

Édito

TERRASOL réalise depuis plusieurs années environ 25 % de son chiffre d'affaires sur des projets à l'étranger, que ce soit pour des clients locaux, internationaux ou français, avec des interventions géotechniques de natures diverses : assistance aux maîtres d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, assistance aux entreprises, etc.

Le Moyen-Orient est l'une de nos zones d'activité les plus importantes depuis de nombreuses années, avec des missions sur des projets dans pratiquement tous les pays de la région, comme l'illustrent la carte ci-contre, et les références présentées dans ce numéro spécial de notre Lettre Terrasol.

Nous profitons aujourd'hui de cette expérience pour poursuivre notre développement dans cette zone, dans le cadre du développement de nos activités à l'international. Les équipes de Terrasol prennent en charge les sollicitations de nos clients dans le domaine géotechnique, et peuvent également travailler au sein des équipes pluridisciplinaires du groupe Setec pour des interventions plus globales.

Vous souhaitant une bonne lecture de ce numéro spécial de notre Lettre Terrasol,

V. Bernhardt

Terrasol et le Moyen-Orient

TERRASOL intervient régulièrement au Moyen-Orient, et nous avons souhaité cette année profiter de ce numéro spécial de notre Lettre TERRASOL pour illustrer quelques-unes de nos nombreuses références dans la région.



Nous sommes ainsi intervenus récemment sur plusieurs projets emblématiques comme la tour « Dubaï Creek Harbour Tower », une tour à haubans destinée à être la plus haute au monde, le métro de Riyad en Arabie Saoudite, ou encore les réservoirs de GNL du terminal LNG Al-Zour, au Koweït.

Depuis le début des années 2000, nous avons développé nos interventions dans la région dans plusieurs secteurs, parmi lesquels les plus importants ont été jusqu'à présent :

- Le bâtiment : avec des problématiques de fondations, de soutènements ou d'interaction sol-structure dans le cadre de projets de tours de grande hauteur, comme la Dubaï Creek Harbour Tower ou la Tour Entisar par exemple, mais aussi de grands bâtiments comme des hôtels ou des sièges d'entreprises.
- Les infrastructures : qu'il s'agisse de transports en commun urbains, du projet ferroviaire GCC, d'ouvrages d'art, ou encore d'interventions dans les domaines portuaire et aéroportuaire.
- L'énergie et le para-pétrolier, thématique évidemment essentielle dans cette région du monde : fondations de réservoirs, centrales électriques ou installations industrielles, impact des risques naturels sur les ouvrages, mais aussi missions sur des projets de barrages.

A noter que la problématique sismique est omniprésente dans la zone, et nécessite le recours à des calculs/vérifications en conditions dynamiques sur la plupart des projets.



The Dubaï Creek Harbour Tower - @DR

Ce numéro spécial de notre Lettre TERRASOL présente une sélection de certains de ces projets, et la carte ci-dessus illustre l'ensemble de nos missions dans la région sur les 12 dernières années. Nous avons également reporté sur la carte (logos verts) les pays dans lesquels le groupe SETEC dispose d'une implantation ou représentation permanente, le Moyen-Orient étant l'une des zones de développement fort pour l'activité internationale du groupe SETEC.

Enfin, outre notre activité d'ingénierie, nous distribuons également au Moyen-Orient nos différents logiciels de calcul géotechnique, et assurons des sessions de formation consacrées à la modélisation géotechnique : application des normes, détermination des paramètres, utilisation des logiciels, exploitation des résultats, etc.

V. Bernhardt et A. Abboud

Fondations de la Tour Entisar

Dubaï, Emirats Arabes Unis

Avec 500 m de hauteur, la tour Entisar sera l'une des plus hautes du monde. Elle comportera à la fois des logements et des espaces de bureau. Avec une surface au sol de 60 m par 60 m, c'est un édifice élancé, générant des contraintes de compression élevées sur ses fondations. Sa construction nécessite par conséquent un dispositif spécifique de fondations profondes.

Le groupe SETEC a été mandaté par ESEC pour effectuer une mission de « Value Engineering », et la conception des fondations a été confiée à TERRASOL.

Le contexte géologique est le suivant (à partir du TN) :

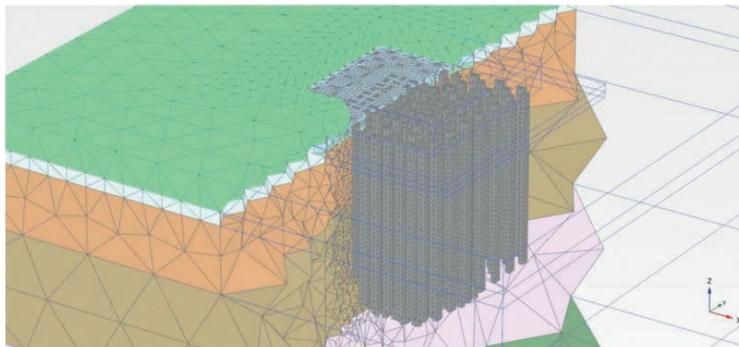
- une couche de sable légèrement silteux et coquillé
- une alternance de couches de calcaires et de grès, avec de nombreuses intercalations de conglomérats rocheux
- une couche de calcisillite avec des intercalations d'argilite et de conglomérats rocheux
- de la roche tendre : gypse et argilite.

Le système de fondations est composé de barrettes rectangulaires à 80 m de profondeur, encastrées dans la roche tendre. La contrainte moyenne à la base du radier (ELS charges permanentes) dépasse 2,5 MPa au niveau du noyau de la structure.

En premier lieu, TERRASOL a réalisé une étude préliminaire des fondations et une analyse technique des solutions proposées par les entreprises dans le cadre de l'appel d'offres. Puis, à la demande de l'entreprise SOLETANCHE BACHY, nous avons réalisé un modèle aux éléments finis en 3D du système de fondations. Cette modélisation avait pour objectifs d'analyser le comportement des fondations et d'évaluer la raideur du sol pour 4 cas de charge : poids propre, surcharges, vent et cas de charge sismique. Le déplacement maximal sous poids propre est atteint dans le quart nord du noyau et reste inférieur à 6 cm. La raideur du dispositif de fondations a été évaluée via plusieurs itérations en interaction sol/structure. Ce processus a permis d'optimiser la conception des fondations mais a aussi contribué à optimiser la structure (avec une meilleure répartition des charges).

A ce jour, les fondations ont été réalisées, et le projet est en stand-by.

A. Bergère



Hotel Marriott à Manama

Bahreïn

Une grande zone d'extension urbaine se développe depuis les années 2000 autour de la baie de Bahreïn, au nord de Manama. La construction d'un nouvel hôtel Marriott, sur une parcelle en remblai gagnée sur la mer, s'inscrit dans ce projet d'extension. Les travaux de réalisation des soutènements de l'excavation (fouille de 80 m x 80 m environ, réalisée en pieux tangents avec plusieurs niveaux de tirants) et des fondations de l'ouvrage (pieux béton de 800 à 1500 mm de diamètre, de 10 à 20 m de longueur, ancrés dans un substratum calcaire plus ou moins fracturé), ont bien débuté, mais se sont vus subitement interrompus en 2006, jusqu'à ce que le projet soit relancé en 2015, avec une conception largement modifiée souhaitée par le nouvel architecte GROUPE 6. Dans cette nouvelle conception, la position du noyau de la tour de 35 étages (hauteur 170 m environ) est décalée, le niveau de fond de fouille est approfondi et les descentes de charge sont modifiées.

TERRASOL a été sollicitée par SETEC TPI pour se prononcer d'une part sur la possibilité de réutilisation des fondations de l'ouvrage initial, et d'autre part sur la faisabilité d'approfondir le fond de fouille. Une analyse de l'ensemble des données d'entrée géotechniques et des essais de portance réalisés sur les pieux existants (essais statiques et dynamiques) a permis de recalculer les capacités portantes des différents pieux. Les vérifications sur les soutènements ont montré qu'il était nécessaire de renforcer la butée par ajout de nouveaux lits de tirants et de prolonger la fiche hydraulique par mise en place d'injections.

Credit photo : SETEC TPI

C. Bernuy



Projet « Crystal Towers »

Beyrouth, Liban



Credit photo : SAYFCO

TERRASOL a assisté son partenaire local STS CONSULTANTS dans la conception du système de fondations de deux tours (30 et 20 étages) à proximité du pont d'Antélias à Beyrouth (Liban).

Le contexte géotechnique du site est marqué par un toit du substratum mécanique fortement variable (de 20 à 50 m de profondeur) et la présence d'un horizon sablo-silteux meuble en surface avec de surcroît un risque de liquéfaction sous séisme. Ces conditions ont justifié le choix d'un système de fondation profonde (radier sur pieux) avec des pieux en béton armé de 1,2 m de diamètre ancrés de 3 à 5 m dans le substratum mécanique.

Ce système a été combiné à un renforcement préalable vis-à-vis de la liquéfaction par colonnes ballastées sur 20 m de profondeur. Le logiciel Foxta a été utilisé pour l'estimation des déplacements et raideurs des fondations en conditions statiques et sismiques, en tenant compte de l'effet de groupe.

F. Cuiria

Dubaï Creek Harbour Tower

Émirats Arabes Unis

Cette tour développée à Dubaï par EMAAR est destinée à être la plus haute structure au monde. Elle est dénommée « The Tower ». Sa conception a été assurée par l'architecte espagnol Santiago Calatrava, appuyé par le bureau d'étude australien AURECON. Ce nouveau monument implanté dans la zone du Dubaï Creek Harbour devrait dépasser en hauteur la tour Burj Khalifa. La tour, en forme de fleur de lys et rappelant un minaret, accueillera un espace d'observation et sera inaugurée pour l'exposition internationale de 2020. La conception de la structure, inspirée des mâts haubanés, est une première au monde : la structure verticale de la tour à diamètre constant est maintenue à 700 m de hauteur par des câbles précontraints ancrés à l'autre extrémité dans des massifs de fondations.

TERRASOL a accompagné sur ce projet SETEC TPI, qui a participé au « Peer Review » pour la partie fondations et superstructure à la demande de BUREAU VERITAS, « Third party Reviewer » du projet. Notre mission consistait à valider le comportement global des fondations en vérifiant les documents d'exécution de l'entreprise SOLETANCHE BACHY, en charge des travaux géotechniques. Nous avons notamment examiné le rapport de reconnaissance de sol de l'entreprise FUGRO, les essais de chargement par la méthode O-Cell, ainsi que les études des barrettes de fondation de la tour et des fondations des structures d'ancrage des câbles.

TERRASOL est également intervenue sur le choix des paramètres géotechniques en lien avec les lois de comportement retenues, ainsi que sur le dimensionnement des fondations en interaction sol-structure (modèles numériques et calculs analytiques). La vérification des barrettes de fondation de la tour chargées au-delà de 100 MN a nécessité la création d'un modèle aux éléments finis en 3D qui a notamment permis d'obtenir les matrices de raideur des fondations nécessaires pour le modèle de contre-calcul de la structure.

A. Guilloux et A. Abboud



© Calatrava

Double excavation pour le projet One Za'abeel

Dubaï, Émirats Arabes Unis

Dans le cadre du projet de construction du siège social de « Investment Corporation » à Dubaï (Emirats Arabes Unis), TERRASOL a été sollicitée par l'entreprise APCC pour réaliser le dimensionnement géotechnique des structures de soutènement, dans un contexte sensible, selon les normes britanniques (British Standards). Le projet comporte la construction de 2 tours qui se trouvent de chaque côté d'un pont routier qui traverse la parcelle de terrain, ce pont existant étant sensible aux déplacements. Les 2 tours s'élèveront à 305 m, avec un parking en sous-sol de six niveaux. La profondeur moyenne d'excavation est d'environ 35 m pour chacun des fouilles.

Nous avons étudié des modèles analytiques et numériques avec couplage hydro-mécanique, et analysé de nombreuses configurations géométriques, en 2D et en 3D, afin de respecter les exigences du projet et de permettre une conception optimisée. De plus, une analyse des soutènements en conditions sismiques a également été menée en complément des calculs statiques.

Les études réalisées par TERRASOL ont permis de proposer de nombreuses pistes d'optimisation des soutènements, tout en respectant les critères de conception ainsi que les délais d'études particulièrement courts. L'un de nos ingénieurs a d'ailleurs été détaché quelques semaines à Dubaï auprès du client, pour faciliter les échanges et gagner en efficacité.

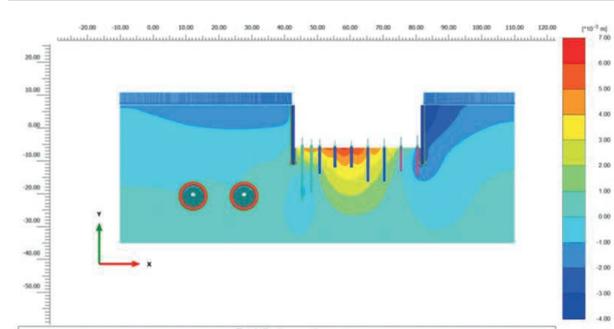
A. Abboud



Crédit photo : APCC

Interaction entre un bâtiment et 2 lignes de métro

Doha, Qatar



TERRASOL a accompagné ACES Qatar dans l'évaluation de l'impact de la construction d'un nouveau bâtiment sur deux lignes souterraines adjacentes du métro de Doha. Le système de fondation prévu est un radier sur pieux, avec une conception de pieux flottants. Les pieux les plus proches des tunnels ont été équipés en tête sur 3 à 7 mètres avec des viroles permanentes afin de réduire la mobilisation du frottement.

L'objectif de l'étude étant d'évaluer les déplacements et les forces internes de la structure du tunnel pendant les différentes phases d'exécution et en particulier la phase de chargement des pieux qui représente l'application de la charge totale du bâtiment.

L'analyse a été réalisée à l'aide d'un modèle aux éléments finis Plaxis 2D intégrant les phases de construction, y compris le pompage, l'excavation de 13 m de profondeur, l'installation et le chargement vertical des pieux. Les données d'entrée du modèle incluent la stratigraphie du sol (couches successives de roche tendre) représentée

avec une loi de comportement de type Mohr-Coulomb, le soutènement provisoire composé de pieux contigus Ø600 ou 700 mm, les structures des tunnels (éléments de plaque) et les pieux de fondation de différents diamètres (« embedded beam elements »).

Les résultats de la modélisation ont montré que les tunnels sont à l'extérieur de la zone d'influence de la construction, avec des déplacements observés négligeables. La comparaison des forces internes entre la phase de construction initiale des tunnels et la phase de chargement des pieux indique que la charge axiale supplémentaire est négligeable. L'analyse a également fourni les valeurs de déplacement vertical et horizontal en différents points du modèle correspondant aux emplacements des équipements d'instrumentation (inclinomètres et extensomètres) mis en place pour suivre l'évolution des déplacements pendant les travaux.

A. Abboud

Métro de Riyad – Lignes 1 et 2

Arabie Saoudite



Crédit photo : Photo FAST 2016

Le métro de Riyad est un ambitieux système de transport en commun de type métro automatique actuellement en cours de construction, et destiné à desservir la ville de Riyad, capitale de l'Arabie saoudite. Le projet prévoit au total 6 lignes, 176 km de voies et 85 stations.

Au sein du consortium FAST, chargé de la conception pour les lignes 4, 5 et 6, le groupe SETEC travaille avec des partenaires venus du monde entier : FCC, ALSTOM, SAMSUNG, STRUKTON, FREYSSINET SAUDI ARABIA, TYPSA, ATKINS, et SETEC, et assure les missions de Project Management Office ainsi que la conception des dépôts de remisage et maintenance des trains. Les deux dépôts, l'un enterré et l'autre en surface, sont intégralement conçus en BIM (Building Information Modeling).

Par ailleurs, le bureau d'études ARUP a obtenu une mission de conception-réalisation pour 5 stations souterraines sur les lots de la ligne 1 (Blue line) et de la ligne 2 (Red line). SETEC TPI, accompagné de TERRASOL pour les aspects géotechniques, a réalisé la mission d'« indépendant checker », avec pour objectif de valider les études d'ARUP, de la phase préliminaire (schematic design) à la phase finale.

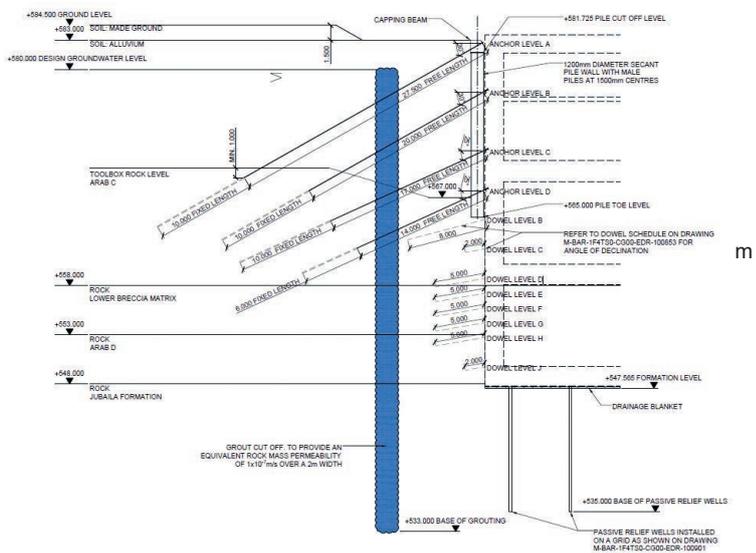
Le contexte géologique est celui de remblais meubles sur une dizaine de mètres d'épaisseur, surmontant une succession d'horizons rocheux de type calcaire ou brèches avec des niveaux de fracturation différents. Les stations sont fondées sur un radier, à une profondeur de 25 à 35 m environ selon les stations.

Les soutènements sont généralement constitués de pieux sécants tirantés ou butonnés sur la hauteur de terrains meubles, et ancrés au toit des horizons rocheux. Pour des considérations hydrauliques, la fiche de la paroi est prolongée au moyen d'injections sur 20 à 30 m sous la base des pieux.

La conception retenue prévoit également un renforcement des horizons fracturés par clouage ou épingleage ainsi que la réalisation de puits de décompression sous le radier.

Pour contrôler le dimensionnement des soutènements, TERRASOL a réalisé des contre-calculs à l'aide du logiciel K-Réa, dans certains cas combinés à des approches en éléments finis (calculs Plaxis). La validation du dimensionnement du clouage dans les roches a été réalisée à l'aide d'approches en éléments discrets (calculs UDEC).

C. Bernuy

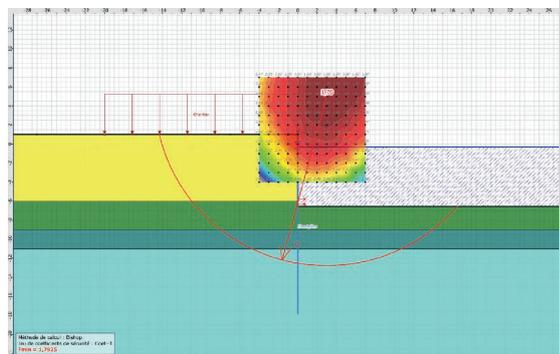


Centrale électrique de Port Saïd

Egypte

Dans le cadre de travaux de remplacement et réparation de conduites en PRV sur le site de la centrale de Port Saïd, TERRASOL a été sollicitée par l'entreprise BALINEAU, en charge des travaux de soutènement provisoire (écrans de palplanches butonnés ou tirantés), pour une mission de contrôle externe.

Il s'agissait dans un premier temps d'analyser les données de sol disponibles, afin de déterminer avec précision les paramètres de sol nécessaires au dimensionnement des écrans de soutènement. Ces données provenaient notamment d'essais in situ (SPT, CPTu et scissomètres), complétés par des essais en laboratoire : essais d'identification et essais triaxiaux (CD, CU+u). L'analyse a été axée principalement sur la caractérisation d'une couche d'argile de 20 m d'épaisseur, située à 10 m de profondeur sous les couches superficielles de limon et de sable, et dont dépend la stabilité du soutènement. Nous avons ainsi pu obtenir une estimation précise de la cohésion non drainée cu de la couche d'argile en fonction de la contrainte verticale effective et de sa variation avec la profondeur.



Dans un deuxième temps, il a été demandé à TERRASOL de procéder à des vérifications du dimensionnement des écrans de palplanches. Il a donc été nécessaire de bâtir des modèles de calcul spécifiques pour les différentes sections étudiées. Les points essentiels à vérifier comprenaient la sécurité sur la butée (qui détermine la profondeur d'encastrement), l'équilibre des efforts verticaux compte tenu de la très faible capacité portante de la couche d'argile, ainsi que la stabilité selon la méthode de Kranz, requise pour définir la distance nécessaire entre l'écran principal et le rideau d'ancrage.

Des vérifications de stabilité globale ont également été réalisées en conditions drainées et non drainées.

Les résultats obtenus nous ont permis de valider la section et la longueur requises pour les palplanches, de déterminer les réactions d'appui pour le dimensionnement des tirants et butons, et d'identifier les mécanismes de rupture critiques.

A. Abboud

3^{ème} 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.

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 pilotes ;
- 2 puits de 20 m de diamètre et de 20 m de profondeur pour ancrer les pylônes de 320 m de haut.

Les pylônes exercent 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.

Après de SETEC TPI, TERRASOL a assuré 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.

Les travaux ont débuté en mai 2013. La pose du dernier élément de tablier a eu lieu en mars 2016 et l'inauguration de l'ouvrage a eu lieu le 26 août 2016.

A. Guilloux



Crédit photo : © ICA IC Içtas-Astaldi

Projet ferroviaire en Oman Oman



Crédit photo : Oman Rail

Ne disposant pas encore d'infrastructure ferroviaire, le sultanat d'Oman envisage un très vaste programme de construction, en neuf phases, d'un réseau national ferré en double-vie de 2135 km. Ce réseau est destiné au fret ainsi qu'au transport de passagers avec des rames circulant à 220 km/h entre 46 gares et 9 terminaux intermodaux. Un appel d'offres international a été lancé en 2014 auprès de 18 groupements candidats pour réaliser les travaux de la première phase, comprenant trois tronçons de 200 km reliant le port de Sohar à Al Buraymi et à la frontière avec les Émirats Arabes Unis, avec 5 gares.

Pendant deux mois de travail intense au sein d'une équipe multidisciplinaire du groupe SETEC dans le cadre de la préparation de l'offre du groupement d'entreprises de génie civil CCC / SAMSUNG / STRABAG, TERRASOL a participé à l'analyse du dossier, à la réflexion pour la conception optimisée et la faisabilité des ouvrages de génie civil ainsi qu'à la préparation du dossier technique de l'offre.

Ayant acquis une solide expérience dans le cadre des projets LGV récents en France, TERRASOL a su appliquer ces compétences pour examiner plusieurs ouvrages complexes : tunnels, viaducs, tranchées couvertes, remblais et déblais de grande hauteur... Ce projet a permis à TERRASOL de mettre en valeur ses compétences dans le cadre d'un projet ferroviaire international.

KV. Nguyen

Un nouveau terminal pour l'aéroport de Malé Maldives



Crédit photo : Thinkstock

Dans le cadre d'un contrat de conception-réalisation pour la construction d'un nouveau terminal de l'aéroport des Maldives, le groupe SETEC accompagne la société SAUDI BEN LADEN GROUP, attributaire du marché, dans le cadre des deux principales phases d'études : les études préliminaires et les études d'exécution.

TERRASOL est intervenue dans le projet au sein des équipes du groupe SETEC : dès la première phase, nous avons établi le programme et le cahier de charge des reconnaissances de sol en les adaptant au mieux au contexte du site, à la nature du sous-sol, et aux moyens disponibles dans la région.

Suite à l'analyse de ces reconnaissances, TERRASOL a proposé et étudié diverses solutions de fondations (superficielles, profondes, par amélioration ou renforcement de sol), et orienté la conception vers une solution de massifs sur fondations profondes, bien adaptée à la stratigraphie de dépôts sableux sur un substratum de roches sédimentaires de coraux. TERRASOL assure au stade des

études d'exécution une mission de second regard sur la solution de pieux battus en béton armé précontraint en cours d'exécution, avec analyse de la méthodologie de réalisation, des notes de calcul et des rapports sur les essais de chargement dynamiques et statiques. Une partie de ces essais a été suivie sur place. Leur interprétation dans le cadre du référentiel BS EN 1997-1 permet d'optimiser les coefficients de sécurité.

Par ailleurs, TERRASOL a aussi dimensionné les systèmes de fondations des pré-passerelles, des passerelles d'embarquement et des bâtiments de maintenance. Les pré-passerelles et le bâtiment de maintenance sont fondés sur un radier général tandis que les passerelles d'embarquement reposent sur des fondations semi-profondes.

S. Burlon, M. Hocdé et A. Abboud

Des réservoirs de GNL sur inclusions rigides à Al-Zour

Koweït



Crédit photo : © Kuwait Integrated Petroleum Industries Company (KIPIIC)

Afin de sécuriser ses importations et exportations de Gaz Naturel Liquéfié, la KUWEIT NATIONAL PETROLEUM COMPANY (KNPC) a lancé la construction d'un gigantesque terminal sur le site d'Al-Zour. Ce projet, qui doit s'achever en 2020, comprend la construction d'une usine de regazéification (1.39 milliards USD) et 8 réservoirs de stockage d'une capacité unitaire de 225.000 m³ (1.52 milliards USD), le tout implanté sur une plateforme entièrement gagnée sur la mer. Cet important contrat en « Design & Build » a été remporté par HYUNDAI ENGINEERING & CONSTRUCTION, qui en a confié le design au bureau coréen KOGAS TECH, spécialisé dans l'ingénierie et la maintenance des installations gazières on-shore et off-shore.

KOGAS TECH, après avoir consulté plusieurs ingénieries géotechniques internationales, a confié à TERRASOL le dimensionnement des fondations des réservoirs. Ces huit ouvrages en béton précontraint de 96 m de diamètre et 45 m de haut doivent pouvoir en particulier vérifier des critères de tassements différentiels assez stricts (1/300 vis-à-vis des tassements mesurés le long du diamètre du réservoir, et 1/500 vis-à-vis du basculement), et encaisser de fortes accélérations sismiques avec une période de retour de 2475 ans.

Le projet est implanté sur une plateforme gagnée sur la mer. La lithologie sous la mer, avant réalisation du remblai, est une succession de couches sableuses dont la densité augmente avec la profondeur, jusqu'à un substratum situé à 70 m de profondeur environ sous le niveau de la mer. Afin de limiter le risque de liquéfaction, il a été décidé de draguer, préalablement aux travaux de remblai, les couches de caractéristiques les plus faibles sur 6 à 7 m de profondeur. Des remblais hydrauliques sont ensuite mis en place et vibro-compactés sur une épaisseur de 20 m environ.

La solution retenue pour les fondations des réservoirs consiste en la réalisation d'inclusions rigides à la tarière creuse, de diamètre 0,8 m, non armées, avec un maillage de 2,80 x 2,80 m au centre du réservoir, et 2,40 x 2,40 m en périphérie. Les inclusions sont ancrées de 1 m dans la couche de sable dense, et sont surmontées d'un matelas de 2 m d'épaisseur. Sous chaque réservoir, 1 128 inclusions rigides sont mises en place, avec une longueur variant entre 20 et 25 m. À l'échelle du projet, c'est donc un linéaire de plus de 200 km d'inclusions qui a été mis en oeuvre, soit l'équivalent d'un Paris-Le Mans !

Les vérifications de portance globale (à l'échelle du réservoir) et locale (sous les voiles périphériques du réservoir), ainsi que la vérification de la stabilité globale (stabilité du remblai hydraulique sous la charge apportée par le réservoir), menées à l'aide du logiciel Talren, ont démontré que la stabilité du réservoir était assurée en l'absence d'inclusions rigides. Ces vérifications ont été menées pour les phases statiques ainsi que pour les phases sismiques, en considérant une période de retour de 2 475 ans, avec une accélération nominale de 0,17 g. Les mécanismes de glissement sous séisme ont également été vérifiés, ainsi que la liquéfaction sous séisme. Les inclusions ne jouent donc qu'un rôle de limitation des tassements (domaine 2 au sens des recommandations ASIRI), rôle néanmoins essentiel compte tenu des charges importantes apportées par le réservoir (jusqu'à 250 kPa lors de la phase d'hydrotest).

S'agissant des justifications sous séisme, TERRASOL a déterminé la réponse sismique du site à l'aide du programme SHAKE, ce qui a permis de déterminer les impédances dynamiques du système de fondation (à l'aide du programme SASSI) avec les bonnes lois de dégradation des modules de cisaillement. Nous avons à cette occasion fait appel à l'expertise d'Alain Pecker pour le calage des spectres sismiques de design.

Dans le cadre de ce projet, TERRASOL a pu démontrer que la solution innovante de fondations de réservoirs sur inclusions rigides était techniquement et économiquement intéressante. L'apport des recommandations ASIRI a été essentiel puisque l'ensemble des critères de déformations très stricts imposés par le marché ont pu être vérifiés en suivant les principes de dimensionnement détaillés dans les recommandations, en s'appuyant sur des méthodes semi-analytiques. Le référentiel ASIRI a ainsi pu s'imposer dans un contexte de projet Oil & Gas pourtant orienté historiquement sur des référentiels British Standard ou ACI.

J. Drivet, C. Bernuy et N. Frattini



Crédit photo : KIPIIC

Complexe de Das Island

Abu Dhabi, Emirats Arabes Unis



Crédit photo : Cegelec

L'ADNOC est une des plus importantes compagnies pétrolières nationales et une des plus avancées sur les techniques d'analyse sismique et d'optimisation des taux de récupération de ses gisements tant dans l'onshore que dans l'offshore. Sa filiale ABU DHABI GAS (ADGAS), spécialisée dans le traitement, la commercialisation et la distribution de GPL et GNL, a retenu CECELEC OIL AND GAS dans le cadre de la construction d'une 8^{ème} turbine de 36 MW de type Frame 6 sur le complexe de l'île de Das, située dans le golfe Persique à environ 110 km de l'Emirat d'Abu Dhabi.

Dans le cadre des études de génie civil, CECELEC a sollicité TERRASOL pour les études géotechniques d'exécution. TERRASOL est d'abord intervenue sur la définition et la supervision des investigations géotechniques sur site, en se conformant strictement aux procédures offshore en termes de sécurité et de risque. Nous avons ensuite réalisé le dimensionnement des fondations des différents ouvrages de la centrale (turbine, charpente métallique, cheminée, bâtiments, etc), en portant une attention particulière au comportement des fondations profondes sous sollicitations dynamiques.

C. Bernuy

Protection d'un gazoduc contre l'érosion

Yemen

Assurant le transport du gaz depuis les gisements de Marib' au centre du pays jusqu'à Bahlaf sur les côtes du Golfe d'Aden, un « pipe » de YEMEN LNG parcourt près de 320 kilomètres de déserts sableux, pierreux, et parfois très montagneux.

Un tronçon de 5 km, qui permet le passage d'un haut plateau culminant à 1700 m d'altitude à une plaine 800 m plus bas, est soumis à rude épreuve géotechnique : entouré de hautes falaises dolomitiques se délestant de blocs cyclopéens, inscrit dans un versant en limite de stabilité, ce tronçon doit en outre traverser une série d'oueds qui, alimentés par la mousson, érodent tout sur leur passage.

Après une mission d'expertise en 2010 sur les désordres liés à cette érosion torrentielle, TERRASOL a été de nouveau sollicitée par TOTAL durant le mois de mars 2012 pour une mission sur place d'un ingénieur TERRASOL pendant un mois portant sur :

- La conduite de travaux sur un ouvrage hydraulique en gabions et enrochements,
- Une expertise sur l'ensemble des travaux de réaménagement réalisés jusqu'alors.

A. Beaussier



Barrage de Janneh

Liban

Dans le cadre de la préparation de sa réponse à un appel d'offres lancé par le gouvernement libanais, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS a sollicité SETEC ENERGIE ENVIRONNEMENT (groupe SETEC) pour une assistance technique sur cette opération, la maîtrise d'œuvre étant assurée par SOGREAH et KHATIB & ALAMI.

Afin de répondre au mieux à la demande, SETEC ENERGIE ENVIRONNEMENT s'est entourée de LOMBARDI (pour l'ingénierie du corps de barrage et la géotechnique associée) et de TERRASOL (pour la géotechnique des ouvrages annexes, batardeau amont, « bulkhead » en jet grouting, et batardeau aval).

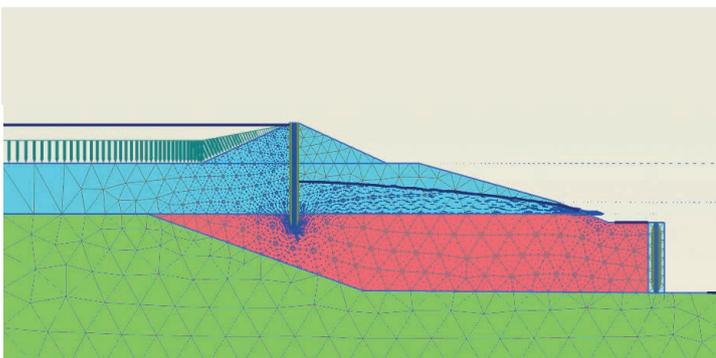
L'ouvrage principal est un barrage en BCR de 92 m de hauteur, avec 62 m de substitution des alluvions sur le fleuve Narh Ibrahim.



@DR



Crédit photo : VCGP



Les batardeaux amont et aval sont composés d'un merlon avec étanchéité par paroi au coulis profonde.

Le « bulkhead » est quant à lui composé d'une paroi en jet grouting en arc de cercle servant de soutènement pour réaliser la substitution des alluvions sous l'assise du corps de barrage.

La mission de TERRASOL a consisté en :

- Une revue de l'AVP,
- L'étude d'une variante proposée par VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS consistant à déplacer vers l'amont le batardeau amont (digue), construire la paroi au coulis côté amont de la digue (plutôt qu'à son axe), et supprimer le « bulkhead ».

Le résultat de cette étude a clairement montré les avantages de la solution variante :

- La solution 1 (sans ancrage de l'écran au coulis dans le substratum) ne présente pas une stabilité suffisante,
- La solution 2 (avec ancrage de l'écran au coulis dans le substratum) présente un risque de débordement en raison du tassement probable de la digue, et nécessite des travaux de jet grouting très importants dont la stabilité est précaire,
- La solution 3 (variante VINCI) minimise les travaux spéciaux (réduction de la paroi au coulis, suppression du jet grouting) et limite les volumes de pompage.

Cette étude comparative a été réalisée en faisant appel au module PLAXFLOW de PLAXIS qui a permis de quantifier les écoulements alors que PLAXIS 2D® a été utilisé pour la vérification des déplacements, ainsi que des contraintes et efforts sur les éléments d'étanchéité (paroi au coulis) ou de soutènement (« bulkhead »).

J. Drivet

Nouvel outil « Liquéfaction » Développements scientifiques

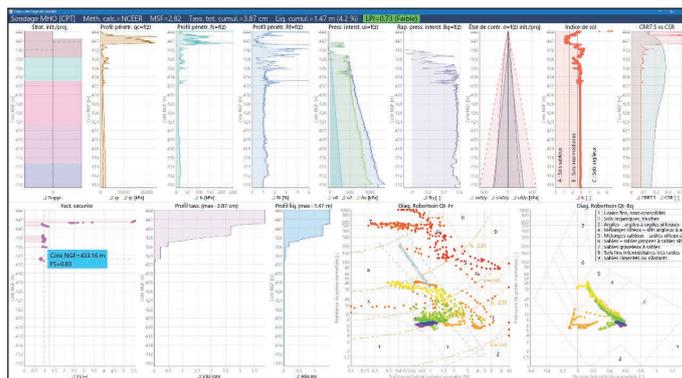
TERRASOL finalise actuellement le développement d'un logiciel dédié à l'analyse quantitative de l'aléa de liquéfaction des sols sous sollicitations sismiques. Dans sa version initiale, cet outil est basé sur une implémentation stricte de la méthode semi-empirique directe dite « NCEER » (Youd et Idriss, 2001), qui fait actuellement référence en la matière au niveau international.

Celle-ci repose sur l'introduction de facteurs de sécurité basés sur la comparaison entre la contrainte de cisaillement induite par le séisme de projet (Cyclic Stress Ratio, CSR) et la résistance au cisaillement cyclique offerte par les matériaux du site (Cyclic Resistance Ratio, CRR) qui découle de l'exploitation d'essais in-situ de type CPT(u) ou SPT.

Une attention particulière est apportée au cadrage des hypothèses de calcul (hypothèses sismiques, conditions hydrogéologiques en site vierge et en projet) et à l'importation des données brutes d'essais CPT(u) et/ou SPT.

Cet outil permet également de conduire des analyses de sensibilité sur l'ensemble des paramètres critiques (niveaux de nappes, couples accélération/magnitude, etc.) à partir de la gestion de « scénarios » associés à l'exploitation d'un sondage ou groupe de sondages, et ceci de manière très conviviale. En complément, une évaluation des tassements sismo-induits est présentée selon la méthode semi-empirique de Zhang et Brachman (2002). Cet indicateur, qui sera bientôt accompagné d'options complémentaires dans le cadre de développements ultérieurs, permet un éclairage spatial et ouvre la porte à des analyses multicritères évitant de restreindre les études de liquéfaction aux simples facteurs de sécurité.

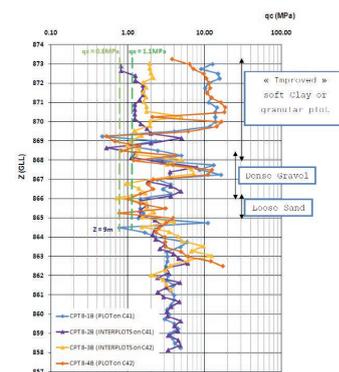
M. Hoddé et M. Huerta



Usine de traitement des eaux usées de Zahlé Liban

La mission de Terrasol sur l'usine de traitement des eaux usées de Zahlé, dans la plaine de la Bekaa au Liban, a démarré en 2006 avec une demande de DEGREMONT SUEZ portant sur une analyse géotechnique du site. La synthèse des premières investigations géotechniques a mis en évidence dans les sédiments lacustres la présence d'une couche d'argile molle, à l'origine d'importants tassements de consolidation à prévoir sous les installations du projet (jusqu'à 30 cm). Dans un second temps, nous avons pu analyser et exploiter les données d'essais pressiométriques complémentaires pour calculer les tassements totaux et différentiels sous les clarificateurs, ce qui a permis de confirmer les premiers résultats.

TERRASOL a ensuite été chargée par l'entreprise générale BUTEC d'étudier un programme de traitement des sols associant plots ballastés (ou substitution dynamique) et drains verticaux. L'espacement, le diamètre et la profondeur des plots ballastés ont été définis pour obtenir un module de sol équivalent de l'argile renforcée conduisant à des valeurs de tassements acceptables. La méthodologie élaborée précisait les objectifs-cibles à atteindre suite au traitement. Pour valider la conception, deux plots d'essai ont été réalisés et ont fait l'objet d'un suivi détaillé par TERRASOL. L'amélioration obtenue a été contrôlée au moyen d'essais pressiométriques et CPT effectués avant puis après le traitement.



Crédit photo : BUTEC

Les zones principales ont ensuite été traitées, et une évaluation finale rigoureuse de la substitution dynamique a été réalisée. Les profils CPT ont montré que sous l'effet du traitement de sol réalisé, le module global avait atteint la valeur cible et que toutes les zones respectaient les critères établis au préalable. Une couche de base compactée et une couche de forme ont ensuite été mises en place sur les zones traitées, avant la réalisation du radier. TERRASOL a apporté son assistance à BUTEC pendant la phase de travaux, entre 2008 et 2010.

Puis en janvier 2013, TERRASOL a effectué une visite sur site à la demande de BUTEC afin de valider la conception des travaux d'amélioration des sols sous le bassin d'aération à partir des résultats d'essais CPT post-traitement. TERRASOL a également passé en revue les procédures et résultats des essais à la plaque pour valider les couches de forme et revoir les objectifs-cibles.

Enfin, en 2014, TERRASOL a réalisé le dimensionnement du radier sous la station de pompage et les filtres de recyclage des boues, et estimé les tassements attendus sous ces structures particulières situées sous le niveau de la nappe et sous les couches traitées.

A. Abboud



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

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

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 : t.elmalki@terrasol.com

TERRASOL Tunisie

2, rue Mustapha Abdessalem
El Menzech
2037 Tunis
Tunisie

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