

## Une nouvelle digue d'enclôture au Port de Brest



Crédit photo : Panoramic Bretagne / Région Bretagne.

Dans le cadre du projet de développement du port de Brest par la Région Bretagne, plusieurs sociétés du groupe SETEC, TERRASOL, SETEC INTERNATIONAL, SETEC HYDRATEC et SETEC IN VIVO, ont accompagné l'entreprise BOUYGUES TP RF depuis la phase d'appel d'offres et de négociation, jusqu'à la phase d'exécution en cours, pour la réalisation d'une nouvelle digue d'enclôture de 860 m de longueur. La digue se refermera sur le nouveau quai en cours d'aménagement permettant ainsi la création d'un futur polder de 14 ha (en complément du polder existant de 30 ha en cours d'aménagement) destiné aux activités de la filière EMR. Le nouveau polder sera remblayé avec les matériaux issus du dragage du chenal d'accès principal au port et des souilles des quais des différents terminaux (dont 500 000 m<sup>3</sup> proviendront du dragage de la souille du quai du nouveau terminal). Au total, ce sont 12 marchés de travaux maritimes et terrestres menés entre 2015 et 2020 qui permettront au port de Brest de s'adapter aux nouveaux standards du transport maritime, de favoriser sa croissance économique, et de diversifier son activité en s'ouvrant aux nouvelles industries.

La digue en cours de réalisation est composée d'une succession d'enceintes circulaires en palplanches plates (AS-500) appelées gabionnades (26 gabions et 25 festons), recouvertes côté mer par un talus en enrochement. Cette solution variante proposée par l'entreprise a remplacé la digue en remblai prévue lors de la conception.

La réalisation de la digue est en cours et s'effectue par moyens terrestres depuis une estacade provisoire (140 m) avec approvisionnement et stockage par moyens nautiques. Le vibrofonçage

des palplanches (de 20 à 33 m) se fait à l'aide d'un guide de battage circulaire à double niveau posé sur des tubes métalliques battus préalablement au refus dans le substratum. Après remblaiement de la gabionnade, les couches constituant le talus à carapace sont mises en œuvre.

La géologie dans le secteur du port de Brest est constituée de formations alluvionnaires récentes de faciès vasards d'une dizaine de mètres d'épaisseur caractérisées par une forte compressibilité, et d'un substratum schisteux. La solution adoptée permet de maintenir les vases en place avec l'installation d'un réseau de drains verticaux (415 km de linéaire) sur la hauteur des sédiments pour accélérer la consolidation et anticiper les tassements primaires et secondaires de l'ouvrage global.

Les études menées par TERRASOL ont permis de justifier le dimensionnement de la digue en vérifiant la stabilité de la gabionnade, son intégrité structurale et la stabilité du talus en enrochement en tenant compte de l'interaction entre les deux parties de l'ouvrage. La gabionnade est soumise à l'action de la poussée des terres, du différentiel de marée (5 m), de la houle, et des surcharges d'exploitation.

La vérification de l'ouvrage tient compte des différents mécanismes de rupture pouvant se développer dans la structure au niveau de la stabilité externe (glissement, portance et excentrement) et de la stabilité interne (rupture par cisaillement vertical, rupture du massif de sol intérieur de type Brinch-Hansen, rupture à la traction des palplanches et dégrafage des serrures). Ces vérifications sont réalisées avec des modèles analytiques en utilisant les logiciels Talren et K-Réa développés par TERRASOL.

## Édito

Notre niveau d'activité très soutenu ces 2 dernières années, combiné au lancement des travaux d'Eole et du Grand Paris Express et à de bonnes perspectives pour l'année 2019, nous a conduits à renforcer significativement notre équipe en 2018, avec de nombreux recrutements aussi bien à Paris qu'à Lyon. En ce début d'année 2019, notre effectif dépasse ainsi 75 personnes.

Outre nos projets en cours en France, nous sommes actuellement particulièrement actifs au Royaume-Uni, en Afrique subsaharienne, au Moyen-Orient, ou encore en Colombie (où nous travaillons en collaboration avec Setec Gómez Cajiao) : autant de zones où nous développons nos prestations d'ingénierie et d'expertise de manière volontariste, en direct ou via le groupe Setec.

Notre activité actuelle est très variée, et porte aussi bien sur les ouvrages souterrains et les infrastructures de transport, que sur les fondations de grands ouvrages d'art, les projets de tours de grande hauteur, ou encore les ouvrages portuaires, y compris en conditions sismiques.

Nous prévoyons également de développer encore notre offre de formation à la conception et la modélisation d'ouvrages géotechniques, avec un nouveau catalogue de formations 2019 incluant des sessions en France et à l'étranger.

Toute l'équipe de Terrasol se joint à moi pour vous souhaiter une très belle année 2019 !

V. Bernhardt

A noter qu'une zone d'approfondissement du toit du substratum a nécessité le recours à une modélisation complémentaire aux éléments finis en 3D.

L'analyse a aussi permis la définition de la maille des drains associée à des phases de remblaiement et de consolidation intermédiaires permettant une augmentation de la résistance (non drainée) des couches de vases à court terme et la consolidation de l'ouvrage à long terme. De nombreux échanges ont été nécessaires entre les équipes études et travaux pour aboutir à un planning respectant les délais partiels et globaux du chantier.

Les ingénieurs de TERRASOL sont fiers d'avoir, à leur mesure, apporté leur expérience à ce projet majeur, l'un des rares de cette ampleur dans le domaine portuaire civil français.

A. Abboud et C. Borely

# Suivi des travaux sur la ligne 15 Sud-Ouest du Grand Paris Express

Paris, France



Une dizaine d'ingénieurs de TERRASOL sont à présent mobilisés pour le suivi de chantier au sein des équipes de maîtrise d'œuvre SETEC sur le projet du Grand Paris Express, dont 4 interviennent sur le suivi des lots T3B (Gare de Fort d'Issy-Vanves-Clamart « FIVC ») et T3C (5 gares, 8 km de tunnel et 8 ouvrages annexes) de la ligne 15 Sud-Ouest.

Outre la mission de visa des études d'exécution sur les aspects géotechniques, TERRASOL assure donc au plus près de ce chantier hors normes le suivi des travaux conduits par le groupement CAP : l'excavation du puits circulaire d'IGR (Institut Gustave-Roussy), actuellement à 30 m de profondeur, est impressionnant ; la réalisation des parois moulées sous le RER B à Cachan s'est parfaitement déroulée ; le premier tunnelier est en cours de montage au puits Robespierre à Bagneux ; et le premier VSM (Vertical Shaft Machine) utilisé en France est entré en action à l'automne 2018.

S'agissant de la gare FIVC, TERRASOL a initié dès le démarrage des travaux une thèse CIFRE dans le but d'approfondir la compréhension du comportement de ces excavations profondes en renforçant l'instrumentation classique par des dispositifs avancés tels que la fibre optique et les cellules de pression. L'analyse des résultats est en cours et un nouvel article est à paraître en partenariat avec SOLETANCHE BACHY à l'occasion du Congrès ECSMGE à Reykjavik en septembre 2019.

G. Chapron

## Reconstruction du pont de Chirajara

Colombie

Suite à l'effondrement du pont haubané de Chirajara en Colombie le 25 janvier 2018, un appel d'offres a été lancé pour sa reconstruction et TERRASOL a assisté le groupement d'entreprises piloté par EIFFAGE GENIE CIVIL sur les conditions de fondations du nouvel ouvrage. L'enjeu était déterminant, car les deux piles de l'ouvrage en cours de construction étaient fondées chacune sur un puits unique de 8 m de diamètre et 32/42 m de profondeur, et il était évidemment intéressant de les conserver pour le nouveau pont.

Suite à une analyse détaillée des rapports d'expertise, privilégiant une explication structurelle de l'effondrement, de l'état des fondations après sinistre, des analyses complémentaires de stabilité produites par le BIEP, et à une visite du site, nous avons pu conclure que les fondations existantes étaient tout-à-fait réutilisables, d'autant que le nouveau projet les sollicite un peu moins que le projet initial. Il reste bien sûr quelques points de vigilance à surveiller en cours de travaux, notamment vis-à-vis de la stabilité des versants, largement dégradés après le sinistre et les travaux de démolition.



Crédit photo : Setec TPI

Le groupement EIFFAGE GENIE CIVIL / PUENTES Y TORONES a été attributaire du marché, et a renouvelé sa confiance à TERRASOL pour l'assister sur les études et le suivi géotechniques en phase travaux, avec la collaboration de nos collègues de SETEC GOMEZ CAJIAO, tandis que SETEC TPI prend en charge les études de la structure.

A. Guilloux et J. Marlinge

## Liaison ferroviaire Lyon-Turin (TELT)

France / Italie

Le groupement S2IP constitué de SETEC TPI (mandataire), SYSTRA, ITALFERR et PINI SWISS ENGINEERS a remporté l'appel d'offres portant sur la maîtrise d'œuvre des Chantiers Opérationnels CO6 et CO7, dans le cadre du projet TELT (Tunnel Euralpin Lyon Turin). Ceux-ci correspondent à l'excavation de la partie centrale du tunnel de base entre les PM 6+760 et PM 29+900 (soit 23 km). Il comprennent également la reprise des ouvrages excavés dans le cadre des travaux de reconnaissance de SMP4 : il s'agit du raccordement des descenderies de Saint-Martin-la-Porte et de la Praz au tube Sud.

TERRASOL intervient en particulier sur la problématique du comportement différé (squeezing) des schistes carbonneux au franchissement du front du houiller briannonnais. Dans ce cadre, nous avons été amenés à dépouiller le gros volume de données collectées tout au long des travaux d'excavation des galeries de reconnaissance dans le houiller. Après une première phase d'appropriation des travaux réalisés et d'analyse fine des données recueillies (géologie, mesures in-situ, auscultations...), nous avons pu approcher de manière analytique la réponse du massif au droit du tunnel de base. Dans un second temps, le comportement mécanique et différé du massif a pu être calé grâce à des études numériques 2D et 3D en rétro analyse sous FLAC. Le modèle numérique ainsi obtenu a permis d'approcher de manière satisfaisante la réponse du massif observée lors du creusement de SMP4 et de justifier les profils de soutènement et le revêtement définitif à 120 ans.



Les principaux défis de cette mission ont été les délais très serrés (<5 mois), la quantité importante de données récoltées depuis plus de 10 ans, et la complexité intrinsèque du projet. La rétro-analyse a permis de caler l'ensemble de mesures (convergences, vitesses de convergences, extrusions...) avec la même loi de comportement.

J.P. Janin et T. Rossi

## Projet Testimonio II

### Monaco

C'est en 2016 que TERRASOL a débuté sa mission sur l'étude des soutènements du projet Testimonio II, une tour de 25 étages et de 13 niveaux de parking, et de leur impact sur les avoisinants. Le Maître d'Ouvrage est SAM TESTIMONIO II (représenté par le groupe MARZOCCO et VINCI IMMOBILIER). Les architectes du projet sont ALEXANDRE GIRALDI et ARQUITECTONICA. Les travaux sont réalisés par SATRI et VINCI CONSTRUCTION. TERRASOL a été missionnée en phase EXE par VINCI CONSTRUCTION MONACO.



Credit photo: Kairos/Réalis

Le projet est situé à Monaco dans un versant à forte pente composé essentiellement d'éboulis surmontant le substratum marneux dans lequel sont ancrées les parois de soutènement et les barrettes portant l'ouvrage. L'emprise est très limitée et entourée d'ouvrages sensibles. A ce jour, TERRASOL a élaboré trois modèles 3D aux éléments finis (logiciel Plaxis 3D), pour étudier successivement :

- le respect des seuils de déformation des avoisinants dans le cadre de la solution de base : remblai allégé dans la zone de l'Aval Florida ;
- l'impact de la première variante (paroi clouée verticale) dans la zone de l'Aval Florida ;
- l'impact de la suppression du contre-voile des « accoudoirs ».

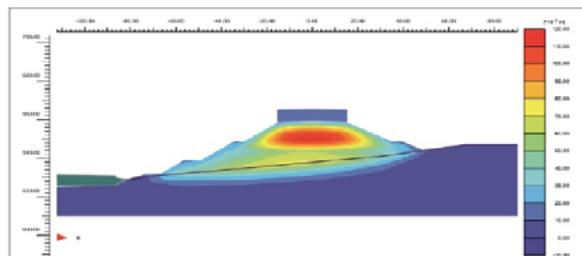
Du fait de la géométrie complexe du projet et de son emplacement en pied de versant, un fort effet 3D entraîne des sollicitations de cisaillement vertical dans les accoudoirs. Il a donc été nécessaire de considérer le glissement entre panneaux latéraux par l'intermédiaire d'interfaces entre les éléments volumiques de la paroi. Ces modèles, d'une taille exceptionnelle (plus d'un million de noeuds), ont nécessité plusieurs mois de travail, des calculateurs puissants, et l'utilisation en avant-première de la version 2018 de PLAXIS 3D pour permettre la résolution numérique du système.

A. Bergère et P. De Oliveira

## Conception optimisée de remblais de grande hauteur pour la RN88

### Baraqueville, France

D'une longueur de 14,3 km, le contournement de Baraqueville (Aveyron) nécessite l'édification de cinq remblais dits de « grande hauteur » au sens du Guide des Terrassements Routiers. Pour ces remblais, d'une hauteur supérieure à 10/15 m, outre les problématiques de stabilité des bermes, de tassement et de poinçonnement du sol support, se pose la question des déformations internes gouvernées par les évolutions hydriques au sein de ces matériaux non saturés. En effet, les déformations du corps de remblai liées aux variations des états hydriques ne sont pas propres aux grands remblais ; mais pour ceux-ci, l'énergie mise en œuvre lors du compactage est inférieure à l'effet de la charge des couches sus-jacentes en situation finale, et les amplitudes des déformations peuvent donc être importantes (sollicitation du sol dans son domaine de chargement vierge).



Classiquement, la mise en sécurité vis-à-vis de cet état limite est réalisée par l'usage, en base des remblais de grande hauteur, soit de matériaux non évolutifs et insensibles à l'eau, faisant cruellement défaut dans les déblais du contournement, soit de matériaux rigidifiés aux liants.

Dans le cadre de la mission de diagnostic géotechnique puis de conception qui lui a été confiée par la DREAL Occitanie, TERRASOL a assisté la DIR Sud-Ouest sur la conception de ces remblais :

- Définition de la zone nécessitant des spécifications de mise en œuvre, sur la base d'essais mécaniques de laboratoire ;
- Définition de solutions de traitement optimisées envisageables en pied de remblai.

A. Beaussier

## Réponse sismique des fondations superficielles et profondes

### Développement de macro-éléments



TERRASOL poursuit son activité de création d'outils de calcul originaux en s'intéressant au développement de macro-éléments permettant d'approfondir la notion de stabilité sismique par une estimation des déplacements irréversibles post-séisme. L'objectif est de quantifier de manière plus réaliste les efforts inertiels transmis par la structure portée à ses fondations. La prise en compte de déplacements irréversibles, même minimes, permet de diminuer de manière notable ces efforts par rapport à un calcul supposant un comportement linéaire élastique.

Pour le calcul sismique des fondations profondes, TERRASOL s'est ainsi engagée dans un travail de thèse CIFRE, en collaboration avec l'IFSTAR et l'ECOLE CENTRALE DE NANTES, en vue de développer un macro-élément capable d'estimer l'impédance dynamique d'un groupe de pieux, en tenant compte des effets non-linéaires qui caractérisent l'interaction pieu/sol/structure. Ce macro-élément est en cours de calibration à partir de modélisations numériques et physiques en centrifugeuse.

S'agissant du calcul sismique des fondations superficielles, nous assurons une mission de Recherche et Développement pour le compte d'EDF-TEGG, visant à implémenter dans Code\_Aster un macro-élément sismique représentant la réponse d'une fondation superficielle étendue de type radier. En parallèle, nous venons de mettre au point un outil de calcul autonome, appelé FONDISIS, basé sur une extension du modèle « brochette » au cas d'un calcul non-

linéaire : la structure portée et le terrain de fondation sont représentés par un ensemble de masses, de ressorts et d'amortisseurs. L'interface sol/structure est dotée d'un mécanisme de plasticité traitant les effets combinés de poinçonnement, de glissement et de décollement.

S. Burlon et F. Cuir

## Logiciels Terrasol en Colombie

TERRASOL était présente lors du XVI<sup>ème</sup> Congrès Colombien de Géotechnique (CCG) à Paipa, aux côtés de nos collègues de SETEC GÓMEZ-CAJIAO. Ce congrès, organisé par la Société Colombienne de Géotechnique (SCG) du 7 au 10 novembre 2018, avait pour thème cette année « Infrastructures et risques géotechniques ».

Nous avons eu l'occasion d'y présenter les logiciels TERRASOL (Foxta, K-Réa et Talren) auprès d'ingénieurs colombiens issus du monde académique et de la pratique, et prévoyons d'équiper plusieurs universités colombiennes de nos logiciels dès le 1<sup>er</sup> semestre 2019.

## Slake : un nouvel outil "Liquéfaction"

TERRASOL a finalisé le développement de Slake, notre nouveau logiciel 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). Nous le diffuserons à quelques beta-testeurs tout début 2019, avant de l'intégrer au catalogue des logiciels TERRASOL au cours du 1<sup>er</sup> semestre 2019. N'hésitez pas à nous contacter si vous souhaitez faire partie de nos beta testeurs !

## Formations

Les sessions de formations inter-entreprises d'ores et déjà programmées pour l'année 2019 sont les suivantes :

- Talren v5 le 1er avril 2019 et le 14 octobre 2019
- K-Réa v4 le 2 avril 2019 et le 15 octobre 2019
- Foxta v3 les 3 et 4 avril 2019 et les 16 et 17 octobre 2019
- Plaxis 2D les 28 et 29 mars 2019, 19 et 20 juin 2019 et du 4 au 6 novembre 2019

Par ailleurs, n'hésitez pas à nous contacter pour organiser des formations intra-entreprise portant sur la modélisation des ouvrages géotechniques.

M. Huerta



Présentation des logiciels Terrasol au XVI<sup>ème</sup> CCG (Colombie), novembre 2018



Formation au dimensionnement avec Foxta v3 chez Bauer à Abu Dhabi, novembre 2018

## Publications et interventions récentes

- Kinematic interaction of piles under seismic loading (J. Perez-Herreros, F. Cuira, S. Escoffier et P. Kotronis) – Congrès ICPMG, Londres, juillet 2018
- Modélisation numérique des ouvrages géotechniques (E. Bourgeois, S. Burlon et F. Cuira) – Techniques de l'Ingénieur, juillet 2018
- Table ronde « L'impact du numérique sur nos métiers » (M. Lebreton, G. Chapron, A. Guillen et S. Riss) – 70 ans du CFMS, Paris, octobre 2018
- Le point de vue des praticiens (JC. Robinet et H. Le Bissonnais) – Journée technique CFMS / CFMR « Microstructure de sols et des sols argileux – conséquences pour l'ingénieur », octobre 2018
- Extension L11 – Adaptation of the Mairie des Lilas Station (JP. Janin) - The Year in Infrastructure 2018 Conference, Londres, octobre 2018
- LNG tanks on rigid inclusions: Kuwait (C. Bernuy, B. Hor, S. Kim, M. Song, S-Y. Alqoud) – Innovative Infrastructure Solutions, Springer, novembre 2018 et Conférence GeoMEast, Le Caire, novembre 2018
- Fonctionnement des éoliennes offshore : charges, sollicitations, interaction sol-structure (F. Ropers) – Journée scientifique et technique CFMS « Fondations d'éoliennes offshore », Marne-la-Vallée, décembre 2018
- Modellazione numerica 2D e 3D nel progetto di opere sotterranee per l'estensione della linea 14 Métro di Parigi (JP. Janin, O. Gastebled et A. Martin) – Revue Ingenio, 2018
- Livre « Calcul des fondations superficielles et profondes » (R. Frank, F. Cuira et S. Burlon) – Presses des Ponts, décembre 2018



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)

### 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 : [telmalki@terrasol.com](mailto:telmalki@terrasol.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)