

Conception des fondations de la plus haute tour d'Afrique : la tour F à Abidjan



Credit photo : @PFO

Dans le cadre de ses activités en Afrique, et après les études d'exécution en 2019 de la Tour Mohammed VI à Rabat (atteignant 250 m de hauteur), Terrasol a conduit l'année passée, pour Spie batignolles fondations et Besix, des études du même type pour la conception du système de fondations de la plus grande tour d'Afrique actuellement en construction : la Tour F à Abidjan (Côte d'Ivoire) culminant à plus de 300 m de hauteur.

Cette tour, dont l'empreinte au sol s'apparente à un pentagone inscrit dans un cercle de 40 m de diamètre, présente un système de fondations comprenant 70 barrettes dont la pointe est injectée. Les barrettes présentent une longueur de 60 m et une section de 4,2m² (1,5 m x 2,8 m). Un radier de 2,5 à 3,5 m d'épaisseur permet d'assurer le transfert de charges depuis la tour vers les fondations.

Le site comprend essentiellement des terrains argilo-sableux avec une nappe à 25 m de profondeur environ. Des lentilles argileuses de taille métrique peuvent apparaître de manière erratique. Ces terrains ont été principalement caractérisés au moyen du pressiomètre Ménard, et deux essais à la cellule d'Osterberg ont été réalisés sur des pieux forés de 1,5 m de diamètre dont la pointe est injectée selon la même méthodologie que les barrettes. Ces essais instrumentés ont permis d'optimiser certains paramètres de calcul, notamment les frottements axiaux et la résistance de pointe, et également de valider la procédure d'injection de la base des fondations mise en œuvre par Spie batignolles fondations. Pour une pression limite nette de 4 MPa dans les sables, la valeur du facteur de pointe apparent est bien supérieure à 2,0 et atteint même 3,0.

Les effets d'interaction sol-structure jouant un rôle fondamental dans la conception du système de fondation, à la fois sous chargement vertical (tassements absolus et différentiels, rotations, sollicitations internes et descente de charges) et horizontal (rotation et flèche horizontale, effets du 2nd ordre), il a été nécessaire de procéder à une estimation la plus précise possible de la raideur des barrettes, en tenant compte des effets de groupe qui se manifestent et qui tendent à assouplir leur raideur apparente (notamment en partie centrale). Des procédures d'interaction sol-structure spécifiques ont été mises en œuvre en associant des modèles éléments finis en trois dimensions avec le logiciel Plaxis 3D d'une part, et des modèles hybrides avec le logiciel Tasplaq développé par Terrasol d'autre part. Ces modèles hybrides, qui combinent des méthodes de résolution numérique classiques, comme la méthode des éléments finis, avec des méthodes analytiques, permettent un gain conséquent en temps de calcul et une possibilité accrue de procéder à de vastes études paramétriques.



Credit photo : @Spie batignolles fondations

Édito

L'année 2021, sur la lancée de la fin de l'année 2020, confirme un niveau d'activité record pour Terrasol, et nous sommes ravis d'avoir pu accueillir ces derniers mois plusieurs nouvelles recrues en renfort au sein de nos équipes - malgré un contexte toujours difficile pour tous du fait du confinement et du télétravail généralisé.

Cette phase de croissance nous a amenés à renforcer également notre Direction Générale début 2021, avec la nomination de Fahd Caira en tant que Directeur Général Adjoint.

Cette forte activité est portée bien sûr par nos grands projets en cours (Grand Paris Express, LGV Londres Birmingham, Tunnel Euralpin Lyon Turin, etc.), ainsi que par les nombreux autres projets et sollicitations, en France et à l'international, sur lesquels nous sommes intervenus au 1^{er} semestre. Les articles de ce numéro vous donnent un aperçu de certains de ces projets, et de nos derniers développements en matière d'interaction sol-structure sous séisme (outil Fondsis).

L'actualité du Pôle Logiciels est également très riche, avec notamment la commercialisation de Scage en début d'année, et celle de Talren v6 en juillet.

Nous espérons que les semaines qui viennent verront se poursuivre le « retour à la normale », que nous pourrions nous retrouver de plus en plus nombreux au bureau, et vous rencontrer, clients et partenaires, à l'occasion des diverses réunions et manifestations programmées à nouveau dans nos agendas !

Souhaitant à tous nos lecteurs un bel été et de bonnes vacances,

Valérie Bernhardt

L'utilisation d'une méthode hybride a ainsi permis de grandement accélérer les procédures d'interaction sol-structure nécessaires et de faciliter le dialogue entre les ingénieurs géotechniciens et ceux de structure. Un calcul 3D complet a aussi été réalisé de manière à confirmer les résultats obtenus. La confrontation entre les modèles numériques et hybrides, avec des écarts sur les résultats inférieurs à 5 %, a permis de valider pleinement la fiabilité et la robustesse de la conception proposée.

Les études d'interaction sol-structure menées sur la Tour F ont permis de développer des méthodes toujours plus efficaces pour mener à bien les études d'exécution et entamer les travaux rapidement. Les méthodes hybrides que Terrasol promeut depuis de nombreuses années constituent des alternatives pertinentes et efficaces aux méthodes numériques qui restent encore coûteuses en temps de mise au point des modèles et de calcul.

S. Burlon

Expertises géotechniques sur le projet de l'EPR Sizewell C

Royaume-Uni



Crédit photo : © EDF, EDF Energy, Edvance 2021

Le projet Sizewell C prévoit la construction de deux nouveaux réacteurs EPR dans le Suffolk, au Royaume-Uni. Le contexte géotechnique du site est marqué par la présence de terrains déformables, qui imposent un traitement affiné des effets d'interaction sol-structure sous actions statique et sismique.

Terrasol est intervenue à plusieurs étapes de ce projet. Tout d'abord nos experts ont participé à l'« Expert Panel » organisé par Edvance en amont et dont l'objectif était d'identifier les pistes d'optimisation au niveau des analyses d'interaction sol-structure (ISS) vis-à-vis des taux de réplication des bâtiments.

Les études d'ISS statique et dynamique des bâtiments de l'îlot nucléaire ont été confiées au groupement ICOSH, dont fait partie le groupe Setec. Dans le cadre de ce groupement, Terrasol a réalisé les

études d'ISS dynamique de la totalité des bâtiments de l'îlot nucléaire (analyse de site, interaction cinématique, fonctions d'impédances dynamiques), ainsi que les études de sensibilité et de contrôle externe du volet ISS statique (modèle élastique non-linéaire à l'aide du logiciel TASPLAQ).

En parallèle, les études de la chambre de précontrainte (PSG) nous ont été également confiées, ce qui vient consolider l'expertise acquise lors des études menées pour le projet d'EPR de Hinckley Point.

J. Pérez Herreros et A. Abboud

Digue de la Pallière : suivi de longue durée d'une digue sur sol tourbeux

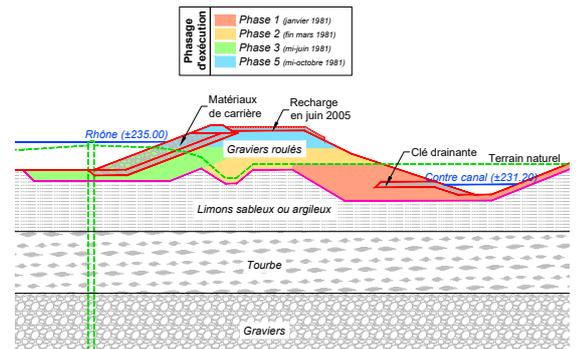
Ain, France

La digue de la Pallière est une digue en graviers située en rive droite de la retenue du barrage de Lavours (01). Cette digue a pour particularité géotechnique d'avoir été fondée sur de la tourbe en épaisseur significative, sur un linéaire de plusieurs centaines de mètres. Depuis sa mise en eau en 1982, la digue a subi des tassements importants allant jusqu'à 1 m par endroits et manifeste plusieurs signes de dysfonctionnement hydraulique.

Sur la période 2007-2011, la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) a confié à Terrasol une série de missions géotechniques visant à établir, par rétro-analyse numérique, un diagnostic de l'état mécanique et hydraulique de la digue, à la lumière des résultats d'un programme d'auscultation détaillé comprenant notamment un suivi de tassements sur plus de 25 ans. Ce diagnostic avait permis de statuer sur la stabilité à long terme de la digue et d'établir un lien direct entre son dysfonctionnement hydraulique et les tassements observés. Ces derniers ont conduit progressivement à une décompression du cœur de la digue et par conséquent à une augmentation localisée de la perméabilité, ce qui impacte le régime d'écoulement dans le corps de la digue.

Aujourd'hui, Terrasol est à nouveau consultée par la CNR pour analyser la réponse de cette digue pendant les phases transitoires de variation du plan d'eau. L'analyse est menée à l'aide d'une modélisation numérique de la réponse transitoire des matériaux de la digue et des terrains en place. Les résultats seront confrontés à ceux d'un suivi renforcé des mouvements observés lors du prochain abaissement du plan d'eau.

F. Cuira



Tunnel des Cliets

Haute-Savoie, France



Crédit photo : @Campenon Bernard Centre-Est

Le Tunnel des Cliets se situe sur la route départementale RD 1212 entre les communes d'Ugine (73) et de Megève (74), dans les gorges de l'Arly. Le site est connu pour être le siège de fréquents éboulements de grande ampleur associés à un mouvement de fauchage généralisé du massif rocheux, composé par des micaschistes sériciteux et quartzeux avec une foliation subverticale.

Suite à un éboulement majeur en février 2019, engageant un volume d'environ 8000 m³ et obstruant la tête amont et aval du tunnel existant, le Conseil Départemental de Savoie (MOA) a décidé de construire un nouveau tunnel de 240 m, plus à l'intérieur du massif, afin de s'éloigner des zones de fauchage.

Terrasol a réalisé les études d'exécution (mission G3) pour le compte de Vinci Construction. Le soutènement provisoire, composé par du boulonnage radial et du béton projeté ou, dans les zones de tête de la galerie, par des cintres lourds HEB 180, a été justifié par des approches de calcul en milieu discontinu et continu.

Des vérifications spécifiques ont été réalisées au niveau de la tête amont, caractérisée par un présoutènement en voûte parapluie et des profils cintrés avec pattes d'éléphant du côté Arly, rendus nécessaires par l'attaque en biais et la dissymétrie des charges. Le revêtement final est composé en piédroits par du béton coulé en place derrière des prémurs préfabriqués, et en voûte par du béton projeté.

P. Antoniazzi, J.P. Janin et J. Drivet

Nouveau pont-rail sur le canal à Saint-Denis

Ile-de-France, France

Un nouveau pont-rail enjambant le canal Saint-Denis est apparu dans le paysage du 19^{ème} arrondissement parisien. Il s'agit d'une structure mixte à arcs biais longue de 80 m environ, réalisée dans le cadre du Terminus Technique du programme de prolongement sur le RER E à l'Ouest (TTEO phase 2).

Terrasol a accompagné SNCF Réseau depuis la conception de cet élégant ouvrage (missions G2 AVP, PRO, DCE/ACT) et tout au long du suivi d'exécution (mission G4), achevé au printemps 2020 avec la pose par barge des deux arcs.

La complexité du PRA Saint-Denis tient notamment aux exigences de projet liées à la maîtrise des déformations de l'ouvrage neuf par rapport au pont centenaire existant auquel il est accolé pour en élargir la plateforme ferroviaire (voie V2E à cheval entre les deux structures). Dans un contexte densément urbanisé, le recours à des « forêts » de micropieux, dont la moitié sont inclinés à 45°, s'est révélé incontournable : chacune des deux piles repose ainsi sur un massif en béton armé fondé sur un groupe d'environ 70 micropieux de type IV. Les culées sont fondées sur des groupes de pieux forés de diamètre 1000 mm. Les modélisations de ces dispositifs de fondations ont été menées en exploitant pleinement les capacités du module Groupie+ de la suite logicielle Foxta.

De nombreux soutènements provisoires ont accompagné la cinématique des travaux. A noter également que le site a fait l'objet d'une vaste campagne d'injections des formations géologiques bartoniennes et lutétiennes, identifiées comme étant le siège d'un fort aléa karstique lié à la dissolution de gypse antéludien.

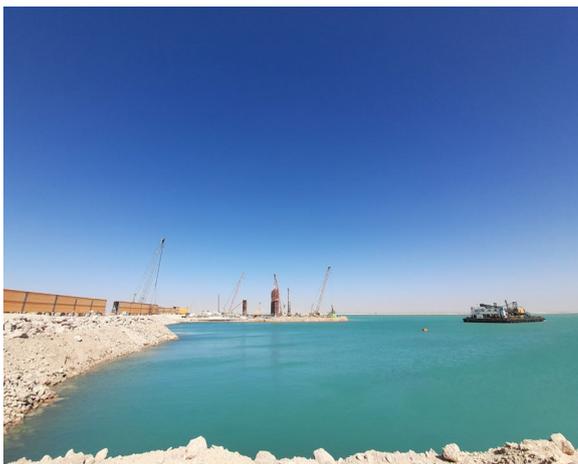


Crédit photo : @SNCF Réseau

M. Hocdé et F. Cuiru

Nouveau port de Laâyoune

Maroc



Crédit photo : @Setec Maroc

Depuis plus d'un an, Terrasol et Setec Maroc interviennent conjointement pour le compte de Jesa Team Maroc qui assure une mission générale d'assistance et de conseil auprès de Phosboucraa, filiale du groupe OCP SA (Office Chérifien des Phosphates), pour la construction d'un nouveau port à Laâyoune qui permettra la valorisation du phosphate du gisement de Boucraa. Les études et les travaux sont réalisés par l'entreprise grecque Archirodon avec l'appui du bureau de maîtrise d'œuvre danois Cowi.

Les missions de Terrasol et Setec Maroc se focalisent essentiellement sur les fondations du viaduc maritime permettant l'accès depuis la terre à une vaste zone portuaire de quais. Long de 3170 m, cet ouvrage perpendiculaire au trait de côte comprend presque 80 travées de 40 m de longueur reposant chacune sur des appuis comprenant 5 pieux battus métalliques dont certains sont inclinés.

La conception des pieux se base sur différents essais de chargement en compression et en traction que Terrasol et Setec Maroc ont analysés. Des optimisations sont recherchées en veillant toutefois à garantir une robustesse et une fiabilité suffisantes. En effet, cet ouvrage conçu pour une durée d'exploitation de 100 ans est soumis à des sollicitations particulières de par son exposition au milieu maritime, qui reste toujours agressif.

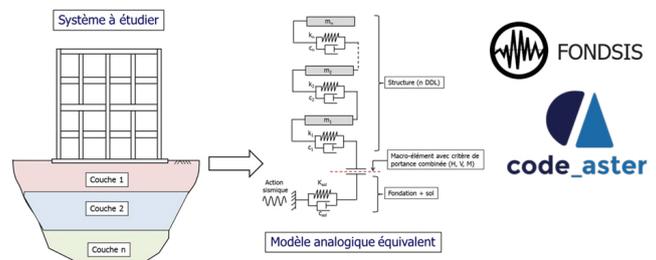
S. Burlon et A. Skali Senhaji

Fondsist, un outil pour le dimensionnement sismique des fondations superficielles

Développements scientifiques

Terrasol est fréquemment sollicitée pour la justification de fondations superficielles ou de radiers sous charge sismique. Il peut s'agir d'ouvrages conventionnels ou d'ouvrages majeurs comme des réservoirs ou des bâtiments nucléaires. Les justifications à réaliser pour ces ouvrages s'appuient sur la mise en œuvre de l'Eurocode 8 qui régit le dimensionnement sismique en Europe. L'application de l'Eurocode 8, bien qu'il autorise le recours à des approches « en déplacements », est usuellement associée à des approches en « forces » faisant intervenir des formalismes de sécurité. Pour des ouvrages fondés superficiellement, ces formalismes aboutissent bien souvent à des impasses conceptuelles et à un surdimensionnement évident et inutile des systèmes de fondation.

Pour s'affranchir de cette impasse conceptuelle, on peut faire appel à des analyses en déplacements, qui consistent à statuer sur l'état limite sismique (glissement, portance, renversement) en chiffrant directement les déplacements irréversibles post-séisme. Ces analyses en déplacements peuvent être menées directement par modèles dynamiques complets non-linéaires, en 2 ou 3 dimensions, dont la complexité et la multitude des paramètres les rendent généralement incompatibles avec les applications pratiques de l'ingénieur. Une approche alternative consiste à utiliser un modèle analogique équivalent : la structure est représentée par un modèle « brochette », la fondation en interaction avec le terrain par un macro-élément intégrant les non-linéarités liées aux mécanismes de décollement, de glissement et de poinçonnement à l'interface sol/fondation. Cette modélisation analogique a fait l'objet d'un logiciel développé par Terrasol, appelé FONDSIS, qui s'est déjà révélé utile et efficace dans le cadre de plusieurs études parasismiques que nous avons menées récemment. En parallèle, à la demande et pour le compte d'EDF-TEGG, Terrasol a implémenté le macro-élément utilisé dans FONDSIS dans Code_Aster, sous la forme d'une nouvelle loi de comportement appelée FONDA_SUPERFI, déjà accessible dans la version actuelle du logiciel.



F. Cuiru, J. Pérez Herreros et C. Borely



Talren v6

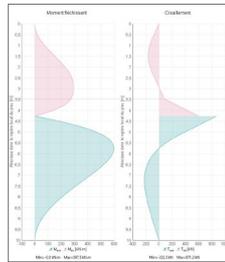
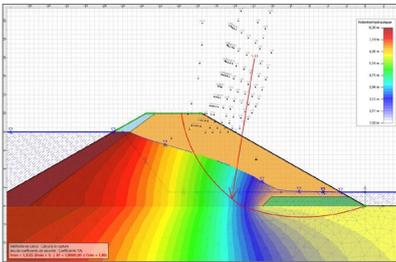
Nouvelle version majeure

Nous vous présentons la version 6 de notre logiciel historique Talren dédié à la vérification de la stabilité des ouvrages géotechniques avec ou sans éléments de renforcement. Cette nouvelle version intègre un nouveau moteur de calcul, plusieurs nouvelles fonctionnalités ainsi que des modules complémentaires permettant d'étendre les champs d'application du logiciel :

- **Module « Pieu »** : ce module complémentaire permet d'estimer de manière plus fine la contribution résistante le long d'un élément de renforcement de type « clou » représentatif d'un pieu, d'une inclusion ou d'une barrette travaillant en flexion-cisaillement.
- **Module « Ecoulement »** : ce module permet un calcul intégré, en régime établi, du champ de pressions interstitielles à considérer pour les analyses de stabilité. Le calcul est basé sur une résolution numérique de l'équation de Laplace tenant compte du caractère multicouche et anisotrope du terrain.
- **Stabilité interne d'un massif en sol cloué** : Talren v6 offre désormais la possibilité de spécifier et/ou de caler automatiquement les efforts en tête des clous nécessaires à la vérification de la stabilité interne d'un massif en sol cloué, conformément aux dispositions de la nouvelle norme NF-P 94 270 datant d'octobre 2020.
- **Module « Sensibilité »** : ce module offre la possibilité de conduire automatiquement des études de sensibilité permettant d'évaluer l'influence des différents paramètres du modèle sur la stabilité de l'ouvrage étudié. Il est également possible de mener des analyses probabilistes.
- **Aspects sismiques** : Talren v6 permet la recherche automatique de l'accélération sismique déstabilisante (celle conduisant à l'équilibre limite) qui peut être utilisée comme donnée d'entrée d'un assistant « Séisme » intégré au logiciel, permettant le calcul empirique ou analytique des déplacements irréversibles post-séisme (modèle de type Newmark).

Une **version d'évaluation** est disponible et peut être téléchargée depuis notre site web.

Y. Abboud, M. Huerta et F. Cuira



Foxta v4.1

Nouvelle mise à jour

Une nouvelle mise à jour de Foxta (v4.1) est disponible et apporte de nouvelles fonctionnalités très utiles au calcul des massifs renforcés par inclusions rigides : traitement d'une fondation d'emprise limitée sur inclusions rigides (approche MV3), ajustement automatique des paliers de frottement négatif, possibilité d'alimenter les lois de réaction t-z à partir d'essais PMT, CPT ou des propriétés de cisaillement du terrain.

Cette mise à jour est gratuite pour les utilisateurs de la version 4 de Foxta.

M. Huerta et F. Cuira

Formations

Sept	Prise en compte des effets d'interaction sol-structure dans le calcul des fondations superficielles et profondes
4 oct	Formation Talren v6 - analyse de la stabilité des ouvrages géotechniques
5 oct	Formation K-Réa v4 - dimensionnement des écrans de soutènement
6 et 7 oct	Formation Foxta v4 - dimensionnement des fondations
8 oct après-midi	Formation Slake - analyse du risque de liquéfaction
19 au 21 oct	Conception pratique des écrans de soutènement en milieu urbain ou maritime
27 oct	Prise en compte de l'eau dans les calculs des ouvrages de soutènement
28 oct	Formation Scage - dimensionnement des parois moulées
17 nov	Workshop Plaxis 2D - modélisation des écrans de soutènement
18 nov	Workshop Plaxis 2D - renforcements des sols et ouvrages en terre
24 et 25 nov	Workshop Plaxis 2D et 3D - conception des ouvrages souterrains



Notre catalogue de formations 2021 est disponible sur notre site web. N'hésitez pas à le consulter pour obtenir la liste complète de sessions de formation à venir.

Par ailleurs, nous sommes à votre disposition pour organiser des formations intra-entreprises en fonction de vos besoins.

Publications récentes



- *Exemples d'interaction sol-structure pour les fondations de deux très grandes tours* (S. Burlon et F. Cuira) Solscope Mag n°17 – Avril 2021
- *Prolongement de la ligne 11 du métro parisien : tunnel des Lilas* (J.P. Janin, C. Dano et V. Villain) Revue Travaux n°969, Juin 2021
- *Eole une nouvelle cathédrale à la Défense* (F. Asselborn, G. d'Ouinice, J. Pinto, S. Reynaud) Revue Travaux n°969, Juin 2021
- *Ligne 15 Sud – Excavation du rameau 1702P dans un contexte défavorable* (E. Peyrard, JF. Orefici, Y. Ben Dhaoui, A. Bachelier) Revue Travaux n°969, Juin 2021

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 : terrasol@setec.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 : terrasol@setec.com

Représentation au Maroc

Setec Maroc
3 rue Abou Hanifa
Agdal
Rabat - Maroc

Tel : +212 (661) 16 20 78
Fax : +212 (537) 77 48 41
Email : ahmed.skalisenhaji@setec.com

Terrasol 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