

Interaction sol-fondation 10 ans de développements scientifiques

Nous avons mené ces dernières années de nombreuses actions scientifiques notamment sur la question de l'interaction sol-fondation. Ces développements, tous motivés par des problématiques concrètes rencontrées au fil des études géotechniques que nous traitons au quotidien, se sont concrétisés par des outils de calcul nouveaux intégrés progressivement à la suite logicielle **Foxta**. En voici un rapide bilan.

Le développement du module **Tasplaq** a constitué un grand pas en avant dans la modélisation des **radiers et dallages** en offrant une méthode de calcul pratique qui s'affranchit de la représentation de type « dalle sur ressorts » tout en évitant le recours à des traitements complets en éléments finis 3D. La méthode s'est révélée efficace dans de nombreux projets d'envergure (Tours de la Défense, EPR UK, ...) et a bénéficié de plusieurs évolutions récentes comme le traitement d'un multicouche non horizontal ou la prise en compte des effets de déchargement/rechargement.

Les enseignements du projet ASIRI ont nourri le module **Taspie+** qui traite de manière simplifiée les interactions complexes mises en jeu dans un massif renforcé par **inclusions rigides**. La puissance de la méthode développée réside dans sa capacité à prendre en compte les effets de rigidité relative sol/inclusion dans la modélisation des mécanismes de transfert de charges. La dernière évolution du module permet d'intégrer les effets de bord dans le cas d'un nombre limité d'inclusions.

La généralisation des modèles « t-z » et « p-y » telle qu'implémentée dans les modules **Taspie+** et **Piecoef+** apporte une réponse satisfaisante et rigoureuse à la problématique des **effets parasites** tenant compte de l'interaction sol-fondation (frottement négatif, poussées latérales, gonflement, ...). Un autre aspect « parasite » propre à la justification des micropieux est



Crystal Towers (Beyrouth, Liban)
Fondations conçues avec Groupie+ et Tasplaq

celui du **flambement**. La formulation mathématique de **Piecoef+** propose une nouvelle approche pour l'estimation directe de la charge critique de flambement, approche qui permet également d'évaluer les effets de 2nd ordre en présence d'une courbure initiale non nulle.

Le nouveau module **Groupie+** dédié aux **groupes de pieux** permet de traiter aisément dans un seul modèle l'équilibre 3D du système pieux/sol/fondation, et ce en tenant compte des non-linéarités liées à la réponse du sol. Les développements se poursuivent avec comme objectif l'introduction de la souplesse de la semelle de liaison ainsi que le traitement des effets d'interaction pieu/sol/pieu.

Le développement récent des **fondations géothermiques** a motivé celui d'un nouveau module, appelé **Thermopie+**, et destiné à l'évaluation des sollicitations thermo-mécaniques dans un groupe de pieux géothermiques liaisonnés en tête par un élément de structure de rigidité quelconque. L'approche proposée rend compte des effets d'interaction pieu/structure/pieu, ce que ne permet pas la modélisation classique limitée à un pieu isolé avec simple liaison élastique en tête.

En parallèle, la prise de conscience récente des enjeux liés au **risque sismique** nous a amenés à travailler sur des méthodes d'analyse complémentaires permettant de rendre compte pleinement du caractère dynamique des sollicitations sismiques. Ainsi, nous sommes actuellement mobilisés sur les sujets suivants :

- **Pieux sous séisme** : la réponse sismique d'une fondation sur pieux nécessite en toute rigueur de tenir compte des effets (dynamiques) d'interaction pieu/sol/pieu, ce qui est implicitement ignoré dans les analyses « pseudo-statiques » usuelles. Cela a motivé l'initiation début 2016 d'une thèse CIFRE en collaboration avec AP Consultants, l'ECN et l'IFSTTAR Nantes, qui vise à développer un « Macro-élément » apte à représenter la réponse non linéaire d'un groupe de pieux sous séisme tenant compte des effets fréquentiels.
- **Inclusions rigides sous séisme** : au-delà du calcul des sollicitations internes sous effets inertiels et cinématiques, la justification parasismique d'une fondation sur inclusions rigides passe par une évaluation des déplacements irréversibles liés à l'effet « fusible » joué par le matelas. Le développement et l'évaluation pratique d'un modèle de type « Newmark généralisé »

Edito

En cette année 2016, les équipes de Terrasol se mobilisent sur tous les fronts :

- Le démarrage des phases Travaux sur les premiers grands projets de transports parisiens : gare Eole de la Défense à l'automne, puis la Ligne 15 Sud-Ouest. Nous nous apprêtons donc à détacher une partie de nos équipes sur ces chantiers, tout en continuant d'assurer nos missions d'études AVP/PRO sur les lots qui suivent.
- Nos réponses réactives sur l'ensemble des offres et projets que nous confient nos clients, en France comme à l'étranger, et ce alors même que nous renforçons nos effectifs affectés à ces projets parisiens.
- Le développement de notre activité dans des domaines tels que l'éolien, les structures géothermiques, le parasismique, les ouvrages portuaires et aéroportuaires, ou encore le nucléaire : nous nous appuyons pour cela sur nos développements scientifiques internes.
- Notre activité de formation dans le domaine géotechnique : elle est en forte progression avec plus de 170 ingénieurs formés au 1^{er} semestre 2016.
- L'encadrement de 2 thèses Cifre : l'une consacrée à la modélisation des soutènements exceptionnels, et l'autre au comportement sismique des fondations profondes.

Nous déployons toute notre énergie et notre savoir-faire pour répondre présents sur l'ensemble de ces sujets, dans l'intérêt des projets et de nos clients. Et nous avons obtenu ainsi au 1^{er} semestre de beaux succès, que ce soit en direct auprès de nos clients, ou au sein des équipes pluridisciplinaires du groupe Setec : pas de tir Ariane 6 à Kourou, Port du Havre, éoliennes offshore à Fécamp, projet LHC du CERN, rénovation du Musée d'Art Moderne, contrats-cadre SNCF...

Et gageons que le 2^{ème} semestre sera porteur de nouvelles opportunités !

Je vous souhaite de très bonnes vacances, et vous donne rendez-vous à la rentrée pour un numéro spécial de notre Lettre consacré à la géotechnique des ouvrages d'art.

V. Bernhardt

Intégrant les effets d'interaction sol-structure ont été menés dans le cadre d'un partenariat R&D actuellement en cours avec Hyundai Engineering & Construction.

F. Cuiira

Tour Casablanca Finance City

Maroc

Dans le cadre de la construction de la tour « Casablanca Finance City », l'entreprise BYMARO, en charge des travaux, a confié à TERRASOL :

- d'une part la réalisation de missions géotechniques d'étude d'exécution relatives au dimensionnement des soutènements provisoires, du système de drainage et aux phénomènes d'interaction sol-structure,
- d'autre part le suivi d'exécution.

Le projet, situé dans l'emprise de l'ancien aéroport d'Anfa (Casablanca), est constitué d'une tour de 25 étages et 6 niveaux de parking enterrés (jusqu'à 20 m de profondeur). Les terrains en place sont des formations meubles sur une dizaine de mètres d'épaisseur, reposant sur un substratum schisteux. La nappe est attendue à 8 m sous le TN. Les soutènements provisoires sont ainsi constitués :

- d'une paroi clouée en partie supérieure, justifiée à partir de calculs Talren,
- et d'une paroi boulonnée au rocher en partie inférieure, justifiée à partir de calculs de stabilité de bloc.



Crédit photo : CFC @BYMARO

Les études des tassements de la tour et du système de contrôle des sous-pressions d'eau ont également été réalisées. La mission de suivi régulier sur chantier a été assurée par notre géotechnicien sur place au Maroc. Elle a porté sur le suivi des opérations de terrassement : suivi et validation des essais d'arrachement de clous, contrôles en cours de terrassement, levés de fracturation, avis sur les adaptations ponctuelles.

T. El Malki, J.F. Bruchon et J. Marlinge

Extension du quai TMDC n°4

Montoir, France



Le Grand Port Maritime de Nantes - Saint-Nazaire procède à l'extension avale du front d'accostage du Terminal à Marchandises Diverses et Conteneurs n°4 (TMDC 4). Les travaux, confiés au groupement BOUYGUES TPRF – COLAS – DTP TERRASSEMENT, consistent en la construction d'un quai en béton armé de 350 m de longueur, fondé sur des pieux métalliques battus, et d'un terre-plein arrière constitué par remblaiement au-dessus d'alluvions renforcées par inclusions rigides. Les travaux nécessitent également le reprofilage par remblaiement et dragage de la berge.

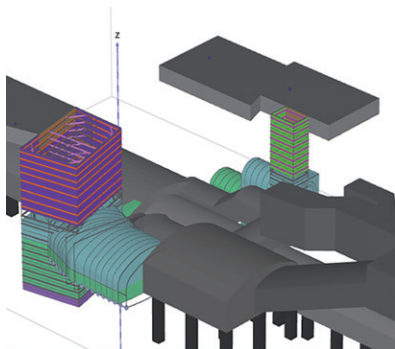
TERRASOL accompagne le groupement depuis la phase d'appel d'offres, en tant que bureau d'études géotechniques. En phase d'exécution, TERRASOL réalise la synthèse géotechnique générale du projet d'une part, ainsi que les études de stabilité des terrassements (calculs Talren), et de battage des pieux d'autre part. L'étude de battage est menée par le biais de simulations numériques basées sur la théorie de propagation d'ondes dans un pieu fiché dans le sol. Elle comprend la définition et l'ajustement des critères de battage, ainsi que la vérification de la portance obtenue.

Les travaux sont en cours depuis juin 2015. L'ensemble des inclusions rigides a été réalisé, et 25% des pieux ont été battus à ce jour.

J. Marlinge et S. Benouis

Métro 11 – Station Mairie des Lilas

Paris, France



Dans le cadre du prolongement de la ligne 11 du métro parisien jusqu'à Rosny-Bois-Perrier, de nouveaux accès secondaires doivent être réalisés au niveau de la station Mairie des Lilas, mise en service en 1937. Les travaux consistent en la réalisation de puits blindés depuis la surface, à partir desquels des galeries souterraines seront excavées pour venir intersecter les ouvrages existants (salle des billets, rameaux, station souterraine).

Les enjeux et les objectifs de l'étude, fixés par la RATP, étaient multiples : concevoir le phasage des travaux, justifier le soutènement provisoire des ouvrages, évaluer les effets de la construction des nouveaux accès sur les ouvrages existants en souterrain (la station Mairie des Lilas et le tunnel de la ligne 11) ainsi que sur les bâtiments et la voirie en surface, et enfin définir un dispositif d'auscultation.

Étant donnée la géométrie du problème à traiter, une approche numérique tridimensionnelle nous a semblé essentielle pour étudier correctement la complexité des interactions sol / structure entre les ouvrages à construire et les ouvrages existants, et pouvoir ainsi traiter les différentes problématiques évoquées ci-dessus.

Deux modèles numériques 3D complexes ont ainsi été bâtis : un pour chaque accès. Ils ont permis de simuler dans le détail le phasage des travaux et de concevoir, lors de la phase DCE, le dispositif d'auscultation qui sera mis en place dans le cadre de la méthode observationnelle à appliquer pendant l'exécution des travaux.

J.P. Janin et H. Le Bissonnais

Conception parasismique des ouvrages de soutènement

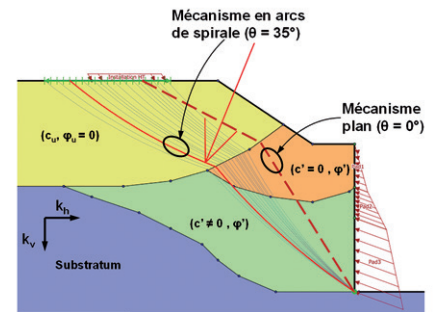
Calcul à la rupture

La méthode cinématique du calcul à la rupture telle qu'implémentée dans Talren permet d'évaluer les diagrammes de poussée/butée « dynamiques » à considérer pour la justification parasismique des ouvrages de soutènement. Cela permet d'aller bien au-delà du domaine de validité des modèles analytiques usuels tels que celui de Mononobe-Okabe étendu au cas d'un sol cohérent (Okabe, 1924).

Le tableau ci-contre présente le résultat d'une comparaison menée pour un mur soutenant un terrain homogène soumis à un séisme caractérisé par $k_h = a_h/g = 0,3$ et $k_v = 0$: le modèle de Mononobe-Okabe conduit à des résultats strictement identiques à ceux d'un calcul à la rupture restreint à des cinématiques planes ($\theta_{max} = 0$), ce qui correspond à l'hypothèse implicitement introduite dans le problème de Coulomb duquel est dérivé le modèle de Mononobe-Okabe. Une telle hypothèse conduit en revanche à des résultats exagérément optimistes lorsque le terme de cohésion devient prédominant, avec une sous-estimation de la poussée dynamique de plus de 20% par rapport à un modèle plus élaboré explorant des cinématiques en arcs de spirale.

Ce constat est corroboré par l'exemple de la figure ci-contre où l'on s'intéresse à la poussée dynamique à l'arrière d'un mur soutenant un terrain hétérogène. La mise en œuvre du calcul à la rupture avec des mécanismes en arcs de spirale conduit à une poussée dynamique résultante de l'ordre de 980 kN/ml, une valeur 1,50 fois supérieure à celle issue d'un calcul restreint à des cinématiques planes (660 kN/ml).

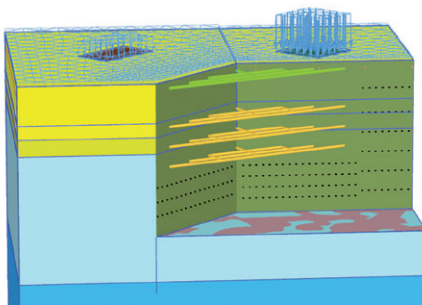
φ' (°)	Pente talus (°)	Cohésion (kPa)	Mononobe-Okabe	Calcul à la rupture cinématique plane	Calcul à la rupture arcs de spirale
30	0	0	570 kN/ml	570 kN/ml	570 kN/ml (+01%)
30	0	20	305 kN/ml	305 kN/ml	310 kN/ml (+02%)
30	16	20	450 kN/ml	450 kN/ml	500 kN/ml (+11%)
0	0	50	368 kN/ml	368 kN/ml	450 kN/ml (+22%)



F. Cuira

Double excavation pour le siège d'Investment Corporation

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.

U.S. Okyay

Bâtiment Roche Diagnostics

Meylan, France



Crédit photo : @Photec Production

La filiale française pour les activités Diagnostics du groupe pharmaceutique ROCHE construit son nouveau siège à Meylan, à proximité de Grenoble. Le bâtiment disposera d'une surface utile de 11 000 m² sur quatre étages, au-dessus de deux niveaux de sous-sols. La société LEON GROSSE, attributaire du marché, a contacté TERRASOL début 2015 suite aux importants déplacements des palplanches périphériques observés lors des premiers terrassements. Le contexte géologique et hydrogéologique très particulier (argiles silteuses litées et saturées) a nécessité la définition et le suivi de reconnaissances complémentaires (sondages carottés, essais triaxiaux, cellules de pression interstitielle...). TERRASOL a ensuite analysé et synthétisé l'ensemble des données collectées, puis défini un modèle géotechnique et hydrogéologique fiabilisé.

Six profils de calcul aux éléments finis (Plaxis 2D) en conditions non drainées et drainées nous ont alors permis, en collaboration étroite avec LEON GROSSE, la Maîtrise d'Œuvre Structures (TRACTEBEL), et le bureau EG-SOL en charge de la mission de suivi G4, de concevoir et dimensionner les confortements nécessaires à la poursuite des terrassements, tout en maîtrisant les déplacements des avoisinants. Ainsi, des pieux tangents renforçant la butée de certains écrans, associés à un butonnage très dense, ont été dimensionnés et exécutés. Le fond de fouille a été atteint fin 2015 avec des déplacements horizontaux conformes aux prédictions du modèle.

TERRASOL poursuit actuellement le suivi des déplacements pour les phases de dépose des butons et de remblaiement du gros œuvre.

T. Rossi

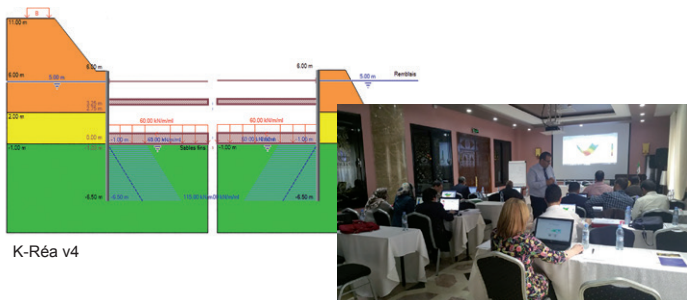
Pôle logiciels



K-Réa v4

La nouvelle version 4 du logiciel K-Réa a été diffusée fin 2015. Les nouvelles fonctionnalités disponibles (cf notre numéro précédent de cette Lettre) ont rencontré un grand succès parmi nos utilisateurs, et plus de 50 ingénieurs géotechniciens ont déjà suivi une formation sur cette nouvelle version, qui permet d'étendre le domaine d'application de K-Réa : grands soutènements pour des excavations d'envergure avec des dalles épaisses (modélisation possible avec appuis surfaciques), puits cylindriques soutenus par liernes circulaires, confortement de quais maritimes (calcul en contre-écran si nécessaire), blindages lors des travaux d'élargissement d'autoroutes, soutènements de culées d'ouvrages d'art ou des batardeaux de piles de pont, etc.

La dernière mise à jour intègre une optimisation significative du temps de calcul et de chargement des résultats (notamment pour des projets comportant un grand nombre de phases) ainsi que de nouveaux assistants pour le choix des caractéristiques des écrans et des ancrages.



Foxta v3

Nous travaillons actuellement sur une mise à jour majeure de Foxta qui intégrera des évolutions significatives à la fois au niveau de l'interface et du calcul. Parmi les nouveautés, extension des « variantes » de calcul à l'ensemble des modules, traitement des effets de bord dans Taspie+ (cas d'un nombre limité d'inclusions), introduction de la souplesse de la semelle dans Groupie+, prise en compte des effets thermiques (fondations géothermiques).

Talren v5

Talren v5 bénéficie depuis peu d'une nouvelle fonctionnalité, pour une convivialité toujours plus grande : les familles de renforcements. Cette option facilite la gestion des renforcements en les associant à des familles de mêmes caractéristiques (avec toutefois la possibilité de gérer des exceptions). Un nouvel outil de génération de renforcements est également disponible.

Conférences

Nous participerons aux Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG) qui se tiendront du 6 au 8 juillet 2016 à Nancy, au travers de nombreuses publications et interventions, ainsi que de notre présence sur un stand d'exposition.

Formations

Le 1^{er} semestre 2016 a été marqué par une activité formation inter- et intra-entreprises toujours très intense, avec plus de 18 sessions organisées au total en France, et plus de 170 ingénieurs qui ont participé à ces formations, tous logiciels confondus.

Les formations inter-entreprises d'ores et déjà programmées au 2nd semestre sont les suivantes :

Paris	Talren v5	22 septembre 2016
Paris	K-Réa v4	13 octobre 2016
Paris	Plaxis 2D	7 au 10 novembre 2016

D'autre part, nous avons également été actifs en formation à l'étranger ces derniers mois, avec plusieurs sessions de formation assurées en Algérie, et une session intensive organisée au Sénégal. Une nouvelle session de formation aux calculs géotechniques est d'ailleurs prévue au Sénégal fin 2016, en partenariat avec la société LABOSOL.

M. Huerta et F. Cuira

Publications et interventions récentes

- Les projets d'ouvrages géotechniques : apports de l'observation et de la modélisation (A. Guilloux) – RFG, n° 146, 2016
- Influence of EPB-TBM heading confinement pressure on surface settlements: comparison between 3D FE numerical predictions and in situ measurements (JP. Janin, P. Renier, A. Bergère et H. Le Bissonnais) – The World Tunnel Congress WTC, San Francisco, avril 2016

2^{èmes} Rencontres Algéro-Françaises de la Géotechnique, du Forage et des Fondations, Alger, mai 2016

- Gestion, surveillance et suivi des glissements de terrains. Cas pratique : étude du point dur au PK176+800 (échangeur de Djebahia) (M. Yahia-Aïssa)
- Étude de sol en zone urbaine et exemple de fondations spéciales du Viaduc de Millau (M. Yahia-Aïssa)

Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur, Nancy, juillet 2016

- Apports de la méthode cinématique du calcul à la rupture pour la conception des soutènements (F. Cuira et B. Simon)
- Apports de l'interaction sol-structure dans la conception des fondations (F. Cuira et B. Simon)
- Considérations pratiques autour de modèles numériques de certaines gares du futur Grand Paris (G. Chapron, K. Nejjar, H. Le Bissonnais et F. Cuira)
- Fondation d'un IGH en environnement contraint (E. Cazès, A. Bergère, F. Cuira et B. Simon)
- Modélisation d'un système d'interaction sol-pieu-structure pour un groupe de pieux géothermiques (C. Borély, F. Cuira et US. Okyay)
- Analyse et rétro-analyse du comportement des fondations d'un ouvrage d'art de la LGV SEA (KV. Nguyen, PL. Loriferne et F. Mathoniere)
- Conception et dimensionnement des fondations d'un IGH en milieu karstique – Le futur Palais de Justice de Paris (A. Beaussier et P. Reiffsteck)



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

c/o Semartec - Bureaux Regus
71, Angle Bd Mohamed V
et Rue Azilal - 3^{ème} étage
Casablanca-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

Conception, mise en page :
Pierre Vincent