

L'année 2003 se termine avec une forte activité pour TERRASOL, qui conforte sa croissance de 5 à 10 % par an observée depuis l'année 2000. C'est ainsi que nous renforçons régulièrement notre équipe, qui atteint maintenant près de 30 personnes, avec des recrutements réguliers d'ingénieurs, pour faire face aux multiples missions confiées tant par nos clients d'entreprises et donneurs d'ordres que dans le cadre des missions de maîtrise d'œuvre en collaboration avec SETEC.

TERRASOL a notamment démarré d'importantes maîtrises d'œuvre de projets pour les études du deuxième tube de la traversée souterraine de TOULON, de deux tronçons de la future ligne nouvelle LGV Rhin-Rhône, ou les travaux du métro d'Alger.

D'autre part, nos missions d'expertise se poursuivent auprès de diverses entreprises sur de grands chantiers (tunnel de Gousserbiérg au Luxembourg, Port 2000, tunnel de La Condamine, descenderie de Saint Martin de la Porte pour le projet Lyon-Turin, études d'exécution pour la LGV Est ...), ainsi qu'auprès de divers donneurs d'ordres (poursuite des études des scellements des galeries de stockage de déchets pour l'ANDRA, audit sur la maîtrise des risques de fontis sur la ligne B du métro de TOULOUSE, ...).

Enfin, notre Pôle Logiciels poursuit son développement, avec en 2003 le lancement de TunRen, logiciel dédié aux analyses de tunnels (notamment au front de taille), et la sortie annoncée en 2004 de :

- Talren 4, nouvelle version de Talren encore plus conviviale et intégrant désormais une méthode de calcul par analyse limite,
- la mise à jour de FoXta (disponible en plusieurs versions),
- K-Réa, pour le calcul des rideaux de soutènement au module de réaction.

Cette lettre présente ainsi quelques-uns des projets réalisés dans l'année écoulée, qui témoignent du savoir-faire de TERRASOL et de la diversité de ses activités.

Alain GUILLOUX  
Président Directeur Général

## Port 2000 Le Havre

Le groupement DPAM2000, chargé des travaux des digues de protection et des accès maritimes, a confié à TERRASOL une mission de conseil pour la justification au plan géotechnique de la stabilité des différents ouvrages. Cette mission couvre les digues intérieures (digues d'enclosure et de fermeture : 4 km), les digues extérieures (5,8 km) et la fondation des musoirs.

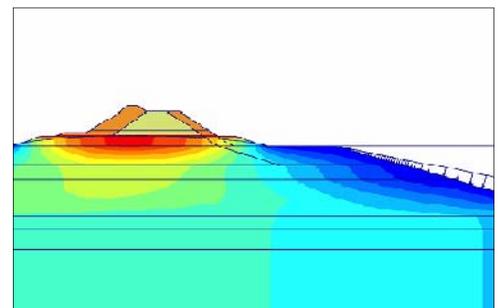
Ces études ont pu s'appuyer sur les reconnaissances très détaillées menées par le Port Autonome du Havre lors de l'élaboration du projet et des reconnaissances spécifiques complémentaires entreprises au titre des études d'exécution, menées par voie terrestre et par voie maritime. Une grande attention a été portée à la prise en compte des phénomènes hydrauliques entretenus par le marnage : des observations spécifiques, menées durant le chantier, ont permis de valider les hypothèses des calculs.



Crédit photo : Patrice Lefebvre

Les logiciels Talren, Plaxis, et Plaxflow se sont révélés être des outils particulièrement adaptés pour mener à bien ces études.

Les caissons béton devant être mis en place par flottaison au droit des musoirs constituent également des ouvrages exceptionnels par leurs dimensions 56 m x 28 m x 21 m ou leur poids (13000 t avant remplissage, 40000 t après). Leur fondation a retenu toute notre attention : que ce soit par les reconnaissances et essais spécifiques qui ont été engagés, les justifications conduites dans le cadre des recommandations ROSA 2000, ou l'évaluation des déplacements lors de la pose ou en service.



## Saint-Fargeau Glissement de terrain

Courant 2001, la Mairie de la ville de Ponthierry- Saint Fargeau (77) a confié à TERRASOL une mission de Maîtrise d'œuvre complète pour la réparation d'un glissement de terrain qui menaçait deux habitations en tête de talus et avait détérioré une canalisation.

Après avoir établi un diagnostic préalable, TERRASOL a suivi les reconnaissances géotechniques puis assuré la gestion du marché de travaux de stabilisation du talus.

La reconnaissance géotechnique du secteur et les analyses de stabilité ont permis de montrer que le glissement concernait la séquence stratigraphique allant du toit des argiles vertes (formant l'horizon du plateau) jusqu'aux marnes d'Argenteuil.

Deux solutions techniques ont été présentées au Maître d'Ouvrage et aux riverains : une solution par terrassement et drainage, et une solution par mur cloué et drainage.

Le choix du Maître d'Ouvrage s'est porté sur la seconde solution qui comprenait la réalisation d'une paroi clouée à l'arrière du cercle de glissement pour mettre en sécurité les habitations, et des tranchées drainantes à l'aval pour évacuer les eaux souterraines et les précipitations.



Chantier avant la réception

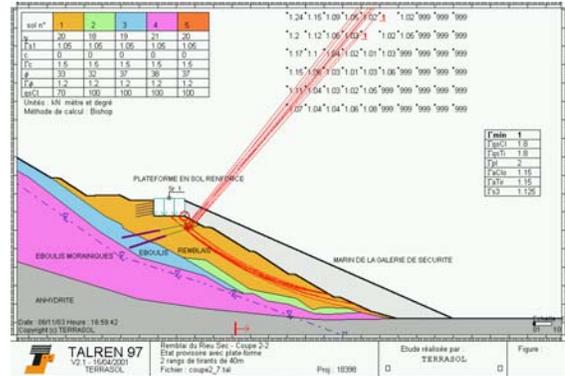
La paroi de 350 m<sup>2</sup>, située à environ 12 m des façades des maisons, fait 80 m de longueur sur une hauteur maximale de 5,50 mètres. Les clous de 10 m de longueur sont répartis sur trois niveaux pour un linéaire total de 1390 m.

Tout au long du chantier, un suivi topographique et inclinométrique a permis de contrôler les déformations de l'ouvrage, qui sont restées de l'ordre du centimètre, et de garantir ainsi la sécurité des habitants des deux maisons menacées et du personnel.

## Tunnel du Fréjus Aménagement de la tête

Dans le cadre du projet de creusement de la galerie de sécurité du tunnel du Fréjus, TERRASOL a analysé les contraintes géotechniques liées à la réalisation d'une plate-forme de travail de 15 m de large, qui viendra surcharger le remblai existant (75 m de hauteur), mis en place lors de la construction du tunnel principal.

Les principales difficultés étaient la prise en compte des mouvements endémiques relevés sur le remblai existant depuis sa construction en 1975, et le stockage des 230 000 m<sup>3</sup> de matériaux de marinage de la galerie de sécurité.



L'élargissement du remblai nécessite la construction anticipée d'un déblai amont à parement quasi vertical sur une hauteur de 9 m en limite de l'emprise autoroutière, puis d'un ouvrage de soutènement en sol renforcé formant la plate-forme d'attaque de la galerie. Le modèle géotechnique de calcul a été confirmé par une campagne de sondages de reconnaissance, qui a notamment permis de préciser les caractéristiques mécaniques des différentes formations.

Des calculs en retour sur la géométrie actuelle du remblai ont fourni un bon calage du modèle de calcul. Celui-ci a montré que la phase provisoire, avant mise en place définitive du marin de la galerie, nécessitait l'ajout de 2 lits de tirants de 40 m pour stabiliser la plate-forme de travail.

En phase définitive, les renforcements amont (mur cloué et sol renforcé) n'interviennent plus pour assurer la stabilité globale des remblais.

## Le viaduc de JAULNY

Le viaduc de Jaulny, situé sur la ligne à grande vitesse Est – Européenne, dans le département de la Meurthe et Moselle, est un ouvrage bi-caisson mixte en acier-béton de 479 m de longueur avec 7 travées. Il passe 50 m au dessus du Rupt de Mad. Terrasol a, lors du concours, participé pour le compte du groupement EIFFAGE aux études géotechniques, puis a fait le projet d'exécution des fondations.

Ce viaduc est implanté dans une région à substratum calcaire peu profond ; toutes les piles ont donc pu être fondées sur semelles au rocher, sans difficultés particulières.

Mais la particularité de ce chantier tenait dans la stabilité du massif calcaire au droit de la culée C0, implantée sur les calcaires du Bajocien en sommet de talus et à proximité de la pente relativement abrupte qui mène à la pile P1 (cf. photo).

En effet, lors des terrassements, il est apparu que l'assise de la fondation était affectée par un système de fractures verticales largement ouvertes, altérées par les dissolutions qui se sont ajoutées à la décompression induite par la proximité du versant.

Le traitement proposé pour l'assise de la culée, ainsi que pour le mur de soutènement de 12 m situé sous la culée, a pour objet de redonner au terrain des caractéristiques homogènes vis à vis de la portance de la culée C0 et de clouer les discontinuités du talus à l'aval :

- Sous la culée C0 le massif a été traité par injection de coulis sur 10 m de profondeur à partir de forages subverticaux renforcés par des barre HA.
- A l'aval le massif est renforcé par injection et inclusion de clous subhorizontaux autour de la culée. Les injections ont pour rôle de combler les plus gros vides et de resserrer les blocs. Les clous permettent de liasonner les blocs entre eux, de façon à assurer une diffusion homogène des efforts dans le talus.



Culée C0 et mur poids (depuis le pied de la pile P1)

Les analyses de stabilité ont été conduites avec le logiciel PLAXIS, dans le but d'évaluer à la fois la stabilité et la déformabilité du système. Les fissures, ainsi que les joints argileux entre les bancs calcaires sont modélisés avec des interfaces verticales et horizontales de caractéristiques mécaniques amoindries.

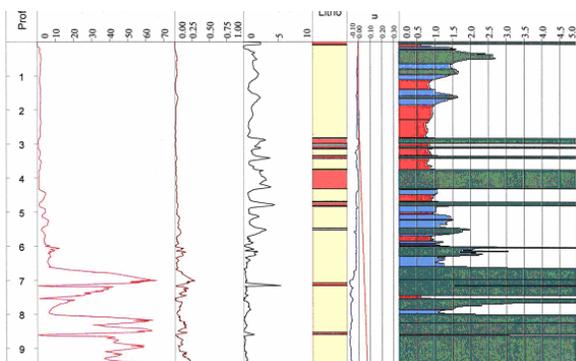
## LGV Sillon Alpin

RFF, agence de Lyon, a confié au groupement TERRASOL - FUGRO, une étude d'évaluation du risque de liquéfaction sur trois secteurs du tracé de la future LGV du sillon alpin, entre Lyon et Chambéry.

L'étude devait se dérouler en 3 phases :

- Une étude bibliographique à partir des reconnaissances existantes suivant les prescriptions de la norme parasismique, qui a donné lieu à l'établissement d'une proposition de campagne de reconnaissances complémentaires à base de sondages carottés, puits à la pelle, piézocônes et essais d'identification.
- Les reconnaissances elles-mêmes et leur analyse pour l'identification des zones suspectes, qui a conduit à un zonage des risques de liquéfaction.
- Une troisième phase de reconnaissances spécifiques avec essais triaxiaux cycliques, qui n'a pas encore été lancée.

En outre, nous avons proposé une reconnaissance géophysique complémentaire, basée sur la sismique réfraction, pour étendre les zones d'investigation et préciser le zonage des risques.



Les analyses de liquéfaction ont été faites à partir des essais au piézocône, selon la méthode reconnue par le NCEER ; nous avons mis au point à cette occasion un logiciel d'interprétation automatique des essais pénétrométrique et de calcul du coefficient de sécurité à la liquéfaction. Il reste à valider les coefficients de sécurité obtenus à partir des piézocônes par des essais triaxiaux cycliques, ce qui est prévu en phase 3.

## Tunnel de GOUSSELERBIERG Luxembourg

Depuis près de 3 ans maintenant, nous poursuivons notre mission d'assistance à l'entreprise Spie-Batignolles TPCI pour le chantier du Tunnel du GOUSSELERBIERG au Luxembourg.

Ce tunnel autoroutier bi-tube de 2700 m de longueur et de 75 m<sup>2</sup> de section excavée est creusé par méthodes traditionnelles dans les marnes du Keuper, sous une couverture atteignant 130 m. Il s'est avéré que le comportement des marnes, avec une géologie a priori relativement simple, en couches horizontales recoupées par quelques failles mineures, a été extrêmement variable selon les zones.



En effet, d'importants linéaires ont montré un comportement globalement satisfaisant, nécessitant même l'emploi de l'explosif dans certains horizons de marnes gypsifères, et de très faibles convergences d'ordre centimétrique.

En revanche, deux zones, de quelques centaines de mètres dans chaque tube, ont montré des convergences extrêmement importantes, pluridécimétriques, et non stabilisées parfois près de deux ans après l'excavation : il a fallu renforcer les soutènements mis en œuvre (boulonnage complémentaire, cintres), procéder à des reprofilages et à des modifications du revêtement définitif.

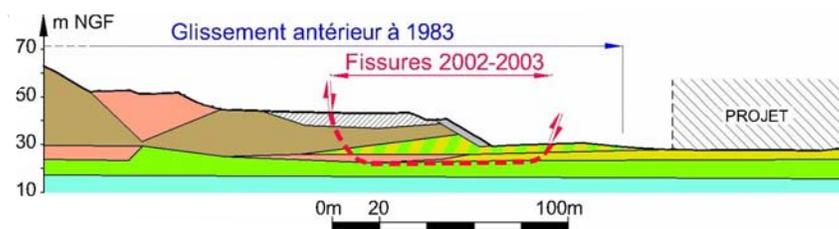
C'est encore une fois l'illustration de l'importance de la géologie dans les projets souterrains, notamment en terrain marneux, où il suffit de faibles variations dans la nature des couches pour basculer d'un comportement parfaitement stable à une situation proche de la rupture.

## Stabilité du terril de Dourges

La plate-forme logistique multimodale d'intérêt Européen de Dourges, en cours de construction, est implantée sur un nœud de communication important (canal de la Deûle, A1 et A21, voies ferrées) ; elle est également localisée au pied du terril 116-117 dont la hauteur est environ de 60 m.

Pour les besoins du projet en matériau de remblai, l'exploitation d'une partie des schistes du terril a été autorisée par arrêté préfectoral. Lors des terrassements fin 2002, un glissement de terrain, affectant une emprise de 2 hectares, est apparu ; le concessionnaire de l'exploitation a alors demandé l'intervention de TERRASOL, qui s'est décomposée en trois phases :

- Une étude bibliographique, avec notamment une analyse des photographies aériennes, a permis de préciser l'historique du terril entre 1950 et 1990. Des traces d'anciens glissements de terrain et de bassins de décantation enfouis ont ainsi pu être mises en évidence. Les argiles de Louvil, peu résistantes, qui constituent l'assise du terril ont manifestement joué un rôle important pour la genèse de ces phénomènes d'instabilité de grande ampleur.
- Une campagne de reconnaissance ciblée a confirmé les observations issues des photographies aériennes et a permis de caractériser mécaniquement les différents terrains.
- Ces informations, associées aux résultats de l'auscultation du glissement par topographie et inclinométrie ont permis le calage des calculs de stabilité réalisés au moyen de TALREN. Le volume du glissement a été estimé à 300 000 m<sup>3</sup>, la surface de rupture étant située à 20 m de profondeur par rapport au niveau de la plate forme supérieure.

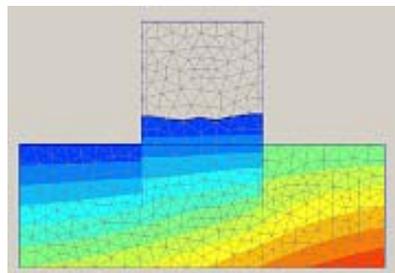
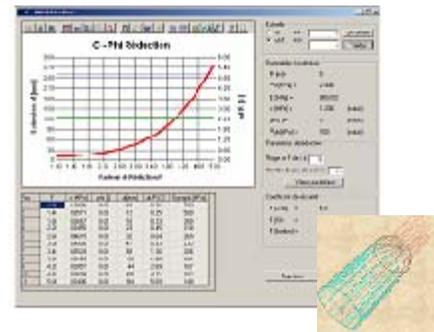


La solution de confortement proposée par TERRASOL, associant terrassements et drainage gravitaire, permettra à terme la construction des infrastructures sans modification du projet.

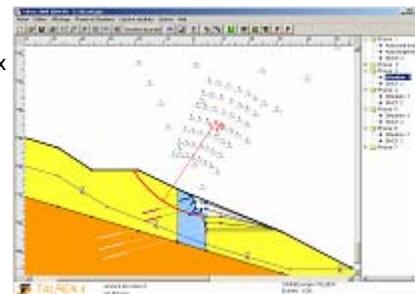
Le catalogue du Pôle Logiciels s'est enrichi courant 2003 du nouveau logiciel **TUNREN**. Il s'agit d'un outil d'aide au dimensionnement des tunnels : en section transversale avec la méthode convergence-confinement, et au front de taille, avec le module Extrusion développé sous licence CNRS-ENTPE, permettant la prise en compte du boulonnage du front. Disponible dans un premier temps en version française uniquement, Tunren est maintenant bilingue français/anglais.

Sont également prévus prochainement :

- **FOXTA 2.0** : il s'agit d'une mise à jour de Foxta v1.x (amélioration de la convivialité de l'interface). Foxta se décline dorénavant en 3 versions : complète (8 modules), Lt (5 modules) pour des applications simples, Pieux (5 modules) pour des applications concernant les pieux et groupes de pieux.
- **TALREN 4** : une nouvelle version de TALREN, avec notamment : une interface graphique interactive, la gestion du phasage et l'intégration de la méthode de calcul en analyse limite.
- **K-REA** : un logiciel de dimensionnement des écrans de soutènement par la méthode de calcul aux coefficients de réaction.



Par ailleurs, la liste des produits Plaxis compte elle aussi un nouveau venu : **PLAXFLOW**. Ce logiciel, qui peut être utilisé seul ou couplé avec Plaxis v8, permet les calculs hydrauliques en régime permanent ou transitoire, et en sols saturés ou non-saturés.



Le logiciel PLAXIS 3D Foundations est lui en cours de finalisation et devrait être disponible début 2004.

**N'hésitez pas à nous contacter pour obtenir une documentation complète et un CD-ROM de démonstration.**

## L'action de TERRASOL dans la Communauté Scientifique

**Projet National Renforcement par inclusions rigides** : pour ce projet et à la demande de l'IREX, B. Simon a animé et coordonné avec R. Kastner (INSA Lyon) une étude de faisabilité puis la préparation d'un Etat de l'Art en France et à l'étranger. Le projet devrait être lancé début 2004. Terrasol se mobilisera pour le succès de cette nouvelle action de recherche.

**Projet national MICROTUNNELS** : ce Projet National, dont Alain GUILLOUX a assuré la direction technique depuis 1996, a vu son aboutissement par la publication aux éditions Hermès de deux volumes de recommandations sur les projets de microtunneliers d'une part et de forages dirigés d'autre part.

**Benchmark FONDSUP 2003** : TERRASOL a participé en 2003 au concours de prévision organisé dans le cadre du Symposium 2003. Il s'agissait d'effectuer des calculs de capacité portante et de tassements, pour plusieurs configurations de fondations superficielles sur talus. Cette participation donnera lieu à une publication dans le Volume 2 des actes du Symposium.

Dans le cadre des activités du CFMS, Alain GUILLOUX a lancé en 2003 un **groupe de travail** commun aux trois comités (Géologie de l'Ingénieur, Mécanique des Roches et Mécanique des Sols) sur le thème "**Sols indurés et roches tendres**".

Au cours des années 2002 et 2003, Stéphane CURTIL a participé, au sein du **groupe de travail n° 1 de l'AFTES**, à la rédaction de la recommandation "**Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains**" qui a été publiée dans le n°177 (mai-juin 2003) de la revue Tunnels.

Depuis le début de l'année 2003, Hervé LE BISSONNAIS participe à la rédaction de la **recommandation AFTES** (Groupe de travail N°30) concernant la **conception et le dimensionnement du boulonnage en tunnel**. Cette recommandation, qui devrait paraître fin 2004, viendra réactualiser et compléter la recommandation concernant les conditions d'emploi du boulonnage datant de 1979.

## Publications

A. GUILLOUX, P. GERNIGON, S. BRETTELLE, Y. DELLA-LONGA, H. LE BISSONNAIS – "**Analyse comparative des fondations retenues pour trois projets de grands réservoirs GNL.**" - Symposium International sur les Fondations Superficielles FONDSUP 2003 – Paris, Novembre 2003.

Y. LAURENT, D. DIAS, B. SIMON. and R. KASTNER - "**A 3D finite difference analysis of embankments over pile-reinforced soft soil.**" - In : International Workshop on Geotechnics of Soft Soils / Theory and Practice, Noordwijkerhout, Netherlands – 17-19 September 2003.

Y. LAURENT, D. DIAS, B. SIMON and R. KASTNER - "**A 3D finite difference analysis of pavements over pile reinforced soft soil**" - In : BGA International Conference on Foundations : "Innovations, Observations, Design and Practice", Dundee—Scotland, 2-5 Septembre 2003.

V. SILVESTRE- BRAC, E. MANIER, J.J. TRITSCH, J. MASROURI – "**Analyse des mécanismes de rupture des marnières**" - Symposium "Les journées du génie civil 2003" - 26-27 mai 2003.

