

## Terrasol met en place une cellule d'expertise dédiée à l'ingénierie sismique et dynamique



L'ingénierie sismique et dynamique a connu ces dernières années un essor significatif dans l'activité de TERRASOL, répondant à une volonté de plus en plus forte des donneurs d'ordre et des entreprises de fiabiliser la conception des ouvrages vis-à-vis du risque sismique et vibratoire.

On peut citer à titre d'exemple le projet KNPC à Al Zour au Koweït (cf photo) pour lequel TERRASOL s'est vue confier la conception parasismique des fondations de 8 réservoirs méthaniers de 90 m de diamètre. Le caractère particulier du projet réside dans le choix d'un système de fondation sur inclusions rigides permettant d'isoler l'ouvrage porté vis-à-vis des sollicitations sismiques transmises par le sol porteur. TERRASOL est également intervenue récemment sur le projet EPR Hinkley Point (UK) aux côtés de SETEC NUCLÉAIRE pour optimiser la justification de la stabilité sismique de certaines installations du projet par des analyses dynamiques non-linéaires. Citons encore la mission récente de TERRASOL auprès du groupe RENAULT pour qualifier et valider la performance dynamique et vibratoire de la fondation d'un simulateur de véhicules autonomes.

Conscients de la complexité croissante des études dans ce domaine, et de l'importance de capitaliser sur les retours d'expérience acquis dans le cadre de nos projets, nous avons créé courant 2019 une cellule « Dynamique » au sein de TERRASOL, avec l'objectif de proposer à nos clients des réponses ciblées et robustes sur les thématiques suivantes :

- Réponse dynamique et sismique de site 1D / 2D ;
- Prise en compte des effets d'interaction

sol-structure dans la justification des ouvrages sous actions sismiques et vibratoires ;

- Modélisation de la réponse des structures et des fondations sous chargement dynamique complexe (chocs, vent, houle, etc.) ;
- Prise en compte des non-linéarités dans la justification des ouvrages sous fortes sollicitations dynamiques (séismes extrêmes, chocs et impacts, etc.).

La réalisation de ces prestations repose notamment sur une parfaite maîtrise par nos équipes de plusieurs codes de calcul spécialisés comme SASSI/MISS-3D, Plaxis Dynamique 2D/3D, Flac 2D/3D, ou encore Code\_Aster. Et les actions menées dans le cadre de notre Cellule Dynamique bénéficient de l'appui de plusieurs experts reconnus de TERRASOL et des autres sociétés du groupe SETEC, ainsi que de consultants extérieurs comme Françoise Ropers et Alain Pecker.

Enfin, la Cellule Dynamique de TERRASOL a également pour vocation de poursuivre et valoriser nos travaux de développement scientifique menés ces dernières années dans le domaine de l'interaction sol-structure (ISS) sous séisme : nous avons ainsi par exemple co-encadré une thèse CIFRE sur le comportement dynamique des groupes de pieux, et réalisons une mission pour le compte d'EDF portant sur le développement dans Code\_Aster d'un macro-élément dynamique permettant de simuler les non-linéarités matérielles à l'interface sol-fondation. Ces actions ont nourri le développement d'outils d'ingénierie spécialisés comme Fondsis (ISS non-linéaire sous séisme) et Slake (analyse du risque de liquéfaction). Ces deux outils

## Édito

L'équipe de TERRASOL s'est encore agrandie pendant l'année 2019, et se structure pour porter le développement de notre ingénierie géotechnique au plus près de nos clients et partenaires, à la fois sur les grands projets (Grand Paris Express, High Speed 2 / UK, Chantier 4 à Bure, etc.), dans le cadre des prestations géotechniques sur tous types d'ouvrages en France et à l'étranger, ainsi que vers de nouveaux champs d'application de la géotechnique ou encore des développements scientifiques innovants, avec par exemple le démarrage début 2020 d'une nouvelle thèse CIFRE. Cette thèse, en partenariat avec le Laboratoire Navier, sera consacrée à la réduction des incertitudes sur le comportement des sols lors du creusement des tunnels au tunnelier par l'analyse en continu des données collectées (avec application à 2 tronçons du Grand Paris Express).

Par ailleurs, nous avons finalisé et commercialisé récemment le logiciel Slake (analyse du risque de liquéfaction), et préparons notamment la version 4 de notre logiciel Foxta.

Enfin, notre offre de formation à la conception et la modélisation d'ouvrages géotechniques continue de s'étoffer et de s'élargir, géographiquement d'abord, et aussi à travers les thématiques abordées.

L'année 2020 s'annonce donc une fois de plus bien remplie, et promet de nouveaux défis passionnants pour nos équipes !

Nous vous souhaitons une très belle année 2020.

Valérie Bernhardt

permettent notamment d'approfondir la notion de stabilité sismique des ouvrages en s'affranchissant de l'impasse conceptuelle des formalismes de justification pseudo-statique et en chiffrant l'état limite sismique en termes de déplacements. Ces actions se poursuivent aujourd'hui avec le lancement d'une nouvelle thèse portant sur le développement d'un macro-élément pour les ouvrages fondés sur inclusions rigides dans le cadre du Projet National ASIRI+.

J. Pérez Herreros et F. Cuir

## Plusieurs projets de ponts à Abidjan

Abidjan, Côte d'Ivoire

Abidjan, capitale de la Côte d'Ivoire, est construite sur une succession d'îles, de presqu'îles et de lagunes. Tout projet d'infrastructure dans cette ville doit donc franchir différents bras de mer, et comporte ainsi des ouvrages d'art, parfois avec des portées très importantes. Les conditions géologiques et géotechniques des différents sites sont particulièrement complexes : des matériaux compressibles et inconsistants (vases) sur des épaisseurs importantes (parfois plus de 30 m), des alluvions sableuses peu denses (en tête) dont le comportement est souvent en-deçà des attentes, un substratum très profond (plus de 80 m).

L'expertise de TERRASOL est souvent sollicitée par les différents acteurs de la construction (MOA, MOE, entreprises, etc.) dans le cadre de la conception et/ou de la réalisation des fondations profondes des ouvrages les plus emblématiques d'Abidjan :

- Pont de Cocody (« 5<sup>ème</sup> pont ») : assistance à l'entreprise CRBC dans l'interprétation des essais de pieux en phase exécution,
- Pont du Banco (« 4<sup>ème</sup> pont ») : expertise géotechnique, pour le compte du groupement de Maîtrise d'Œuvre Travaux composé de SETEC TPI, SETEC COTE D'IVOIRE, SETEC INTERNATIONAL, TERRABO et STUDI,
- Pont Henri Konan-Bédié (ou pont Riviera – Marcory, ou « 3<sup>ème</sup> pont ») : assistance à l'entreprise BOUYGUES TP pour les études des fondations,
- Pont Félix Houphouët Boigny (« 2<sup>ème</sup> pont ») : expertise géotechnique pour le compte du groupement de Maîtrise d'Œuvre Travaux SETEC TPI / SETEC COTE D'IVOIRE / SGI / IETF,
- Pont de Jacqueville : expertise sur les pieux de fondation de l'ouvrage pour le compte du Maître d'Ouvrage.

Par ailleurs, TERRASOL intervient également sur des projets d'aménagement tels que celui de la baie de Cocody ou le Rond-Point Indénié. L'expérience de TERRASOL en fait ainsi une ingénierie de référence pour les projets géotechniques complexes à Abidjan.

J. Drivet



## Construction du siège de la société de Jungheinrich

Vélizy-Villacoublay, France

Implantée en France depuis 55 ans, la société JUNGHEINRICH, référence mondiale dans le secteur de l'intralogistique (équipements de manutention, de systèmes de stockage et de services) prévoit la reconstruction du siège de sa succursale française à Vélizy-Villacoublay, en région parisienne. Le projet, d'une superficie d'environ 7200 m<sup>2</sup>, consiste en la démolition du siège existant, et la construction de deux bâtiments de bureaux de type R+6 et R+3, ainsi que d'un parc de stationnement sur 2 niveaux de sous-sols.

TERRASOL a été missionnée par JUNGHEINRICH et son architecte pour réaliser les missions géotechniques G2 AVP, G2 PRO/DCE (études géotechniques d'avant-projet et de projet) et G4 (suivi géotechnique d'exécution).

Forte de son expérience dans le contexte géotechnique local (intervention passée sur le projet du centre commercial de Vélizy par exemple), TERRASOL a accompagné le Maître d'Ouvrage des études de conception en 2016, jusqu'aux travaux démarrés en 2018, en définissant des solutions adaptées et économiques pour les fondations et soutènements (semelles superficielles et voiles par passes). Le premier bâtiment a été réalisé en 2019 ; l'ensemble du projet sera inauguré courant 2020.

K-V. Nguyen



## Interventions multiples dans le domaine des carrières

France



TERRASOL répond à un nombre croissant de sollicitations dans le domaine des carrières. Les clients sont multiples : GSM, EQIOM, PLACOPLÂTRE, KNAUF, etc., et les demandes techniquement diversifiées :

- Etudes de projets de développement (extensions, construction d'installations industrielles),
- Etudes de points particuliers du dossier d'autorisation (impact sur les ouvrages avoisinants),
- Expertises à l'occasion d'un incident d'exploitation (glissement / éboulement),
- Diagnostics de sites en vue de leur abandon ou de leur réhabilitation (stabilité à long terme, stockage d'inertes).

Nous sommes par exemple intervenus récemment pour le compte d'EQIOM, gestionnaire de carrières, dans le cadre de la recherche de sites d'entreposage d'inertes, en particulier en provenance des importants travaux du Grand Paris. L'un des sites étudiés est constitué d'anciennes carrières souterraines, dont le comblement présenterait un double avantage : le

stockage d'inertes sans impact environnemental, et la sécurisation définitive d'un site abandonné sans réhabilitation. TERRASOL a fourni un diagnostic de faisabilité du projet en inspectant les galeries afin d'apprécier les aléas géotechniques du site, et d'envisager les aléas résiduels à l'issue des comblements.

Autre exemple : le producteur d'agrégats routiers CARRIERES DU STINKAL a consulté TERRASOL dans le cadre de la mise en œuvre de reconnaissances pour évaluer le potentiel d'une extension de carrière. Les observations en carrière, puis l'exploitation d'une campagne de reconnaissances mêlant sondages et profils géophysiques ont permis d'identifier et de localiser une faille qui bornait l'extension du gisement.

Le principal point commun de ces différentes prestations est le pragmatisme des questions posées, les entreprises étant bien conscientes des contraintes imposées par la situation géologique des sites.

F. Binet

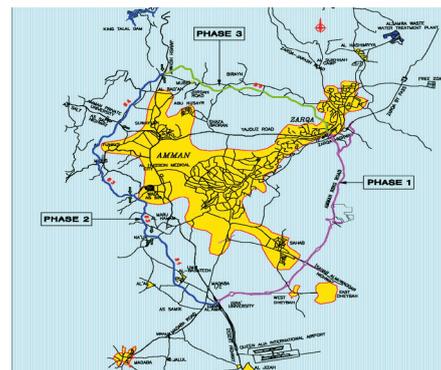
## Contournement d'Amman

Amman, Jordanie

Le projet de contournement de la capitale jordanienne (Amman Development Corridor) porte sur la réalisation d'une voie rapide située à une distance de 10 à 25 km de la capitale pour relier l'aéroport au Sud à l'autoroute de Jerash au Nord, en passant par la route de la Mer Morte et les agglomérations adjacentes. Le projet vise à désenclaver le trafic urbain, réduire la pollution, faciliter le transfert de marchandises et favoriser le développement économique des régions desservies. La Banque Mondiale a missionné le groupe SETEC pour l'assister techniquement dans une démarche de Value Engineering sur la phase 2 située à l'ouest. Une visite de site et une analyse critique des études existantes ont été suivies de l'exploration de pistes d'optimisations (techniques et financières) du projet pour aboutir à une consolidation du dossier d'appel d'offres.

TERRASOL était en charge d'analyser les études géotechniques de dimensionnement des tunnels et des ouvrages d'art. Sur un linéaire de 50 km, il est prévu 6 tunnels et 14 viaducs. Il s'agit de tunnels bi-tubes de 100 m<sup>2</sup> en surface d'excavation par tube, avec une couverture pouvant dépasser 100 m. Les tunnels seront creusés selon la méthode traditionnelle avec recours ponctuel à l'explosif. Les viaducs traversant les oueds sont de longueurs variables allant jusqu'à 500 m, avec des piles de 50 m de haut. Deux systèmes de fondations sont proposés : fondations superficielles ou caissons profonds.

La revue des hypothèses, des méthodes de calcul et des choix de conception a été effectuée en tenant compte de la géologie locale. Puis nous avons étudié la modification du tracé existant pour aboutir à une réduction des nombres d'ouvrages et en conséquence du budget global.



Credit photo : Engicon

A. Abboud et J. Targhaoui

## Projet ATM – Couverture d'une plateforme ferroviaire existante

Paris, France

La couverture de la plateforme ferroviaire entre la gare d'Austerlitz et le boulevard des Maréchaux dans le sud-est parisien a été amorcée dans les années 1990 sous le nom de projet « ATM » (Austerlitz Tolbiac Masséna) et TERRASOL est déjà intervenue sur plusieurs îlots par le passé. La réalisation de l'îlot M10VP comprend la construction de 10 dalles de couverture (près de 9 300 m<sup>2</sup>), destinées à terme à supporter des bâtiments de type R+1 à R+13, des aires paysagées, des voiries et un pont-rail au niveau de la Petite Ceinture.

Dans un contexte géologique particulier (amenuisement et altération progressive de la "dalle" de Calcaire Grossier vers l'Est, surmontant les fausses glaises de l'Yprésien), les conditions d'exécution des travaux ont fortement influencé la conception compte-tenu de l'impérieuse nécessité de limiter l'impact sur les circulations ferroviaires, des accès et emprises de chantier. Ces contraintes ont justifié le recours à un dispositif de fondations profondes par files de barrettes faiblement espacées, associant la réalisation de fondations neuves à l'utilisation de barrettes préexistantes. Outre les barrettes, localement injectées en pointe, les travaux géotechniques comprennent des parois berlinoises provisoires destinées à soutenir les voies ferrées pendant la réalisation des semelles BA des appuis de fûts, et une dalle provisoire portée sur micropieux pour permettre l'évolution des engins de forage lourds dans des emprises chantier très exigües.

Le Maître d'œuvre SNCF RESEAU DGII a confié à TERRASOL une mission globale d'accompagnement technique, comportant les missions G2 AVP/PRO (conception), G2 DCE/ACT (consultation des entreprises), G4 Visa et G4-DET (assistance technique à la réalisation des travaux géotechniques).

M. Hocdé et F. Cuira



## Grand Paris Express - Assistance à Maîtrise d'Ouvrage géotechnique

Île-de-France, France

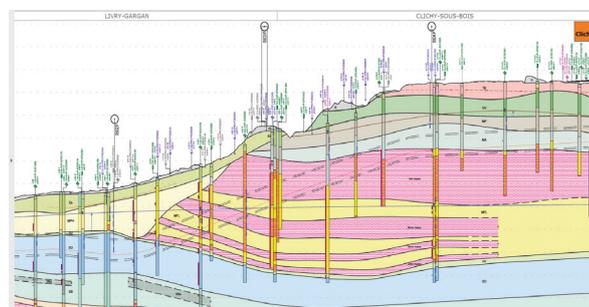
Dans le cadre du projet du Grand Paris Express, les missions d'Assistance à Maîtrise d'Ouvrage (AMO) auprès de la SOCIÉTÉ DU GRAND PARIS sur les aspects géologiques et géotechniques prennent une envergure exceptionnelle, qui s'exprime en termes non seulement de volume de données à examiner, mais aussi de volume de prestations, conseils et échanges entre le Maître d'Ouvrage et son AMO. TERRASOL intervient en AMO géotechnique sur les futures lignes 16 et 18 de ce projet.

Dans ce cadre, nos interventions sont multiples et évoluent en fonction de l'avancement du projet :

- En phase reconnaissances : prise en compte des demandes du Maître d'Œuvre en termes de données géologiques, géotechniques et hydrogéologiques. TERRASOL assure la définition des programmes (ou le contrôle des programmes proposés par la MOE), le suivi des campagnes, la validation des données et leur mise à disposition.
- En phase études : mission de second regard sur des ouvrages ou des conceptions clés du projet, le principe étant de consolider certains choix en procédant à des conceptions en double « aveugles », d'apprécier les divergences de méthodes pour assurer une revue exhaustive des aléas et l'optimisation des ouvrages.
- En phase travaux : partage avec le Maître d'Œuvre de la vision technique du projet, et retour d'expérience sur des aléas chantier ou des propositions d'adaptation. L'AMO, en retrait des contraintes du chantier, apporte une vision « horizontale » complémentaire des points de vue des autres acteurs du projet.

À l'échelle des chantiers du Grand Paris Express, il s'agit de missions au long cours. Les 2 lignes sur lesquelles TERRASOL est mobilisée comme AMO géotechnique ont des avancements décalés : la Ligne 16 est en phase exécution pour le premier lot, alors que Ligne 18 est en phase études. Ces projets vont se poursuivre sur plusieurs années.

F. Binet et C. Babin





## Slake

Slake, notre nouvel outil dédié à l'analyse quantitative de l'aléa liquéfaction des sols sous sollicitations sismiques, est officiellement commercialisé et mis à votre disposition. Il vient renforcer notre catalogue de logiciels en proposant dans un premier temps une mise en application stricte de la méthode semi-empirique directe dite « NCEER » (Youd et Idriss, 2001), basée sur l'exploitation d'essais in situ SPT/CPT. En parallèle, le calcul des facteurs de sécurité est couplé à une évaluation des effets induits, en particulier les tassements post-liquéfaction, reposant sur l'implémentation des courbes de Ishihara et Yoshimine (1992) avec une option de contrôle des pas d'intégration des déformations volumiques.

Les résultats d'analyses par sondages peuvent être affichés graphiquement et sous forme de tableaux, dont le contenu est exportable pour faciliter les opérations de post-traitement. Au sein d'un même projet, plusieurs analyses individuelles peuvent également être superposées via la fonction de comparaison. Le module de représentation en plan par cartes d'isovaleurs de différents résultats de calcul (FS minimum, tassements post-liquéfaction, épaisseurs liquéfiables cumulées, LPI, ...) apporte un éclairage spatial de l'aléa sans restreindre l'analyse à la seule notion de coefficient de sécurité calculé localement.

Une version de démonstration est dès à présent disponible sur notre site Internet pour vous permettre de découvrir et manipuler l'interface-utilisateurs, obtenir un aperçu des fonctionnalités disponibles et des options d'impression des rapports d'analyse. Les notices techniques et de prise en main du logiciel sont également à votre disposition en ligne.

Slake est voué à accueillir le contenu de la nouvelle génération de l'Eurocode 8 dès sa parution, ainsi que les recommandations du sous-groupe de travail Liquéfaction de l'AFPS (produites en parallèle du PS2020), à la rédaction desquelles TERRASOL participe.

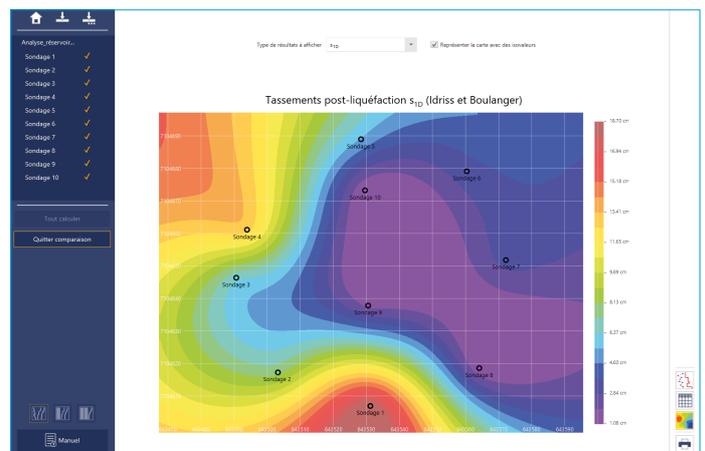
N'hésitez pas à nous contacter pour en savoir plus, ou à vous inscrire à la première session de formation consacrée à Slake.

## Formations

Notre catalogue s'élargit, avec un nouveau type de sessions orientées vers le dimensionnement des ouvrages. Nos prochaines sessions de formation inter-entreprises sont les suivantes :

- Prise en compte des effets d'interaction sol-structure dans le calcul des fondations superficielles et profondes, les 25 et 26 mars 2020 à Paris
- Formation Slake, le 27 mars 2020 à Lyon
- Conception pratique des écrans de soutènement en milieu urbain ou maritime, les 30 et 31 mars 2020 à Paris
- Formation Foxta v3, les 1 et 2 avril à Paris

Notre catalogue de formations 2020 est disponible sur notre site Internet. N'hésitez pas à le consulter, ou à nous contacter pour organiser des formations intra-entreprises en fonction de vos besoins.



M. Hocdé et O. Gilles

## Publications et interventions récentes

### Congrès XVII ECSMGE-2019, Reykjavik, septembre 2019

- Accounting for non-linear behavior of ground for the prediction of settlements due to deep excavations (K. Nejjar, R. Witasse, D. Dias, F. Cuira et S. Burlon)
- Performance and modelling of a deep excavation in the context of the Grand Paris project (K. Nejjar, A. Boffa, D. Dias, F. Cuira, P. Vidil, H. Le Bissonnais et G. Chapron)
- Centrifuge modelling of a pile group foundation in a multilayered soil under sinusoidal and seismic loadings (J. Pérez-Herreros, F. Cuira, S. Escoffier et P. Kotronis)
- Accounting for plastic strain mechanism in calculations of deep excavations (H. EL Arja, E. Bourgeois et S. Burlon)
- Comparison of different approaches of pile design in chalk adopted in France and UK (M. Doghman, H. Mroueh et S. Burlon)
- "S" shaped curves for shallow foundations design using pressuremeter test results (N. El Khotri, M.T. Hoang, F. Cuira et S. Burlon)
- Synthetic charts for the thermo-mechanical behaviour of thermoactive piles (J. Habert, H. Mroueh et S. Burlon)

### 10<sup>ème</sup> Colloque National AFPS, Strasbourg, septembre 2019

- Interaction dynamique sol-structure d'un groupe de pieux avec l'approche macroélément (J. Pérez-Herreros, P. Kotronis, S. Escoffier et F. Cuira)
- Etude expérimentale en centrifugeuse du comportement d'un groupe de pieux sous séisme (J. Pérez-Herreros, S. Escoffier, P. Kotronis et F. Cuira)
- Une approche simplifiée d'interaction sol-structure non linéaire pour la justification des fondations sous charge sismique (F. Cuira et S. Burlon)
- Prise en compte des efforts d'inertie dans le sol dans l'étude sismique des fondations superficielles (Y. Abboud, S. Burlon et F. Cuira)

### Autres publications

- Propositions d'approche probabiliste dans un logiciel de calcul de stabilité (A. Bergère, H. Pillard, X. Guo, D. Dias, P. Tachker, O. Bory et J.J. Fry) – Colloque CFBR – Justification des barrages : état de l'art et perspectives, Chambéry, novembre 2019
- Quand le numérique s'invite en géotechnique (V. Bernhardt) – Solscope Mag, novembre 2019



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)