

## Incertitudes et analyse de risques en géotechnique



Edito

Contrastant avec la fin d'année 2012 marquée par un léger ralentissement de nos activités, suite au report ou au décalage de certains projets, ce premier semestre 2013 a été au contraire particulièrement actif pour l'ensemble des équipes de Terrasol :

- Sur le plan commercial, les appels d'offres en cours occupent fortement nos équipes, qu'il s'agisse de la Maîtrise d'Œuvre sur les grands projets en équipe intégrée avec les autres sociétés du groupe SETEC tels que les premiers lots du Grand Paris Express, ou le stockage souterrain des déchets radioactifs pour l'Andra (Cigeo), ou d'assistance aux entreprises sur de grands chantiers tels que le métro de Rennes ou la poursuite de la galerie de reconnaissance de Saint-Martin-La-Porte ;
- L'activité est particulièrement soutenue également sur les projets en cours, avec en particulier la fin de l'avant-projet du prolongement d'Eole entre Saint-Lazare et La Défense, les études géotechniques pour le prolongement de la ligne 14 du métro parisien, différentes phases d'intervention sur les LGV françaises (Est Européenne, Rhin Rhône, BPL, SEA, CNM, PACA), les réservoirs pétroliers de Shah Deniz en Azerbaïdjan, et différents projets d'aménagement hydroélectrique. Il faut souligner le recours de plus en plus fréquent à des modélisations complexes, avec de multiples approches en éléments finis 3D, qui apportent une aide significative pour la conception des ouvrages en interaction sol-structure dans la mesure où l'on maîtrise ces outils ;
- L'activité Logiciels du 1<sup>er</sup> semestre s'est concentrée sur la finalisation de la toute dernière évolution de Talren (version 5), dont la commercialisation débute actuellement, et la poursuite de l'intégration des Eurocodes dans les logiciels, au fur et à mesure que les normes françaises d'application sont validées ;
- Enfin, dans le domaine «Recherche et Développement», nous poursuivons notamment notre action, initiée il y a plusieurs années, de développement de méthodes d'analyse de risques dans le domaine géotechnique, en lien là aussi avec les Eurocodes, afin de pouvoir compléter nos études par des approches fiabilistes.

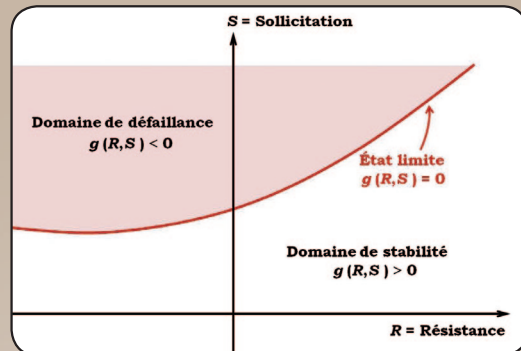
Tout cela passe bien sûr par des recrutements nombreux, et c'est bientôt une équipe de 60 collaborateurs qui sera à votre écoute pour vous accompagner dans la géotechnique de vos projets de plus en plus complexes.

Je profite de cet éditto pour vous indiquer également que nous serons très présents lors du prochain Congrès International de Mécanique des Sols et de Géotechnique, du 2 au 6 septembre 2013 au Palais des Congrès à Paris : participation au Comité d'Organisation du Congrès, communications scientifiques, stand d'exposition : venez nombreux nous y retrouver !

A. Guilloux

La prise en compte des incertitudes est une préoccupation constante en géotechnique. Tous les acteurs de la profession cherchent à réduire ces incertitudes et leurs effets, en proposant par exemple des actions :

- Visant à réduire les incertitudes sur les données géotechniques, et à mieux anticiper les moyens pour réagir face à ces incertitudes. On peut citer par exemple deux actions «normatives» récentes : l'édition de la recommandation GT32 de l'AFTES sur la caractérisation des incertitudes et des risques géologiques, hydrogéologiques et géotechniques, et la mise à jour en cours de la norme NF P 94-500 qui définit les missions géotechniques et les reconnaissances géotechniques minimales à effectuer dans le cadre d'un projet. Terrasol a participé aux travaux des groupes de travail dans ces 2 cas ;
- Permettant de mieux prendre en compte ces incertitudes dans le dimensionnement des ouvrages, et c'est ce point que nous avons choisi de développer ici, en lien notamment avec les Eurocodes.



Exemples de désordres affectant des ouvrages courants

En effet, Terrasol a engagé depuis 2009 un travail de recherche et de développement axé sur les techniques d'analyse de risques et leurs applications au dimensionnement d'ouvrages géotechniques. Cela répond d'une part à une forte attente des maîtres d'ouvrage, confrontés à un patrimoine vieillissant et à un corpus technique français peu développé sur le sujet, et d'autre part à des demandes d'optimisation de la part des entreprises dans des contextes de plus en plus complexes, comme par exemple celui des concessions.

Ces techniques s'appuient sur une approche probabiliste dérivée de la théorie de la fiabilité et permettent d'exprimer le niveau de sécurité vis-à-vis d'un mécanisme de ruine donné sous la forme d'une probabilité de défaillance ou de ruine de l'ouvrage.

Ainsi, dans cette approche, les caractéristiques géotechniques sont des variables aléatoires, munies d'une loi de probabilité avec une moyenne et un écart type. Par rapport à un dimensionnement classique par approche déterministe ou semi-probabiliste, la mise en œuvre des techniques fiabilistes permet soit de sécuriser un ouvrage quand les paramètres géotechniques présentent une dispersion significative, soit d'optimiser le dimensionnement quand cette dispersion est en revanche limitée.

Ce travail s'est conclu par la mise au point d'un outil d'analyse des risques basé sur la méthode approchée « Response Surface Method » (RSM) qui s'est révélée efficace dans ses applications aux ouvrages géotechniques. Cet outil sera intégré progressivement aux logiciels de calcul de Terrasol sous la forme d'un assistant de « dimensionnement fiabiliste » permettant l'évaluation de la probabilité de dépassement d'un état limite prédéfini par

l'utilisateur (portance, glissement, tassement, butée...). Les probabilités ainsi obtenues sont à comparer aux valeurs de probabilité cible définies par l'Eurocode 0 pour les états limites ultimes ou de service.

La méthode qui a été développée a également vocation à éclairer l'application des Eurocodes lorsque des méthodes numériques comme celle des éléments finis ou des différences finies sont utilisées pour le dimensionnement des ouvrages.

F. Cuira & B. Simon



# Remplacement des conduites forcées de Malgovert

## Bourg-Saint-Maurice, Savoie

L'aménagement de Malgovert est un maillon essentiel du bassin hydroélectrique de la Haute Isère (3/4 de la puissance installée, soit 300 MW mobilisables en quelques minutes), et un outil important de gestion du réseau électrique. Il se compose d'une galerie d'aménée de 15 km aboutissant à deux conduites forcées de 1500 m de long et 750 m de dénivelée dans un versant affecté de mouvements profonds et lents.

Les travaux de renouvellement des conduites forcées ont été confiés à SPIE-BATIGNOLLES ; TERRASOL est son géotechnicien. Les travaux nécessitent de disposer de grues mobiles et d'amener des pièces de chaudronnerie particulièrement pesantes à l'emplacement des conduites. Situés dans la pente d'un versant à 30° en moyenne, les terrassements des pistes et plateformes de travail sont

déliçats et demandent la conception de nombreux ouvrages variés : parois clouées, murs poids en enrochement, remblais renforcés, écrans pare-blocs...

En outre, s'agissant d'un projet en montagne et sur un aménagement ancien, les « surprises » sont courantes : variations rapides de la géologie, ou présence d'ouvrages anciens ou abandonnés (soutènements, fondations, galeries, blondins...) qui nous conduit parfois vers une dimension archéologique. Le projet nécessite donc une présence très régulière sur le site pendant les travaux, et une adaptation en continu des études à la réalité d'un site complexe.

F. Binet



# Modélisation 3D des ouvrages géotechniques

## Calculs aux éléments finis

Les grands projets nécessitent de plus en plus souvent des modélisations en déformation complexes et aptes à appréhender l'interaction sol - structure.

Depuis quelques années, TERRASOL a conduit des modélisations aux éléments finis en 3D pour des ouvrages aussi variés que des soutènements (tour Odéon à Monaco), des fondations de bâtiments complexes (Fondation Louis Vuitton pour la Création, Tribunal de Grande Instance de Paris), des travaux souterrains (prolongement de la ligne 14 du métro parisien), des fondations d'ouvrages d'art (3<sup>ème</sup> pont sur le Bosphore), etc.

Citons deux exemples récents :

- Pour le nouveau Tribunal de Grande Instance de Paris aux Batignolles, bâtiment d'une hauteur de 160 m (ci-contre), l'objectif de la modélisation 3D était la compréhension du fonctionnement des fondations profondes des trois noyaux de l'ouvrage et de leur interaction avec la géologie complexe du sous-sol parisien. Ce modèle a permis d'affiner l'estimation des tassements et du transfert des charges en fondation mixte.
- Pour la chambre de démontage du tunnelier de la ligne 14, creusée en souterrain au droit de bâtiments anciens du 8<sup>ème</sup> arrondissement parisien, il s'agissait de montrer que la forme ramassée de l'ouvrage et les méthodes de réalisation retenues contribuent à la maîtrise des tassements.

Ces nombreux cas 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.

A. Beaussier, P. Reiffsteck & A. Martin



Crédit photo : 2010-in progress - Paris Courthouse  
Renzo Piano Building Workshop, architects - Render by L'Autre Image

# 3<sup>ème</sup> Pont sur le Bosphore

## Istanbul, Turquie

Le troisième pont sur le Bosphore est un pont suspendu et haubané, de 1400 m de longueur en une seule travée, qui relie les rives européenne et asiatique d'Istanbul (Turquie). Construit par le consortium turco-italien Içtas-Astaldi, sa conception a été attribuée à T-Ingénierie en collaboration avec Michel Virlojeux. Auprès de SETEC TPI, TERRASOL assure actuellement la mission de contrôle du dimensionnement des fondations. La première phase de la mission étant axée sur l'analyse de la conception, TERRASOL a apporté ses conseils d'optimisation avec en particulier la justification de la stabilité des fondations au rocher appuyée par des calculs aux éléments finis en 3D.

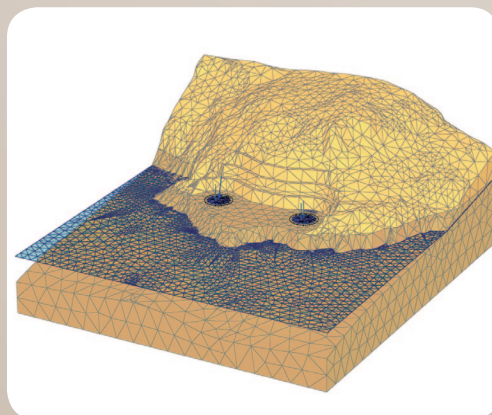
Inscrit dans un cadre sismique particulièrement contraignant, le pont s'appuie, sur les deux rives, sur

une formation rocheuse composée d'andésite et de conglomérats. Les extrémités du pont comportent chacune :

- un massif d'ancrage de 15 m de profondeur ;
- un bloc d'approche à terre comportant des clés de cisaillement de 2 m de profondeur permettant l'ancrage des haubans ;
- 4 pilettes ;
- 2 puits de 20 m de diamètre et de 20 m de profondeur pour ancrer les pylônes de 320 m de haut.

Ces pylônes exerceront des efforts considérables en phase d'exécution, sous l'effet du vent et lors de la mise en place du tablier, ainsi qu'en phase définitive, sous l'effet de basculement du tablier et sous sollicitations sismiques.

B. Aksoy





# Prolongement de la ligne de métro n° 14

## Paris

Depuis plus d'un an et demi, TERRASOL réalise 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, constituant le premier chaînon dans le maillage du GRAND PARIS EXPRESS, a pour objectif principal de désaturer la ligne 13 et d'accompagner le développement de ZAC de grande ampleur situées 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. Le démarrage des travaux est prévu au premier trimestre 2014.

A. Martin



Crédit photo : RATP/STIF

# Shah Deniz phase 2

## Baku, Azerbaïdjan

Le projet Shah Deniz phase 2 porte sur l'extension du terminal terrestre existant Sangachal de traitement de gaz et de production d'huile, exploité par BP en grande partie. Le terminal est situé au bord de la mer Caspienne, à 50 kilomètres au sud de Baku, en Azerbaïdjan. La nouvelle raffinerie de gaz et de pétrole sera adjacente à l'existante.

L'extension comprendra notamment un nouveau plateau de production de gaz d'une capacité de 16 000 milliards de m<sup>3</sup> par an, incluant deux trains de traitement de gaz supplémentaires et auxiliaires, et nécessitant la construction de sept réservoirs de stockage de produits hydro-carbonatés.

La spécificité du site réside dans la présence de sol « effondrable » sur une épaisseur de 6 à 8 m. Cette couche de surface est constituée majoritairement de grains de sables, liés dans une matrice limono-argileuse. Des composés volcaniques sont également inclus dans cette composition. Cette couche a la particularité de contenir beaucoup de vide et d'être sensible à l'adjonction d'eau. Son humidification provoque son effondrement sur-elle-même avec ou sans apport de charge. A l'inverse, à l'état naturel, cette couche est protégée par une croûte, et présente des caractéristiques mécaniques qui pourraient être qualifiées de bonne qualité.



Crédit photo : ENTREPOSE Projets

Lors de la construction de l'extension et de son exploitation, la croûte de protection peut être endommagée et il existe donc un risque d'humidification de la couche superficielle. Des accidents, déjà survenus par le passé sur le terminal existant, peuvent également provoquer l'humidification de cette couche superficielle. Afin de limiter les futurs problèmes de tassements, les réservoirs de stockage seront donc fondés sur pieux reposant sur les couches sous-jacentes.

Dans ce contexte particulier et rare, ENTREPOSE PROJETS SAS a confié à TERRASOL la partie géotechnique et à SETEC TPI la partie structurelle du dimensionnement des fondations des réservoirs de stockage pour les études d'exécution.

C. Babin

# Aménagement hydraulique EDF de Gavet

## Isère

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 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.

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, à savoir une stratigraphie irrégulière et la 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 & Y. Bagagli





## Pôle logiciels

### Talren v5

La cinquième génération du logiciel TALREN arrive cet été ! Les derniers bêta-tests ont permis de valider sa nouvelle interface. Celle-ci a été complètement revue : elle est à présent plus conviviale et particulièrement fiable. Elle intègre également de nouvelles fonctionnalités : coefficients partiels prédéfinis selon les normes en vigueur, compatibilité avec les dernières versions de Plaxis pour l'import de données, import de géométries au format Autocad®, nouveaux assistants, aperçu avant impression... Pour découvrir toutes les fonctionnalités de cette nouvelle version, nous vous invitons à nous contacter ou à consulter notre site internet. D'autre part, plusieurs sessions de formation seront organisées à partir de cet automne pour faciliter, si vous le souhaitez, votre prise en main de cette nouvelle interface.



Talren v5.0



Foxta v3.1



K-Rea v3.0



Straticad v1.4



Plaxis2D 2012.00



Plaxis3D 2012.02

### Foxta v3 et Eurocode 7

La norme NFP 94 261 consacrée aux fondations superficielles est sur le point d'être publiée. Nous avons anticipé cette publication et déjà effectué les ajouts correspondants dans Foxta v3 (module Fondsup). Ceux-ci sont en cours de validation, et seront diffusés dans une prochaine mise à jour du logiciel, avec les modifications relatives à la norme NF P 94 262 portant sur les fondations profondes (modules Fondprof et Taspie+). Foxta v3 vous permettra donc sous peu de réaliser vos calculs en conformité avec les normes françaises d'application de l'Eurocode 7. Cette mise à jour majeure sera également l'occasion d'introduire de nouvelles versions optimisées de plusieurs moteurs de calcul.



### Les logiciels Plaxis

- Nous avons organisé en mai dernier une réunion des utilisateurs Plaxis francophones. Cet événement a permis aux participants d'échanger sur leurs pratiques avec les outils Plaxis, que ce soit en 2D ou en 3D.
- Plaxis 3D 2013 sera disponible cet été. Il intégrera de nombreuses améliorations, notamment pour la création du maillage. Le module Plaxflow 3D sera également intégré à cette occasion.

### Événements

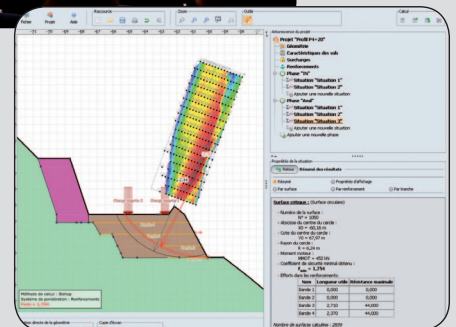
**Conférences** : TERRASOL est partenaire de la Conférence Internationale de Mécanique des Sols et de Géotechnique qui se tiendra à Paris du 2 au 6 septembre 2013. Venez nombreux nous rendre visite sur notre stand pour découvrir les nouveautés et partager vos retours d'expérience avec les ingénieurs Terrasol !

**Formations** : TERRASOL organisera au second semestre 2013 de nombreuses formations :

- Septembre 2013 : Workshop calculs hydrauliques avec Plaxis 2D
- Octobre 2013 : Formation Talren v5
- Novembre 2013 : Pratique éclairée des éléments finis en géotechnique avec Plaxis 2D
- Décembre 2013 : Formation K-Réa v3, et formation Talren v5



Journée Utilisateurs Plaxis, Paris, Mai 2013



Copie d'écran de TALREN v5

## Publications et interventions récentes

- « LGV Est Européenne - Tunnel de Saverne » (A. Cuccaroni, N. Zehani, A. Lacroix, P. Bouvatier, J. Sousa, **P. Legrand**) - Revue Travaux 894, Janvier/Février 2013
- « Calculation of Dynamic Impedances for an embedded structure: Practical concerns, limitations and suggestions » (**F. Cuira, N. Kottaki**) - ICEGE Istanbul, Juin 2013
- « Traitement anti-liquéfaction sous trois réservoirs GNL à Dunkerque » (M. Lebreton, **B. Simon**, D. Michel) - Revue Travaux 897, Juin 2013
- « South Toulon tube: numerical back-analysis on in situ measurements » (**JP. Janin**) - Bulletin Plaxis, Printemps 2013



Scannez ce QR Code avec votre Smartphone



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



Rhône-Alpes

Immeuble l'Orient  
10, place Charles Béraudier  
69428 Lyon Cedex 03- France

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



Tunisie

2, rue Mustapha Abdesslem  
El Menzeh  
2037 Tunis - Tunisie

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