

## Edito

Dans le dernier numéro spécial « Sols et fondations » de la revue Travaux, en juin 2010, j'évoquais quelques-uns des défis auxquels les géotechniciens sont de plus en plus confrontés, et qui poussent ces derniers à l'innovation permanente. Les projets évoqués dans cette Lettre montrent que **TERRASOL** s'inscrit parfaitement dans ce contexte.

Je citais en particulier :

- La maîtrise des risques et notamment des déformations causées par des travaux, ainsi que le recours à la méthode observationnelle : les injections de compensation mises en œuvre sur le chantier du tunnel de Toulon, pour la première fois en France, en sont une application poussée à l'extrême ;
- Le renforcement des sols, une réponse géotechnique aux impératifs de développement durable ; la reprise de fondations du château de Versailles par Jet Grouting pour y réaliser une galerie technique souterraine en est une belle illustration ;
- La modélisation numérique et son bon usage : des exemples comme les calculs aux éléments finis en 3D particulièrement complexes pour le projet de la Tour Odéon à Monaco, ou l'approche fine de lois de comportement non linéaires, calées sur des essais spécifiques, avec un retour d'expérience en vraie grandeur pour les réservoirs LNG de Dunkerque, montrent bien comment on peut utiliser ces outils pour trouver des réponses adaptées à des problématiques variées ;
- La prise en compte d'une réglementation toujours plus présente, notamment avec les Eurocodes dont les normes d'application nationales pour les différents types d'ouvrages géotechniques sont pour certaines déjà parues et pour les autres en cours d'élaboration. Terrasol participe activement à cette élaboration et notre équipe « logiciels » prépare déjà l'évolution des outils pour accompagner ces normes.

C'est ainsi que, dans un contexte économique difficile, **TERRASOL** poursuit son développement, avec une équipe qui atteint 50 personnes, et un objectif permanent de performance, d'innovation et de qualité de nos prestations. C'est à mon sens, certainement la bonne façon d'envisager une année 2011 qui soit dans la lignée des précédentes.

**A. GUILLOUX**  
Président Directeur Général

## Toulon : injections de compensation pour le deuxième tube de la traversée souterraine

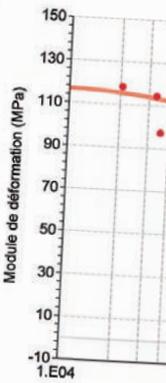
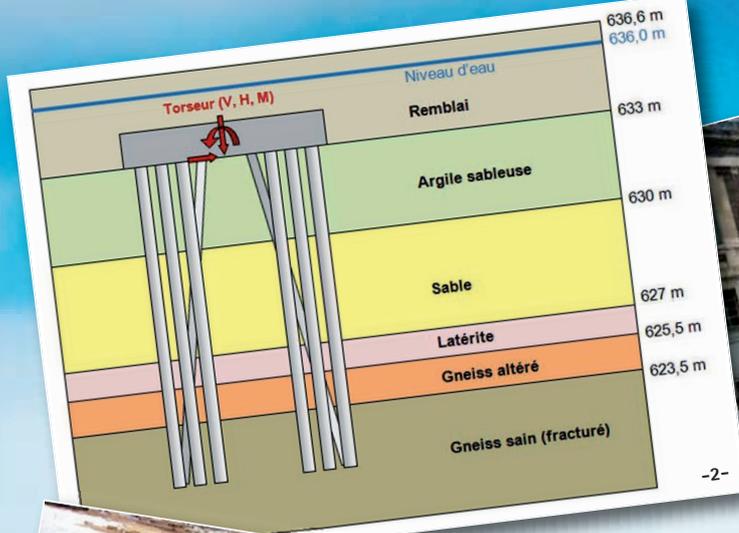
Dès le début des études du projet du deuxième tube de la traversée souterraine de Toulon, le passage sous les bâtiments Esplanade et Schéhérazade dans le secteur Marchand, en partie centrale du tunnel, avait été identifié comme étant particulièrement difficile. Ces deux immeubles de 8 étages avaient 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). Un soutènement très rigide avec renforcement du front par colonnes de jet grouting avait été envisagé, avec un recours à des injections de compensation en tranche conditionnelle en cas de déformations trop importantes en surface. 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. La structure du bâtiment s'est avérée beaucoup plus sensible que prévu. 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 avec une précision de l'ordre de  $1/10^e$  millimètre. 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. Une « première » en France, permettant d'envisager l'utilisation de la méthode pour d'autres projets délicats.

H. Le Bissonais



Injections de compensation sous immeuble / zone Marchand



## Ponts haubanés

## Galerie technique

### Guinée Equatoriale

### Château de Versailles

**TERRASOL** a été missionnée pour les études de fondations dans le cadre de la conception-réalisation de deux ponts haubanés de 3 travées sur la rivière Wele à l'entrée d'Oyala, au centre de la Guinée Equatoriale. Le pont n°1 est situé en amont, à environ 1 km du pont n°2. Les deux ponts sont identiques, au calage vertical près. Le contexte géologique local est le suivant :

- alluvions de la rivière Wele en surface, de caractéristiques mécaniques médiocres,
- terrain d'altération in situ du substratum cristallin (profil latéritique),
- substratum granitique ou gneissique avec une partie supérieure d'altération atteignant l'état de sable.

Les conditions d'accès au site, la faible disponibilité de laboratoires et de machines de sondages dans le pays rendent la campagne de sondages difficile. L'évaluation des caractéristiques mécaniques s'avère délicate de par la disparité des valeurs mesurées et exige une approche des calculs de dimensionnement en fourchette.

La conception des fondations des deux ouvrages dans ce contexte géologique latéritique a abouti au dimensionnement de 44 micropieux de 10 à 15 m de long pour chaque fondation de pylône et de culée, ancrés de 4 m au minimum dans le substratum gneissique. Ces micropieux travaillent essentiellement en frottement dans le rocher car la contribution des terrains de surface reste faible. Une dizaine de micropieux sont inclinés de 15° pour reprendre les efforts horizontaux.

Le Château de Versailles, classé monument historique, compte parmi les sites les plus visités de France. C'est un édifice complexe, s'élevant sur 5 à 11 niveaux, résultant de multiples remaniements architecturaux initiés au milieu du XVIIème siècle par Louis XIV et s'achevant au début du XIXème siècle à l'initiative de Louis Philippe. Dans le cadre d'un programme de rénovation des réseaux et de mise en sécurité, il a été décidé la construction d'une galerie technique souterraine de grande section. Le tracé de la galerie est situé localement en sous-œuvre du bâtiment Grand Commun et du Pavillon ouest de l'aile des Ministres Sud.

**TERRASOL**, associée à SETEC Bâtiment, est intervenue dans le cadre d'une mission de conception de type G12 et G2 pour la définition des principaux travaux géotechniques de reprise en sous-œuvre et de soutènement.

La première étape de notre mission a été la définition des reconnaissances géotechniques adaptées à l'ouvrage pour préciser les niveaux d'arase des fondations existantes, ce qui a conduit à exécuter des puits blindés parfois de plusieurs mètres de profondeur.

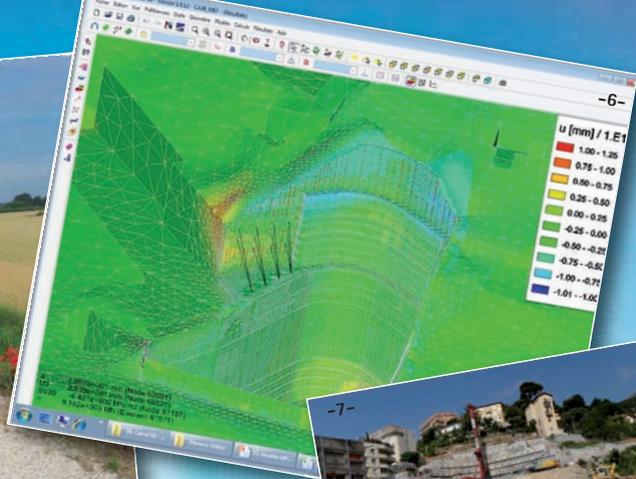
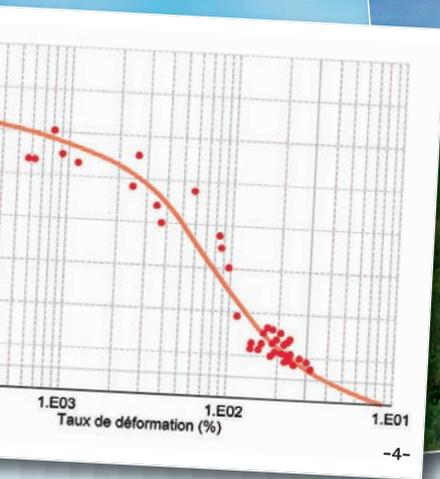
La variabilité des contraintes géométriques nous a conduits à retenir et associer, au stade des études de Projet, deux techniques pour permettre la construction de l'ouvrage. A savoir des reprises en sous-œuvre traditionnelles et la mise en œuvre de colonnes de jet grouting pour transférer les efforts des fondations en profondeur mais également constituer par endroits le soutènement des piédroits de la galerie.

La reprise des fondations par colonnes de jet s'est avérée tout-à-fait adaptée moyennant la réalisation d'essais préalables de chargement sur plots d'essais et la mise en œuvre d'un monitoring des déformations asservi à l'appareillage d'injection. L'exiguïté des accès a également imposé la mise en œuvre de machines de gabarits réduits pour l'exécution de colonnes ne dépassant pas 10 m de longueur.

A. Bergère

P. Chalivat

- 1- Ponts haubanés d'Oyala : fondations
- 2- Ponts haubanés d'Oyala : coupe de principe sur les fondations
- 3- Château de Versailles
- 4- Terminal méthanier de Dunkerque : loi  $E=f(\epsilon)$  de l'Argile des Flandres
- 5- Le Petit Rhône : digue en terre
- 6- Tour Odéon : modèle César 3D
- 7- Tour Odéon : début d'excavation



## Terminal méthanier

### Dunkerque

Dans le cadre du projet de terminal méthanier dans l'avant-port de Dunkerque, TERRASOL a été mandatée par Bouygues afin d'élaborer le projet de fondation de 3 réservoirs GNL. Ces ouvrages sont implantés au droit d'un contexte stratigraphique marqué par une très forte épaisseur (90 m) d'Argile des Flandres, formation géologique susceptible de tasser fortement et d'affecter le comportement des ouvrages.

Une partie importante du travail réalisé dans ce cadre a donc consisté à bâtir un modèle géotechnique fiable du comportement de l'Argile des Flandres.

Ce calage a été mené selon deux approches parallèles.

- d'une part, nous avons bâti à l'aide d'un calcul par éléments finis (Plaxis) un modèle numérique apte à reproduire l'évolution des tassements mesurés depuis plus de 20 ans au droit des îlots de la centrale nucléaire de Gravelines, située à proximité du site d'étude.
- d'autre part, nous avons mené une analyse détaillée des données géotechniques disponibles sur site, couplée à une synthèse de la bibliographie existante sur l'Argile des Flandres ; ceci nous a notamment conduit, par la comparaison de résultats d'essais oedométriques, d'essais triaxiaux avec bender element, et de mesures cross-hole, à mettre en évidence la variation de la compressibilité de l'Argile des Flandres avec le taux de déformation. La convergence des deux approches (modèle numérique rétrocalé et loi  $E=f(\epsilon)$  déduite des essais) a pu être établie en simulant le comportement d'un réservoir GNL avec chaque jeu de paramètres, les distributions de déformation et de tassement obtenues étant comparables. Cette convergence des résultats a constitué un résultat décisif afin d'établir la fiabilité des valeurs de tassements sous les réservoirs en projet.

M. Reboul

## Digues en terre

### Le Petit Rhône

Dans le cadre du volet inondation du plan Rhône, le SYMADREM (SYndicat Mixte interrégional d'Aménagement du Delta du Rhône et de la Mer) a chargé le groupement TERRASOL – HYDRATEC d'étudier 18 kilomètres de digues en terre en rive gauche du Petit Rhône (lot 2), en aval de la ville d'Arles. Ce lot présente un tronçon résistant à la surverse.

Ce marché d'études préliminaires et d'avant-projets consiste à étudier et à définir des aménagements de la digue pour protéger le delta du Rhône des crues du Petit Rhône. La dernière crue, survenue en 2003, a touché plus de 12 000 personnes et causé plus de 700 M€ de dégâts.

Les aménagements possibles sont des renforcements et un décorsetage limité (ou recul par rapport aux berges) des digues.

Les études préliminaires (diagnostic) s'articulent autour d'une analyse bibliographique, de visites d'inspection (suivant la méthode SIRS digue) et des reconnaissances géophysiques et géotechniques.

L'objectif étant de définir in fine :

- un niveau de risque par tronçon de digue homogène,
- un tracé de décorsetage de la digue.

Les études d'avant-projet sont axées sur :

- la modélisation géomécanique et d'écoulement souterrain,
- le dimensionnement des ouvrages projetés,
- le dimensionnement des bassins de dissipation et des coursiers liés au fonctionnement en surverse.

Actuellement, les études préliminaires se terminent. Le tracé du décorsetage limité est en cours de validation par le SYMADREM.

J. Sénemaud

## La Tour Odéon

### Monaco

Le projet de la tour Odéon à Monaco est exceptionnel, tant par sa hauteur, 160 m, qui en fera le plus grand immeuble à Monaco, que par la profondeur de l'excavation à réaliser, qui atteindra environ 70 m au maximum :

- 30 m de soutènement provisoire : microberlinoise puis berlinoise ancrées pour la création d'une plate-forme horizontale au niveau de base des superstructures,
- puis 40 m en parois moulées pour les infrastructures, en construction up/down.

Dans le cadre de ce chantier, réalisé par un groupement Vinci Construction France – Solélanche Bachy, TERRASOL est sollicitée pour des avis géotechniques divers sur les reconnaissances, les fondations ... mais aussi et surtout pour la mise en œuvre d'un modèle aux éléments finis 3D pour analyser notamment l'influence des excavations sur les avoisinants.

Réalisé avec le logiciel César LCPC, ce modèle est particulièrement lourd puisqu'il comprend près de 700 000 éléments, avec modélisation explicite de 366 tirants précontraints (de longueur ajustable), 48 micropieux, 22 pieux, et plus de 500 ml de parois moulées et barrettes, ainsi que les éléments de structure des sous-sols, sans oublier les 57 phases de calcul, avec excavations par passes, mise en place des éléments de soutènements, et application progressive de la charge de la tour !

Le temps de calcul pour le modèle complet atteint ainsi 36 heures.

Un défi pour les modélisateurs, qui a pu être relevé grâce à la persévérance de nos équipes !

A. Guilloux

# Pôle Logiciels

## Prochaines sessions de formations "logiciels" en France

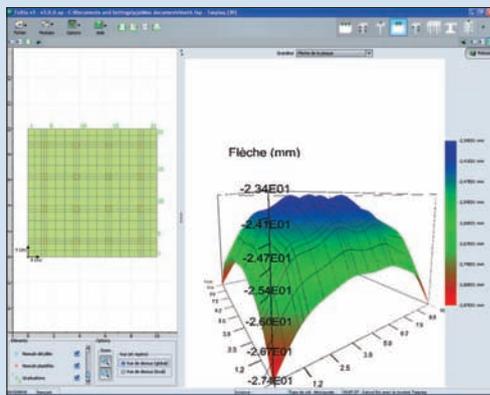
- 02/02/2011 : Formation K-REA à Lyon (69)
- 03/02/2011 : Formation TALREN 4 à Lyon (69)
- 17/03/2011 : Formation TALREN 4 à Montreuil (93)

N'hésitez pas à nous contacter pour toute information relative à ces sessions de formation. Nous restons bien sûr à votre disposition pour répondre à toute demande de formation intra-entreprise.



## Foxta v3

Nous préparons actuellement une phase de beta-tests de la nouvelle version Foxta V3 auprès d'utilisateurs volontaires. Si vous souhaitez participer à ces tests (que vous soyez ou non utilisateurs de Foxta v2), merci de nous contacter.



## DERNIÈRES VERSIONS DES LOGICIELS



Talren 4 v2.0.3



Straticad v1.2



Foxta v2.0.2



K-Rea v2.4.0



Plaxis 2D 2010



Tunren v1.05

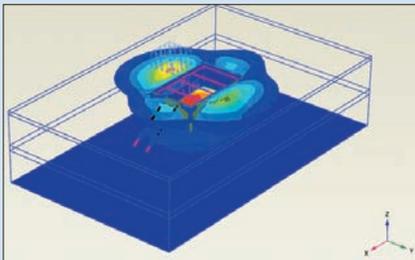


Plaxis 3D 2010

## Distributeur en Algérie

Nous sommes heureux de vous annoncer que nous avons à présent un distributeur pour nos logiciels en Algérie. Il s'agit de M. Belkacem YAHIA-AISSA, de la société AMEDIC, que vous pouvez joindre à l'adresse mail suivante : [amedic\\_dz@yahoo.fr](mailto:amedic_dz@yahoo.fr)

## Les logiciels Plaxis



- PLAXIS 2D 2010, nouvelle version qui fait suite à la version v9, est disponible depuis le mois de novembre 2010. Les abonnés VIP (utilisateurs de Plaxis v9) bénéficieront de la mise à jour sans frais. Les utilisateurs de Plaxis v8 peuvent profiter d'une dernière occasion de s'abonner à la formule VIP et de mettre à jour leurs licences v8 jusqu'à la fin de l'année 2010.
- PLAXIS 3D 2010 est disponible depuis l'été 2010. Il s'agit d'un logiciel permettant de mailler en « vraie » 3D et donc de traiter tout type de projet géotechnique aux éléments finis en 3D.
- Une offre spéciale de fin d'année est valable sur les logiciels PLAXIS jusqu'à fin janvier 2011.

Nous sommes à votre disposition pour vous présenter les évolutions proposées dans les nouveaux logiciels 2D et 3D. Sollicitez-nous !

## Publications récentes

- Retours d'expériences sur grands tunnels en roche tendre (A. Guilloux, S. Curtil et H. Le Bissonais) – CIGOS-2010 – Paris, Novembre 2010
- La fondation Louis Vuitton pour la Création : modélisations géotechniques croisées 2D et 3D et confrontation avec les auscultations (A. Beaussier, A. Guilloux et J. Verschuere) – CIGOS-2010 – Paris, Novembre 2010
- Tassements sous un IGH fondé sur radier (C. Lefèvre et B. Simon) – CIGOS-2010 – Paris, Novembre 2010
- Remblais de grandes hauteurs renforcés par géotextiles (R. Arab, M. Yahia-Aissa, Z. Djidjeli et S. Tabti) – CFMIG – Tunis, Décembre 2010



Immeuble Hélios  
72, avenue Pasteur  
93108 Montreuil Cedex - France

Tél. : + 33 (0)1 49 88 24 42  
Fax : + 33 (0)1 49 88 06 66  
Email : [info@terrasol.com](mailto:info@terrasol.com)



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

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



2, rue Mustapha Abdessalem  
El Menzeh  
2037 Tunis - Tunisie

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