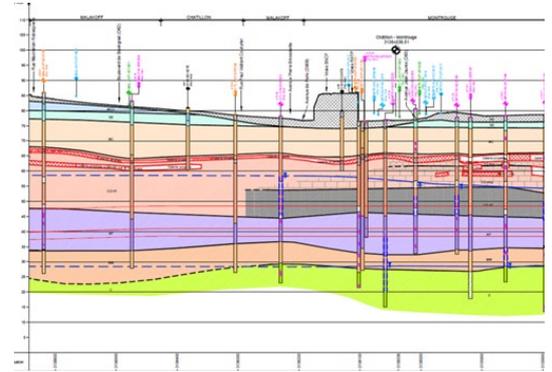


## De la conception...

### Grand Paris - Ligne 15

La Ligne 15 entre le Pont de Sèvres et Noisy (« Ligne Rouge Sud ») sera le premier chaînon du Réseau de Transport Public du Grand Paris à être lancé en travaux en 2015, pour un objectif de mise en service à l'horizon 2020. Le groupement SETEC / INGEROP réalise la Maîtrise d'Œuvre de conception du tronçon T3 entre les futures gares Pont de Sèvres et Villejuif - Louis Aragon.



TERRASOL est responsable de la coordination des études géotechniques sur l'ensemble du linéaire avec en particulier l'interprétation des reconnaissances géotechniques, la réalisation du profil en long géologique et géotechnique, et la conception des ouvrages en interaction avec le sol (tunnel, ouvrages annexes, soutènement des gares,...). Ce tronçon, long de 12,5 km, peut être découpé en quatre unités géologiques : la vallée de la Seine sur 3,2 km avec un tunnel excavé dans la craie sous les Alluvions de la Seine, le plateau de Vanves/Clamart/Arcueil sur 6,4 km, le passage de la vallée de la Bièvre, puis la remontée sur le plateau de Villejuif sur 2,5 km.

Le secteur de Vanves - Clamart - Arcueil se caractérise par la présence d'anciennes exploitations de Calcaire Grossier, en carrières souterraines ou à ciel ouvert, sur quasiment 6 km, conduisant à retenir un tracé du tunnel situé sous ces niveaux de carrières, avec un front situé essentiellement dans le Calcaire Grossier inférieur ou dans les formations de l'Yprésien (Fausses Glaïses, Argile Plastique). Ces difficultés géotechniques nécessitent la réalisation de modélisations complexes dès les phases AVP (calculs éléments finis 2D et 3D) afin de caler au mieux le tracé et les contraintes de creusement.

G. Chapron et H. Le Bissonnais

## Edito

Depuis la création de TERRASOL en 1979, les travaux souterrains sont devenus sous l'impulsion d'Alain Guilloux un axe majeur de développement de notre activité de bureau d'études en géotechnique. Avec plus de 250 ouvrages souterrains étudiés en 35 ans, TERRASOL est un leader incontesté dans ce domaine. Nous avons notamment contribué à développer les méthodes de calcul des tunnels, en particulier l'utilisation des calculs aux éléments finis (premiers tunnels LGV, Eole, Météor), et sommes également particulièrement impliqués dans la mise au point de nouvelles techniques d'excavation (Jet Grouting sur le tunnel des Hurtières, pré-soutènement et renforcement du front de taille sur Tartaignille, injections de compensation à Toulon, microtunneliers, etc).

Ce numéro spécial de la Lettre Terrasol présente quelques projets réalisés dans ce domaine ces dernières années, et illustre l'étendue des compétences de nos équipes, que ce soit en phase de conception (suivi / interprétation des reconnaissances géotechniques, choix et dimensionnement des méthodes de réalisation) ou en phase travaux (études d'exécution, suivi de travaux, expertises).

Nous vous en souhaitons bonne lecture.

H. Le Bissonnais

## ... à l'exécution

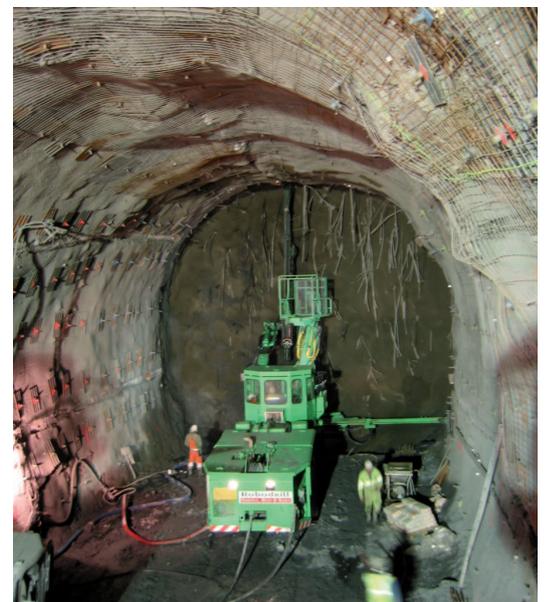
### Saint-Martin-la-Porte

La descenderie de Saint-Martin-la-Porte est l'un des premiers ouvrages réalisés de la liaison Lyon Turin Ferroviare (LTF). Conçu d'abord comme une galerie de reconnaissance, ce tunnel de 2,4 km servira ensuite d'accès et de ventilation pour les futurs travaux du tunnel de base, ce qui explique ses dimensions conséquentes (section excavée de l'ordre de 100 m<sup>2</sup>). À partir de 2002, TERRASOL a réalisé les études d'exécution et l'assistance géotechnique pour le compte du groupement d'entreprises RAZEL, BILFINGER-BERGER et PIZZAROTTI. Avec un début d'excavation en mai 2003, la galerie a atteint le PM 2400 en juin 2010, après avoir rencontré successivement un cône d'ébouillis, des terrains sédimentaires (calcaires, marnes et dolomies), le « front » du houiller (anhydrites et gypses) et le houiller productif (grès et schistes charbonneux).

Les principales particularités du projet sont le peu d'expérience de creusement de tunnels de grande section dans ces terrains sous forte profondeur (jusqu'à 600m) et la présence de terrains extrêmement déformables. Cette dernière problématique a nécessité, pour les études, un suivi du comportement de la structure, une caractérisation des terrains à l'avancement à partir de rétro-analyses, et une adaptation continue des méthodes d'excavation et de soutènement aux observations et données nouvelles.

Un des enseignements de ce chantier est la confirmation des limites structurales d'un soutènement rigide dans des terrains déformables sous forte couverture. Le creusement en méthode souple (boulonnage dense, béton projeté, cintres coulissants) mis en œuvre depuis le PM1200 a nécessité un suivi très rigoureux des déformations avec des convergences métriques.

B. Madinier et H. Le Bissonnais



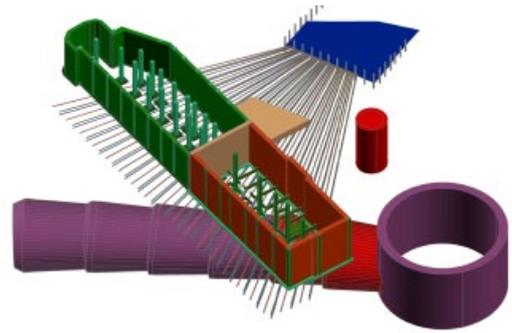
## Injections de compensation à Toulon

Var, France

Dès le début des études du projet du deuxième tube de la traversée souterraine de Toulon, le passage sous les bâtiments Esplanade et Schéhérazade dans le secteur Marchand, en partie centrale du tunnel, avait été identifié comme étant particulièrement difficile.

Ces 2 immeubles de 8 étages avaient en effet déjà subi le creusement du premier tube, et les reconnaissances par sondages montraient la présence de terrain de qualité particulièrement médiocre (poches d'argile molle issue de la dissolution du gypse).

Dès le début du creusement à partir de l'attaque intermédiaire du puits Marchand, le bâtiment Esplanade a réagi de manière significative avec une fissuration du second œuvre des bâtiments, malgré un niveau de déformation en surface encore relativement faible. Du fait des prévisions de déformations en limite des seuils admissibles après le passage du tunnel, le creusement a dû être arrêté. Après avoir étudié la possibilité de renforcer la structure du bâti, l'utilisation de l'injection de compensation pour stabiliser le bâti a finalement été retenue.



Cette méthode consiste à injecter des petites quantités de coulis afin de soulever le bâti et de compenser les tassements générés par le creusement du tunnel. Ces injections ont été réalisées à partir de 3 lits de 20 forages subhorizontaux équipés de tubes à manchettes, constituant 5300 points d'injection. Un important dispositif d'auscultations constitué de mesures topographiques à partir de théodolites automatisés, de chaînes d'électro-nivelles, d'extensomètres en forages, et de tiltmètres, a permis de contrôler en continu les tassements absolus et différentiels.

Une première phase avant reprise de l'excavation a consisté à pré-soulever le bâtiment de 12 à 15 mm afin de « rattraper » les premiers tassements déjà acquis. Cette phase a également permis d'étalonner le dispositif et valider les volumes de coulis à injecter par manchette. Le creusement a pu ensuite reprendre en activant le dispositif de compensation. Avec des injections journalières de l'ordre de 2000 à 3000 litres, les tassements ont pu être complètement maîtrisés avec une précision de l'ordre de plus ou moins 1 mm.

H. Le Bissonnais

## Un tunnel dans du corail

Miami, États-Unis

TERRASOL a été mobilisée par BOUYGUES pour l'assister dans l'analyse des conditions géotechniques de creusement d'un tunnel sous un bras de mer dans le port de Miami. Ce tunnel routier bi-tube, de 11 m de diamètre, passe à environ 15 m sous le fond du chenal, et traverse des massifs coralliens extrêmement hétérogènes, dont une couche de très faibles caractéristiques.

Aucun tunnel de cette taille n'avait été excavé auparavant en Floride dans de telles formations, dont la reconnaissance était particulièrement délicate du fait de la grande fragilité de certains horizons. Un défi pour la (géo)technique française !

Le tunnel a ouvert en août 2014 après une intense campagne de traitements de terrain en site aquatique.

A. Guilloux



Crédit photo : Daniel Azoulay

## Tunnel de Saint-Béat

Haute-Garonne, France

L'aménagement de la RN 125 entre Saint-Béat et Arlos (Haute-Garonne) permettra de contourner le village de Saint-Béat grâce à un tunnel creusé dans la montagne du Cap de Mount. Ce village est renommé pour son exploitation de marbre blanc, formation constituant l'essentiel du massif où est excavé le tunnel.

Le groupement GUINTOLI – SOLÉTANCHE-BACHY – SOLÉTANCHE-BACHY TUNNELS – PIZZAROTTI a confié à TERRASOL et BMCI (filiale de SETEC TPI) l'ensemble des études d'exécution géotechniques et de génie civil. Le tunnel, long de 1018 m, a été excavé en méthode traditionnelle à l'explosif avec un soutènement essentiellement constitué de boulons et béton projeté. Malgré une géologie favorable à la réalisation d'un tunnel (calcaire Marmoréen et marbre de bonne qualité, avec une fracturation peu développée), le chantier a connu quelques surprises, avec la rencontre de karsts en tête nord, puis de fortes venues d'eau sur l'attaque sud. La principale difficulté du projet, bien identifiée dès les premières reconnaissances, était l'interception par la galerie de sécurité nord d'un sillon glaciaire rempli de matériaux alluvionnaires. L'analyse des reconnaissances complémentaires réalisées depuis le tunnel et depuis la surface a conduit à proposer de traverser cet accident géologique à l'aide d'un soutènement cintré renforcé par une voûte parapluie. Le tunnel principal a été percé en décembre 2013.



H. Le Bissonnais

## Tunnel du Ganntas

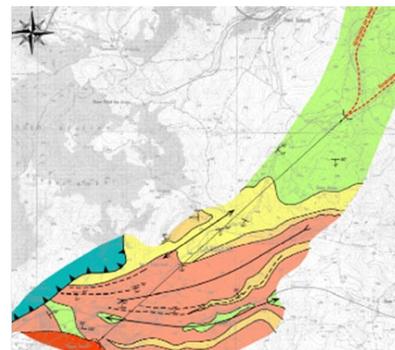
Algérie

Dans le cadre de sa mission auprès de l'entreprise CCECC, en charge des travaux du projet de dédoublement de la voie ferroviaire avec rectification du tracé entre les gares d'El Affroun et Khemis Miliana (à l'Est d'Alger), TERRASOL a élaboré l'étude d'exécution du tunnel du Ganntas. Il s'agit d'un bitube de 6,7 km qui permet le franchissement du Djebel Ganntas culminant à 800 m environ entre l'Oued Zebboudj au Nord-Est et Ain Soltane au Sud-Ouest. Il présente une section de 41 m<sup>2</sup> et une couverture maximale de 390 m, avec excavation selon la méthode traditionnelle.

Avant même l'entame des travaux, TERRASOL a été mobilisée pour mettre à jour le profil en long compte-tenu des incertitudes géologiques relevées lors de la phase d'APD. TERRASOL a élaboré une analyse paramétrique basée sur des calculs aux éléments finis (CESAR), afin d'approcher le comportement du massif encaissant en fonction du contexte géologique (variation des faciès de terrains traversés, couverture), et des méthodes/phases de creusement. A l'issue de cette étude, TERRASOL a établi un catalogue de soutènements à mettre en œuvre au vu des constats effectués lors du creusement.

Le suivi des travaux, avec relevés géologiques de terrain, mesures des convergences mais aussi sondages à l'avancement, a permis d'ajuster les hypothèses de calcul et d'adapter les méthodes dans la zone de faille attendue dans la partie sud du tunnel. L'avancement des travaux à l'été 2014 atteint plus de 60% du linéaire.

M. Yahia-Aissa, P. Brossier et F. Binet



## LGV Est Européenne

Saverne, France

Les Travaux de la LGV EE (LGV Est Européenne) sur le tronçon H, de Danne-et-Quatre-Vents (57) à Vendenheim (67), se sont achevés en ce début d'année 2014 par les livraisons successives des 2 tubes du tunnel de Saverne du lot 47 aux équipements ferroviaires. Cette livraison, en avance sur le planning initial grâce au creusement record du second tube, intervient dans la continuité de celle des plateformes ferroviaires des lots adjacents de section courante 43a et 43b, ainsi que des lots « Viaduc » 48 et 49.

TERRASOL a participé activement avec SETEC à la mission de Maîtrise Œuvre sur les différents lots : mission VISA menée par les équipes parisiennes, et détachement de 2 ingénieurs sur site pour le suivi des travaux sur le lot 47, le Tunnel de Saverne et les Ouvrages d'Arts non courants.

Au travers de cette mission, TERRASOL a ainsi contribué à la réussite du projet pour solutionner les différentes problématiques rencontrées lors de la réalisation du tunnel et des fondations des différents viaducs.

P. Legrand



Crédit photo : JM BANNWARTH pour Balloide photos

## Sillon Alpin Sud Phase II (rénovation)

St-Marcel lès Valence – Moirans, France

Les lignes ferroviaires qui permettent de relier les agglomérations de Valence, Grenoble et Chambéry constituent l'axe communément appelé « Sillon Alpin Sud ». La phase II du projet consiste en une électrification des lignes entre St-Marcel lès Valence et Moirans, un raccordement de la ligne à la LGV (opération Sud) et une électrification des lignes entre Gières et Montmélian (opération Nord).

Le groupement (ALSTOM – Mandataire, SPIE BTP, COLAS RAIL, NOUVETRA et SETEC) travaille sur l'opération Sud dans le cadre d'un marché conception-réalisation. Longue de 80 km, la ligne se situe sur les terrasses de l'Isère et recoupe quelques éperons rocheux, ce qui a justifié le percement de 3 tunnels (Têche, Poliénas et Rochefort).

Dans le cadre de ce projet, TERRASOL, au sein de la Maîtrise d'œuvre Intégrée SETEC, a participé aux études de projet et au suivi de chantier :

- Electrification de la ligne (caténaire, postes électriques en ligne, sous-station) ;
- Raccordement de la ligne ferroviaire à la gare de Valence TGV (3,5 km de ligne nouvelle, 1 pont-route, travaux de génie civil et de voie) ;
- Démolition de 6 ouvrages d'art courants, construction de 4 ponts-route et 2 ponts-rail ;
- Mise au gabarit des 3 tunnels du tracé : une analyse poussée de sensibilité sur différents paramètres a été menée en phase PRO à l'aide de calculs aux éléments finis pour le tunnel de Têche, et une instrumentation a été mise en place lors des travaux pour contrôler les déplacements dans les tunnels et sur les murs extérieurs suite aux travaux d'injection et de décaissement de la plateforme centrale ;
- Pose d'écrans acoustiques en zone urbaine (≈ 6,4 km).



Crédit photo : ©Tes 237

Les travaux, démarrés en 2012, ont permis l'ouverture de la ligne en décembre 2013, pour une circulation des trains électriques courant 2014.

C. de la Salle

## Tunnel Jenner

Le Havre, France

Le Tunnel Jenner est un ouvrage souterrain à deux voies de 535 ml pour le premier tramway de l'agglomération havraise reliant la basse ville du Havre à la place Jenner de la ville haute. Il est parallèle au tunnel routier existant, et en est assez proche.

La couverture en voûte du tunnel varie entre 35 m et 6 m, pour une section excavée de 60 m<sup>2</sup> environ. Le tunnel est excavé en méthode traditionnelle à l'aide d'une machine à attaque ponctuelle, équipée d'une fraise de plusieurs tonnes : le creusement a été réalisé entre janvier et novembre 2011. SPIE BATIGNOLLES a mandaté TERRASOL pour réaliser une étude géologique complémentaire, et le suivi géologique du creusement du tunnel.

La principale problématique de ce chantier de creusement est la mise en place de profils de soutènement lourds (cintres, béton projeté, voûte parapluie et boulons de front, et localement contre-cintre en radier) répondant à des conditions géologiques défavorables (zones karstiques ou altérées) prévues sur une grande partie du tracé, alors que l'on peut supposer que le faciès traversé est en grande partie de la craie compacte assimilée à une roche. En effet, le tunnel est implanté au droit d'un plateau creusé dans la craie du Cénomaniens, recouverte sur une épaisseur décimétrique par les argiles à silex et localement les limons des plateaux. Le début du creusement a confirmé la présence de craie majoritairement saine, avec néanmoins la présence de karsts de taille limitée nécessitant un présoutènement de type « forepolling ».



H. Le Bissonnais

## Le tunnel de Croix-Rousse

Lyon, France

Le tunnel urbain de la Croix-Rousse est un monotube bidirectionnel permettant de relier l'Est et l'Ouest de l'agglomération lyonnaise. Son état particulièrement vétuste a nécessité une mise en conformité vis-à-vis des directives européennes qui a consisté en :

- la réalisation d'une galerie de sécurité pouvant accueillir les modes doux et les transports en communs,
- une rénovation complète du tube routier et de ses usines de ventilation.

TERRASOL a assuré la partie géotechnique de tout le projet, de sa conception à sa réalisation avec comme contrainte majeure un environnement ancien très urbanisé.

L'entrée en terre côté Rhône a nécessité la réalisation d'un ouvrage de soutènement complexe pour lequel des limitations drastiques en termes de déformation ont été imposées afin de garantir la pérennité des ouvrages existants (bâtiments anciens, réseau important de galeries nommé « arrêtes de poissons », église très sensible,...).



Crédit photo : Anne Claude Barbier

Dans le même objectif, les 100 premiers mètres côté Rhône ont été excavés à la machine à attaque ponctuelle et soutenus par un soutènement lourd de type voûte parapluie renouvelable pour traverser les formations limono-sableuses du Miocène.

De plus, un système d'instrumentation important a été mis en œuvre pour suivre l'impact de la poursuite du creusement à l'explosif (émulsion) à faible profondeur en milieu urbain dans le socle cristallin granitique ou gneissique.

J. Voiron et B. Madinier

## Métro de Rennes

France

Le projet du Métro de Rennes Métropole prévoit la réalisation d'une seconde ligne de métro traversant l'agglomération rennaise selon une diagonale Nord-Est à Sud-Ouest, et vient compléter la ligne A existante. Les travaux du lot 1 du projet prévoient la réalisation d'un tunnel de 8 km de long, de 9 stations et de 5 puits. Ils ont été attribués à l'automne dernier au groupement d'entreprises mandaté par DODIN CAMPENON BERNARD.

Ce projet s'inscrit dans un contexte urbain sensible du fait de la proximité immédiate du bâti plus ou moins sensible avec des fouilles de stations atteignant 30 m de profondeur, jusque dans l'hyper-centre de la vieille ville. Le contexte géotechnique se révèle délicat au regard du REX (retour d'expérience) de la ligne A existante et de la variabilité géotechnique des schistes rennais.

En lien étroit avec une mission d'auscultation renforcée, TERRASOL intervient dans le cadre d'une mission G3 par la définition des différentes hypothèses géotechniques relatives aux stations et par une mission de suivi des reconnaissances, de l'excavation des stations et du creusement au tunnelier, avec détachement d'un ingénieur sur site.



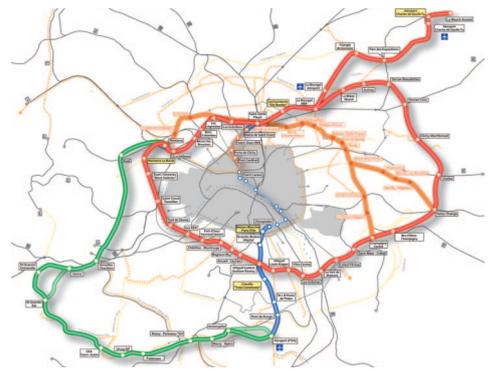
P. Legrand

## Grand Paris - Transports parisiens

France

Les projets de travaux souterrains à l'étude sont particulièrement nombreux sur la région parisienne : ceux-ci sont essentiellement liés à la nécessité de réaliser de nouvelles infrastructures de transport de voyageurs (tramway, métro, RER, train). TERRASOL, du fait de son implantation historique sur Paris, de sa grande connaissance de la géologie et géotechnique de la région et de ses compétences en travaux souterrains, est impliquée de manière très importante sur un grand nombre de projets, soit pour des missions purement géotechniques, soit en collaboration avec diverses sociétés du groupe SETEC sur des missions de Maîtrise d'Œuvre.

Sur les lignes de métro, on peut citer le prolongement de la Ligne 4 (2<sup>ème</sup> phase, de la Mairie de Montrouge à Bagneux) avec une mission pour la RATP de « second regard géotechnique » en phases études et travaux. Une mission similaire est en cours sur la phase PRO pour le prolongement de la Ligne 12 jusqu'à la Mairie d'Aubervilliers (2<sup>ème</sup> phase). TERRASOL est également présente sur le prolongement de la Ligne 14, projet prioritaire de la RATP pour la désaturation de la Ligne 13 entre Saint Lazare et la Mairie de Saint-Ouen.



Crédit photo : Société du Grand Paris

Concernant les RER, le projet majeur à venir est le prolongement d'Eole vers la Défense, avec notamment une nouvelle gare sous le CNIT (Maîtrise d'Œuvre SETEC / EGIS). On notera également une étude de faisabilité pour le doublement du tunnel des lignes B et D entre Châtelet et la gare du Nord.

Enfin, le projet qui devrait mobiliser beaucoup d'énergie en études puis en travaux ces prochaines années, est bien sûr celui du Réseau de Transport Public du Grand Paris : TERRASOL, au côté de SETEC TPI et SYSTRA, a réalisé les études préliminaires du tronçon Villejuif – Saint-Cloud (arc Sud-Ouest – Ligne « Rouge ») avant d'obtenir au sein du groupement SETEC/INGEROP la maîtrise d'œuvre géotechnique du tronçon Pont de Sèvres / Villejuif Louis Aragon (Ligne 15 ouest). TERRASOL est également intervenue en étude de faisabilité sur le tronçon Orange entre Noisy et Saint-Denis, puis en études préliminaires approfondies sur le prolongement sud de la Ligne 14 (Ligne « Bleue ») vers Orly.

H. Le Bissonais

## Prolongement de la ligne de métro n°14

France

TERRASOL a réalisé les missions G12 et G2 du prolongement de la Ligne 14 à Mairie de Saint-Ouen, pour le compte de SYSTRA Ile de France. Ce projet a pour objectif principal de désaturer la Ligne 13 et d'accompagner le développement de ZAC de grande ampleur située dans le 17<sup>ème</sup> arrondissement et dans les villes de Clichy et Saint-Ouen. Ce prolongement, qui est entièrement souterrain, sera creusé au tunnelier sur une distance de 5,8 km (plus environ 500 m de tunnel de raccordement vers le site de maintenance) et comprend également la construction de quatre nouvelles stations à ciel ouvert, de profondeur comprise entre 23 et 34 m, et d'un certain nombre d'ouvrages annexes aux fonctions variées (sécurité, ventilation, ouvrage de démontage du tunnelier, etc). La construction de ce prolongement s'effectue dans les terrains bien connus de la région parisienne, allant des Marnes Infragypseuses du Ludien aux Calcaires Grossiers du Lutétien, et s'inscrit dans une zone à risque de dissolution de gypse.

La mission de TERRASOL associe suivi des reconnaissances et rédaction des mémoires de synthèse géotechnique, depuis la phase AVP jusqu'à la consultation des entreprises. TERRASOL intervient également sur d'autres problématiques plus ponctuelles, comme sur la modélisation 3D de l'ouvrage de démontage du tunnelier.



M. Hocdé et H. Le Bissonais

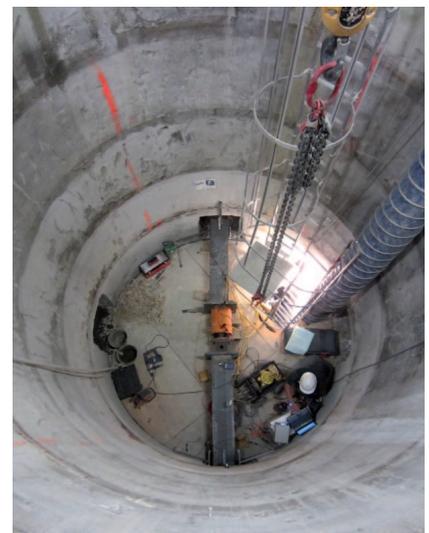
## Les ouvrages du prolongement du RER E

La Défense, France

Dans le cadre des études de Maîtrise d'Œuvre du prolongement du RER E (Eole) vers l'Ouest de Paris, TERRASOL réalise les études géotechniques des ouvrages du secteur de La Défense pour le compte de SETEC TPI. La mission comprend la définition des programmes de reconnaissance, le suivi de leur exécution, la rédaction des mémoires de synthèse géotechnique, et le dimensionnement de certains ouvrages. En particulier, la nouvelle gare qui doit être implantée dans le quartier de la Défense sous le bâtiment du CNIT, mêlant techniques de reprise en sous-œuvre et techniques souterraines, s'inscrit dans un contexte géotechnique particulier à fort enjeu technique. De lourds travaux de reconnaissance ont été entrepris depuis les sous-sols du bâtiment, sous Maîtrise d'Œuvre commune SETEC TPI – TERRASOL.

Un puits de reconnaissances dédié, de 4 m de diamètre excavé, a ainsi été descendu par des moyens conventionnels à 25 m de profondeur. Il a permis de visualiser les terrains en grand et de réaliser à plusieurs niveaux des essais en vraie grandeur (chargements au vérin à plaque rigide horizontaux et verticaux, essais de vibration). Des reconnaissances géotechniques conventionnelles (forages carottés, diagraphies différées, essais in situ SPT, pressiométriques, dilatométriques et cross-hole, essais en laboratoire) ainsi que des essais de perméabilité en grand ont été réalisés en parallèle.

Les travaux, réalisés entre juin et décembre 2013, ont fourni des données permettant d'établir une synthèse géologique, géotechnique et hydrogéologique exhaustive adaptée au contexte et à la complexité du projet, de définir les paramètres de calcul pour la phase d'études PRO, ainsi que de proposer des méthodes d'exécution adaptées pour la phase EXE.



J. Marlinge et H. Le Bissonais

## Galerie hydraulique du terminal LNG de Dunkerque

France

Le projet du terminal méthanier de Dunkerque comporte la réalisation :

- de trois réservoirs de gaz liquide (LNG) d'une contenance de 190.000 m<sup>3</sup> chacun,
- d'un terminal portuaire pour l'accostage de bateaux de transport de gaz (appointement), qui accueillera environ 80 méthaniers par an, d'une capacité allant jusque 270 000 m<sup>3</sup>,
- d'une unité de regazéification,
- d'un tunnel d'amenée d'eau du CNPE de Gravelines vers la zone des réservoirs (tunnel de 3,0 m de diamètre intérieur et 5.000 m de long), pour réchauffer le gaz liquide.

TERRASOL a réalisé la conception en tant qu'assistant à la Maîtrise d'Ouvrage (EDF au travers de sa filiale DUNKERQUE LNG SAS) du tunnel d'amenée d'eau et du puits d'entrée.

La galerie est réalisée en souterrain sur 5 km à l'aide d'un tunnelier confiné à pression de terre, en restant entièrement dans le même horizon géologique (argile de Flandres). La couverture de terrain est de l'ordre de 45 m côté centrale de Gravelines. Le tunnel traversera l'avant-port Ouest. L'accès au tunnel se fait par un puits circulaire de 16 m de diamètre et 45 m de profondeur réalisé en paroi moulée.

TERRASOL est actuellement en charge de la mission G4 (suivi géotechnique d'exécution) pour le creusement sous la centrale nucléaire de Gravelines et la connexion entre le tunnel et les puits verticaux de prise d'eau.

H. Le Bissonnais et A. Bergère



## Laboratoire de Chooz

Ardennes, France

Dans le cadre de l'expérience scientifique « Double Chooz » visant à étudier le comportement des neutrinos, le groupement d'entreprises GUINTOLI - SOLÉTANCHE BACHY TUNNELS a construit entre 2011 et 2013, pour le compte du CEA et du CNRS et sous Maîtrise d'Œuvre EDF, un laboratoire souterrain sur le site de la centrale nucléaire de Chooz (Ardennes). Les études d'exécution ont été réalisées par le groupement TERRASOL (mandataire) - SETEC TPI.

TERRASOL a réalisé l'étude des soutènements des accès au laboratoire (trémie - longueur 90 m, et descenderie - section 20 m<sup>2</sup>, longueur 145 m), de la caverne souterraine (section 95 m<sup>2</sup>, longueur 30 m) et de son puits vertical, appelé à recevoir l'expérimentation (excavation de profondeur 13 m, diamètre 9.5 m). L'étude des ouvrages, excavés dans des terrains schisto-gréseux, a combiné une approche structurale (analyse de la stabilité des blocs découpés par la fracturation du massif rocheux) et des calculs aux éléments finis en milieu élasto-plastique équivalent (estimation des déformations et sollicitations par des modèles 2D et 3D).

J. Marlinge



Crédit photo : Cédric Helsly pour Solétanche Bachy

## Forage dirigé sous l'Escaut

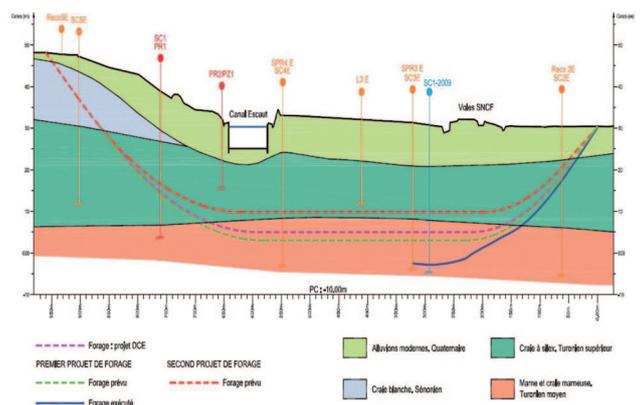
Neuville-sur-Escaut, France

TERRASOL a réalisé en 2009 une expertise dans le cadre de la réalisation d'un forage dirigé de 980 m de longueur sous l'Escaut, pour la pose de la canalisation SNET de GRT Gaz. Le projet consistait à poser une canalisation de gaz DN 500 mm par forage dirigé sous des voies SNCF en remblai et sous le canal de l'Escaut au lieu-dit « les trois Muids », sur la commune de Neuville sur Escaut.

Du fait du risque de présence de silex dans les niveaux crayeux, l'entreprise avait retenu un tracé implanté majoritairement dans les formations marneuses du Turonien.

Un premier tir a été interrompu à 341 ml dans les marnes, suite à des montées en pression inacceptables du fluide de forage dans l'espace annulaire (colmatage). Il a finalement été décidé de remonter le profil du forage pour rester dans les niveaux crayeux : ce deuxième tir s'est ensuite déroulé sans difficulté particulière.

A. Guilloux et H. Le Bissonnais



## Aménagement hydraulique EDF de Gavet

Isère, France

TERRASOL assure une mission globale d'expertise géotechnique pour le nouvel aménagement hydraulique de Romanche-Gavet (Isère), avec la participation d'Alain Guilloux au Comité Technique. Cet aménagement est constitué d'une galerie d'amenée de 9.3 km (4.7 m de diamètre), d'une cheminée d'équilibre de 180 m de haut, d'une conduite forcée de 163 m, et d'une centrale souterraine équipée de deux groupes de production, qui remplacera les six centrales existantes sur la Romanche et permettra d'augmenter les capacités de production de 10%. Le chantier Romanche-Gavet est le plus gros chantier hydraulique actuellement développé par EDF en France.

TERRASOL réalise parallèlement une mission d'assistance hydrogéologique et géotechnique en phase d'exécution pour les ouvrages aval de restitution, pour lesquels il a été réalisé un batardeau permettant l'excavation d'une fouille de 100 m sur 30 m, atteignant 12 m de profondeur. TERRASOL est intervenue dans la définition et le suivi de la campagne géotechnique début 2012, et dans la rédaction de la note d'hypothèses géotechniques. TERRASOL a ensuite assuré un contrôle externe des notes d'exécution du batardeau.



Crédit photo : Dodin Campenon Bernard

De plus, afin de dimensionner la solution de pompage nécessaire au rabattement de la nappe en-deçà du fond de fouille en cas de crue décennale, une étude hydraulique 3D a été conduite en s'attachant à représenter le plus fidèlement possible la réalité du terrain (stratigraphie irrégulière et présence d'une nappe profonde captive). Une étude paramétrique de sensibilité (débit, position des puits de pompage) a permis d'optimiser la solution de rabattement.

C. Bernuy et Y. Bagagli

## Barrage de Tabellout

Texenna, Algérie

L'Agence Nationale des Barrages et des Transferts d'Algérie (ANBT) a confié au groupement GEIE/RAZEL/CMC/RAVENA l'exécution du projet de barrage de Tabellout situé près de la ville de Texenna à 70 km environ au sud de la wilaya de Jijel (Algérie). Le projet comporte dans son ensemble la réalisation d'un barrage en béton compacté au rouleau (BCR) de 366 m de long et de 112 m de haut (capacité de retenue de 294 hm<sup>3</sup>), et d'une galerie de transfert de 4,3 m de diamètre (3,5 m de diamètre fini) et de 13 km de long, dont la réalisation est prévue au tunnelier (TBM).

Dès l'entame des travaux, en mars 2010, de nombreux problèmes géotechniques ont été mis en évidence, notamment un éboulement sur la rive gauche du barrage mais aussi de fortes dégradations des voussoirs de la galerie avec développement d'un éboulement, et un blocage du tunnelier pendant plus de 6 mois.



Sur demande du groupement d'entreprises et compte tenu de la complexité du contexte géologique, TERRASOL assure depuis juillet 2012 une mission d'assistance technique et de conseil au groupement sur les différents aspects géotechniques, notamment ceux relatifs à la prédiction du comportement du massif lors du creusement de la galerie, et tout particulièrement celui des argiles numidiennes et des zones de fauchage suspectées d'être à l'origine des problèmes rencontrés (blocage du tunnelier, éboulement de la galerie, dégradations importantes des voussoirs). Dans cette optique, un programme de sondage et d'essais a été défini par TERRASOL en concertation avec le groupement et le Maître d'Œuvre. Il s'agit de réaliser des sondages profonds réalisés depuis la surface pour ajuster si nécessaire le profil en long géologique, mais aussi des essais mécaniques dans une galerie de reconnaissance creusée latéralement à la galerie principale dans la zone de l'éboulement du tunnel.

M. Yahia-Aissa et A. Guilloux

## Approvisionnement en eau potable

Melamchi, Népal

L'objectif de ce projet est de fournir un approvisionnement en eau potable sûr et efficace dans la vallée de Katmandou, d'y améliorer les conditions sanitaires et d'aider ainsi au développement économique de la vallée. Il est prévu un tunnel de 26 km environ, 3 galeries d'accès (« adits ») et des ouvrages de déviation du fleuve à l'amont de la vallée. Le tunnel et les galeries d'accès, réalisés à l'explosif, s'inscrivent dans le massif précambrien du complexe Himalayen, caractérisé par des formations rocheuses avec un métamorphisme élevé. Les horizons concernés par le creusement du tunnel sont le gneiss, les quartzites et les schistes. Le soutènement retenu par le Maître d'Œuvre est constitué principalement de boulons radiaux et de béton projeté. La mise en place de cintres est préconisée dans les zones de roche les plus dégradées.

Les travaux ont débuté en avril 2010 avec une première entreprise, mais ils ont été interrompus en septembre 2012. En juin 2013, une nouvelle entreprise a été désignée : CMC (« Cooperativa Muratori e Cementisti di Ravenna »). CMC a demandé l'intervention de M. Marc PANET en tant qu'expert, et celui-ci a sollicité TERRASOL pour l'assister dans sa mission sur place en avril 2014. Les objectifs de cette mission étaient d'analyser les ouvrages déjà réalisés (environ 6 km au total de galerie d'accès et une partie du tunnel principal) et de proposer des recommandations pour la réalisation des sections restant à excaver.



La mission a permis de conclure que la stabilité à court terme des tronçons de tunnel déjà réalisés est assurée. Cependant, il est nécessaire de prévoir des travaux de reprise et confortement du soutènement en place pour garantir la pérennité de l'ouvrage. Il est préconisé en particulier un contrôle systématique de l'épaisseur et de la qualité du béton projeté. Des recommandations ont également été effectuées pour aborder les difficultés géologiques susceptibles d'être rencontrées lors de la suite de l'excavation et optimiser le cycle d'avancement ainsi que le soutènement/revêtement à mettre en place.

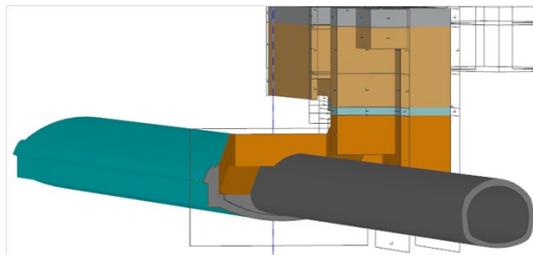
J.P. Janin

# Modélisation 3D des ouvrages souterrains

## Calculs aux éléments finis

La réalisation d'un ouvrage souterrain est un problème clairement tridimensionnel. Ceci est d'autant plus valable pour des projets présentant des géométries complexes, des méthodes d'excavation phasées, ou encore des interactions avec des structures avoisinantes.

Depuis quelques années, TERRASOL a conduit plusieurs modélisations d'ouvrages souterrains aux éléments finis en 3D afin de répondre au mieux aux différentes problématiques posées sur les projets : déplacements engendrés en surface et au droit des avoisinants, dimensionnement du soutènement provisoire et du revêtement définitif, renforcement des ouvrages existants, etc. Citons 2 exemples récents :



- Pour la chambre de démontage du tunnelier de la future extension de la ligne 14 à Paris, la modélisation 3D a permis de vérifier que la géométrie retenue pour l'ouvrage ainsi que la méthode d'excavation choisie permettent de respecter les seuils de tassements imposés au niveau des bâtis de surface.
- Pour la station de métro « Olympiades » (Paris), une modélisation 3D a été bâtie pour étudier les effets de la réalisation d'un nouvel accès secondaire sur l'ouvrage existant. Ce modèle a permis d'identifier les zones de la station les plus impactées par les travaux et de définir un dispositif d'auscultation approprié.

Les différentes études réalisées ont permis de conforter notre savoir-faire, de préciser les limites de ces modélisations, et par là même, d'être en mesure de proposer des approches adaptées aux objectifs recherchés, en fonction du stade d'avancement des études.

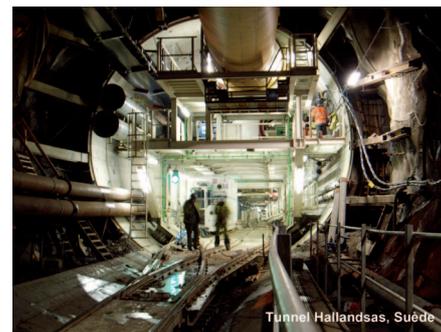
JP. Janin

## Comités techniques «Ouvrages souterrains»

Fréquemment, pour les grands projets d'ouvrages souterrains, les acteurs des chantiers mettent en place des comités techniques ou comités d'experts chargés de suivre, avec un regard externe, le déroulement des chantiers. Ces comités sont mis en place, soit par l'une des parties, maître d'ouvrage, maître d'œuvre ou groupement d'entreprises, soit conjointement par plusieurs de ces parties.

C'est ainsi que j'ai été sollicité, au cours des dernières années, pour participer à plusieurs de ces comités :

- métros : Toulouse ligne B, Lyon ligne B (tunnel sous-fluvial à Oullins), Le Caire (Egypte), Rennes ligne B ;
- tunnels routiers du Lioran, de Bois de Peu, de la Bussière et Chalosse sur l'A 89, de Miami (USA) ;
- tunnel ferroviaire de Hallandsås – Suède (ci-contre) ;
- descenderie de La Praz – LTF.



Le rôle de ces comités est d'assister les responsables des chantiers sur les grandes options prises en termes de méthodes et de conception, et sur les éventuelles difficultés rencontrées lors des travaux. Et ce avec une vision détachée du quotidien du chantier, permettant ainsi un plus grand recul, et par des experts ayant déjà eu l'occasion d'être confrontés à de multiples projets dans des contextes très variés, et donc capables de faire bénéficier les acteurs du projet de leurs nombreux retours d'expérience. Un rôle qui semble apporter une réelle plus-value, puisque ces comités tendent à se multiplier.

A. Guilloux

## Publications et interventions récentes

- Mise en place de la méthode observationnelle pour la construction d'une tête de tunnel (LGV Est lot 47) (O. Bril, E. Ducoin, R. Bourget et **S. Perrot-Minot**) – JNGG 2012 – Bordeaux, Juillet 2012
- Keynote lecture: Management of settlements for an urban tunnel, Toulon, France (**A. Guilloux** et **H. Le Bissonnais**) – Geotechnics for Sustainable Development - Geotec Hanoi 2013
- 2D and 3D numerical analysis for the design of a TBM dismantling cavern to be excavated under sensitive buildings for Paris metro line extension (**JP. Janin**, A. Martin et O. Gastebled) – NUMGE 2014 - Delft, Juin 2014
- South Toulon tube : 3D numerical back-analysis on in situ measurements (**JP. Janin**, **H. Le Bissonnais**, **A. Guilloux**, D. Dias, R. Kastner et F. Emeriault), 8<sup>th</sup> International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Seoul, Août 2014
- Puits de reconnaissance et essais en vraie grandeur pour une nouvelle gare RER à La Défense (**J. Marlinge**, T. Perini, A. Martin, **H. Le Bissonnais**) – JNGG 2014 – Beauvais, Juillet 2014
- Tunnel de Saverne (LGV Est) : Déroulement des études géologiques et géotechniques en phase conception et travaux dans le cadre d'un processus de maîtrise des risques (**H. Le Bissonnais**, **P. Legrand**, PL. Veyron, A. Lacroix et A. Cuccaroni) – Congrès AFTES, Lyon, Octobre 2014
- Prise en compte des effets différés dans les ouvrages géotechniques enterrés (**G. Tzimas**, **H. Le Bissonnais**, R. Witasse) – Congrès AFTES, Lyon, Octobre 2014



Scannez ce QR Code avec votre Smartphone

### Siège social

Immeuble Central Seine  
42-52 quai de la Râpée  
75583 Paris Cedex 12  
France

Tel : +33 (0)1 82 51 52 00  
Fax : +33 (0)1 82 51 52 99  
Email : [info@terrasol.com](mailto:info@terrasol.com)

### Agence Rhône-Alpes

Immeuble le Crystallin  
191/193 cours Lafayette  
69458 Lyon Cedex 06  
France

Tel : +33 (0)4 27 85 49 35  
Fax : +33 (0)4 27 85 49 36  
Email : [lyon@terrasol.com](mailto:lyon@terrasol.com)

### Terrasol Tunisie

2, rue Mustapha Abdessalem  
El Menzech  
2037 Tunis  
Tunisie

Tel : +276 71 23 63 14  
Fax : +256 71 75 32 88  
Email : [info@terrasol.com.tn](mailto:info@terrasol.com.tn)

Conception, mise en page :  
Margot COWBURN