de l'avancement des ateliers. Pour assurer la parfaite continuité des travaux, un travail de coordination et d'organisation minutieux est nécessaire entre les différents corps de métiers du groupement.

Depuis mi-avril, les équipes fondations sont mobilisées avec celles des terrassiers, de jour comme de nuit, pour réaliser les installations générales, les modifications de voiries, le montage des centrales et créer les plates-formes provisoires en surplomb des chaussées circulées. Les premiers coups de bennes sont prévus à partir de début juin, tandis que la première foreuse est attendue pour le mois d'août.



Notre expertise

Tassements derrière un écran de soutènement : comparaison entre mesures et modèles

Settlements behind a retaining wall: comparisons between measurements and models

Tomasz DAKTERA ^{1,2}, Emmanuel BOURGEOIS ²,
Pierre SCHMITT¹, Thierry JEANMAIRE ¹, Nicolas UTTER ¹,
Philippe GOTTELAND ³

¹ Soletanche Bachy, Rueil Malmaison, France

² COSYS-LISIS, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-77454
Marne-la-Vallée, France

³ Fédération Nationale des Travaux Publics, Paris, France

Résumé

Les soutènements des futures stations de métro du Grand Paris Express sont des parois moulées avec des hauteurs de terrassement allant jusqu'à 30 m. Lors de la construction de la gare de Créteil L'Echat, les déplacements horizontaux des parois et les tassements derrière la paroi ont été mesurés. On présente les résultats et on les compare aux modèles prédictifs.

Abstract

The stations of the Grand Paris Express project are enclosed with diaphragm walls with excavation depths up to 30 m. During the construction of the Créteil L'Echat station, horizontal displacements of the walls as well as settlements behind the wall have been monitored. This communication presents the results and compares them with predictive models.

1 • Introduction

Les soutènements des gares de la Ligne 15 du Grand Paris Express sont des parois moulées, avec des hauteurs de terrassement allant jusqu'à 30 m.

Le terrassement de l'intérieur des gares cause des déplacements horizontaux des parois et des tassements de surface derrière l'écran, qui peuvent avoir un impact sur les ouvrages avoisinants pour les gares implantées dans des zones fortement urbanisées.

Différentes techniques complémentaires et relativement classiques permettent de mesurer les déplacements horizontaux à l'aide d'instruments ou de cibles installés sur (ou dans) les parois ou les butons. En revanche, le

suivi des déplacements verticaux du sol derrière l'écran est plus difficile car la surface du sol n'est pas toujours accessible en raison de l'exécution des travaux et est souvent partiellement masquée.

Cet article concerne la construction de la gare Créteil L'Echat. Pour ce site, la profondeur d'excavation est de 28 m, la paroi moulée, d'une épaisseur de 1,2 m, est retenue par trois lits de butons métalliques.

Les instrumentations mises en place sont :

- des inclinomètres dans les parois moulées,
- des cibles topographiques sur les parois,
- des extensomètres à cordes vibrantes sur les butons.

En complément, un inclinomètre horizontal de type Shape Accel Array (SAA) de 30 m de long a été enterré dans une tranchée perpendiculaire à la paroi pour mesurer les tassements autour de la fouille dus aux terrassements.

Cet article rappelle le principe de la mesure puis présente différents aspects de la mise en œuvre du SAA : son installation, les problématiques de chantier et le traitement des données. On compare les mesures avec les résultats de deux approches de calcul : une méthode semi-empirique et des modélisations numériques par éléments finis.

2 • La gare Créteil L'Echat

2.1 Généralités

La Figure 1 présente le plan de la gare et les instrumentations mises en place. La gare comporte une petite boîte, une boîte centrale et une boîte réalisée en taupe.

Légende

- P10 Inclinomètre P10
- ShapeAccelArray (SAA)
- Cibles topographiques
- Buton métallique instrumenté d'extensomètres
- S10 Section de calcul

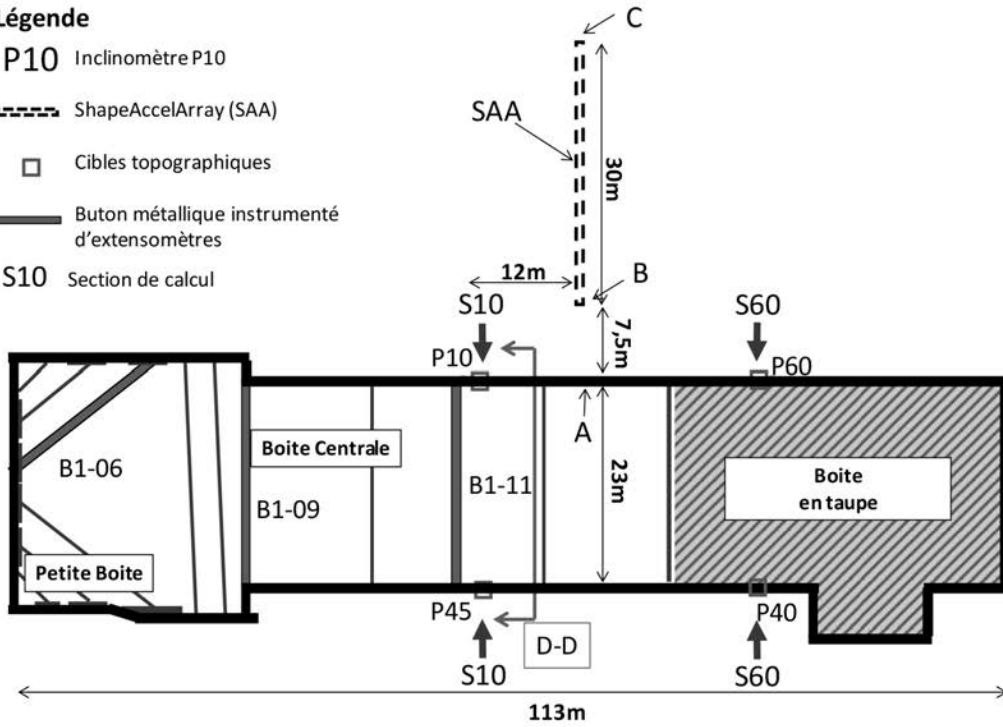


Figure 1. Plan des instrumentations de la gare Créteil l'Echat

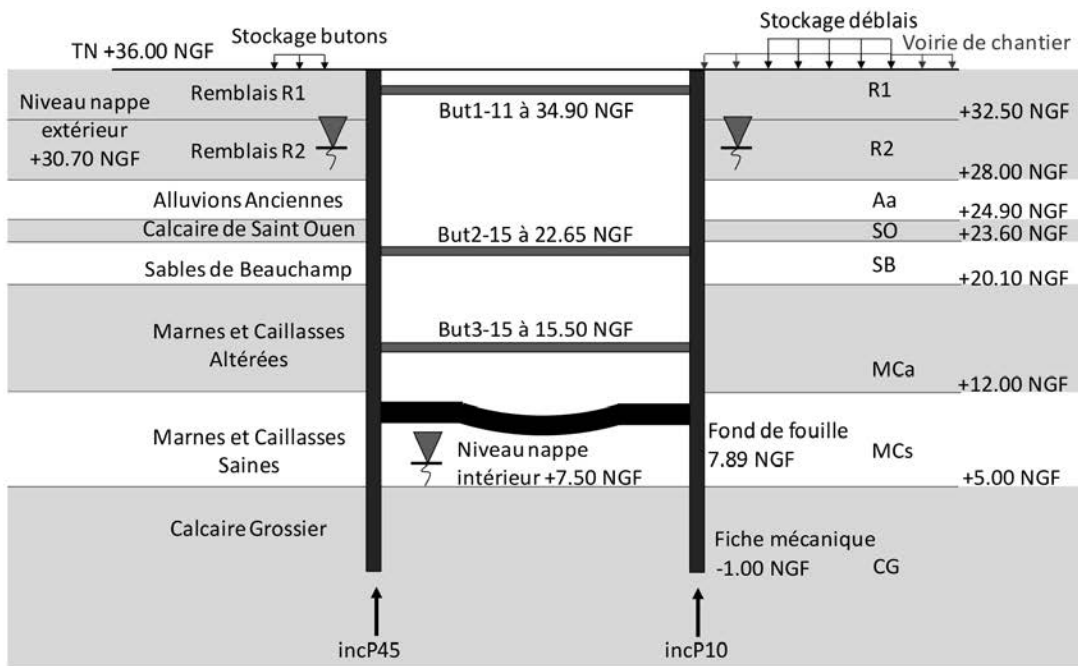


Figure 2. Coupe D-D de la boîte centrale - Section S10

Trois lits de butons métalliques sont mis en œuvre au fur et à mesure du creusement de la gare. La Figure 2 présente la coupe D-D pour la boîte centrale.

2.2 Paramètres géotechniques

Les paramètres géotechniques d'entrée ont été définis en fourchette, avec une valeur supérieure et une valeur inférieure, présentées dans le Tableau 1. Six sondages pressiométriques dans la zone de la future gare ont permis de réduire l'intervalle de variation des modules E_M . En revanche, le faible nombre d'essais triaxiaux (dix essais pour les sept couches de sol) a seulement permis de proposer des valeurs

extrêmes. Par exemple, pour les Alluvions Anciennes, un seul essai triaxial drainé a été réalisé. Il a donné des paramètres de cisaillement très élevés $c=15$ kPa et $\varphi=41$ degrés. Le retour d'expérience en région parisienne donne plutôt un angle de frottement voisin de 36 degrés et une cohésion proche de zéro.

Deux calculs ont été faits pour chacune des sections : d'une part avec les jeux de paramètres inférieurs pour tous les sols et d'autre part avec les jeux de paramètres supérieurs pour tous les sols.

Tableau 1 Paramètres géotechniques

Couche de sol	Module E_m (MPa)	α – coefficient rhéologique (-)	φ' (°)	c' (kPa)
R1	9-14	0,5	32-35	5-10
R2	4-8	0,5	32-35	5-10
Aa	15-25	0,33	35-41	0-15
SO	23-40	0,5	28-32	20-30
SB	21-29	0,5	22-35	30-25
MCa	52-81	0,5	34-36	15-40
MCS	127-277	0,5	34-36	15-40
CG	334-577	0,5	40	100

3 • Les systèmes d'auscultation

3.1 Les systèmes de mesure classiques

Les systèmes d'auscultation installés sur ce chantier sont représentés sur la Figure 1.

Des tubes de réservation ont été placés dans les cages des parois moulées pour y sceller des tubes inclinométriques, qui descendent 5 m au-dessous de la fiche des parois.

Quatre niveaux de cibles topographiques ont été installés sur la surface des parois moulées au fur et à mesure de l'avancement des terrassements. Ces mesures permettent de confirmer les déplacements déduits des mesures inclinométriques.

Des extensomètres à cordes vibrantes ont été installés sur douze butons métalliques de section circulaire sur les trois lits de butons. Les raideurs obtenues par comparaison des mesures inclinométriques aux efforts de compression dans la section des butons ont été utilisées pour les rétro-analyses. L'analyse des efforts dans les trois lits de butons n'est pas présentée dans cet article, faute de place, mais est disponible dans Daktera (2020)).

3.2 Le Shape Accel Array (SAA)

3.2.1 Principe de mesure

Le *Shape Accel Array* est un capteur fabriqué par la société Measurand, présenté comme une chaîne d'inclinomètres. Il est constitué de tubes rigides reliés par des joints souples. Les joints peuvent se plier dans toutes les directions, mais résistent à la torsion. Cela est une condition essentielle dans le calcul précis des déplacements. Chaque tube comporte trois capteurs d'accélération micro-électromécaniques orthogonaux connectés à un convertisseur analogique-numérique et un capteur de température. Dans le cas de cet ouvrage, le SAA est fait de 30 tubes rigides de 1 m – soit une longueur totale de 30 m.

3.2.2 Installation du dispositif de mesure

Le SAA a été installé dans une tranchée de 70 cm de profondeur. Son extrémité la plus proche de l'excavation se situe à 7,5 m de la paroi moulée à cause de contraintes de chantier. L'installation a eu lieu environ deux mois avant le début des terrassements et avant la fin d'une forte activité du chantier dans la zone entre la paroi moulée et le SAA.

3.2.3 Mesures

Le SAA enregistre des mesures de manière automatique et les mesures sont disponibles en temps réel. On a effectué une mesure toutes les 30 minutes soit 48 mesures par jour. Deux types de correction ont été appliqués aux mesures : la correction de la dérive (en anglais *drift*) et du choc. Swarbrick et al. (2015) décrivent le phénomène de la dérive qui ne provient pas des capteurs mais du système d'acquisition qui doit convertir le signal analogique en signal numérique.

La correction du choc consiste à détecter les cas où un des capteurs de la chaîne présente un manque de continuité de comportement dans le temps. Ces corrections sont déterminées par un logiciel fourni par le fabricant du SAA. Les détails exacts des opérations effectuées par ce logiciel sont la propriété industrielle du fabricant et ne sont pas divulgués. Les courbes de tassement présentées dans la suite de l'article prennent en compte ces deux corrections.

4. Rétro-analyse des déplacements horizontaux

Deux sections ont été analysées dans ce travail : la section S60 passant par la boîte en taupe et la S10 passant par la boîte centrale, à 12 m du SAA. Deux méthodes de calcul des déplacements horizontaux de la paroi ont été utilisées et comparées. La première est la méthode des éléments finis (EF) avec la loi de comportement Hardening Soil Model (Schanz et al. 1999), appelée HSM dans la suite.

Toutes les modélisations aux EF ont été faites avec des paramètres drainés vu la durée du chantier. La seconde est la méthode d'interaction sol structure au coefficient de réaction (Norme Ecran NF P 94-282 AFNOR, 2009), qu'on appelle MISSK. L'équation ⁽¹⁾ présente les modules utilisés dans la modélisation EF HSM (Daktera et al. 2019).

$$E_{50} = E_{oed} = \frac{E_{ur}}{3} = 2 \cdot \frac{E_M}{\alpha} \quad (1)$$

où E_{50} , E_{oed} et E_{ur} sont les modules sécant à 50% de la résistance, œdométrique et de déchargement - rechargement respectivement, et α le coefficient rhéologique de Ménard. L'exposant qui permet de caractériser la dépendance de raideur avec les contraintes m dans la loi HSM est supposé égal à zéro.

L'équation ⁽²⁾ permet l'obtention des valeurs des coefficients de réaction k_h qui ont été utilisées dans la modélisation MISSK (Schmitt 1995).

$$k_h = 2.1 \cdot \left(\frac{E_M}{\alpha}\right)^{4/3} / (EI)^{1/3} \quad (2)$$

où EI est le produit d'inertie de l'écran. Pour la paroi considérée, on a adopté les valeurs $E = 27 \text{ GPa}$ et $I = (1,2\text{m})^3 \times 1 \text{ m} / 12$.

La figure 3 présente les résultats des déplacements horizontaux de l'écran de la section S60 (en taupe). Il n'y a aucune surcharge derrière les parois. On a pris en compte un moment fléchissant dû au poids propre (sans aucune charge d'exploitation) de la dalle de couverture au niveau des aciers en attente. En considérant que la dalle est encastree dans la paroi, un calcul de résistance des matériaux donne la valeur de 1980 kN.m/m.

Sauf pour le premier terrassement, les courbes inclinométriques se situent entre les courbes calculées pour les deux jeux de paramètres, ce qui confirme que les deux méthodes peuvent être utilisées pour la prédiction des déplacements de ces parois. Le comportement de la partie supérieure de l'écran est fortement influencé par le moment au niveau de la dalle qui tire la paroi vers le sol. Une différence entre la valeur réelle du moment et la donnée d'entrée des modèles peut justifier une légère divergence du niveau et de la valeur du ventre entre les modélisations et les courbes inclinométriques.

Les courbes des deux modèles de calcul se suivent très bien et sont très cohérentes.

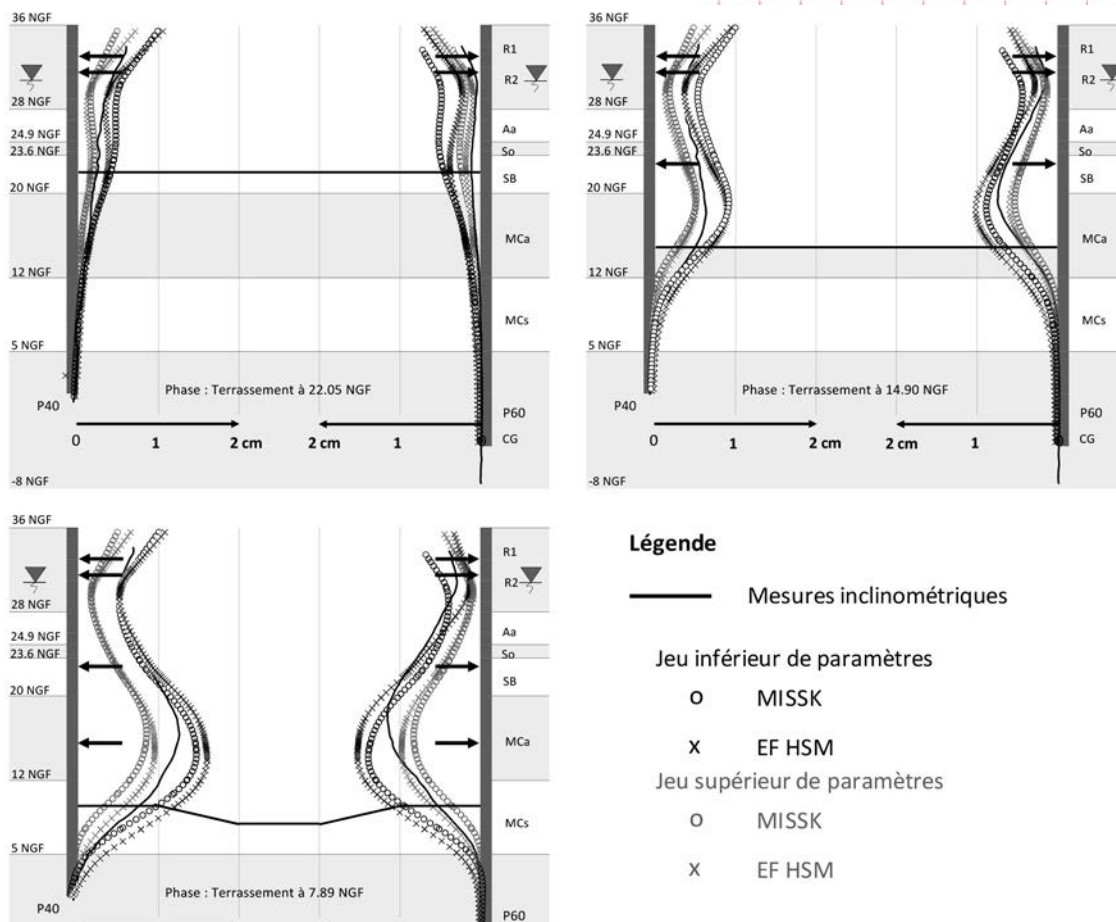


Figure 3. Déplacements horizontaux pour la section S60 : mesures inclinométriques et calculs

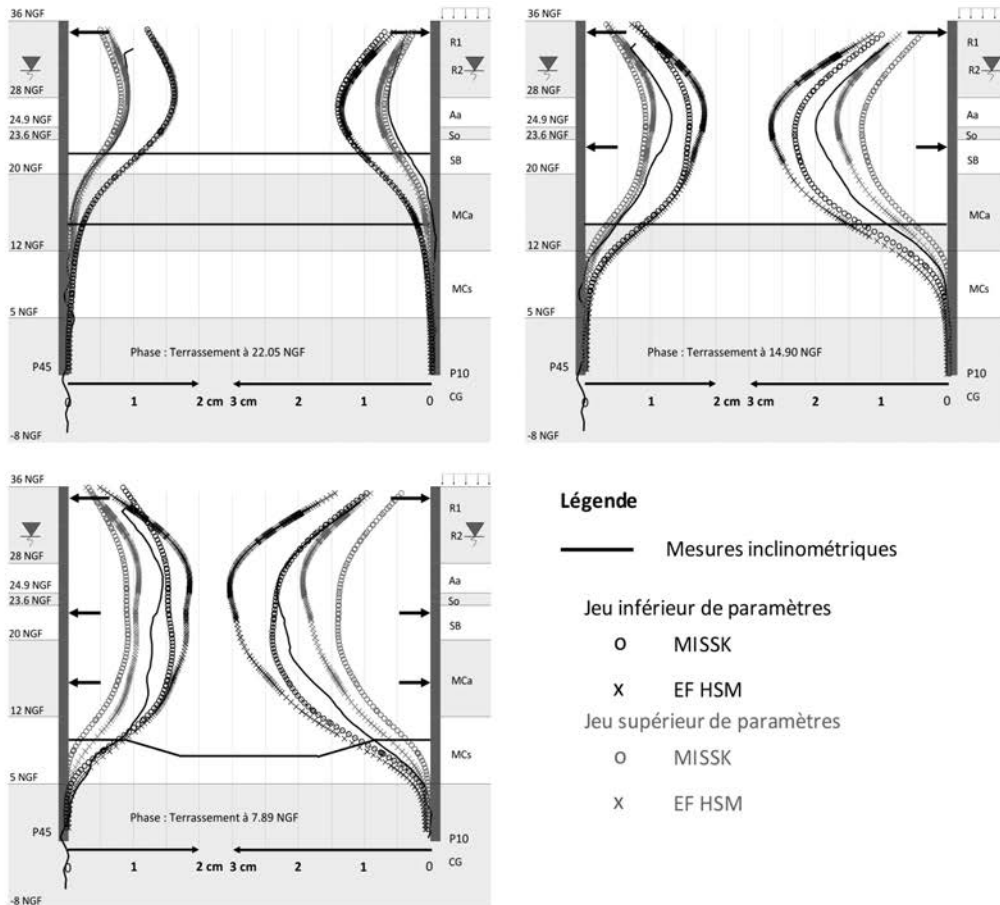


Figure 4. Déplacements horizontaux pour la section S10 : mesures inclinométriques et calculs

La figure 4 présente la rétro analyse de la section S10. Pour cette coupe, on prend en compte une surcharge derrière le panneau P10 : elle correspond à un talus formé de déblais de la fouille, constitué pour permettre un meilleur rendement des opérations de terrassement. La surcharge de 40 kPa rend le problème nettement dissymétrique.

Pour la section S10, les six courbes mesurées se trouvent entre les courbes calculées avec les deux jeux de paramètres, pour les deux méthodes. Les paramètres de la borne inférieure correspondent plus aux mesures inclinométriques. Cependant, il est important de noter que les éléments finis montrent plus de déplacements (environ 5 mm) en partie supérieure de l'écran que MISSK. Malheureusement, on ne peut en conclure davantage, car le modèle géotechnique n'est pas assez précis. Les calculs sont présentés en détail dans Daktera (2020).

5. Rétro analyse de la cuvette de tassement derrière la paroi

Le SAA est décalé de la section S10 d'environ 12 m (Figure 1). En analysant les données du chantier et en particulier les photos journalières prises de l'immeuble avoisinant, on considère que, pour retrouver le tassement du SAA, il faut prendre en compte le même

phasage que pour la section S10 mais avec une surcharge du talus réduite à 20 kPa au lieu des 40 kPa pris en compte précédemment (cf section 4 ci-dessus).

5.1 Calcul des tassements par la méthode de Hamza et al. (1999)

Parmi les méthodes semi-empiriques de prédiction des tassements décrites dans la littérature, celle proposée par Hamza et al. (1999) a confirmé sa validité sur les fouilles profondes du Métro du Caire (Bazin et Schmitt, 2001). Elle distingue deux modes de comportement de paroi : en console ou avec un appui en tête. Le cas de Créteil l'Echat correspond au deuxième cas. La méthode repose sur deux hypothèses principales : 1) la courbe de tassement derrière un écran de soutènement a la forme d'une courbe gaussienne décalée et inversée vers le bas ; 2) les tassements sont estimés à partir des déplacements horizontaux de l'écran, supposée connus. L'équation (3) présente le déplacement vertical vers le bas $s(x)$ en fonction de la distance x à la paroi :

$$s(x) = s_{1,max} \cdot e^{\left(\frac{-x^2}{2 \cdot i_1^2}\right)} \quad (3)$$

où $s_{1,max}$ est le tassement maximum et i_1 la distance entre la paroi et le point d'inflexion de la courbe gaussienne. Hamza et al. (1999) proposent d'évaluer $s_{1,max}$ et i_1 par :

$$s_{1,max} = R_s \cdot y_{max} \quad (4)$$

$$i_1 = \frac{V_s}{2.1 \cdot s_{1,max}} \quad (5)$$

où y_{max} est le déplacement horizontal maximum, R_s est le ratio de tassement, et V_s est le volume de la cuvette de tassement. Il est pris égal au produit de l'intégrale V_w du déplacement horizontal de la paroi par un ratio noté R_v :

$$V_s = R_v \cdot V_w \quad (6)$$

Les équations (4) et (6) montrent que le ratio R_s contrôle la valeur maximale du tassement, et que le ratio R_v contrôle le volume de la cuvette et donc son étendue. Dans le cas du métro du Caire, Hamza et al. (1999) ont obtenu des résultats satisfaisants pour $R_v = 0,65$ et $R_s = 0,71$. La valeur de $R_s = 0,71=1/1,4$ a déjà été proposée par Clough et Schmidt (1981). Pour la station El Behoos, Bazin et Schmitt (2001) recalent le ratio de tassement à $R_s = 0,5$. L'ordre de grandeur des deux coefficients est confirmé par de nombreuses études de cas présentées dans Gaba et al. (2017).

Pour Créteil l'Echat, on obtient un meilleur accord entre le modèle et les valeurs mesurées pour $R_v = 0,5$ et $R_s = 0,71$ puisque le tassement maximal correspond environ à la valeur du déplacement horizontal maximal de l'écran multiplié par 0,71 (Figure 5).

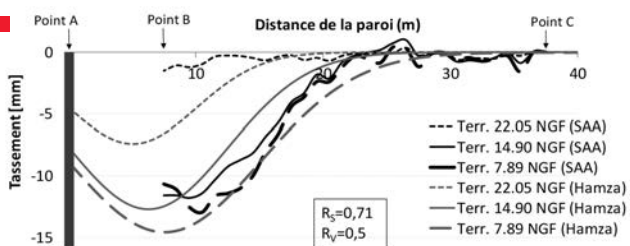


Figure 5. Tassements mesurés comparés à la méthode de Hamza (pour $R_v=0,5$ et $R_s=0,71$)

5.2 Calcul des tassements par la méthode des éléments finis

La Figure 6 présente les tassements calculés par éléments finis avec Plaxis. Les paramètres géotechniques pour ce calcul ont été recalés, entre les deux bornes des paramètres, pour que le volume de déplacement horizontal soit le même que celui mesuré pour les deux derniers terrassements. Les tassements calculés sont plus importants que les valeurs mesurées et l'étendue de la cuvette semble surestimée : pour la dernière phase, on obtient environ 10 mm de tassement à 22 m de distance alors que la mesure montre un tassement négligeable.

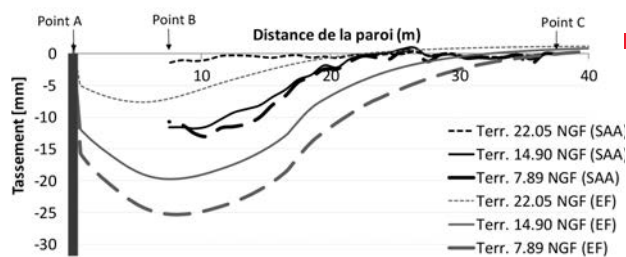


Figure 6. Tassements mesurés comparés aux calculs éléments finis

6. Conclusions

Les conclusions de cette analyse sont les suivantes :

1. Pour les deux sections, les déplacements ont été évalués de manière satisfaisante par les deux méthodes, la borne inférieure des paramètres géotechniques donnant des résultats plus proches des mesures. Pour la paroi P60, les deux méthodes placent le ventre des déplacements trop bas.

Cela peut être dû à la difficulté d'évaluer le moment fléchissant en tête dû à la dalle de couverture.

Pour la paroi P10, il est intéressant de noter que les éléments finis montrent plus de déplacements en partie supérieure de l'écran que MISSK, mais il est compliqué de tirer des conclusions précises à cause du faible nombre d'essais de laboratoire qui conduit à un modèle géotechnique en fourchette.

2. La prédiction de la cuvette de tassement avec la méthode semi-empirique de Hamza et al. (1999) se montre extrêmement pertinente en termes de valeur absolue de tassement mais aussi en termes d'étendue de la cuvette. La seule modification apportée est l'ajustement du ratio R_v (qui règle l'étendue de la cuvette) pour le ramener de 0,65 à 0,5. Le ratio R_s qui règle la valeur du tassement maximal n'a pas été modifié.

3. Les calculs par éléments finis surestiment le tassement maximum d'un facteur 2 et l'étendue de la cuvette d'un facteur 1,6 environ.

Le ratio calculé entre le déplacement horizontal maximal et le tassement maximal est légèrement inférieur à 1. Pour réduire cette divergence, on peut proposer d'introduire pour les remblais un coefficient de surconsolidation supérieur à 1, de manière à réduire la valeur maximale du tassement ainsi que l'étendue de la cuvette sans modifier sensiblement le déplacement horizontal de l'écran.

Cette idée reste à tester pour le cas de Créteil l'Echat ; on pourra également chercher des cas bien documentés en région parisienne pour la valider.

7. Remerciements

Les auteurs remercient la Fédération Nationale des Travaux Publics pour le financement de l'installation du Shape Accel Array sur le site de Créteil L'Echat, la Société du Grand Paris et les équipes techniques du Groupement Horizon (Bouygues Travaux Publics, Soletanche Bachy) pour le soutien durant ce projet de recherche.

8. Références

AFNOR (2009) NF P 94-282 : Calcul géotechnique / Ouvrages de soutènement : Ecrans.

Bazin E., Schmitt P. (2001) Analyse des mesures de déformation des parois moulées du métro du Caire. XV ICSMGE, Istanbul, vol 2.

Clough G.W., Schmidt B. (1981) Design and performance of excavations and tunnels in Soft Clay Engineering. Elsevier, Amsterdam, pp. 569-634.

Daktera T., Bourgeois E., Schmitt P., Jeanmaire T., Delva L., Priol G. (2019) Design of deep supported excavations: comparison between real behavior and predictions based on the subgrade coefficient method. XVII ECSMGE, Reykjavik.

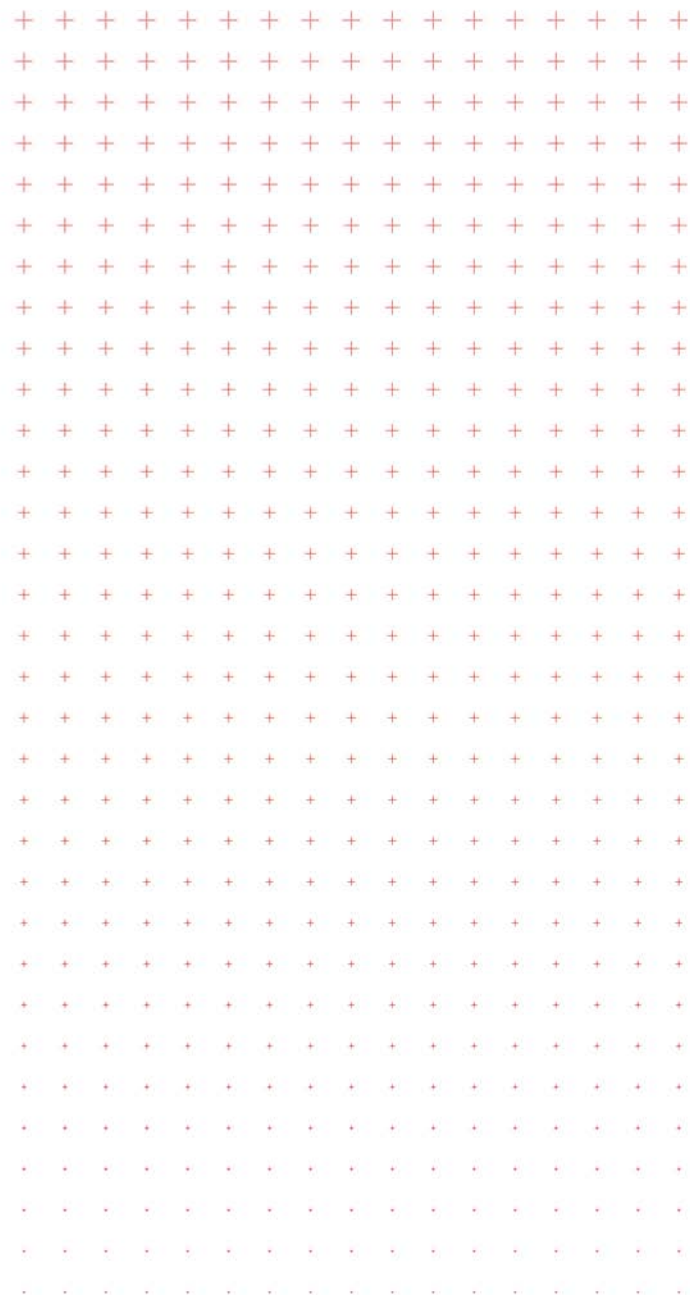
Daktera T. (2020) Evaluation des méthodes de calcul des écrans de soutènement à partir du retour d'expérience de grands travaux récents. Thèse Univ Gustave Eiffel (à paraître).

Gaba A., Hardy S., Doughty L., Powrie W., Selemetas D. (2017) Ciria C760 : Guidance on embedded retaining wall design.

Hamza M., Ata A., Roussin A. (1999) Ground movements due to the construction of cut and cover structures and slurry shield tunnel of the Cairo Metro. Tunnelling and Underground Space Technology, 14(3) : 281-289.

Schanz T., Vermeer P. A., Bonnier B. G. (1999). "The Hardening Soil Model: formulation and verification." Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Balkema, Rotterdam.

Schmitt P. (1995) Méthode empirique d'évaluation du coefficient de réaction du sol vis-à-vis des ouvrages de soutènement souples. Revue Fr. de Géotechnique n°71, pp. 3-10.



Nos implantations

Retrouvez nos agences et nos filiales en France

Agences

		Tél.	Fax
NORD	Hubert GRUNEWALD Rueil	01 47 76 56 10	01 40 90 02 97
• IdF service confortements	Guillaume DOUHERET Rueil	01 47 76 56 10	01 40 90 02 97
• Antenne Est	Guillaume CATEL Strasbourg.....	03 88 38 87 39	03 88 38 84 25
• Normandie.....	Mehdi BENHABBARI..... Rueil	02 35 68 87 41	01 40 90 02 88
• Bretagne - Pays de la Loire	Mehdi BENHABBARI..... Rueil	02 40 92 26 36	01 40 90 02 97
• Hauts-de-France	Guillaume CATEL..... Lille	03 20 50 92 92	03 20 50 93 83
 SUD	 Tony CHIGNARD	 Aix-en-Pce	 04 42 99 03 50
• Lyon	Quentin DESJARS	Lyon	04 78 31 51 71.....
• Côte d'Azur	Pierre-Yves MAURY.....	Sophia Antipolis .	04 93 00 12 42.....
• Bordeaux	Axel TERLAUD	St Médard	05 56 05 25 25
• Toulouse	David COUSIN.....	Toulouse	05 61 35 84 55.....
 LA RÉUNION	 Tony DEL GIUDICE	 Rueil	 01 47 76 55 33

Filiales

Soletanche Bachy Fondations Spéciales

• Siège

Direction..... : Eric TOURNEMILLEWissous..... 01 56 70 42 00 01 56 34 03 88
 Antoine D'HALLUIN..... Wissous..... 01 56 70 42 00.....01 56 34 03 88

• Antennes

Région parisienne & Normandie : Xavier BARTHE Wissous 01 56 70 42 0001 56 34 03 88
 Est..... : Anthony RE..... Strasbourg 03 88 38 87 3903 88 38 84 25
 Nord - Luxembourg : Anthony RE..... Lille 03 20 50 92 9203 20 50 93 83
 Ouest Bretagne..... : Frédéric TALOTTE..... Nantes 02 40 92 26 3602 40 92 26 30
 Sud..... : Elric COMTE Aix-en-Pce 04 42 99 03 5004 42 21 54 93
 Rhône Alpes - Bougogne : Clément MOLLARET Lyon 04 72 76 82 8204 78 61 10 88

SB TUNNELS

..... : Patrick ROLANDETTI La Garde 04 94 21 70 4204 94 21 71 55

BESSAC

..... : Bernard THERON..... Toulouse 05 61 37 63 6305 61 09 26 29

BACHY FONDACO

..... : Frédéric KISSLING Fort de France 05 96 71 44 0105 96 72 42 41

(Antilles - Guyane)

BALINEAU

..... : Jean-Philippe DURVILLE . Pessac..... 05 57 89 16 7805 56 07 34 78

