

## La ligne 14 Sud du Grand Paris Express : les ouvrages géotechniques à l'honneur !



TERRASOL intervient actuellement sur les lignes 14 Sud et 15 (en Maîtrise d'Œuvre), ainsi que 16 et 18 (en AMO Géotechnique) du projet Grand Paris Express.

L'extension de la ligne 14 vers le sud reliera la capitale à l'aéroport d'Orly. Construit entièrement en souterrain, ce tronçon est composé de 14 km de tunnels, de 6 stations et de 12 puits, dont un de dimension exceptionnelle, à 66 m de profondeur. Les délais serrés (la mise en service de ce tronçon est prévue pour les Jeux Olympiques de Paris 2024) et l'ampleur des travaux ont imposé une division du projet en 4 lots avec 4 groupements d'entreprises différents, et la mise en service de 3 tunneliers dont 2 ont déjà été baptisés « Claire » (en référence à Claire Mérouze, la 1<sup>ère</sup> femme à avoir été à 25 ans aux commandes d'un Rafale) et « Koumba » (en référence à Koumba Larroque, championne de lutte).

L'une des principales complexités techniques de ce projet est l'excavation du tunnel pour le lot 2 sous les anciennes carrières d'exploitation du Calcaire Grossier (CG) et des Masses et Marnes du Gypse (MFL). Pour sécuriser les travaux en zone urbaine, il a été décidé d'injecter toutes les carrières et décompressions du terrain au-dessus du tunnel sur une largeur définie en étude entre 20 et 30 m. Ces travaux d'injection dans un environnement urbain dense constituent un défi majeur, qui nécessite de minimiser les nuisances pour les résidents malgré la coactivité de plusieurs sites en travaux.

L'équipe TERRASOL, au sein du groupement de Maîtrise d'Œuvre SETEC/SYSTRA, intervient actuellement à la fois sur la mission

Visa des études d'exécution et sur le suivi géotechnique de chantier (après avoir assuré les phases d'études). A ce stade, le suivi géotechnique est principalement axé sur les travaux de comblement des carrières, l'exécution des parois moulées et les terrassements des gares et ouvrages annexes.

La présence des carrières d'exploitation du sous-sol parisien impose des conditions géotechniques difficiles : la présence des vides / décompressions des terrains et des remblais non compactés de carrières génère des mécanismes d'instabilité dès la phase de forage des travaux d'injection :

- Mécanisme local et rapide : 2 fontis ont été déclenchés fin 2018 dans le secteur du Kremlin-Bicêtre où les carrières sont reconnues sur plusieurs niveaux, en mauvais état avec des ciels de carrières très instables. Les carrières sont à faible profondeur dans le CG, sous une couverture de Marnes et Caillasses parfois décomprimées.
- Mécanisme lent et étendu à l'échelle du quartier de Marcel Sembat : ce quartier du Kremlin-Bicêtre repose sur un versant où les MFL affleurent, avec des carrières du CG en profondeur. Des décompressions importantes et des carrières d'exploitation ont été observées en phase étude dans les MFL.

Dans la mesure où les carrières et les décompressions sont confortées par les travaux d'injection prévus au marché, le passage du tunnelier ne devrait pas créer d'instabilités, mais seulement un tassement supplémentaire, à prendre en compte dans l'analyse de vulnérabilité des bâtis concernés.

## Édito

Terrasol poursuit sa belle trajectoire de croissance, aussi bien en termes d'activité que d'effectifs.

Ces derniers mois ont été marqués pour nous par l'augmentation significative de nos effectifs détachés en mission, avec actuellement une dizaine d'ingénieurs sur chantiers en Maîtrise d'Œuvre Travaux dans le cadre du projet Grand Paris au sens large, 2 ingénieurs en suivi de travaux sur le site de l'Andra à Bure, et 3 ingénieurs au Royaume-Uni au sein de la « Design JV » d'un des lots du projet High Speed 2. Preuve s'il en est besoin que nous savons nous mobiliser « à l'extérieur », pour tous types de missions géotechniques ! Et que nous disposons de riches retours d'expérience « chantier » que nous saurons valoriser sur nos futurs projets

Dans un autre domaine, nous sommes fiers de vous annoncer l'aboutissement cette année de 2 thèses CIFRE portées par Terrasol : Khadija Nejjar soutiendra le 4 juillet prochain sa thèse sur le « Comportement des parois de soutènement dans un contexte exceptionnel (application à la gare Fort d'Issy-Vanves-Clamart du Grand Paris Express) » ; Jesús Perez Herreros soutiendra sa thèse à l'automne 2019 : « Comportement sismique des fondations profondes : vers l'introduction d'un aspect fréquentiel dans l'outil macroélément ». Tous deux rejoignent à présent les équipes Terrasol.

Enfin, je suis heureuse de vous présenter le logiciel Slake, notre nouvel outil d'analyse quantitative du risque de liquéfaction, dernier-né de la gamme des logiciels Terrasol de calcul géotechnique, et qui propose des fonctionnalités optimisées sur le plan scientifique comme sur le plan de la convivialité d'utilisation.

Souhaitant à tous nos lecteurs un bel été !

V. Bernhardt

A cela s'ajoutent de nombreuses contraintes : limitation des emprises, présence d'avoisnants sensibles, découverte de nouvelles zones exploitées ou de mécanismes de fontis en cours non répertoriés sur les cartes IGC, etc. Début mai 2019, environ 50 % des travaux d'injection des carrières ont été réalisés.

A. Bergère, E. Geay et P. De Oliveira

## Restauration de l'Hôtel de la Marine

Paris, France



Crédit photo : @DR

TERRASOL intervient actuellement sur la restauration-reconversion de l'Hôtel de la Marine, au sein de l'équipe de Maîtrise d'œuvre dirigée par le cabinet 2BDM Architectes, et pour le compte du Centre des Monuments Nationaux. Ce bâtiment du 18<sup>ème</sup> siècle se situe le long de la place de la Concorde à Paris.

Le chantier en cours sur ce monument a pour objectif, entre autres, de permettre l'ouverture du monument au public et de créer sur les étages supérieurs des bureaux. Dans ce cadre, les modifications structurelles et quelques faiblesses locales ont conduit en phase études à retenir un renforcement de certaines fondations existantes.

Plusieurs techniques ont été choisies en interaction avec le bureau d'études EQUILIBRE STRUCTURES : injections en résine expansive, micropieux, puits blindés alternés.

Par ailleurs, un diagnostic de la portance des cours a été mené afin d'indiquer à la Maîtrise d'Ouvrage les véhicules pouvant circuler zone par zone. Un couplage entre investigations géophysiques et géotechniques a permis d'avoir une vision générale des sols en surface et de localiser certaines zones de faiblesse et des ouvrages enterrés (réseaux, ...). TERRASOL assure à présent la supervision des études et des travaux d'exécution. Pour ce faire, nous assurons des visites de chantier régulières afin d'assurer un contrôle des travaux effectués.

M. Brun et S. Messikh

## De nouvelles tours à Casablanca

Maroc

Depuis quelques années, TERRASOL est fortement impliquée aux côtés de SETEC MAROC dans la conception et le suivi géotechnique d'exécution de plusieurs projets de tours et immeubles de grande hauteur à Casablanca : Tour CFC, Tour BCP, Tour Attijari, projet RMC.

Les missions réalisées portent sur les différentes étapes de construction de ces tours. Nous sommes notamment sollicités dans le cadre de la réalisation des fouilles et des terrassements préalables dans des environnements urbains sensibles : il est nécessaire de concevoir/étudier des techniques de confortement appropriées à la nature rocheuse des terrains en place (fracturation de la roche, présence d'eau, etc.).

Nos missions incluent également la conception du système de fondation de ces tours en termes de portance et de raideur, avec prise en compte de l'interaction sol-structure pour des combinaisons d'actions statiques et sismiques, ou encore les aspects relatifs au drainage et à l'assainissement.

Le suivi d'exécution de ces différents projets permet par ailleurs de disposer de riches enseignements sur le comportement réel des ouvrages. L'expérience ainsi accumulée par TERRASOL et SETEC MAROC sur ces différents projets devrait permettre à l'avenir de proposer des solutions constructives avec des coûts optimisés tout en garantissant une fiabilité et une robustesse optimales.

S. Burlon et T. El Malki



## Projet hydroélectrique de Banda Azul

Bolivie



Située sur les contreforts de la cordillère orientale séparant la plaine amazonienne des hauts plateaux andins, la province bolivienne de Chaparé (département de Cochabamba) présente un fort potentiel hydroélectrique que la Bolivie développe pour faire face à la forte croissance des besoins énergétiques du pays.

Dans le cadre du projet Banda Azul, développé par ENDE CORANI (compagnie bolivienne d'électricité), le groupe SETEC intervient pour le compte de l'AFD (Agence Française de Développement), co-financier du projet, pour une mission d'expertise sur les thématiques de gestion des sédiments et de géologie/géotechnique.

Suite à une mission de terrain effectuée en décembre 2018 et sur la base des investigations géotechniques déjà réalisées, TERRASOL est en charge d'une revue de conception géotechnique de l'ensemble des ouvrages de ce projet.

Ceux-ci incluent un barrage poids en béton d'une cinquantaine de mètres de retenue, un tunnel d'adduction de sept kilomètres, des puits et cheminées de décompression souterrains, une salle des machines, un tunnel de déviation des sédiments d'un kilomètre, ainsi qu'une dizaine de seuils permettant un contrôle des sédiments.

A. Beaussier

## Extension de l'aéroport de Tribhuvan (Katmandou)

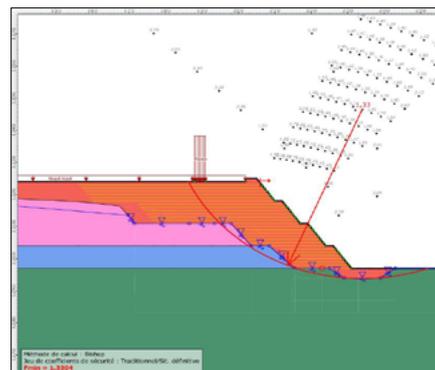
Népal

Katmandou, capitale et porte d'entrée du Népal, est une destination réputée pour son patrimoine culturel et naturel. L'aéroport de la ville est donc un élément majeur du développement du pays. Sa modernisation et son renforcement capacitaire ont été confiés à la Maîtrise d'Œuvre d'ADPi. L'infrastructure est établie sur une colline, et le projet de création de tarmacs et taxiways s'expose à une double difficulté : absorber des dénivellés importants et tenir compte des possibilités d'extension limitées (la ville ceinture l'aéroport).

ADPi a confié à TERRASOL la conception des soutènements, avec de nombreuses problématiques géotechniques : remblais de grande hauteur (jusqu'à 28 m de hauteur) ; aléa sismique fort (séisme de magnitude 7,9 le 25 avril 2015) ; site localisé en fond de vallée sur des terrains liquéfiables ; et plateforme sensible aux tassements.

Pour le dimensionnement des ouvrages, TERRASOL a utilisé une campagne de reconnaissances mettant en œuvre des SPT, des carottages, et des essais en laboratoire. La synthèse permet d'établir, pour chaque site, les modèles géotechniques et le potentiel de liquéfaction selon la méthode NCEER (avec notre nouveau logiciel SLAKE).

Le dimensionnement des remblais renforcés a été effectué avec TALREN, et les tassements de la plateforme ont été évalués avec le module Tasseldo du logiciel FOXTA. Le tassement lié au fluage dans le temps avec prise en compte des éléments de renforcement a été étudié grâce à un modèle PLAXIS 2D.



F. Binet

## Vers de nouveaux Eurocodes structuraux et géotechniques

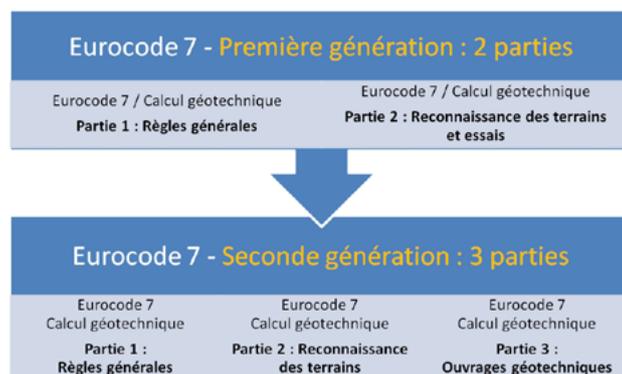
Normalisation

TERRASOL a toujours été très impliquée dans les activités de recherche et développement, ainsi que dans les actions de normalisation. Dans le cadre de la mise en place de la seconde génération des Eurocodes, TERRASOL participe actuellement aux travaux de la dernière équipe projet en charge de la version finale des trois nouvelles parties de l'Eurocode 7 qui sont à finaliser pour avril 2021. Le vote de ce nouvel Eurocode 7 (et des autres Eurocodes) devrait intervenir en 2022, pour une application probable en 2024.

Le nouvel Eurocode 7 traitera de nouveaux sujets : simplification des formats de sécurité, gestion de la fiabilité des études, effets de l'eau, charges dynamiques et cycliques, mécanique des roches, etc. L'objectif est de disposer d'une norme européenne de conception géotechnique facilement applicable en Europe, mais aussi et surtout hors Europe, en promouvant les différentes facettes de l'ingénierie européenne. Il s'agit ainsi de tirer profit des principaux savoir-faire européens pour optimiser les ouvrages géotechniques et rendre l'ingénierie européenne réellement compétitive.

Au niveau français, il s'agira ensuite de mettre à jour les différentes normes d'application nationale de l'Eurocode 7, et le cas échéant de proposer de nouvelles normes détaillant les sujets complémentaires abordés.

S. Burlon



## Une première usine de valorisation des déchets à Sharjah

Emirats Arabes Unis

L'Émirat de Sharjah a créé en 2007 une société municipale de gestion des déchets, BEE'AH (partenariat public-privé), qui a choisi CNIM pour concevoir et construire la première usine de valorisation des déchets (Waste-to-Energy) aux Emirats Arabes Unis. L'usine convertira à terme 300 000 tonnes de déchets par an en 30 MW. L'électricité produite sera transportée vers Sharjah (sauf pour la partie utilisée pour les besoins propres de la centrale).

TERRASOL intervient pour le compte de CNIM, en sous-traitance de SETEC ENERGIE ENVIRONNEMENT, et a d'abord réalisé une mission de diagnostic géotechnique qui a permis de proposer des optimisations des fondations des ouvrages.

TERRASOL a ensuite participé aux études d'exécution de ce projet : conception géotechnique des fondations des ouvrages majeurs de la centrale (chaudière, massif turbine, zone de stockage des déchets) et étude notamment des interactions entre ouvrages sur fondations profondes et ouvrages sur radiers (estimation des déformées, prise en compte des effets du frottement négatif sur les pieux).

TERRASOL assure enfin un encadrement technique sur site pour la phase de démarrage des travaux de fondations profondes en mai 2019.



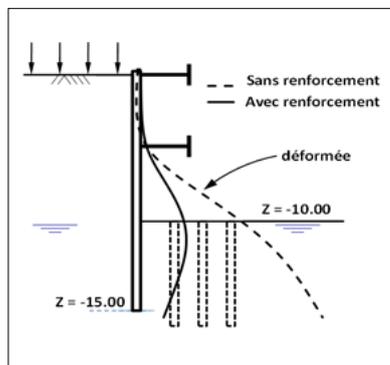
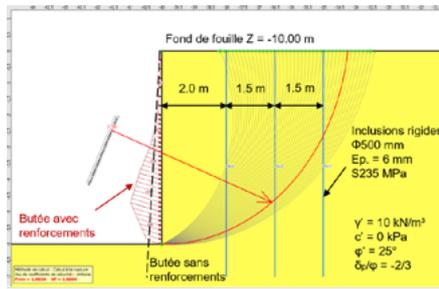
Crédit photo : Bee'ah

C. Bernuy et J.Drivet

## Apports combinés de Talren et K-Réa

Le cas d'application ci-contre d'un écran de palplanches fiché dans un sol limoneux et renforcé par inclusions rigides illustre les apports combinés de Talren et K-Réa.

Dans une première étape, à l'aide de la méthode cinématique du calcul à la rupture, Talren permet d'établir le diagramme de butée mobilisable tenant compte de l'interaction avec les inclusions (assimilées à des clous travaillant en flexion/cisaillement).



La figure ci-dessus illustre l'augmentation de la butée mobilisable par rapport à un sol non renforcé.

Dans un 2<sup>ème</sup> temps, le diagramme de butée limite obtenu peut être importé dans K-Réa en vue d'analyser l'équilibre local de l'écran en termes de sollicitations et de déplacements, tenant compte de la contribution résistante des inclusions.

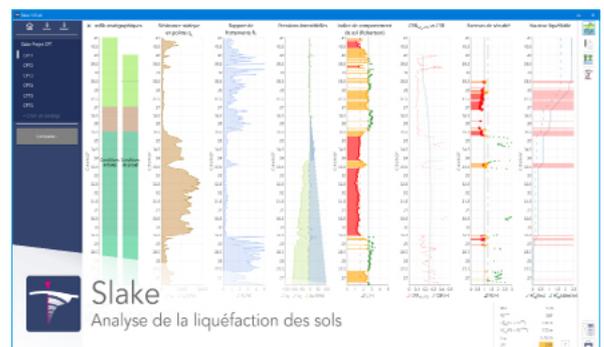
## Plaxis 2D et 3D

PLAXIS BV a rejoint le giron du groupe BENTLEY SYSTEMS à l'été 2018. Les logiciels Plaxis 2D et 3D sont donc désormais intégrés au catalogue des produits Bentley. Ils sont toujours distribués en France (et dans certains pays francophones) par TERRASOL, qui continue également d'assurer le support technique et les formations pour ces logiciels.

## Slake : votre nouvel « outil liquéfaction »

Slake est le dernier-né des logiciels TERRASOL : il est dédié à l'analyse quantitative de l'aléa de liquéfaction des sols sous sollicitations sismiques par application de la méthode semi-empirique directe dite « NCEER » (Youd et Idriss, 2001).

La phase de beta-test se termine et Slake sera commercialisé dès cet été. Nous aurons l'occasion de le présenter lors du Salon Solscope les 26 et 27 juin à Marseille. N'hésitez pas à nous contacter dès à présent !



M. Huerta

## Publications et interventions récentes

- Ligne 15 Sud : Retex de la gare Fort-d'Issy-Vanves-Clamart (**K. Nejjar**) – Journée Scientifique et Technique du CFMS / Grands Projets d'infrastructures en région parisienne, Paris, mars 2019
- Shallow chalk quarry stability using an original shear strength reduction approach (F. Rafeh, H. Mroueh et **S. Burlon**) – Computers and Geotechnics 112, avril 2019
- Etude expérimentale en centrifugeuse du comportement d'un groupe de pieux sous séisme (**J. Perez Herreros**) – Présentation à la Journée Scientifique et Technique CFMS Jeunes, Paris, avril 2019
- Exemples de problèmes posés dans la justification des ouvrages mêlant géotechnique et parasismique (**F. Cuira**) – Présentation à la Journée Scientifique et Technique CFMS Jeunes, Paris, avril 2019
- Kourou, centre spatial guyannais : nouvel ensemble de lancement pour Ariane 6 (**C. Babin, F. Binet et M. Hocdé**) - Solscope Mag n°12, avril 2019
- Edito Revue Travaux - Numéro Sols et Fondations (**V. Bernhardt**) - Revue Travaux n°950, avril/mai 2019
- A macroelement for dynamic soil-structure interaction analysis of pile-group foundations (**J. Perez-Herreros, F. Cuira, S. Escoffier et P. Kotronis**) - 7<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Rome, juin 2019

### World Tunnel Congress (WTC) 2019, Naples, mai 2019

- South extension of the metro Line 14 in Paris – focus on Limestone quarries grouting (**A. Bergère, M. Coblard, JP. Janin, F. Lanquette et PL. Le Tolguenec**)
- Arcueil-Cachan, Grand Paris Express Metro Station (S. Telhawi, L. de Saint-Palais, **G. Chapron, JP. Vaysse, B. Mougel et J. Royer**)
- Performance and modelling of Fort-d'Issy-Vanves-Clamart metro station: a 32 m deep excavation of the Grand Paris project (**K. Nejjar, D. Dias, F. Cuira, H. Le Bissonnais et G. Chapron**)
- 3D numerical back-analysis on an experimental conventional tunnel in Paris Sanoisian "Green" Clay (**JP. Janin, A. Beaussier et H. Le Bissonnais**)



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 : [terrasol@setec.com](mailto:terrasol@setec.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 : [terrasol@setec.com](mailto:terrasol@setec.com)

### Représentation au Maroc

Setec Maroc  
3, rue Abou Hanifa  
Agdal  
Rabat-Maroc

Tel : +212 (661) 25 53 89  
Fax : +212 (529) 03 64 00  
Email : [tarik.elmalki@setec.com](mailto:tarik.elmalki@setec.com)

### Terrasol Tunisie

2, rue Mustapha Abdessalem  
El Menzeh  
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)