Prologue

Les 10èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur confirment l'ambition de réunir les chercheurs, les industriels, les décideurs, les doctorants et même les élèves–ingénieurs autour de *l'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain*, en partageant les avancées scientifiques, les réalisations technologiques, les expériences innovantes menées au laboratoire ou au chantier et les modélisations numériques qu'elles soient continues ou discrètes.

Les JNGG 2020 sont co-organisées par le laboratoire GEOMAS de l'INSA Lyon, l'ENTPE et le Cerema sous l'égide des Comités Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique CFMS, de Mécanique des Roches CFMR et de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement CFGI.

Nous avons le plaisir d'accueillir à Lyon les auteurs de 155 communications regroupées selon trois thématiques et nombreuses sous-thématiques :

Aspects fondamentaux
- Modélisation numérique
- Modélisation physique
- Conception, réalisation et durabilité des ouvrages géotechniques
- Dynamique des sols, chargement cyclique, fondations d'éoliennes
- Matériaux et géomatériaux : caractérisation et modélisation
- Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages

Applications
- Ouvrages souterrains
- Fondations
- Ecrans et ouvrages de soutènement
- Amélioration et renforcement des sols et des roches
- Géosynthétiques – Sites et sols pollués

Impact sur la société
- Enseignement et transmission en géotechnique et géologie de l'ingénieur
- Environnement, risques naturels ou anthropiques, enjeux sociétaux
- Gestion des risques : aléas naturels, prévention et dispositif

Les communications ont été expertisées par les membres du Comité Scientifique mais également par les membres du Comité d'Organisation qui sont vivement remerciés. La période particulièrement turbulente a affecté quelque peu la synchronisation entre relecteurs et auteurs.

A l'occasion des JNGG des prix sont décernés : le prix Jean Kérisel du CFMS, le prix Jean Goguel du CFGI et le prix Pierre Londe du CFMR. Les laurét.e.s exposeront leur travaux durant les sessions plénières.

Les JNGG 2020 accueillent également une exposition, parrainée par la FNTP, l'USG et Syntec ingénierie, qui permettra aux différents intervenants de la profession (entreprises, bureaux d'études, fournisseurs de matériels et de logiciels...) de promouvoir leurs activités, leurs produits et se faire connaitre des ingénieurs de demain.

Ni les difficultés rencontrées suite à la pandémie, ni la peur de l'annulation des Journées n'ont enfreint notre volonté de vous accueillir à Lyon tout en espérant faire de l'édition 2020 le lieu des échanges fructueux et des rencontres privilégiées.

Le Comité d'Organisation

Comité de pilotage

- Valérie Bernhardt, Présidente du CFMS
- Jean Sulem puis Philippe Conseza, Présidents du CFMR
- Guilhem Deveze, Président du CFGI
- Laurent Briançon, Président du Comité d'organisation

Comité d'organisation

- Laurent Briançon (INSA) Président du comité d'organisation
- Irini Djeran-Maigre (INSA)
- Catherine Pothier (INSA)
- Florent Prunier (INSA)
- Claire Silvani (INSA)
- Denis Branque (ENTPE)
- Elisabeth Haza-Rozier (CEREMA)
- Jean de Sauvage (UGE)
- Caroline Chalak (ARCADIS)

Comité scientifique local

- Irini Djeran-Maigre, INSA, CFMS, Présidente du comité scientifique
- Nicolas Berthoz, CETU Bron, CFMS
- Pierre Bésuelle, 3SR, CFMR
- Marion Bost, IFSTTAR Bron, CFMR
- Tristan Bourdin, GEO-GC, CFGI
- Sylvie Bretelle, GEOS, CFMS
- Stéphane Brulé, Ménard, CFMS
- Lionel Causse, SNCF, CFGI
- Marie-Aurélie Chanut, Cerema Bron, CFGI
- Marianne Chahine, Cerema, CFGI
- Roger Cojean, CFGI
- Stéphane Curtil, GEOS, CFMR
- Benoît Deffontaines, Université MlV, CFGI
- Jean-Louis Durville, Consultant, CFGI
- Fabrice Emeriault, 3SR, CFMS
- Yannick Fargier, IFSTTAR Bron, CFGI
- Emmanuel Humbert, TELT
- Orianne Jenck, Université Grenoble Alpes, CFMS
- Muriel Gasc, Cerema, CFMR
- Nicolas Gatelier, Geostock, CFMR
- Lina Maria Guayacan Carrillo, ENPC, CFMR
- Johan Kasperski, CETU Bron, CFGI
- Cécile Lasserre, Université Lyon 1
- Clémence Louvard, ANTEA, CFMS
- Siegfried Maiolino, Cerema Bron, CFMR
- Cécile Maurel, Cerema, CFMS
- Nicolas Nayrand, Bureau Veritas, CFMS
- Xuan-Phu Nguyen, Itasca, CFMS
- Cédric Sauzéat, ENTPE
- Aurélie Talon, Université Clermont, CFMS
- Monique Terrier, BRGM, CFGI
- Emilie Vanoudheusden, BRGM Clérmont-Ferrand
- Nicolas Villard, NGE Fondations, CFMR
- Jean-David Vernhes, Unilasalle, CFGI
- Eric Vincens, Ecole Centrale de Lyon

jngg 2020

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 1A

Conception, réalisation et durabilité des ouvrages géotechniques 1

EFFET DE CYCLES HYDRIQUES SUR LA PERMEABILITE DE MATERIAUX LIMONO-SABLEUX COMPACTES

EFFECTS OF HYDRIC CYCLES ON HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF COMPACTED SANDY-SILTS

Yasmina BOUSSAFIR[1] et Laurent ARBARET[2]
[1] Université Gustave Eiffel, Ifsttar, Laboratoire Sols Roches et Ouvrages géotechniques, 77447 Marne la Vallée, France
[2] ISTO, Université d'Orléans CNRS BRGM – UMR7327, 45071 Orléans, France

Résumé
L'étude du vieillissement des matériaux peut se faire en reproduisant les effets des environnements extérieurs sur les matériaux compactés, tels qu'ils sont utilisés dans les ouvrages en terre et notamment dans les digues. Nous avons étudié le vieillissement d'un sol compacté sous l'influence de la météorologie et plus particulièrement sous l'effet de cycles de séchage et d'humidification caractéristiques du climat français. Un cycle reproduit à l'échelle d'une année, une alternance entre la période sèche estivale et la période humide hivernale.
Nous avons donc crée les conditions d'un vieillissement accélérée en imposant plusieurs cycles hydriques en laboratoire, sur des éprouvettes de sols limono-sableux classé B5 selon NF P11-300, provenant de la digue de La Ville-aux-Dames, compactés comme un remblai de faible perméabilité à 95% ρ_{dOPN}, et à l'état hydrique initial humide.
Nous avons ainsi pu observer l'évolution de la conductivité hydraulique (perméabilité) sur plusieurs lots d'échantillons compactés, mesurée en enceinte triaxiale, jusqu'à 12 cycles de séchage et d'humidification, et comparer ce résultat avec l'évolution de la microstructure d'un échantillon préparé dans des conditions identiques et observé en tomographie par Rayons X, jusqu'à 6 cycles.
Nous en avons conclu que l'effet des cycles hydriques sur matériaux non confinés conduit à modifier durablement la microstructure du sol B5 compacté. Ces modifications conduisent à dégrader la conductivité hydraulique d'une puissance de 10 selon le protocole que nous avons appliqué, la perméabilité ayant augmenté de 10^{-7} à 10^{-6} m/s à l'issu des 12 cycles.

Mots clés : Conception, réalisation et durabilité des ouvrages géotechniques ; perméabilité ; cycles hydriques ; microstructure ; tomographie Rayon X

DEFORMEE D'UN PIEU SOLLICITE LATERALEMENT POUR LE CAS D'UN BICOUCHE ET D'UNE PLASTIFICATION

DEFORMATION OF A PILE UNDER LATERAL LOADING FOR A TWO-LAYER MODEL AND A YIELDING MODEL

Olivier DAVID[1], Mathieu FEREGOTTO[2]
[1] *Fondouest, Granville, France*
[2] *Cerema Méditerranée, Aix-en-Provence, France*

Résumé

Le Cerema va publier un guide méthodologique consacré aux micropieux. Ce guide traitera de l'ensemble des sujets qui concernent l'exécution (forage, armature, …) et consacrera un chapitre à certaines problématiques de dimensionnement spécifiques aux micropieux. Ce chapitre a pour objectif d'apporter aux concepteurs des éléments méthodologiques et des recommandations sur ces sujets.

Nous présentons dans cet article les développements théoriques d'un de ces sujets, qui concerne les calculs de la déformée des pieux sollicités horizontalement en tête.

Les formules usuelles de calculs de la déformation d'un pieu soumis à un effort horizontal en tête ne s'appliquent qu'aux cas « simples », c'est-à-dire respectant en particulier les conditions suivantes :

- le module de réaction horizontal Kf est homogène sur toute la longueur du micropieu ;
- le palier plastique défini dans la loi de réaction « p-y » n'est jamais atteint.

Dans la pratique, ces formules ne sont donc pas applicables pour des cas courants, par exemple dès que l'on applique une minoration de la loi « p-y » à proximité de la surface, ou si l'on souhaite mener un calcul élastoplastique pour identifier l'étendue de la zone plastifiée.

Nous exposons ici les développements théoriques permettant d'établir des formules analytiques simples, qui permettent de traiter les cas cités plus haut sans avoir recours à des calculs numériques.

Ces résultats sont synthétisés dans des tableaux de type « matrice de souplesse » qui seront présentés dans le guide.

Mots clés : Conception, réalisation et durabilité des ouvrages géotechniques ; Pieux ; déformée horizontale ; sollicitation latérales ; matrice de rigidité.

INFLUENCE DES PHASES PROVISOIRES SUR LE DIMENSIONNEMENT D'UN MASSIF EN SOL RENFORCE : CAS DES CULEES DU VIADUC DU CHARMAIX.

TEMPORARY STAGES IMPACT FOR REINFORCED EARTH DESIGN: CHARMAIX VIADUCT

Lisa FRAYSSE[1], Ludovic SAHM[2], Benoit CHANTEPERDRIX[3]

1 *VSL, Guyancourt, France*
2 SAGE Ingénierie, Gières, France
3 VSL, Guyancourt, France

Résumé

L'autoroute d'accès au tunnel routier du Fréjus franchit le talweg du torrent du Charmaix par le biais d'un viaduc, en amont du hameau de Fourneaux à proximité de Modane. Cet ouvrage construit entre 1977 et 1978 sur un versant instable a subi des désordres importants qui imposent aujourd'hui sa reconstruction.
Le projet de reconstruction se situe à l'amont du viaduc actuel et conserve approximativement le même linéaire.
L'ouvrage est un pont à caissons métalliques disposant de 3 travées continues de 82,50m, 116,25m et 82,50m : soit une longueur de totale de 281,25m.
Il est constitué de 2 culées (C0, C3) et de 2 piles intermédiaires (P1, P2) toutes fondées sur semelle superficielle. L'assise de fondation de la pile P2, située en bordure d'une « falaise enterrée », a nécessité le creusement d'un puits afin d'assoir la pile dans le rocher sain à plus de 12 m de profondeur par le biais d'une semelle circulaire.
A l'arrière des culées, deux massifs en sol renforcé par armatures métalliques ont été mis à œuvre de manière à réduire l'emprise et le volume du remblai technique coté aval. La stabilité aux grands glissements des remblais renforcés « seuls » n'étant pas assuré, des clous sont ajoutés au niveau des plateformes d'assise des remblais : leur ancrage est réalisé au moyen d'une poutre en béton armé.
L'assemblage des caissons et le lançage de la charpente métallique s'effectuera en 5 phases depuis une plateforme de montage créée en tête du massif en remblai renforcé de la culée C3. La procédure de déchargement et de montage de la charpente depuis la plateforme prévoit notamment l'utilisation de 2 grues de 160 et 130 tonnes.
De par l'importance de ces chargements (stockage de la charpente, circulation et stationnement d'engins lourds,…), la phase provisoire permettant la mise en œuvre de l'ouvrage d'art devient dimensionnante dans la justification de la stabilité interne, externe et générale des massifs en sol renforcé.
Le présent article s'attachera à décrire l'impact des différents cas de charge pris en compte sur le dimensionnement du soutènement en remblai renforcé ainsi que l'étude de la diffusion des charges provisoires en tête du massif mais également à l'arrière de l'écran fictif.
Les points suivants seront particulièrement examinés :

- La majoration des efforts de traction dans les armatures de renforcement
- Impact dans la situation transitoire sur la stabilité externe du soutènement

Mots clés : Massif en remblai renforcé ; phase provisoire ; chargement ; diffusion

PROCESSUS D'ANALYSE ET DE CONCEPTION DES FONDATIONS PROFONDES D'UN ENTREPOT ENTIEREMENT AUTOMATISE DANS DES SOLS DIFFICILES

PROCESS OF ANALYSIS AND DESIGN OF DEEP FOUNDATIONS OF FULLY AUTOMATED WAREHOUSE IN DIFFICULT SOIL CONDITIONS,

Michal Marchwicki[1], Serge Lambert[2]
[1] *Keller Pologne*
[2] *Keller Fondations Spéciales*

Résumé

Les entrepôts automatisés de grande hauteur font partie des structures nécessitant une étude particulière très pointue du fait des critères stricts de tassement absolus et différentiels du dallage. Le projet présenté dans cet article se situe dans des conditions du sol très difficiles avec notamment de la tourbe (MO > 50%), des sols sablonneux alternant avec des sols organiques suivis de gyttia (un sol organique avec une teneur en M0 de 30% environ) présent jusqu'à une centaine de mètre de profondeur. L'ouvrage en question représente un cas extrême en termes de dimensionnement du fait du contexte géotechnique. L'article présente le processus d'élaboration d'une solution permettant un système de fondation sûr, l'analyse des pieux testés, les modèles de construction appliqués et résume le processus de mise en œuvre des fondations.

Mots clés : entrepôt ; automatisé ; tassement ; pieu

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 1B

Matériaux et géomatériaux : caractérisation et modélisation 1

DETERMINATION EXPERIMENTALE DU FACTEUR KSIGMA D'UN SABLE, POUR LES ETUDES DE LIQUEFACTION.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE KSIGMA CORRECTION FACTOR OF A SAND FOR LIQUEFACTION ANALYSES

Emmanuel JAVELAUD[1], Julien DUFOUR[1], Sandrine COMBA[1]
[1] *EDF DI-TEGG, Aix-en-Provence, France*

Résumé

Cet article présente l'évaluation du coefficient K_σ d'un sable à partir d'essais cycliques à l'appareil triaxial et la compare aux relations proposées dans la littérature.

Les essais cycliques de liquéfaction réalisés au laboratoire montrent que la résistance cyclique des sols augmente quasi-linéairement avec la pression de confinement (Harder and Boulanger, 1997 ; Montgomery *et al.*, 2014). C'est cette quasi-proportionnalité par rapport à la contrainte de confinement qui permet de normaliser la résistance à la liquéfaction des sols par la contrainte verticale effective σ'_v et de présenter, sous la forme d'un diagramme unique indépendant de la profondeur, le rapport de résistance cyclique $CRR_{M=7,5}$ en fonction des résistances du sol normalisées $(N_1)_{60\text{-}cs}$ ou $q_{c1N\text{-}cs}$ par exemple.

L'écart par rapport à une évolution parfaitement proportionnelle de la résistance cyclique des sols en fonction de la pression de confinement traduit toutefois un comportement non-linéaire du sol. Ce dernier est pris en compte lors de la mise en œuvre de la méthode simplifiée de Seed pour les études de liquéfaction via le coefficient K_σ.

Une campagne d'essai de laboratoire à l'appareil triaxial cyclique piloté en contrainte a été réalisée pour définir le coefficient K_σ d'un sable. Les essais réalisés montrent un conservatisme des relations usuelles donnant le coefficient K_σ lorsque la pression de confinement est de 50 kPa, et une bonne correspondance avec la relation d'Idriss et Boulanger (2008) lorsque la pression de confinement est de 200 kPa.

Mots clés : Dynamique des sols ; Liquéfaction ; Sable ; Méthode simplifiée ; K_{sigma} ; Essai à l'appareil triaxial cyclique.

INTERPRETATION ELASTIQUE DE L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE DANS LES ARGILES EN CONDITION NON DRAINE ET NON SATURE

ELASTIC INTERPRETATION OF PRESSUREMETER TEST INTO CLAY WITH UNSATURATED UNDRAINED CONDITIONS

Jacques Monnet[1], Luc Boutonnier[2], Dino Mahmutovic[2]
[1] *Gaiatech, Seyssinet, France*
[2] *EGIS, Seyssins, France*

Résumé
Dans le domaine du génie civil, le pressiomètre est largement utilisé pour la conception de structures telles que les fondations superficielles (Annexe D - AFNOR, 2013) ou le tassement de fondations (annexe H - AFNOR, 2013). Ces méthodes utilisent les caractéristiques géotechniques du sol déduits de l'essai pressiométrique, la pression limite Ménard p_{LM} et le module pressiométrique E_M. On sait maintenant que ces quantités ne sont pas des caractéristiques intrinsèques du sol et ne peuvent pas être introduites en tant que données dans un calcul par éléments finis ou différences finies pour l'étude des travaux de génie civil (murs de soutènement, tunnels, stabilité des talus, digues, ...). Ces calculs modernes nécessitent au moins la connaissance des caractéristiques élastiques du sol (module de Young E, coefficient de Poisson ν) et de la résistance au cisaillement (cohésion c, angle de frottement Φ).

Cette étude suppose des conditions Non Drainées qui sont fréquemment rencontrées dans la pratique, mais interprétées jusqu'à présent en contrainte totale (Carter et al., 1986 ; Monnet and Chemaa, 1994 ; Cao et al., 2001). L'hypothèse de l'essai en contrainte totale ne permet pas d'atteindre les caractéristiques mécaniques fondamentales du sol, car l'effet de la succion ou de la surpression interstitielle est intégré à la résistance mécanique du sol pour représenter l'essai comme réalisé dans un corps élastique équivalent.

Nous proposons dans cet article de prendre en compte la pression interstitielle et les contraintes effectives pour un sol Non Saturé et Non Drainé. En effet, l'air occlus est principalement présent dans les sols naturels (Boutonnier, 2007 ; Boutonnier et al., 2019) et sa compressibilité entraîne un transfert partiel des contraintes isotropes totales sur le squelette solide lors d'un essai non drainé, ce qui modifie considérablement la réponse du sol. Dans l'interprétation du pressiomètre, ces phénomènes restent à prendre en compte. Cet article présente les développements théoriques et la validation des modèles numériques dans le cas de l'élasticité linéaire. C'est une première étape pour interpréter l'essai au pressiomètre différemment et plus précisément.

Mots clés : pressiomètre ; analyse ; élasticité ; non drainé ; non saturé

MODELISATION THEORIQUE DE LA COURBE DE RETENTION - APPLICATION AU LIMON DE LIVET-GAVET

THEORETICAL MODELING OF RETENTION CURVE - APPLICATION TO LIVET-GAVET LOAM

Jacques Monnet[1], Luc Boutonnier[2], Dino Mahmutovic[2], Saïd Taïbi[3], Denis Branque[4]
[1] *Gaiatech , Seyssinet, France*
[2] *Egis Géotechnique, Seyssins, France*
[3] *LOMC, Le Havre, France*
[4] *ENTPE, Vaulx-en-Velin, France*

Résumé
Les grands ouvrages en terre tels que digues, barrages, terrassements sont compactées à l'optimum Proctor avec un degré de saturation compris entre 80 et 98%, de sorte que le sol n'est pas saturé. Lorsque la construction en terre est terminée, les aléas de séchage et de mouillage associés aux conditions pluvieuses et ensoleillées se produisent. Comme il est souvent demandé au Maitre d'œuvre de garantir un taux de déformation limité, ces événements nécessitent la mise au point d'un modèle capable de simuler les chemins de séchage et de mouillage afin d'anticiper les variations de succion du sol et les déformations associées.

Dans ces modélisations, la courbe de rétention reliant le degré de saturation et la succion joue un rôle clé. Il existe plusieurs façons de la modéliser. La première méthode consiste à utiliser des relations expérimentales. Il a été initié avec succès par le modèle de Brooks and Corey (1966) qui nécessite la détermination de la succion d'entrée d'air s_{air} et d'un paramètre expérimental δ. Plus tard, Genuchten, (1980) a utilisé une nouvelle relation expérimentale capable de simuler plus de courbes de rétention avec 3 paramètres expérimentaux (α, n, m). Gallipoli et al. (2003) ont suivi le même schéma de recherche et proposé une relation expérimentale plus complète avec 4 paramètres expérimentaux (Φ, Ψ, ν, δ). La deuxième méthode consiste à utiliser une modélisation physique. Avec cette approche, la forme de la courbe de rétention n'est pas choisie à l'avance, mais est une conséquence des hypothèses physiques. Une première option consiste à considérer le sol comme un milieu poreux (Or and Tuller, 1999 ; Kutilek et al. (2007). La deuxième option consiste à considérer le sol comme une structure constituée de particules sphériques. La présente étude traite d'un modèle théorique basé sur l'arrangement de particules sphériques élastiques. Cette approche suit une nouvelle ligne de recherche afin que le phénomène physique de rétention puisse être expliqué et calculé avec un nombre limité de paramètres expérimentaux ayant une signification physique. Une application du modèle au limon de Livet-Gavet compacté à l'optimum Proctor est présentée.

Mots clés : Modélisation ; sol ; non saturé ; rétention

DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE D'ESSAI D'EMIETTAGE AMELIORE PAR TRAITEMENT D'IMAGES.

DEVELOPMENT OF AN ENHANCED CRUMB TEST BASED ON COMPUTER VISION.

Ludovic DORE[1], Yasmina BOUSSAFIR[2], Christophe CHEVALIER[3]
[1] Cerema, Blois, France
[2, 3] Université Gustave Eiffel, Ifsttar, Laboratoire Sols Roches et Ouvrages géotechniques, 77447 Marne la Vallée, France

Résumé

La désagrégation est un type d'érosion qui se produit lorsqu'un sol est immergé dans l'eau. Elle se traduit par le détachement de particules de sol sous l'effet de l'infiltration de l'eau. La sensibilité à la désagrégation est un paramètre important dans l'évaluation de la fiabilité des digues en terre. L'essai d'émiettage (ou Crumb Test) est un moyen pour déterminer cette sensibilité : il consiste à placer un échantillon compact de sol dans un volume d'eau et à observer sa dispersion à intervalles donnés. Il s'agit d'un essai simple et rapide, mais ses résultats sont qualitatifs et très dépendants de l'opérateur. Cet article présente une version améliorée de l'essai d'émiettage, développée dans le cadre de l'opération de recherche Ifsttar-Cerema EGIDE (Enhanced Geotechnical Investigation and DEsign for sustainable development) et basée sur l'utilisation de méthodes de traitement d'image. Dans cette version, l'échantillon de sol utilisé est cylindrique (5 cm de hauteur et de diamètre) et est fabriqué par compactage dynamique. Il est ensuite placé en immersion dans un aquarium dont le fond est éclairé, puis des photos sont prises à intervalles réguliers pendant une heure. A la fin de l'essai, la phase de traitement d'image débute. Elle consiste à déterminer, sur chaque image, le contour de l'échantilllon. Le contour est extrait grâce à la différence de luminosité entre le fond de l'aquarium et l'échantillon de sol. Il est ensuite possible d'obtenir la hauteur et le diamètre au sommet de l'échantillon et d'en suivre l'évolution. La prise de vue, le traitement d'image et la calibration sont pilotés par un nano-ordinateur grâce à une interface graphique. Le prix peu élevé de ces appareils et l'utilisation de logiciels libres rend la réalisation de l'essai d'émiettage amélioré peu coûteuse et relativement facile à mettre en œuvre. La méthode d'essai a été testée pour quatre matériaux différents : une marne caillouteuse A2-B6, un sable limoneux B5, un limon A2 et une argile A4. Chaque matériau a été testé à trois teneurs en eau différentes. Les premiers résultats montrent que la résistance à la désagrégation d'un sol peut varier fortement selon sa teneur en eau : ainsi des échantillons d'un même sol argileux se sont effondrés au bout de quelques minutes d'immersion à une teneur en eau de 7,9% mais n'ont montré aucune variation de leurs dimensions pendant une heure à une teneur en eau de 20,4%. Le suivi des dimensions des échantillons met également en évidence une phase de gonflement avant la phase d'effondrement pour les matériaux de faible teneur en eau.

Mots clés : Matériaux et géomatériaux, essai d'émiettage, résistance à l'érosion, traitement d'image, digue

SURFACE ÉLEMENTAIRE REPRESENTATIVE STATISTIQUE DES ROCHES ARGILEUSES

STATISTICAL REPRESENTATIVE ELEMENTARY AREA OF CLAY ROCKS

Philippe COSENZA[1], Dimitri PRET[1], Anne-Laure FAUCHILLE[2], Stephen HEDAN[1], Albert GIRAUD[3]
[1] Université de Poitiers, UMR CNRS 7285 IC2MP- HydrASA, ENSI Poitiers, France.
[2] Ecole Centrale de Nantes, UMR CNRS 6183 Institut de Recherche en Génie Civil (GEM), Nantes, France.
[3] Université de Lorraine (ENSG), CNRS, CREGU, GeoRessources, Vandoeuvre-les-Nancy, France.

Résumé
La présente communication apporte de nouvelles estimations de tailles de Surface Elémentaires Représentatives (SER) obtenues sur une roche argileuse activement étudiée dans le cadre du stockage géologique de déchets radioactifs: l'argilite du Toarcien de la station expérimentale de Tournemire. Les tailles de SER, nommées L_{SER}, ont été calculées à partir d'une carte de minéraux suivant la méthode classique de la «méthode des boites » (box counting) et d'une approche statistique qui introduit le concept d'une SER «statistique». Suivant cette dernière approche, une SER «statistique» est liée non seulement à la microstructure et aux propriétés de chacun des constituants de la roche, mais surtout à une précision donnée dans l'estimation de la propriété effective (ou ici, propriété moyenne à l'échelle de l'ingénieur). Cette précision utilisée pour la détermination de la propriété effective est elle-même fonction du nombre de réalisations que l'on est prêt générer pour calculer la propriété effective en question. Le concept probabiliste de réalisation est ici, d'un point de vue pratique, un sous-domaine d'une carte de minéraux dans lequel les propriétés morphologiques ou mécaniques apparentes doivent être calculées. Dans cette étude, les modules élastiques apparents d'un sous-domaine d'une carte de minéraux ont été estimés à l'aide de modèles micromécaniques basés sur une approche différentielle.
Nos calculs ont montré les résultats suivants: (i) Les valeurs de L_{SER} morphologique (considérant la fraction surfacique d'argile) obtenues par la méthode des boites et par une approche statistique sont dispersées mais du même ordre de grandeur, i.e., de quelques centaines de microns. (ii) Les valeurs de L_{SER} mécanique associées au module de compressibilité et au module de cisaillement sont significativement supérieures à celles du L_{SER} morphologique Le concept de L_{SER} dépend donc de la propriété physique considéré ; (iii) Les estimations L_{SER} du module de compressibilité et celles du module de cisaillement sont semblables. La nature du module élastique semble avoir peu d'influence dans notre cas, sur la détermination du L_{SER} mécanique (élastique).

Mots clés : Matériaux et géomatériaux : caractérisation et modélisation ; Argilite ; Surface Elémentaire Représentative ; Homogénéisation.

VERS UN NOUVEAU MATERIAU COx/MX80 EN PELLETS : ETUDE DU MELANGE ET OPTIMISATION DU FUSEAU GRANULAIRE

TOWARDS A NEW COx/MX80 MATERIAL IN PELLETS: STUDY OF THE MIXTURE AND OPTIMIZATION OF GRANULAR MIXTURE

Danai TYRI[1,2,3], Irini DJERAN-MAIGRE[2], Jean-Claude ROBINET[3], François NADER[2] et Jad ZGHONDI[1],
[1] *Andra, Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory, 52290 Bure, France*
[2] *Univ Lyon, INSA Lyon, GEOMAS, F-69621 Villeurbanne, France*
[3] *Euro-Géomat Consulting, 45100 Orléans, France*

Résumé
Dans le cadre du projet Cigéo (Centre industriel de stockage géologique), l'Andra étudie différents matériaux à base d'argilites excavées remaniées répondant au mieux aux spécifications fixées pour le remblai courant des galeries : en particulier une capacité de gonflement capable de reprendre les vides technologiques de remplissage et de limiter en plus la propagation de la zone fracturée autour des ouvrages. Les matériaux étudiés sont à base d'un mélange argilite (COx)/bentonite (MX80), leur optimisation tient compte du comportement à court et à long terme, ainsi que la compatibilité avec une mise en œuvre industrielle. La présente étude porte sur la faisabilité de la mise en place du matériau en pellets (particules compactées à environ 2 Mg/m^3 en forme quasi sphérique), qui sera placé dans des conditions presque sèches et se comportera comme un milieu granulaire, présentant un état aussi dense que possible. L'eau provenant de la roche environnante en pénétrant dans la galerie, provoquera le gonflement du remblai.
En premier lieu, une étude a été réalisée pour définir un fuseau granulaire minimisant les vides initiaux et réalisable technologiquement. Des modélisations granulaires à l'échelle du pellet, simulant le dépôt d'un échantillon de sphères de granulométrie prédéfinie (mode, tailles et pourcentages des sphères) et sous différentes conditions (hauteur de chute, caractéristiques mécaniques des pellets) ont été menées. La méthode des éléments discrets (DEM) a été choisie,-considérant des particules rigides avec une loi de contact unilatéral non régulière qui ne permet pas l'interpénétration entre corps. La loi de frottement sec de Coulomb sans cohésion est appliquée. Il s'agit d'une loi à seuil. Des échantillons trimodaux de granulométries différentes sont générés et déposés par gravité dans une cellule, et la densité résultante est calculée. L'effet du frottement entre particules est aussi étudié. En parallèle, des travaux expérimentaux menés sur des mélanges COx/MX80 en poudre mettent en évidence l'effet de la MX80 au sein de l'élément pellet. Pour des raisons technico-économiques le plus faible pourcentage de la MX80 permettant de retrouver le comportement cible, est retenu. Afin de déterminer le comportement du remblai, la compressibilité et la capacité de gonflement des mélanges pour des densités équivalentes à celles attendues lors de la mise en place ont été étudiées.

Mots clés : Massifs rocheux fracturés, géothermie, stockage de déchets en surface et souterrain; mélange argilite/bentonite; pellets; granulométrie optimale; gonflement

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 1C

Ouvrages souterrains 1

VALORISATION D'UN MATERIAU COMPOSITE (SCHISTE ET LAITIER CRISTALLISE) DANS LA CONSTRUCTION ROUTIERE

VALORIZATION OF A COMPOSITE OF (SHALE AND BLAST FURNACE SLAG) IN ROAD CONSTRUCTION

Omar BOUDLAL[1], Yahia MESSANI[2], Ahmed BENAMAR[3]
[1] Laboratoire de recherche en Géomatériaux, Environnement et Aménagement (L.G.E.A), Département de Génie Civil, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO), Tizi-Ouzou, Algérie. Email : boudlal_geniecivil@yahoo.fr
[2] Département de Génie Civil, Faculté du génie de la construction, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO), Tizi-Ouzou, Algérie
[3] Laboratoire Ondes et Milieux Complexe (LOMC), Université du Havre, France

Résumé
Le développement de l'industrie génère des quantités de plus en plus importantes de produits et de co-produits considérés comme déchets. Ils sont souvent jetés dans la nature ou abandonnés dans des décharges inappropriées, notamment dans les pays en voie de développement tel que l'Algérie. Par contre ces dernières années, en face de situations économiques et environnementales alarmantes, beaucoup de matériaux locaux naturels et industriels font l'objet de valorisation et de recyclage. Cela permet de se débarrasser des quantités importantes de déchets néfastes pour l'environnement, libérer les espaces occupés par ces matériaux pour d'autres utilisations, compenser le manque en granulats dont souffrent certaines régions…
Le présent travail s'inscrit dans ce contexte, il a comme objectif, la mise en œuvre d'un matériau composé de laitier du haut fourneau (laitier cristallisé) et du schiste, pour une utilisation en couches inférieures de chaussées.
Les deux matériaux (laitier et schiste) sont d'abord soumis aux essais d'identification, ensuite, concassés et tamisés pour reconstituer des échantillons à différentes proportions de laitier (30, 50 et 70%). Ces derniers sont ensuite soumis au laboratoire aux essais mécaniques et routiers (compactage, CBR, cisaillement, usure, dégradabilité et fragmentabilité) reproduisant les sollicitations mécaniques et climatiques subites ultérieurement lors de leur mise en service. Les résultats obtenus permettent de conclure que les mélanges étudiés développent des densités sèches très satisfaisantes. L'ajout du laitier cristallisé améliore sensiblement leur portance ainsi que leur résistance au cisaillement. Les résistances aux chocs des mélanges sont faibles à moyennes, par contre, leurs résistances à l'usure s'améliorent avec la teneur en laitier. Ce dernier est peu dégradable et peu fragmentable sous sollicitations hydriques et mécaniques.
Les mélanges étudiés présentent ainsi des comportements très intéressants, notamment pour des teneurs en laitier supérieures à 50 %. De tels résultats permettent d'incorporer initialement ces matériaux en couches de forme et de fondations sur des tronçons de chaussées de faible à moyen trafic. Il convient alors d'engager des actions concertées des acteurs économiques et des chercheurs pour concrétiser la valorisation des matériaux de recyclage dans les différents domaines de construction.

Mots clés : Matériaux et géomatériaux, Matériaux locaux, comportement, chaussées, valorisation, environnement

ANALYSE DU COMPORTEMENT DU SOL REEL TRAITE, EXCAVE PAR TUNNELIER A PRESSION DE TERRE

ANALYSIS OF REAL CONDITIONED SOIL BEHAVIOR EXCAVATED BY EARTH PRESSURE BALANCE MACHINE

Nour EL SOUWAISSI[1,2], Irini DJERAN-MAIGRE[1], Laurence BOULANGE[2], Jean-Luc TROTTIN[2]

[1] *Univ Lyon, INSA Lyon, GEOMAS, F-69621 Villeurbanne, France,*
[2] *Eiffage Génie Civil* Travaux Souterrains, 78140 Vélizy-Villacoubay, France,

Résumé

Dans le cadre du projet de Grand Paris Express, Eiffage Génie Civil Travaux Souterrains a utilisé le tunnelier à pression de terre EPBM pour creuser le tunnel destiné à l'extension de la ligne 14 du métro parisien. L'avantage de ce type de machine réside en sa capacité d'équilibrer les contraintes provenant du front de taille et celles de soutènement, via le confinement du sol excavé dans la chambre d'excavation, à condition que le sol ait une texture appropriée. Cette technique, à l'origine, était prévue pour des terrains meubles fins. Afin d'augmenter les performances du tunnelier EPBM et de réduire l'usure des outils, des additifs sont ajoutés dans le sol dans plusieurs parties du tunnelier. Ces matériaux peuvent être de l'eau, des tensioactifs (agents moussants), des polymères ou des fines selon le type de sol à traiter. Les additifs utilisés en quantité optimale, modifient les propriétés hydromécaniques et rhéologiques du sol, lui conférant une texture compressible ayant des faibles cohésion et perméabilité.

Le travail effectué à l'INSA de Lyon en collaboration avec Eiffage Génie Civil Travaux Souterrains permet de coupler les informations provenant du chantier aux études du laboratoire. Le sol de référence est le sol réel du chantier enrichi. En premier lieu, le sol réel est classifié par GTR. En second lieu, les protocoles de la génération de la mousse seule et du mélange sol/mousse sont décrits. Afin d'étudier la qualité de la mousse, les paramètres de dégradation sont étudiés en observant l'évolution du volume de la mousse en fonction du temps et en mesurant sa demi-vie. Cette évolution suit la loi Weibull. De plus, ce travail présente l'effet de la mousse sur le comportement mécanique du sol réel, à court terme, et l'analyse de l'évolution des paramètres mécaniques du sol traité, en fonction de la dégradation de la mousse, à plus long terme. Des essais géotechniques standards comme les essais œdométriques et de cisaillement sont utilisés pour déterminer l'évolution du comportement mécanique du sol traité. Les résultats montrent l'impact direct de la mousse, le jour de son mélange avec le sol et l'effet sur les paramètres mécaniques du sol de référence au fur et à mesure de sa dégradation, surtout en termes d'indice des vides et de cohésion.

Mots clés : Ouvrages souterrains, tunnelier à pression de terre EPBM, sols excavés, tensioactifs, essais en laboratoire

LEVES GEOLOGIQUES PAR PHOTOGRAMMETRIE : APPLICATION PAR LE GEOTECHNICIEN AU SUIVI D'EXECUTION DE TUNNELS

PHOTOGRAMMETRY FOR GEOLOGICAL SURVEY : APPLICATION BY THE GEOTECHNICIAN TO SITE SUPERVISION OF UNDERGROUND STRUCTURE

Alexis SERIEYS[1], Nour-Eddine EL-KHOTRI[1], Jean-François BRUCHON[1]

[1] TERRASOL, Paris et Lyon, France

RÉSUMÉ

Cet article présente un exemple d'application de la photogrammétrie aux relevés de fracturation dans le cadre de travaux souterrains. La méthodologie proposée, basée sur des moyens simples et économiques, rendent la technique utilisable directement par le géologue/géotechnicien en charge du suivi d'exécution tout en permettant l'acquisition de modèles 3D suffisamment précis pour l'obtention de mesures structurales exploitables.

Mots clés : Levés géologiques ; photogrammétrie ; fracturation ; massif rocheux ; tunnel ; suivi des travaux souterrains

PUITS D'ESSAIS A AULNAY SOUS BOIS – METRO L16 : ETANCHEMENT DES SOLS POUR LE CREUSEMENT DE GALERIE

TEST SHAFT AT AULNAY SOUS BOIS – METRO L16 : SOIL « WATER SEALING » METHOD FOR TUNNEL EXCAVATION

Pierre-Louis REGAZZONI [1], Alexandre GIROUX [2], Jonathan ROT [3], Basile LECONTE [4], Laurent SOYEZ [5]

[1] Egis Structures et Environnement, Seyssins, France
[2] Egis Structures et Environnement, Saint Quentin, France
[3] GEOTEC, Saint Quentin en Yvelines, France
[4] Solétanche Bachy, Rueil Malmaison, France
[5] Société du Grand Paris, Saint-Denis, France

Résumé

Dans le cadre du projet du Grand Paris Express ligne 16 tronçon Saint-Denis à Noisy Champs, des ouvrages souterrains sont à excaver sous nappe en méthode dite « traditionnelle ».

Pour cela, la technique d' « étanchéification » de la formation des Sables de Beauchamp pour le creusement de ces galeries entre les ouvrages dits annexes et le tunnel du métro (rameaux) doit être choisie. Dans cette formation géologique, la technique d'injection par imprégnation s'avère peu efficace. Afin de répondre à cette interrogation un ouvrage de reconnaissance géotechnique exceptionnel est construit en 2016-2017 sur la commune d'Aulnay-sous-Bois. Les objectifs de ce puits d'essai sont de tester, de comparer la faisabilité ainsi que l'efficacité de deux techniques d' « étanchéification » (jet-grouting et congélation) en conditions réelles. Cette communication présente succinctement les résultats le retour d'expérience de ce puits d'essais.

Une première partie présente l'ouvrage, les différentes investigations menées, et les systèmes de mesure mis en place pour le suivi du comportement des ouvrages. Une seconde partie présente succinctement les résultats des essais de laboratoire. Une présentation de la rétro-analyse des données de suivi du comportement complète cette partie. Cette rétro-analyse a été menée par une modélisation aux éléments finis des galeries. Les paramètres des lois de comportement ont été choisis d'après les données factuelles issues des essais suite à interprétation et analyse. Pour finir, nous présentons le retour d'expérience d'un point de vue méthode et chantier des deux techniques d' « étanchéification ».

Mots clés : Ouvrages souterrains ; congélation ; jet-grouting ; galeries ; Sables de Beauchamp

PRISE EN COMPTE DES EFFETS DIFFERES DES ROCHES ARGILEUSES SUR LA CONCEPTION DE TUNNELS PROFONDS

ACCOUNTING FOR LONG TERM EFFECTS OF CLAYSTONES FOR THE DESIGN OF DEEP TUNNELS

Victor Augusto RIBEIRO LIMA[1], Jean-François BRUCHON[1], Sébastien BURLON[1]
[1] *Setec Terrasol, Paris, France*

Résumé

Cette étude s'intéresse à la modélisation du comportement différé des galeries profondes excavées dans des roches argileuses présentant un comportement différé telles que l'argilite du COX. Un enjeu de cette modélisation est la prédiction fiable de l'évolution des efforts qui sollicitent le soutènement des galeries. Parmi les différents modèles de fluage identifiés dans la littérature, les modèles visco-élasto-plastiques à potentiel gouvernés par la théorie de Perzyna sont habituellement utilisés tels que la loi de Lemaitre ou la loi de Norton. La loi de Norton, plus simple d'emploi, est généralement utilisée pour réaliser des calculs paramétriques de dimensionnement des soutènements des galeries. Les limitations de cette loi conduisent au développement d'une nouvelle loi de fluage. Trois galeries sont modélisées avec FLAC 3D et l'évolution des convergences, des contraintes-déformations dans le terrain et des efforts dans le soutènement sont présentées dans cette étude pour les deux lois de fluage.

Mots clés : ouvrages souterrains, argilite, fluage, Norton, revêtement

ANALYSE ET INTERPRÉTATION DE L'ESSAI IN-SITU DE COMPRESSION MECANIQUE DE L'EDZ

ANALYSIS AND INTERPRETATION OF THE EDZ IN-SITU MECHANICAL COMPRESSION TEST

Hippolyte DJIZANNE[1]*, Rémi DE LA VAISSIERE[2], Gilles ARMAND[3]
[1] Andra R&D, Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne, Bure, France
[2] Andra R&D, Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne, Bure, France
[3] Andra R&D, Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne, Bure, France

Résumé

Dans une galerie du Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne, la compression exercée par un scellement de bentonite sur une partie de la zone fracturée en paroi de galerie est reproduite à l'aide d'un vérin hydraulique. La surface comprimée est de forme circulaire avec une superficie de 1 m² (soit 0,56 m de rayon). L'expérimentation CDZ « Compression Mécanique de l'EDZ » installée en 2010 permet ainsi de simuler d'une part l'effet du gonflement d'un noyau de bentonite dans une galerie c'est-à-dire la cicatrisation de l'endommagement et l'évolution de la perméabilité et d'autre part l'effet de retrait du revêtement des galeries. Les premiers résultats de cette expérimentation ont déjà fait l'objet de plusieurs publications (de la Vaissière et al. 2014, 2015). Cet article a un objectif double qui est d'une part, de présenter les résultats de l'analyse mécanique des campagnes de l'essai de compression court réalisé en 2017 et d'autre part, de comparer ces résultats avec ceux de l'essai de compression court réalisé au même endroit avec le même vérin, en 2011. Durant ces 5 années, la zone endommagée a été hydratée et un cycle de chargement intermédiaire de longue durée a été réalisé, puis le vérin a été déchargé en 2016. L'effet d'un confinement mécanique sur la zone endommagée et celui d'un déconfinement soudain et progressif de la paroi d'une galerie sont analysés. L'interprétation de cet essai au vérin est faite à partir de la formule de Boussinesq c'est-à-dire avec l'hypothèse d'une plaque circulaire rigide appliquant une force à un milieu semi-infini homogène isotrope élastique. Les modules de déformation du massif rocheux sont estimés à partir des déplacements du vérin. Les modules de déformation « globaux » et « locaux » de déformation calculés après l'essai de 2017 sont comparés à ceux obtenus en 2011. Lors du chargement du vérin, on montre que la fermeture des fissures préexistantes contribue à augmenter les modules de la zone fracturée, tandis que lors du cycle de décharge/charge, incluant la relaxation du vérin et les effets de l'hydratation, l'amplitude de ces modules diminue. Les calculs d'incertitudes montrent qu'il n'y a pas d'évolution significative des modules entre 2011 et 2017 ; les variations observées restant dans les plages d'incertitudes calculées.

Mots clés : EDZ, Callovo-Oxfordien, Essai in-situ, Compression, Incertitudes.

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 2A

Gestion des risques : aléas naturels, prévention et dispositif

RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES DISPOSITIFS D'ALERTE APPLIQUES AUX INSTABILITES DE PENTE

FEEDBACK ON EARLY WARNING SYSTEMS APPLIED TO SLOPE INSTABILITIES

Stella COCCIA[1], Emmanuelle KLEIN[1]
[1]*Ineris, Nancy, France*

Résumé

Le changement climatique et l'urbanisation croissante de territoires à risque s'accompagnent d'une vulnérabilité toujours plus forte de nos sociétés aux risques naturels, y compris aux mouvements de pente induits par des événements pluvieux soutenus, en durée ou en intensité. Dans certains contextes, une solution pour gérer le risque de mouvement de terrain repose sur la mise en œuvre d'un dispositif d'alerte. Cette approche regroupe un ensemble d'outils et de processus intégrés qui inclut la sensibilisation et la préparation des populations à l'action. Son but est d'émettre des alertes au moment opportun, pour permettre d'agir rapidement et garantir la sécurité publique.
Ces dispositifs sont généralement déployés selon des conditions et des moyens ciblés, adaptés au site, au phénomène redouté ainsi qu'aux enjeux et aux populations exposées. Ils peuvent être mis en œuvre à l'échelle locale ou territoriale, le territoire pouvant couvrir une ville, une région ou même un pays. A l'échelle locale, ils reposent principalement sur l'acquisition et l'expertise de données obtenues en quasi temps réel permettant d'appréhender l'évolution de l'aléa. A l'échelle territoriale, les dispositifs d'alerte peuvent couvrir plusieurs typologies d'instabilités à la fois et reposent donc principalement sur la surveillance des facteurs déclenchants que sont les conditions météorologiques couplées à des modèles probabilistes d'instabilité.
Depuis la fin des années 1970, période à laquelle les premiers dispositifs ont été déployés, les contours de ces dispositifs ont évolué. Un focus sur quatre dispositifs emblématiques, celui des Ruines de Séchilienne en France, d'Ancône en Italie, de Norvège et de Hong-Kong en Chine, permet d'illustrer les conditions et cadres dans lesquels ces différents dispositifs sont opérés.
A partir du retour d'expérience de ces dispositifs emblématiques on constate que la synergie entre différents dispositifs d'alertes déployés sur un même territoire ou frontaliers, couvrant éventuellement d'autres aléas géologiques ou hydro-climatiques, est souvent peu ou prou prise en compte. La répartition des responsabilités entre les différentes parties prenantes reste, pour diverses raisons (administratives, fonctionnelles, budgétaires, etc.) bien souvent peu claire et donc mal comprise des populations menacées, ce qui a un effet direct sur l'efficacité des dispositifs.
La culture du Rex est également encore trop peu développée. De ce fait, il n'existe pas encore de standards ou de bases méthodologiques faisant référence pour déployer et gérer un dispositif d'alerte, ni mesurer son efficacité. Ainsi, une marche de progrès consisterait donc à mettre en place un dispositif de capitalisation de données et des informations ainsi que de partage d'expérience sur les projets d'observation et de surveillance des risques naturels de mouvements de terrain menés au fil du temps à travers les territoires, au bénéfice des communautés des chercheurs, des experts et spécialistes, ainsi que des parties prenantes que sont les prescripteurs, les collectivités, les aménageurs et autres gestionnaires de surveillance opérationnelle.

Mots clés : gestion des risques, dispositifs d'alerte, instabilités de pente, prévention, changement climatique

UN PLAN DE GESTION COMME SOLUTION POUR L'AMENAGEMENT DES TERRITOIRES A FORTS RISQUES NATURELS

A MANAGEMENT PLAN AS SOLUTION FOR EQUIPMENT AND DEVELOPMENT OF HIGH NATURAL HAZARDS TERRITORIES.

SERRE Jean-Baptiste[1], GINGEMBRE Olivier[2], BENYAKHOU David 3[3], GEORGES Emmanuel[4]
[1] GEOLITHE, Crolles, France
[2] RISQUE & TERRITOIRE, Saint-Bauzile, France
[3] Communauté de communes Gorges Causses Cévennes, Florac, France
[4] DDT de la Lozère, Mende, France

Résumé

En Lozère, 13 communes des gorges du Tarn et de la Jonte sont classées au patrimoine mondial de l'Unesco et une partie du territoire appartient au Parc Naturel National des Cévennes. Les enjeux, en particulier, touristiques, associés à cet espace sont donc essentiels.

L'élaboration du Plan de Prévention des Risques Naturels (PPR) chute de blocs des gorges du Tarn et de la Jonte a été longue et difficile car elle a suscité de nombreuses oppositions : des phases de concertation et d'études poussées se sont succédées. Une grande part de ce territoire est classée en zone rouge dans les Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR) inondation d'une part, et chute de blocs d'autre part.

Des études détaillées concernant les chutes de blocs ont permis d'identifier 70 sites justifiant de mesures de protection. Les capacités financières des communes se sont avérées trop limitées pour pouvoir leur imposer la réalisation de ces travaux. Le préfet de Lozère a décidé d'opter pour un PPR chute de blocs qui n'imposerait pas de travaux aux collectivités mais demanderait en contrepartie la mise en place d'une stratégie locale de prévention assortie d'un programme d'actions.

Pour les accompagner dans l'élaboration de cette stratégie, les communes ont fait appel à un groupement de deux bureaux d'études : *Géolithe*, pour les aspects techniques concernant les risques naturels, et *Risque et Territoire*, bureau d'études spécialisé dans l'élaboration de documents stratégiques concernant les risques naturels.

L'objectif de ce plan de gestion est donc de proposer des solutions techniques d'aménagements adaptées aux besoins des communes, en adéquation avec leurs budgets, en prenant en compte les risques naturels identifiés affectant leur territoire.

Mots clés : gestion des risques gravitaires, aléas naturels, prévention et dispositif

EVALUATION DE L'ALEA EBOULEMENT : ETAT DE L'ART

ROCKFALL HAZARD ASSESSMENT: STATE OF THE ART

Didier HANTZ[1], Bastien COLAS[2], Jean-Pierre ROSSETTI[3]
[1] *ISTerre, Université Grenoble Alpes*
[2] *BRGM, Montpellier*
[3] *Alp'Géorisques, Domène*

Résumé

En 2008, le JTC1 (issu des sociétés internationales de mécanique des sols, mécanique des roches et géologie de l'ingénieur) publiait des recommandations pour le zonage de la susceptibilité, de l'aléa et du risque liés aux mouvements de pentes en général, dans le contexte de l'aménagement du territoire. Ces recommandations soulignaient le besoin croissant de quantifier le risque. Depuis, de nombreuses approches quantitatives ont été proposées dans la littérature scientifique. Un état de l'art semblait donc nécessaire, notamment dans le domaine des éboulements rocheux, pour lequel il existe peu de recommandations spécifiques.

Pour l'aléa éboulement, on distingue deux types d'études : les études d'aléas diffus et les études d'aléas localisés. Dans le cas d'un aléa diffus, on cherche à estimer la fréquence (temporelle) de chutes dans une zone de départ homogène, en fonction du volume, puis la fréquence d'atteinte en tout point de la zone d'intérêt. Elle s'exprime en nombre d'éléments par année et par mètre, ou en nombre d'éléments par année pour une taille d'enjeu donnée. La fréquence de départ peut être estimée à partir d'un inventaire des éboulements, d'un relevé des blocs déposés, des traces d'impact sur les arbres, des cicatrices dans la falaise, ou par analogie avec des falaises similaires. La propagation peut être modélisée par simulation des trajectoires ou par la méthode de l'angle d'énergie. Lorsque l'incertitude est trop grande, on se contente de donner un "niveau d'aléa" (fort, moyen ou faible), qui correspond à une plage de fréquence.

Dans le cas d'un aléa localisé, on cherche la probabilité que le compartiment identifié comme potentiellement instable, se détache (probabilité de départ ou de rupture) dans une période donnée fixée par le maître d'ouvrage (période de référence). Dans l'état actuel des connaissances, cette probabilité ne peut pas être déterminée quantitativement par une approche mécanique, c'est pourquoi elle est généralement estimée à dire d'expert. La probabilité que le compartiment atteigne un point quelconque (probabilité d'atteinte) est le produit de la probabilité de départ par la probabilité de propagation (déterminée par simulation des trajectoires, par l'angle d'énergie ou à dire d'expert). La vraisemblance des probabilités de départ estimées à dire d'expert, peut être vérifiée en estimant la fréquence de départ sur l'ensemble de la zone étudiée, pour la gamme de volume correspondante (étude d'aléa diffus).

Mots clés : risques naturels, éboulements, aléa résultant, méthodes quantitatives, méthodes qualitatives.

HIÉRARCHISATION DU RISQUE DE CHUTES DE BLOCS SUR LA RD 25 DANS LES GORGES DE LA VIS ENTRE MADIÈRES (30) ET CAZILHAC (34).

ROCKFALL HAZARD PRIORITIZATION ON THE RD 25 IN THE VIS GORGES BETWEEN MADIÈRES (30) AND CAZILHAC (34).

Pierre AZEMARD[1], Dominique ANSALDI[1], Lisa ZAHARIAS[1], Cindy MAISONNAVE[1]

[1] Cerema Méditerranée, avenue A. Einstein, 13593 AIX-EN-PROVENCE Cedex 3

RÉSUMÉ

Cette étude porte sur 17 Km de la RD25 dans les gorges de la Vis (34). La priorisation entre zones d'alea d'atteinte équivalent est effectuée par une démarche à dire d'expert appuyée principalement sur la morphologie et l'intensité de la fracturation. Elle met en œuvre la méthode de la ligne d'énergie. A chaque étape des ajustements manuels ont été nécessaires afin de limiter les incohérences des calculs automatiques.

RISSC : MIEUX GERER LES RISQUES LIES AUX CAVITES SOUTERRAINES EN WALLONIE ET DANS LES HAUTS-DE-FRANCE

THE RISSC PROJECT: IMPROVING RISK MANAGEMENT FOR UNDERGROUND CAVITIES IN WALLONIA AND HAUTS-DE-FRANCE

Ali KHEFFI[1], Jean-Marc WATELET[2] , Cédric LEFEBVRE[3] , Audrey DEUDON[4] , Michel DUBOIS[5] , Fanny DESCAMPS[6]

[1] ISSeP, Institut Scientifique de Service Public wallon, Colfontaine, Belgique
[2] Ineris, Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Verneuil-en-Halatte, France
[3] Cerema, Centre d'étude et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, Lille, France
[4] ACM France, Association des Communes Minières de France, Liévin, France
[5] Univ. Lille, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, Lille, France [6] UMONS, Université de Mons, Mons, Belgique

RÉSUMÉ

La Wallonie et les Hauts-de-France connaissent des problèmes similaires de mouvements de terrains lies aux cavités souterraines, qui menacent la sécurité des personnes, l'aménagement du territoire et l'attractivité socio-économique. Basé sur une dynamique transfrontalière, le projet Interrègne RISSC vise l'amélioration de la connaissance, de la prévention et de la gestion des risques lies aux terrains sous-caves.

Mots clés : cavités souterraines ; risques

FAISABILITE DE L'INFILTRATION DES EAUX PLUVIALES EN ZONE D'ALEA DISSOLUTION DU GYPSE : CAS D'UN ECOQUARTIER

FEASIBILITY OF STORMWATER INFILTRATION IN AREA WITH GYPSUM DISSOLUTION HAZARDS : A CASE STUDY IN PANTIN (FRANCE)

Emmanuel DUMONT[1], Philippe BRANCHU[1], Jérémie SAGE[1]
[1] *Cerema Ile-de-France, Trappes, France*

Résumé

Le risque de dissolution du gypse constitue dans de nombreuses zones d'Île-de-France un obstacle à l'infiltration des eaux pluviales, alors que les risques réels inhérents aux différentes pratiques d'infiltration restent mal caractérisés. La gestion des eaux pluviales à la source constitue pourtant un enjeu important pour les collectivités afin de contribuer à la réduction des pressions sur les milieux aquatiques et des risques d'inondation. L'infiltration des eaux pluviales dans les sols figure parmi les principes répondant à cet enjeu.

L'Etablissement Public Territorial Est Ensemble et le Cerema ont signé une convention de partenariat de recherche et d'échanges de données, dont l'objectif est d'étudier la faisabilité d'une politique d'infiltration des eaux pluviales urbaines dans des contextes hydrogéologiques sensibles, en particulier vis-à-vis du risque de dissolution du gypse, avec comme cas d'étude le projet d'aménagement de la ZAC Écoquartier de la gare à Pantin.

Pour atteindre cet objectif, une caractérisation fine de la géologie ainsi que des fonctionnements hydrogéologiques et géochimiques du site a dans un premier temps été effectuée. Cette caractérisation s'est appuyée sur une analyse critique des données géologiques disponibles, un programme de suivi hydrogéologique et géochimique, ainsi que des expérimentations en laboratoire sur des échantillons de gypse. Un suivi en continu des niveaux de nappe et de la conductivité, complété par des prélèvements d'eau mensuels, a notamment été mis en place dans huit piézomètres. Un dispositif de plaques poreuses destiné à recueillir les eaux d'infiltration a également été installé afin d'étudier, d'un point de vue quantitatif et qualitatif, les eaux pluviales percolant à travers des sols en place représentatifs de la zone urbaine

Les données recueillies ont par la suite été utilisées pour des travaux de modélisation numérique, visant à étudier les impacts du projet d'aménagement sur la recharge (simulation des écoulements dans la zone non-saturée) et les équilibres géochimiques (modélisation des écoulements en zone saturée et du transport conservatif à l'aide du logiciel Visual Modflow). Deux scénarios d'aménagement, l'un basé sur une infiltration diffuse et l'autre sur une infiltration concentrée, ont ainsi pu être comparés à la situation actuelle, avant aménagement.

Mots clés : Gestion des risques, gypse, dissolution, hydrogéologie urbaine, eaux pluviales

EVALUATION DE L'ALEA ROCHEUX DE LA FALAISE DE BONIFACIO : SCENARIO DE RUPTURE ET GESTION DU RISQUE

STUDY OF ROCKFALL HAZARD ON THE BONIFACIO CLIFF : FAILURE SCENARIOS AND RISK MANAGMENT

Baptiste VIGNEROT[1], Christian FRANCK[2], Marie MALASCRABES[3]
[1] BRGM, Montpellier, France
[2] INERIS, Verneuil en Halatte, France
[3] CEREMA, Nice, France

Résumé

Un secteur de la Citadelle de Bonifacio est affecté par un aléa de type « effondrement en masse » de niveau très élevé. Il correspond à une partie de la falaise présentant un surplomb de 20 m, impliquant plus de trente bâtiments. Une étude d'évaluation localisée de l'aléa a été réalisée par le BRGM, le Cerema et l'Ineris, bénéficiant d'investigations spécifiques. Le programme d'amélioration de la connaissance développé dans le cadre de cette étude aura permis de débuter une phase d'observation et de caractériser la géométrie de la falaise et ses forçages environnementaux et anthropiques, un modèle global a pu être défini selon les principes suivants : Lithologie à 4 faciès ayant des paramètres géomécaniques issus d'une campagne d'essais en laboratoire; Fracturation arrière N110° mise en évidence en paroi dans les faciès 1 à 3 et en forage, mais non visible en surface, hypothèses conservatives sur son prolongement et son état d'ouverture ; Fracturation conjuguée N20° non clairement identifiée en paroi, famille peu exprimée dans le secteur. Des hypothèses défavorables de présence et d'ouverture de fractures sont ajoutées aux scenarios d'éboulement; Pas de mise en charge de la fracture N110° ni des potentielles fractures N20° dans les 3 premiers faciès; Recul du pied de falaise à caractériser pour évaluer le recul nécessaire pour déstabiliser le système.

Trois hypothèses de position de fracture N20° sont utilisées pour bâtir un modèle de stabilité géométrique des blocs, considérant une rupture au niveau du rentrant maximal de la falaise. Le surplomb de la Citadelle apparaît stable si l'on ne considère que la seule fracture N110°E. Sa combinaison avec la N20°E engendre des situations d'instabilité dans la seule position où elle a été observée (N20min) et si elle est continue dans tout le massif. L'aléa d'éboulement rocheux est considéré à partir des trois scenarios de rupture envisagés, apportant chacun un niveau de risque et des scenarios de gestion.

Selon le niveau d'aléa définit, le péril imminent a été levé, l'aléa a été requalifié sur l'ensemble de la zone d'étude et des recommandations en terme de gestion du risque ont été formulées. Elles visent la réduction des enjeux humains, qu'ils soient temporaires ou permanents selon les secteurs, la réduction de l'aléa par des mesures de protections vis-à-vis des forçages hydrogéologiques, météorologiques et marins, et par la mise en place d'un protocole de vigilance pour la collectivité directement intégré dans le plan de gestion du risque de la ville.

Mots clés : Evaluation de l'aléa, gestion du risque, falaise littorale, éboulement, approche multidisciplinaire, observation multi-paramètre, modélisation.

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 2B

Géosynthétiques - Sites et sols pollués

MATERIAUX GEOSYNTHETIQUES POUR LA MAITRISE DU CYCLE DE L'EAU DANS L'INDUSTRIE SUCRIERE : CAS CONCRET

THE USE OF GEOSYNTHETICS TO CONTROL THE WATER CYCLE IN THE SUGAR INDUSTRY: A CONCRETE CASE

Caroline CHALAK[1], Thomas WOHLHUTER[2], Thierry GISBERT[3]
[1] ARCADIS, Lyon, France
[2] ARCADIS
[3]ARCADIS

Résumé

L'industrie sucrière est l'une des rares activités industrielles productrice d'eau. En effet, la betterave contient environ 77% d'eau qui va être libérée lors du processus d'extraction et de cristallisation du sucre. Ainsi, les chiffres du Syndicat National des Fabricants de Sucre (SNFS) indiquent qu'une sucrerie qui travaille 20 000 t de betteraves par jour durant une campagne de 110 jours produit chaque année environ 300 000 t de sucre, 400 000 t de pulpes, 60 000 t de mélasse… et 1,7 millions de m3 d'eau. L'eau est donc le premier produit d'une sucrerie, devant le sucre ! Cette réalité permet donc aux sucreries d'être complètement autonomes vis-à-vis de leurs besoins en eau et doit leur permettre de réduire drastiquement voir d'arrêter toute consommation d'eau de forage, réduisant ainsi leur impact sur la ressource en eau souterraine. La capacité de l'industrie sucrière à stocker et valoriser cette eau est donc déterminante et permet à l'industrie sucrière de contribuer activement au développement de pratiques agronomiques performantes et durables.

L'utilisation des géosynthétiques permet de répondre aux enjeux que constituent le stockage de l'eau mais également celui des effluents des sucreries. Les sucreries sont en effet amenées dans ce contexte à améliorer les performances de leurs installations de stockage existantes, constituées encore pour partie d'ouvrages de rétention en matériaux naturels. Les fluides à stocker peuvent être des eaux terreuses (issues du lavage des betteraves), des eaux condensées (en provenance du procédé d'extraction du sucre), des eaux traitées avant rejet au milieu naturel, des boues de STEP (préalablement à leur épandage sur les parcelles agricoles) ou encore des eaux industrielles ou d'extinction d'incendie.

Seront présentés dans ce contexte les études de conception et les travaux de création ex-nihilo d'un bassin de stockage d'eaux terreuses issues des installations de lavage des betteraves d'une sucrerie située en Normandie ainsi que les enjeux techniques et économiques associés. L'article et la communication présenteront également les différents produits géosynthétiques utilisés : géomembrane, géotextile de protection, géosynthétique bentonitique et géogrille de renforcement.

Mots clés : Conception, Travaux, Géotechnique, Géosynthétique, Bassin

SUIVI IN SITU DU COMPORTEMENT D'UNE GEOGRILLE DANS UNE PLATEFORME FERROVIAIRE

IN SITU MONITORING OF THE BEHAVIOUR OF A GEOGRID WITHIN A RAILWAY TRACK BED

Olatounde A. YABA[1,2], Fabrice EMERIAULT[2], Orianne JENCK[2], Jean-François FERELLEC[1], Amine DHEMAIED[1]
[1] SNCF Réseau, DGII – VA – CIR, 6 av. F. Mitterrand, 93574 La Plaine St Denis, France
[2] Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38000 Grenoble, France

Résumé

L'utilisation de géogrilles pour améliorer les plateformes ferroviaires fait partie des solutions proposées par la SNCF pour effectuer des travaux de régénération. Les géogrilles sont des géosynthétiques présentant des ouvertures de maille de tailles et formes variées et servant à renforcer les couches de sols granulaires, par verrouillage mécanique des grains dans les mailles (Carroll, 1988).
A l'heure actuelle, les connaissances sur le comportement mécanique des géogrilles et leur apport en conditions opérationnelles dans le domaine ferroviaire sont limitées. La majorité des études dans le domaine se focalisent sur l'interaction des géogrilles avec le ballast. Ces études ont montré l'efficacité des géogrilles pour la réduction de l'usure et des tassements du ballast (Horníček et al., 2017 ; Nimbalkar & Indraratna, 2016 ; Lenart & Klompmaker, 2014 ; Fernandes et al., 2008 ; Sharpe et al., 2006). Néanmoins, elles ne permettent pas de tirer des conclusions satisfaisantes par rapport à l'amélioration des plateformes. De plus, pour plusieurs raisons, la pose d'une géogrille dans la couche de ballast ou directement en dessous, ne convient pas aux particularités du RFN (techniques de maintenance, trafic, etc.).
D'où l'intérêt de mettre en place une expérimentation qui mesure les déformations de la géogrille ainsi que les contraintes et les tassements dans la plateforme. Cela pour quantifier les apports d'une géogrille posée sous la sous-couche de grave d'une plateforme ferroviaire sur le RFN et, au fil du temps, étudier le mécanisme par lequel l'amélioration est atteinte. Cet article présente un retour d'expérience sur le suivi d'un tronçon amélioré par une géogrille et une analyse des résultats préliminaires.

Mots clés : Amélioration, géogrille, sous-couche, ferroviaire, instrumentation

ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES REMBLAIS COHESIFS RENFORCÉS PAR GÉOSYNTHÉTIQUE : EXPÉRIENCES ET MODÉLISATION.

STUDY OF THE BEHAVIOR OF COHESIVE EMBANKEMENT REINFORCED BY GEOSYNTHETICS/ EXPERIMENT AND MODELLING.

Maria DELLI CARPINI[1], Fabrice EMERIAULT[1], Laurent BRIANÇON[2], Pascal VILLARD[1], Emmanuel MENGUE[3], Gwenael LEGUERNEVEL[3].
[1] Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38100, Grenoble, France.
[2] INSA de Lyon, Laboratoire GEOMAS, 69621 Villeurbanne.
[3] Afitexinov, 38110 Saint Didier de la Tour.

Résumé

Pour mieux comprendre le comportement des sols cohésifs renforcés par géosynthétique sur cavité localisée, des expérimentations in situ en vraie grandeur ont été réalisées en 2019 dans le cadre du projet REGIC. Deux types de sols cohésifs ont été testés : un sol naturel et un sol reconstitué (sable traité à la chaux). Des cavités circulaires de 1 et 2 m de diamètre ont été simulées sous des remblais de 0,5 et 0,75 m d'épaisseur. Des renforcements géosynthétiques permettant de détecter la présence des cavités par un système de mesure par fibre optique ont été positionnés à la base du remblai. Plusieurs types de renfort géosynthétique ont été utilisés. Le remblai renforcé a été chargé jusqu'à la rupture. Des mesures de déformations du géotextile, déflexion de surface du remblai et des contraintes à la base du remblai ont été effectuées. En parallèle, un modèle numérique couplé DEM-FEM a été utilisé pour rendre compte des mécanismes d'effondrement en blocs du sol cohésif sur la nappe de renforcement et pour faire une rétro analyse des résultats expérimentaux. Le modèle numérique permet de considérer successivement la phase d'ouverture de la cavité et la phase de chargement jusqu'à la rupture du remblai cohésif. Plusieurs modèles de comportement du sol cohésif ont été testés. Les résultats numériques ont été confrontés aux résultats expérimentaux. L'analyse permet de faire des propositions quant au dimensionnement de ce type de renforcement.

Mots clés : Géosynthétique, sol, cohésif, risque, prévention.

ETUDE DU RENFORCEMENT GEOSYNTHETIQUE DES PLATEFORMES GRANULAIRES SUR SOL DE FAIBLE PORTANCE

STUDY OF THE GEOSYNTHETIC REINFORCEMENT OF GRANULAR PLATFORMS OVERCOMING SOFT SOIL

Nicole KHOUIERY[1], Laurent BRIANÇON[1], Ali DAOUADJI[1] et Mathilde RIOT[2]
[1] AFITEXINOV, La Tour du Pin, France
[2] Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, Villeurbanne, France

Résumé

Depuis cinquante ans, les géosynthétiques (GSYs) ont été de plus en plus utilisés en génie civil et plus spécialement en géotechnique. Les géosynthétiques peuvent assurer différentes fonctions selon les applications : la séparation, la filtration, le drainage, le renforcement, la protection, l'anti-érosion et l'étanchéité. Les GSYs ont été utilisés dans le renforcement des Plateformes granulaires routières non revêtues sur des sols de faible portance depuis 1970. Avec les années, l'expérience a prouvée l'efficacité du renforcement par GSYs dans ce domaine. L'hétérogénéité de la structure et surtout la présence du renforcement a complexifié les mécanismes développés dans ces plateformes. Dans la littérature, plusieurs auteurs ont essayé de comprendre et d'expliquer le fonctionnement de ces plateformes granulaires renforcées. Cependant, les nombreux mécanismes mis en jeu, la variété des GSY employés n'ont pas permis à ce jour de disposer d'une méthode de dimensionnement faisant l'unanimité.
Une nouvelle étude a été engagée dans le cadre du LabCom PITAGOR au sein du laboratoire GEOMAS de l'INSA de Lyon pour identifier les mécanismes mis en jeu et proposer des règles de dimensionnement. Un nouveau dispositif expérimental a été développé pour tester les Plateformes routières non revêtues renforcées à échelle réelle au laboratoire. Un soin particulier a été apporté pour définir un protocole expérimental permettant de disposer d'un même état initial du sol à chaque essai. La plateforme à tester est sollicitée par un chargement ponctuel cyclique et par un chargement de circulation en utilisant la machine SAT (Simulateur Accélérateur de Traffic) développée spécialement dans le cadre de ce projet. En effet la machine SAT a été conçue de façon à appliquer une charge de circulation lourde sur une longueur effective de 2 m, et de garder la même intensité de charge même après une déformation excessive, grâce à son mécanisme d'application de charge particulier.
Cet essai permet de comparer plusieurs types de GSYs, de quantifier l'efficacité du renforcement et d'identifier l'effet des paramètres influençant les mécanismes développer à l'interface. D'autre part, les résultats permet la comparaison de l'effet du type de sollicitation sur la plateforme.

Mots clés : Géosynthétiques, Sol de faible portance, routes non revêtue, essai à grand échelle, charge de circulation.

CE QU'IL FAUT SAVOIR SUR LES INSTALLATIONS DE STOCKAGE DE DECHETS INERTES (ISDI)

WHAT YOU NEED TO KNOW ABOUT INERT WASTE STORAGE FACILITIES

Agathe DENOT[1], Thierry DUMAS[2], Laurent EISENLOHR[1]
[1] Cerema, L'Isle-d'Abeau, France
[2] DREAL Auvergne-Rhône-Alpes

Résumé

Les installations de stockage de déchets inertes (ISDI) sont des filières d'élimination. Elles permettent de stocker les déchets, principalement des terres, ne pouvant pas être valorisés, soit par manque d'installations de valorisation sur le territoire, soit par des coûts technico-économiques non acceptables, soit à cause de performances mécaniques et géotechniques insuffisantes. En 2014, environ 26 millions de tonnes de déchets inertes issus des chantiers du BTP ont été déposés en ISDI (source SOeS, 2017).
L'ouverture d'installations de stockage de déchets inertes sur les territoires fait partie d'objectifs de certains plans de prévention et de gestion des déchets pour :

- avoir un maillage d'installation proche de gisements de déchets non valorisables,
- résorber les dépôts sauvages,
- compenser certaines fermetures programmées des ISDI autorisées.

Par ailleurs, des projets sont en cours ou à l'étude avec de forts enjeux de territoire en générant d'importants volumes de matériaux excavés (par exemple, les travaux du Grand Paris, la ligne ferroviaire Lyon-Turin, la ligne nouvelle Provence Côte-d'Azur). Ces volumes importants de matériaux, sur un temps relativement court, peuvent perturber les filières existantes. Il faudra, pour ces volumes de matériaux excavés inertes non-réemployables ou non-valorisables, les stocker localement ISDI.
Les ISDI sont des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), soumises au régime de l'enregistrement.
Pour avoir l'autorisation d'exploiter une ISDI, il faut réaliser une étude et déposer un dossier administratif. Ensuite, des aménagements sont à réaliser pour maîtriser les impacts sur l'environnement et garantir la sécurité du site. En phase exploitation, afin de garantir la qualité des déchets entrants sur l'ISDI, l'exploitant met en place une procédure d'acceptation des déchets. Il tient à jour un registre d'entrée et s'assure également de la traçabilité des déchets. En fin de l'exploitation de l'ISDI, un réaménagement est mis en place pour être compatible avec le futur usage du site.

Mots clés : Stockage de déchets, Déchets inertes, Etudes préalables, Exploitation d'une ISDI, Réaménagement

INTERACTION SOL-STRUCTURE AVEC LES VESTIGES DE FONDATIONS DANS LES FRICHES INDUSTRIELLES

SOIL-STRUCTURE INTERACTION WITH REMAINS OF FOUNDATIONS FOR BROWNFIELDS

Stéphane BRÛLÉ[1], Fabien CHAMPMARTIN[2], Rodolphe LE MEAUX[2]
[1] *MENARD, Orsay, France*
[2] *CITINEA, Villeurbanne, France*

Résumé

La réhabilitation des friches industrielles amène à composer avec les vestiges de fondations présents dans les sols. La purge de ces vestiges n'est pas systématique à condition de vérifier leur interaction mécanique avec les nouvelles fondations. Pour le cas d'une centrale biomasse située à Lyon, cet article illustre les raisons du choix du compactage dynamique des sols ainsi que l'amélioration de l'empreinte carbone du projet.
Pour les situations nécessitant une évacuation totale ou partielle des remblais et des volumes de matériaux issus de la démolition, la solution de densification des sols et des remblais depuis la surface libre est avantageuse en limitation des émissions en CO2.

Mots clés : Amélioration des sols, interaction sol et structure, radier, friches industrielles, empreinte carbone.

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 2C

Fondations 1

UTILISATION D'UNE APPROCHE DE DÉPLACEMENT POUR ÉVALUER LES EFFETS PARASITAIRES AGISSANT SUR UN PIEU À PROXIMITÉ D'UN REMBLAI

USE OF A DISPLACEMENT APPROACH TO EVALUATE PARASITIC EFFECTS ACTING ON A PILE NEAR AN EMBANKMENT

Minh Tuan HOANG[1], Antoine ABBOUD[1], Fahd CUIRA[1]

[1] *Terrasol, Paris, France*

Résumé

La justification des pieux d'une culée remblayée doit prendre en considération des effets « parasites » dont les poussées latérales et le frottement négatif. Ces phénomènes proviennent des mouvements vertical et horizontal du terrain sous l'effet de la charge du remblai, et peuvent être évalués à l'aide d'une « approche en déplacement » faisant intervenir la notion de rigidité relative entre le pieu et le sol encaissant. La pertinence d'une telle approche impose une estimation affinée de la loi de contrainte-déformation du sol en place et en particulier le choix d'un module de déformation cohérent avec le taux de chargement (ou de déformation) induit par le remblai.

L'article s'attache à rappeler les bases théoriques d'une telle approche qui constitue une généralisation des modèles « t-z » et « p-y » utilisés en ingénierie pour le dimensionnement des fondations profondes sous charges axiale et transversale. Le lien avec les normes en vigueur est également commenté. La mise en œuvre pratique de l'approche est ensuite illustrée à travers l'étude de plusieurs culées remblayées dans le cadre du projet d'extension du Port de Calais. L'estimation des déplacements vertical et horizontal du terrain à proximité immédiate des pieux a été établie à l'aide d'un modèle élastique non-linéaire développé dans le cadre du projet ARSCOP, exprimant le rapport E/E_M en fonction de la déformation verticale. Les résultats ont pu confrontés à des mesures in situ sur des remblais instrumentés dans le cadre de l'opération.

Mots clés : fondation profonde, frottement négatif, poussées latérales, approche en déplacement, module de déformation

VERS UNE APPROCHE DE CALCUL UNIFIEE DE TASSEMENT DES SEMELLES ET DES RADIERS

TOWARDS A UNIFIED CALCULATION APPROACH OF SHALLOW FOUNDATIONS AND RAFTS SETTLEMENTS

Minh Tuan HOANG[1], Fahd CUIRA[1], Sébastien BURLON[1]
[1] *Terrasol, Paris, France*

Résumé

Le présent travail s'intègre dans le cadre du projet national ARSCOP et a pour but de présenter de nouvelles alternatives rendant compte d'un comportement élastique non linéaire pour le calcul du tassement des fondations superficielles avec le pressiomètre. Cette démarche a pour objectif de développer une approche de calcul unifiée du tassement des semelles et des radiers.

En complément de la corrélation usuelle $E = kE_M/\alpha$ (où k est un paramètre de calage dépendant du type d'ouvrages), de nouvelles corrélations entre E et E_M sont présentées pour rendre compte explicitement de la dépendance entre le module élastique et les déformations. Elles aboutissent à la proposition de courbes en « S » où le module varie en fonction du taux de déformations. Une nouvelle approche de calcul est ainsi développée à partir de ce principe et de la théorie classique de l'élasticité de Boussinesq.

Cette approche basée sur des courbes en « S » est comparée à la méthode de calcul de Ménard pour l'estimation du tassement des semelles et à la base de données d'essais de chargement de semelle du LCPC. Les résultats obtenus montrent que l'approche proposée constitue une alternative fiable à la méthode de Ménard. Elle assure par ailleurs un lien cohérent avec la théorie de l'élasticité, notamment les formules de Giroud. Cette approche présente enfin l'avantage d'être basée sur des hypothèses de calcul explicitement définies contrairement à la méthode de Ménard qui présente certains paramètres difficilement justifiables.

En parallèle, l'approche est testée sur des radiers de différentes constructions : tours de grande hauteur, remblais de grande largeur et centrales nucléaires. Les résultats obtenus montrent que les courbes en « S » développées permettent de bien apprécier les tassements absolus et différentiels de ces ouvrages permettant ainsi un dimensionnement structural plus fiable et plus robuste.

Mots clés : pressiomètre, tassement, module de déformation, courbe en « S », retours d'expérience

UN CRITERE CONVENTIONNEL POUR LA JUSTIFICATION DE LA PORTANCE SISMIQUE DES FONDATIONS SUPERFICIELLES

A CONVENTIONAL FRAMEWORK FOR THE SEISMIC DESIGN OF SHALLOW FOUNDATIONS

Youssef ABBOUD[1], Sébastien BURLON[1], Fahd CUIRA[1]
[1] *Terrasol, Paris, France*

Résumé

Le dimensionnement sismique des ouvrages nécessite la vérification de la stabilité de leurs fondations. En conditions sismiques, la réponse inertielle de la structure fait que la charge transmise à la fondation présente une inclinaison et un excentrement, ce qui est susceptible d'induire rapidement une instabilité par perte de portance de celle-ci. En plus, des efforts d'inertie induits dans le sol au passage des ondes sismiques mobilisent une partie de la résistance au cisaillement du sol et constituent un facteur additionnel de cette instabilité.
Le cadre conventionnel de vérification de la portance sismique consiste à comparer l'effort vertical à une valeur limite, réduite en fonction de l'inclinaison et l'excentrement. D'autre part, le cadre de l'Eurocode 8 – Partie 5 consiste à vérifier que le torseur d'efforts transmis à la fondation répond à un critère formulé en fonction des efforts d'inertie dans le sol.
Dans ce contexte, cet article présente un critère pour la vérification sismique des fondations superficielles. Ce critère, formulé dans un cadre conventionnel, met en jeu 3 coefficients correcteurs pour tenir compte des effets de l'inclinaison, l'excentrement et des effets d'inertie dans le sol sur la portance de la fondation. Ces coefficients sont formulés conformément aux normes en vigueur (Eurocode 7 et Eurocode 8 – Partie 5).

Mots clés : dynamique des sols, fondation superficielle, Eurocode, portance sismique, macroélément

DETERMINATION DE LA COURBE $E/E_M(\varepsilon)$ A PARTIR DU TASSEMENT PRESSIOMETRIQUE D'UNE SEMELLE CIRCULAIRE

DETERMINING OF THE $E/E_M(\varepsilon)$ CURVE FROM THE PRESSIOMETRIC SETTLEMENT OF A CIRCULAR FOOTING

Olivier DAVID [1],
[1] *FONDOUEST, Angers, France*

Résumé

Cet article explicite une formulation analytique des courbes de dégradation du module élastique en fonction du module pressiométrique sous la forme $E/E_M = f(\varepsilon)$, permettant le calage du tassement obtenu à partir des modèles dérivés de la théorie de l'élasticité sur celui donné par le « modèle de Ménard », pour des semelles circulaires.

Les travaux récents, développés notamment dans le cadre du projet national ARSCOP, ont montré que l'estimation du module d'Young à partir du module pressiométrique peut être amélioré en considérant la dégradation du module avec le taux de déformation. Des lois de dégradation fonction de E_M et du coefficient α ont ainsi été proposées, en vue du calcul de radiers de grandes dimensions, sur la base d'un calage des tassements « élastiques » et « pressiométriques », pour des semelles rectangulaires de dimensions variables.

Pour le cas des semelles circulaires de rayon R, cas théorique de référence à partir duquel a été établi le modèle semi-empirique de Ménard, l'approche analytique se trouve simplifiée et permet d'expliciter une expression de E en fonction de ε, de E_M et des autres paramètres du modèle. Elle peut en outre être étendue à un profil de modules pressiométriques évoluant avec la profondeur suivant une loi de puissance, aux cas des semelles souples et rigides et à des modèles élastiques 1D et 3D.

Cette approche alternative apporte des éléments d'éclairage sur l'influence des paramètres et hypothèses du modèle ainsi que sur la représentativité des courbes obtenues et leur domaine d'application.

Mots clés : Modélisation numérique ; tassement ; fondation superficielle, module pressiométrique ; courbe de dégradation.

FONDATION D'IMMEUBLES DE GRANDE HAUTEUR PAR MICROPIEUX A SEUIL MINIMAL DE TASSEMENT

FOUNDATION OF HIGH-RISE BUILDINGS BY MINIMAL THRESHOLD SETTLEMENT MICROPILES

Emmanuel CHANGEON[1], Paul VIDIL[2], Mathias RABOURDIN[3]
[1] *SOLETANCHE BACHY, Rueil-Malmaison, France*
[2] *SOLETANCHE BACHY*
[3] *SOLETANCHE BACHY*

Résumé

Le projet ALTO, débuté à partir de 2016 à La Défense (92), prévoit la construction d'une tour de 150 mètres de haut et de sa structure externe, dite exostructure Nord, reliées l'une à l'autre.

Il s'est révélé indispensable de limiter le tassement différentiel entre la tour, très fortement chargée et fondée sur paroi moulée et barrettes, et son exostructure faiblement chargée et fondée sur trois massifs.

Pour ce faire, les trois massifs ont été fondés sur un ensemble original constitué d'un groupe de micropieux et d'un appareil d'appui en élastomère fretté, nous permettant ainsi de garantir l'atteinte d'un seuil minimal de tassement de l'exostructure et respecter conséquemment le critère de tassement différentiel avec la tour.

Cet article vise à détailler la solution technique innovante retenue, à exposer la méthode d'estimation du tassement des micropieux, ainsi qu'à proposer une comparaison entre les tassements théoriques et les tassements mesurés lors des essais de chargement.

Mots clés : Fondations, Micropieux, Tassement, Immeuble de Grande Hauteur (IGH), Appareils d'appui

DES FONDATIONS EXCEPTIONNELLES PAR PIEUX BATTUS DE 45 A 85 M POUR LE VIADUC DU WOMEY A COTONOU AU BENIN

EXCEPTIONAL FOUNDATIONS BY DRIVEN PILES FROM 45 TO 85 M FOR THE VIADUCT FROM WOMEY A COTONOU TO BENIN.

Stéphane CURTIL[1], Benedikt STÜTZL[2]
[1] *GEOS Ingénieurs Conseils – Rueil-Malmaison*
[2] *GEOS Ingénieurs Conseils – Rueil-Malmaison*

Résumé

Le viaduc sur le Womey permet de franchir la lagune de Djonou, à proximité de Cotonou au Bénin. Baptisé « Pont de l'Alliance », il facilite la continuité des circulations et des échanges entre les populations de Cocotomey, Womey et ses environs.

Sur site, constatant que les habitants avaient réussi à créer une piste « piétonne et 2 roues » pour franchir la lagune par apport de matériaux sur la végétation flottantes, il avait été imaginé que la construction du viaduc aurait pu se faire par remblaiement de la lagune à l'avancement. Toutefois, les ruptures successives des remblais provisoires d'accès pour la construction de l'ouvrage ont rapidement contraint le concepteur à abandonner cette idée pour lui privilégier une solution classique plus adaptée au contexte géologique et géotechnique singulier de la zone : des terrains très fortement compressible sur plus de 25 m d'épaisseur. La solution retenue a été un pont estacade construit à l'aide d'un lanceur-guide de battage s'appuyant sur la pile N pour construire la pile N+1.

En phase initiale de conception, des études bibliographiques des données géologiques et structurales à l'échelle régionale et locale ont permis de mettre en évidence un risque accru d'avoir la conjonction de plusieurs failles à l'origine d'approfondissement important des horizons d'ancrage des fondations profondes.

Dans ce contexte particulier, les reconnaissances historiques du site, d'une profondeur de 20 m, n'avaient rencontré aucun horizon résistant. Une campagne de sondages profonds incluant des sondages destructifs avec essais pressiométriques mais également des sondages au pénétromètre statique ont permis d'identifier vers 45 m de profondeur des horizons plus sableux de 2 à 4 m d'épaisseur susceptibles de pouvoir accueillir les pointes des futures fondations profondes.

La conception des fondations s'est alors orientée vers des pieux battus profonds qui, lors de l'exécution, n'ont pas tous rencontré de couche porteuse. Le suivi de l'exécution et l'interprétation des mesures des énergies de battage ont alors permis l'adaptation des ouvrages et la validation des critères d'arrêts de battage. Les pieux les plus profonds ont atteint 87 m.

Mots clés : Travaux maritimes et fluviaux, matériaux compressibles, pressiomètre, fondations profondes, pieux battus

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 3A

Modélisation physique

DES RÈGLES DE SIMILITUDE POUR LE FROTTEMENT DANS LES MODÈLES RÉDUITS DE SOL RENFORCÉ ?

SCALING LAWS FOR THE FRICTION IN CENTRIFUGE MODELS OF REINFORCED SOIL ?

Jean de SAUVAGE[1], Thierry DUBREUCQ[2],
[1] *Université Gustave Eiffel, Marne-la-Vallée, France*
[2] *Université Gustave Eiffel, Bouguenais, France*

Résumé

Le recours à des modèles réduits centrifugés est fréquent pour étudier des ouvrages géotechniques. Il permet d'une part d'observer leur comportement jusqu'à la rupture et d'autre part de mener des études paramétriques à coût réduit. Afin que les modèles réduits fournissent des informations pertinentes quant aux ouvrages prototypes correspondant, certaines règles de similitude doivent être respectées.
Le comportement des ouvrages en sol renforcé dépend fortement du frottement mobilisé à l'interface entre le sol et l'inclusion (armature, clou, …). Si les résultats concernant la résistance au cisaillement de ces interfaces sont bien établis, les règles de similitude concernant le déplacement mobilisant cette résistance ne sont pas connues. A l'heure actuelle, la validation des modèles réduits centrifugés de sol renforcé nécessite de réaliser des essais d'arrachement ad hoc.
Afin de déterminer l'influence sur les lois de frottement sol-inclusion de la taille des grains, de leur distribution granulométrique et de la rugosité de l'inclusion, des essais d'arrachement d'inclusions modèles ont été réalisés sous différentes contraintes de confinement à l'aide d'une boite de cisaillement simple adaptée pour l'occasion. Ces essais ont été menés avec du sable d'Hostun HN38 et des inclusions de diamètres et rugosités variables. Des coupures granulométriques ont également été effectuées sur le sable.
Cette étude expérimentale a été complétée par des simulations numériques en éléments discrets effectuées à l'aide de l'environnement Yade-DEM. Ces dernières permettent d'une part d'étudier la mobilisation locale de la résistance au cisaillement le long de l'inclusion et d'autre part de comprendre les mécanismes micromécaniques à l'œuvre.
La comparaison des résultats expérimentaux et numériques a permis d'expliciter les principes de mobilisation de la résistance au cisaillement dans les modèles réduits de sol renforcé et de proposer les prémisses de règles de similitude.

Mots clés : Modélisation physique, centrifugeuse géotechnique, frottement, sol-renforcé, règles de similitudes

IDENTIFICATION DES SOLS LIQUEFIABLES PAR PENETROMETRE STATIQUE CYCLIQUE (CPT-CYCLIQUE) : APPROCHES NUMERIQUES ET EXPERIMENTALES.

IDENTIFICATION OF SOIL LIQUEFACTION BY CYCLIC STATIC PENETROMETER (CYCLIC-CPT): NUMERICAL AND EXPERIMENTAL APPROACHES

Hamid Hosseini-Sadrabadi*[1,2], Ankit Sharma[1], Bruno Chareyre[1], Christophe Dano[1], Luc Sibille[1], Pierre Riegel[2]

Résumé

Le Pénétromètre statique (CPT) est utilisé pour la reconnaissance in-situ des couches de sol en subsurface. Des versions avancées du CPT telles que le piézocone (CPTU) existent pour évaluer la sensibilité à la liquéfaction des sols. Le présent projet vise à améliorer l'interprétation du CPT (sans mesure de la pression interstitielle) pour l'identification des sols liquéfiables. Nous présentons des approches numériques et expérimentales explorant la possibilité d'utiliser des données issues d'un chargement cyclique de la pointe d'un CPT pour évaluer le potentiel de liquéfaction du sol.
La partie expérimentale est basée sur des essais de pénétration effectués dans une chambre de calibration à l'aide d'un pénétromètre original développé spécifiquement par la société Equaterre pour effectuer un chargement cyclique de la pointe. Les essais sont réalisés dans un sable fin saturé à densité initiale contrôlée et soumis à une contrainte de confinement grâce à la chambre de calibration.
Le modèle numérique du pénétromètre est basé sur un couplage entre la méthode des éléments discrets pour décrire la phase solide et une méthode de volumes finis définis à l'échelle des pores du sol pour résoudre la dynamique de la phase fluide interstitielle en condition saturée. En plus de la résistance de la pointe, ce modèle donne accès aux champs de contraintes, de déplacements, de pression interstitielle et de vitesse du fluide en tout point du volume de sol.
Les résultats expérimentaux et numériques sont analysés de manière complémentaire pour mettre en évidence, d'une part les informations clés qui peuvent être fournies par un CPT cyclique dans des sables fins typiquement lâches et denses, et d'autre part, comment ces informations pourraient être utilisées pour évaluer le potentiel de liquéfaction du sol.

Mots clés : Pénétromètre statique cyclique (CPT ; cyclique) ; méthode des éléments discrets (DEM) ; couplage fluide ; solide ; liquéfaction du sol.

BUTÉE DE SOL SUR LES ÉLÉMENTS TRANSVERSES DES INCLUSIONS COMPOSITES VSoL®

BEARING ON THE TRANSVERSE ELEMENTS OF VSoL® COMPOSITE INCLUSIONS

Michalis CHiKARAS[1], Benoit CHANTEPERDRDIX[2]
[1] *Consultant Indépendant, Athènes, Grèce*
[2] *Bouygues Travaux Publics, Paris, France*

Résumé

Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse au mécanisme d'interaction entre le sol et les renforcements d'un ouvrage en remblai renforcé avec des armatures horizontales unidimensionnelles peu extensibles et souples sous forme de treillis métalliques soudés VSoL®.

Afin d'améliorer la connaissance des conditions de cette interaction, nous avons procédé à des essais statiques d'extraction en laboratoire à l'UTNA (Université Technique Nationale d'Athènes en Grèce) sur ces inclusions composites de géométrie variable connues dans des caissons remplis de sol et soumis à différents niveaux de contrainte verticale (surcharge uniforme).

L'interaction mobilisée totale est décomposée en frottement latéral sur les barres longitudinales et en butée passive sur les barres transversales dont l'influence est examinée en détail. L'importance significative du phénomène de la dilatance empêchée lors de l'essai sous faibles contraintes est soulignée.

Ces essais ont démontré que l'importance des éléments transversaux de treillis est primordiale, notamment au voisinage immédiat des nœuds, où la butée est mobilisée beaucoup plus tôt par rapport à la partie centrale de la barre transversale qui ne joue pas un rôle si important à cause de sa déformation. De plus, la réponse d'une seule barre transversale individuelle n'est pas toujours extrapolable au système de l'ensemble des barres résistantes d'un treillis à cause de l'effet de groupe. Ainsi, la résistance mobilisée coïncide avec la résistance mobilisable uniquement quand le rapport de l'espacement des barres sur leur diamètre est suffisamment grand et optimisé pour qu'il n'y ait aucune interférence.

Mots clés : Applications ; Interaction ; Essai d'extraction ; Butée ; VSoL®

GROUPE DE PIEUX THERMOACTIF DANS UN ECOULEMENT AQUIFERE : MODELISATION PHYSIQUE ET NUMERIQUE

GEOTHERMAL ENERGIE-PILE GROUP IN AQUIFER FLOW: PHYSICAL AND NUMERICAL MODELLING

Thibault Badinier[1], Jean deSauvage[1], Fabien Szymkiewicz[1], Bruno Regnicoli Benitez[1,2]
[1] *GERS-SRO, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-*77447 Marne-la-Vallée, France
[2] Università degli Studi di Perugia, DCEE

Résumé

La géothermie de faible profondeur est une solution à faible impact environnemental pour répondre à des besoins locaux en énergie notamment pour le chauffage et la climatisation des bâtiments. Depuis la fin des années 80, de nouvelles solutions de géothermie de surface sont apparues avec le développement progressif des structures thermoactives. Celles-ci assurent simultanément le rôle de fondation des structures géotechniques et un rôle d'échangeur thermique. Cette méthode permet de répondre au besoin en énergie des bâtiments sans avoir recours à une structure géothermique supplémentaire.

Naturellement, ces structures interagissent avec leurs environnements et dans le cas où celles-ci sont mises en place dans des aquifères, le mouvement de la nappe génère un phénomène d'advection. Bien que bénéfique à l'équilibre thermique du sous-sol, ce phénomène crée un effet de panache thermique susceptible d'atteindre et de perturber le fonctionnement d'autre structure en aval. Le développement de ces structures dans les zones urbaines nous conduit à nous pencher sur les interactions qui existent entre les différentes structures.

Pour étudier ces interactions, nous menons des modélisations physiques et numériques des phénomènes thermiques et hydrauliques afin d'en comprendre le fonctionnement et l'importance.

On étudie ici le cas d'un groupe de 9 pieux mis en place dans la plateforme d'essais Sense-City. Ces pieux thermoactifs peuvent être sollicités indépendamment par pompe à chaleur. Grâce à un réseau de capteur et de fibres optiques, il est possible de mesurer les températures dans les pieux et d'étudier leur fonctionnement et leur interaction. En parallèle, un modèle numérique a été développé à l'aide du logiciel de modélisation par éléments finis, CESAR-LCPC. Ce modèle permet de tenir compte du couplage thermo-hydro-dynamique en représentant à la fois les phénomènes de convection et d'advection. Ce modèle numérique permet de reproduire les phénomènes observés dans le modèle physique et devra permettre d'étudier de structures plus complexes sur des périodes de temps plus importantes.

Mots clés : Géothermie ; Structures thermoactives ; Modèle numérique ; Éléments finis, Modèle physique

DEVELOPPEMENT D'UN BATTEUR POUR INSTALLER DES MODELES DE MONOPIEUX D'EOLIENNES EN MER EN CENTRIFUGEUSE

DEVELOPMENT OF A HAMMER TO DRIVE MONOPILES OF OFFSHORE WIND TURBINES IN CENTRIFUGE

S. Matouk[1*], M. Blanc[1], L. Thorel[1]
[1] *Université Gustave Eiffel, GERS-GMG, Nantes, France*

Résumé

Un nouveau batteur embarqué en centrifugeuse a été spécialement conçu à l'Université Gustave Eiffel pour installer à 100×g des modèles de monopieux d'éoliennes en mer. Lors de l'étude de fondation en centrifugeuse, il est important de reproduire le mode d'installation, ici le battage, de cette fondation afin de reproduire l'état de contraintes initial qu'elle subit. Tout d'abord, les lois de changements d'échelles utilisées pour étudier le mécanisme du battage sont rappelées. Il faut à la fois prendre en compte des phénomènes statiques et dynamiques. Ensuite, une étude bibliographique présente les différents systèmes de battage de pieux développés en centrifugeuse. Le nouveau système de battage a été conçu pour battre à 100×g un monopieux de 50 mm de diamètre (5 m à l'échelle prototype) sur une profondeur de 250 mm (25 m à l'échelle prototype). Le monopieu modèle est un tube ouvert de 525 mm de long avec une épaisseur de 2,5 mm. Ce monopieu est installé dans du sable saturé de Fontainebleau NE34 à un indice de densité de 80%. Afin de battre ce monopieu sur la profondeur désirée, l'énergie de battage choisie est de 2,5 MJ en prototype ou 2,5 J à l'échelle modèle. Le batteur permet la chute libre d'un mouton d'environ 100 grammes. Un moteur électrique permet de remonter ce mouton. Ce batteur est fixé sur un vérin hydraulique qui suit le pieu lors de son installation. De plus, ce vérin hydraulique permet de contrôler la hauteur de chute du mouton jusqu'à 25 mm de haut. La fréquence de battage peut être ajuster en modifiant la vitesse de rotation du moteur électrique. Finalement, des résultats expérimentaux présentent l'installation par battage d'un monopieu modèle instrumenté de fibres optiques à réseaux de Bragg ainsi que d'un accéléromètre situé sous l'enclume.

Mots clés : centrifugeuse ; battage ; monopieu

BASE DE DONNEES D'ESSAIS DE PIEUX CENTRIFUGES : TRACTION POUR ANCRAGE D'EOLIENNE FLOTTANTE

DATA BASE OF CENTRIFUGE PILE TESTS : TENSION LOADING FOR ANCHORAGE OF FLOATING WIND TURBINES

Luc THOREL[1], Ismat EL HAFFAR[1,2], Matthieu BLANC[1].
[1] GERS-GMG, Univ. Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-44344 Bouguenais, France
[2] Fugro GeoConsulting, Bruxelles, Belgique

Résumé

Dans le cadre de la transition énergétique et du développement des énergies marines renouvelables, l'Ifsttar a débuté en 2017, en réponse à un appel à projet du Weamec, le programme de recherche REDENV-EOL qui porte sur la Réduction de l'emprise environnementale d'éolienne flottante avec des fondations de type pieu. L'idée est ici de réduire la longueur des lignes d'ancrages, en privilégiant les lignes tendues qui font travailler le pieu d'ancrage en traction, en mobilisant la résistance verticale de l'interaction sol pieu.

190 essais en traction sur des pieux cylindriques fermés ou des pieux hélicoïdaux ont été réalisés et regroupés dans une base de donnée qui est présentée ici. Quatre pieux lisses foncés en vol à 100×g dans du sable de Fontainebleau NE34, dense ou lâche, sec ou saturé, sont soumis ensuite à une traction verticale. Cinq pieux hélicoïdaux mono-hélice de diamètre différent sont installés en vol par vissage à 10 profondeurs relatives différentes, dans du sable de Hostun HN38, dense ou lâche, sec ou saturé. Les efforts d'installation sont mesurés. Les pieux hélicoïdaux sont soumis à des sollicitations monotones, cycliques voire monotone post-cyclique.

L'ensemble de ces essais est regroupé dans une base de données dont les caractéristiques détaillées sont présentées ici.

Mots clés : géotechnique marine, centrifugeuse, éoliennes flottantes, ancrage, pieux

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 3B

Fondations 2

FONDATIONS PROFONDES EN HAUTE MONTAGNE (3200 M D'ALTITUDE) - OUVRAGES DE REMONTEE MECANIQUE DE LA CIME CARON/ORELLES (73)

DEEP FOUNDATION IN HIGH FRENCH MONTAINS (SAVOIE) SKI LIFT AT 3 200m PEAK ALTITUDE

Patrick GIRARDI[1], Maxime SOUDE[1]
[1]NGE FONDATIONS

Résumé

Par leur capacité à être déployés dans des sites exigus et difficiles d'accès, les micropieux sont une technique de fondations profondes adaptée en domaine montagneux. Le présent sujet s'inscrit dans le cadre du projet de liaison par télécabine entre Orelles et la cime Caron où se trouvent le massif de remontée mécanique, le bâtiment le recouvrant et 3 pylônes implantés en crête de falaise, tous fondés sur micropieux. L'absence de pistes adaptées pour gagner l'altitude de 3200m de la cime Caron ainsi que la période courte entre deux enneigements soulèvent non seulement des contraintes logistiques mais également un délai d'exécution réduit. La création d'un accès depuis la base vie située à 2500 m d'altitude est indispensable pour amener l'ensemble du matériel nécessaire à cette opération, entre-autre : 3 foreuses MC15 de 16 tonnes paramétrées pour une combustion avec manque d'oxygène, 2 compresseurs de 30 000 litres, 3 postes d'injection complétés ponctuellement de bennes héliportées et divers containers ou citernes (d'eau chaude notamment).
La géologie de ce type d'environnement présente de nombreuses singularités telles que des réseaux de fracturation et la présence de cavités entre blocs dont la plupart comportent un mélange sol-glace, voire, de la glace franche. La zone destinée à accueillir les différents ouvrages étant assujettie au permafrost, les températures négatives presque toute l'année contribuent à expliquer la stabilité mécanique de ces formations géologiques. Cependant les terrassements de la plateforme des futurs bâtiments réduisent l'épaisseur de matériaux de couverture des zones congelées et provoquera, à termes, des mécanismes de fonte. La justification des micropieux implique d'anticiper sur la prise en compte d'un modèle géotechnique hétérogène et évolutif, à l'origine de déplacements latéraux ainsi que des frottements négatifs des sols. Pour tenir compte de la diversité des résultats des forages, des descentes de charges sous chaque massif, de l'inclinaison des micropieux par rapport à la verticale et des différents états limites de réponse du sol sous sollicitations transversales, de nombreuses modélisations furent nécessaires. Ces calculs ont conduit à armer les micropieux par un double tube d'armature en tête et à des vérifications structurelles d'instabilités de forme selon les codes de calcul de l'EC3.
En intégrant les problématiques d'intempéries, de grands vents et de neige, 3 mois de travaux auront conduit à la réalisation de 1600 ml de forage de type « rota Odex » et « marteau fond de trou ».

Mots clés : Fondations ; Micropieux ; Déplacement du sol ; Site instable ; Gel ; Dégel ; Altitude

ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES PIEUX D'UNE TOUR DE GRANDE HAUTEUR : AUSCULTATION GÉOTECHNIQUE ET MODÉLISATION

STUDY OF THE BEHAVIOR OF PILES FOUNDATIONS OF A HIGH-RISE BUILDING: INSTRUMENTATION AND NUMERICAL MODELING

Rosy Milane[1], Laurent Briançon[1], Ali Daouadji[1], Stéphane Grange[1], Pierre Cazes[2]
[1] Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, Lyon
[2] Antea Group, 109 Rue des Mercières, F-69140, Rillieux-la-Pape

Résumé

La ville de Lyon, comme la plupart des grandes villes, tend à construire des grandes tours qui symbolisent la puissance économique et financière. Cela peut être sujet à plusieurs contraintes, surtout quand il s'agit d'une zone de construction dense. La construction d'un immeuble de grande hauteur exige alors une bonne compréhension du comportement du sol soumis à de grandes charges et un bon dimensionnement de la structure et des fondations.

C'est dans ce cadre que Silex², une tour de 135 mètres de hauteur, est en cours de construction dans le quartier de la Part-Dieu à Lyon. Elle est fondée sur 20 pieux de 1.2 m de diamètre et 17 m de profondeur et qui sont enfoncés dans les alluvions du Rhône et sont ancrés dans la molasse du Miocène, cette dernière étant un sable fin plus ou moins grésifiés dont les caractéristiques ne sont pas bien connues.

En première partie, une instrumentation des fondations et du sol est nécessaire afin de suivre en temps réel leur comportement. Un extensomètre multipoint aidera à mesurer le tassement des alluvions et de la molasse. D'autre part, des capteurs de pression totale et des jauges des déformation (électriques ou à corde vibrante) mesureront respectivement la contrainte sur la tête des pieux et la déformation qui en résulte. Cette dernière sera en même temps mesurée à l'aide de fibres optiques.

En deuxième partie, un modèle numérique sera réalisé sur FLAC3D, basé sur la méthode des différences finies. Il permettra de comprendre le comportement de la structure, du sol et de l'interface sol structure. Une loi de comportement bien adéquate aux alluvions et à la molasse sera utilisée dans ce modèle, elle sera validée à l'aide de l'instrumentation et bien aussi à l'aide de quelques essais de laboratoire.

Ce travail présentera alors l'auscultation géotechnique réalisée au sein de ce projet qui a pour but de caractériser le sol lyonnais, de prédire le comportement à long terme de la structure et du sol et par la suite constituer une base d'expérience pour les autres tours prévues sur le site de la Part-Dieu.

Mots clés : Fondations, Instrumentation, déformation, contrainte, sol lyonnais

FONDATIONS DE LA NOUVELLE E.N.S. CACHAN – PRISE EN COMPTE DU GONFLEMENT PAR INTERACTION SOL STRUCTURE

NEW E.N.S. CACHAN – CONCEPTION AND DESIGN OF FOUNDATIONS ON SWELLING MATERIALS BASED ON SOIL STRUCTURE INTERACTION

Alexandre BEAUSSIER[1], Fahd CUIRA[2], Olivier CANAT[3]
[1] *Terrasol (Groupe Setec), Lyon, France*
[2] *Terrasol (Groupe Setec), Paris, France*
[3] *AIA Ingénierie, Lyon, France*

Résumé

A travers l'exemple de la nouvelle ENS Cachan sur le plateau de Saclay, cet article présente la prise en compte du gonflement des terrains dans la conception et le dimensionnement de fondations superficielles.
Après une brève présentation de la structure des bâtiments, du contexte géotechnique de l'ouvrage et notamment des aléas identifiés ceux-ci ayant guidé la conception des fondations, l'article se focalisera sur la problématique de gonflement des terrains d'assise.
Il abordera l'identification des horizons argileux gonflants, puis s'attardera sur la caractérisation mécanique du gonflement, sur la base d'un modèle de comportement unidimensionnel en effort-déformation, calé à partir d'essais à l'œdomètre.
Enfin, il présentera comment un tel modèle de comportement peut être utilisé dans le dimensionnement de fondation superficielles, d'une part pour des fondations isolées associées à des vides sanitaires, et surtout pour des fondation étendues (radiers, dallages), par le biais d'une méthode simpliste d'interaction sol/structure

Mots clés : Fondations ; gonflement ; radier ; essai œdométrique; interaction sol structure

CALCUL D'UN PIEU EN TRACTION – EFFET DE CÔNE

TRACTION PILE CALCULATION – CÔNE EFFECT

Léo Quirin1, Serge Lambert1,
[1] *Keller Fondations Spéciales, France*

Résumé

Le calcul des pieux devient particulièrement complexe lorsqu'il est nécessaire de prendre en compte la résistance à la traction. En effet, le poids du volume de sol mobilisé devient une résistance qui doit être calculée afin de la comparer à l'effort de traction appliqué. La norme NF P 94 262 décrit deux méthodes de dimensionnement que nous allons analyser et comparer afin de définir leur forces et faiblesses. Ces deux méthodes seront également comparées à une modélisation Plaxis 2D afin de déterminer si les mécanismes se développant dans le sol sont bien cohérents avec les deux méthodes décrites par la norme NF P 94 262.

Mots clés : Cône, Traction, Pieux

INTERACTION SOL-STRUCTURE SUR SOL GONFLANT : CAS DU RADIER DU SIEGE DES NATIONS UNIES A DIAMNIADIO-DAKAR

SOIL-STRUCTURE INTERACTION ON EXPANSIVE SOIL : CASE OF RAFT FOUNDATION AT THE UNITED NATIONS HEADQUARTERS IN DAKAR

Abdou Xaadir GAYE[1], Alexandre BEAUSSIER[2], Cyril BORELY[3],
[1] AGTS - SN, Dakar, Sénégal
[2] TERRASOL, Lyon, FRANCE
[3] TERRASOL, Paris, FRANCE

Résumé

Le pôle urbain de Diamniadio est en train d'être érigé sur des formations géologiques sujettes au phénomène du retrait-gonflement. Elles ont la particularité de causer des désordres structuraux sur les constructions lorsqu'aucune disposition particulière n'est prise. Les fondations sur radier sont posées généralement sur une couche de substitution accompagnée d'une batterie de dispositions constructives afin de maîtriser au mieux l'influence du climat sur les formations gonflantes.
La présente étude porte sur l'interaction radier - sol gonflant dans le cadre de la construction du siège de l'ONU, la prise en compte du phénomène de gonflement comme déformation imposée dans le dimensionnement du radier en l'occurrence. Il sera question d'abord d'apprécier l'évolution des paramètres de dimensionnement du radier dans le but qu'il soit en mesure d'absorber les effets dus à la déformation imposée du sol, laquelle est causée par le gonflement, puis de proposer une solution sécuritaire pour une fondation en radier.
La prise en compte du gonflement dans le dimensionnement du radier objet de l'étude, a entraîné une augmentation des sollicitations maximales (moments) de 12% à 20%. Dès lors, il s'en suit une augmentation du volume de béton et du poids des armatures respectivement de 16 et 20%. Toutefois l'augmentation des rotations relatives d'environ quatre fois plus qu'en absence de gonflement a fait que le radier ne pouvait directement se fonder sur le sol gonflant sans dispositions constructives. Par ailleurs, l'étude montre que cette approche approfondie, apporterait dans certains cas, une alternative aux coûts élevés des fondations sur sols gonflants.

Mots clés : fondations, sols gonflants, radier, dimensionnement, interaction sol-fondation

RETOUR D'EXPERIENCE SUR LE COMPORTEMENT THERMOMECANIQUE DES PIEUX ENERGETIQUES DANS DES CONDITIONS REELLES D'EXPLOITATION

ENERGY PILES BEHAVIOR IN REAL EXPLOITATION CONDITIONS

Roxana Vasilescu[1,3], Panagiotis Kotronis[1], Christophe Dano[2], Anne-Laure Fauchille[1], Philippe Gotteland[4].
[1] Ecole Centrale de Nantes, GeM- MEO, 1 rue de la Noë 44000 Nantes, France.
[2] Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38000 Grenoble, France.
[3] Entreprise PINTO, 48 Rue Jules Verne, 35300, Fougères.
[4] Fédération Nationale des Travaux Publics, 3 rue de Berri, 75008 Paris, France.

Résumé

Les pieux énergétiques représentent une solution alternative intéressante, face à l'accroissement des besoins mondiaux en énergie et à la réduction de l'utilisation des énergies fossiles. Les pieux géothermiques sont des fondations profondes à double fonction: elles reprennent les charges de la structure et sont des échangeurs thermiques. Pour profiter de l'énergie contenue dans le sol, les pieux sont équipés d'un système de tubes dans lequel la circulation (en circuit fermé) d'un fluide caloporteur permet l'échange thermique entre les pieux et le sol afin de chauffer ou refroidir le bâtiment selon la saison. Au fil des saisons, ces pieux sont soumis à des cycles de chauffage et de refroidissement entraînant respectivement des cycles de dilatation et de contraction, qui participent à l'augmentation de déplacements verticaux et la modification de la contrainte verticale dans les pieux, de la résistance du sol ou de manière plus générale à des modifications du comportement thermomécanique du sol. Afin de mieux comprendre l'influence de chargements thermiques cycliques sur le comportement des pieux et du sol alentour, une campagne expérimentale de mesures de déformation et température à l'échelle 1 a été réalisée sur des pieux instrumentés sous une station d'épuration(STEP) à Sept-Sorts (Seine-et-Marne, France). Pour ce projet 45 sur 100 pieux de fondations ont été équipes des réseaux géothermiques afin d'assurer 100% du besoin en chauffage et refroidissement du bâtiment des bureaux de la STEP (environ 350m2). L'évolution des déformations et des températures de trois pieux (deux pieux géothermiques et un pieu classique) ont été suivi pendant un an avant la mise en service de la pompe à chaleur et pendant plus de un an et demi après l'activation géothermique afin de quantifier l'impact de l'exploitation géothermique de la fondation. Les résultats montrent que les valeurs de déformation des pieux due à la géothermie ont le même ordre de grandeur que les valeurs de déformation due aux variations saisonnières de température dans le sol mais leur distribution est plus uniforme le long de la partie chauffe/refroidi du pieu. Ces déformations sont faibles mais non-négligeables et varient entre -50µm/m (compression) et 30µm/m (extension) dans la période étudiée.

Mots clés : Environnement, pieux énergétiques, In-situ, Chargements thermiques cycliques

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 3C

Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages 1

PRECISION DES RESULTATS DE L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE

PRECISION OF THE PRESSUREMETE RESULTS

Jacques MONNET[1]
[1] *Gaiatech, Seyssinet, France*

Résumé

Le développement de méthodes numériques et la nécessité de quantifier la précision des calculs obligent à préciser les erreurs admissibles sur les données de calcul et en particulier sur les paramètres issus de l'essai pressiomètrique (E_M, p_{LM}), utilisés pour la conception des fondations (AFNOR, 2013).

Dans cet article, on suppose que les données du pressiomètre suivent une répartition de Gauss avec une valeur moyenne et un écart type. Cette hypothèse est supportée par le fait que les mesures de pression et de volume sont parfois manuelles. La théorie des erreurs (GUM, 2008 ; Gachon, 1969 ; Rouaud, 2013) est utilisée et ses relations sont appliquées aux méthodes de détermination standardisées (AFNOR, 2015). Le calcul de l'erreur est finalement appliqué à une série de quatre essais au pressiomètre utilisés comme référence pour le projet national français ARSCOP (Jacquard, 2017). Les calculs sont basés sur les classes de précision fournies par la norme (AFNOR, 2015) et par les fabricants de matériel. Des conclusions sont tirées sur l'influence de chaque mesure individuelle (pression, volume, diamètre, longueur,…) sur la précision des corrections apportée à la pression et au volume, et finalement sur la précision des paramètres pressiomètrique qui sont le module pressiométrique E_M et la pression limite p_{LM} ce qui est d'un grand intérêt pour la précision du dimensionnement des ouvrages (AFNOR, 2013). Faute de budget et de temps l'étude de sensibilité des paramètres au bruit de chaque mesure, ainsi que l'influence de la qualité du forage n'ont pas été étudiées

Mots clés : Pressiomètre ; Incertitudes ; Module pressiomértrique ; Pression Limite

ESSAIS PRESSIOMETRIQUES CYCLIQUES AVEC MESURE DE LA PRESSION INTERSTITIELLE-APPLICATION A L'EVALUATION DE LIQUEFACTION DES SOLS

ESSAIS PRESSIOMETRIQUES CYCLIQUES AVEC MESURE DE LA PRESSION INTERSTITIELLE-APPLICATION A L'EVALUATION DE LIQUEFACTION DES SOLS

P.G. Karagiannopoulos[1,2], M. Peronne[1], P.Reiffsteck[2]
[1] Jean Lutz SA, Jurançon, 64110, France,
[2] 2Université Paris-Est, Institut Français de la science et de la technologie des transports (IFSTTAR), Marne La Vallée, 77447, France,

Résumé

Cette communication présente un programme des tests sur différents types des sols en utilisant une nouvelle sonde pressiométrique équipée avec un mini-capteur pour la mesure de la pression interstitielle du sol. Ce nouveau type de capteur est attaché soit directement sur le caoutchouc de la gaine soit sur les lamelles métalliques du tube fendu. Une grande série des tests cycliques montrent la relation entre l'augmentation résultante du volume et de la pression interstitielle. Ces résultats sont comparés avec ceux des essais classiques du laboratoire (triaxial,etc..). Une estimation de la relation entre le ratio cyclique de la contrainte appliquée pendant les tests et le nombre des cycles pour arriver à la rupture sont présentés et discutés dans cet article.

Mots clés : Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages, pressiomètre, pression interstitielle, liquéfaction des sols

MESURE DE LA PRESSION INTERSTITIELLE PENDANT L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE DANS UNE CHAMBRE D'ETALONNAGE-APPROCHE PHYSIQUE ET NUMERIQUE

MESURE OF THE PORE PRESSURE DURING THE PRESSUREMETER TEST IN A CALIBRATION CHAMBER-NUMERICAL AND PHYSICAL APPROACH

P.G. Karagiannopoulos[1],[2], M. Peronne[1], P.Reiffsteck[2]
[1] *Jean Lutz SA, Jurançon, 64110, France*
[2] *2Université Paris-Est, Institut Français de la science et de la technologie des transports (IFSTTAR), Marne La Vallée, 77447, France*

Résumé

Une chambre de calibrage a été développée chez JEANLUTSA afin de réaliser des essais pressiométriques dans un environnement bien contrôlé. La chambre dispose des capteurs de la pression interstitielle et de la pression totale installés dans l'échantillon autour de la sonde. De cette façon, les variations de la pression interstitielle et totale peuvent être enregistrées dans des différents points autour de la sonde. Cette communication présente les données expérimentales collectées des essais monotones et cycliques dans le sable d'Hostun. Ces résultats expérimentaux sont comparés avec des modélisations effectuées sur le logiciel des éléments finis César-LCPC et une méthode d'évaluation du potentiel de la liquéfaction des sols est proposée par les résultats des essais cycliques

Mots clés : Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages, chambre d'étalonnage, pressiomètre, pression interstitielle

ESSAIS PRESSIOMETRIQUES MENARD – REFLEXION SUR LES MATERIELS ET PROTOCOLES

MÉNARD PRESSUREMETER TESTS- DISCUSSIONS ON MATERIALS AND PROTOCOLS

Catherine JACQUARD[1], Michel RISPAL[1]
[1] *FONDASOL, Avignon, France*

Résumé

Sur la base des résultats d'une campagne d'essais réalisée par Fondasol dans le cadre du programme de recherche ARSCOP dans des formations sableuses moyennement denses à denses, l'article passe en revue l'ensemble des paramètres susceptibles d'influencer les valeurs des pressions limites et des modules pressiométriques Ménard obtenues. Le protocole B de la norme NF EN ISO 22 476-4 a été respecté, et tous les essais sont réalisés dans un préforage au tricône sous boue bentonitique, soit avec sonde nue équipée de gaines de différentes inerties, soit avec des tubes fendus de différentes géométries (sondes longues et courtes). On observe une dispersion sur les pressions limites que l'on attribue à l'hétérogénéité du sol ; en revanche, on observe des valeurs de modules pressiométriques mesurés au tube fendu 2 à 3 fois supérieurs à ceux mesurés avec les sondes nues. Une proposition de correction liée à la déformabilité de la sonde est alors discutée.

Mots clés : pressiomètre Ménard

ESSAIS PRESSIOMETRIQUES ET DIMENSIONNEMENT CYCLIQUE DES PIEUX : PREMIERS RESULTATS ET PERSPECTIVES

PRESSUREMETER TESTS AND CYCLIC PILE DESIGN: FIRST RESULTS AND PERSPECTIVES

Alexandre LOPES DOS SANTOS [1,2], Alain PUECH[2], Jean-Claude DUPLA[2] Jean CANOU[2]
[1] *Fugro France, Nanterre, France*
[2] *Laboratoire Navier Géotechnique*

Résumé

De considérables développements concernant la pratique de l'essai pressiométrique et l'utilisation de ses résultats pour le dimensionnement des ouvrages ont été réalisés dans le cadre du Projet National ARSCOP. L'amélioration de la qualité du matériel d'essai et le développement de protocoles adaptés ont permis de montrer que l'accès *in situ* au module de cisaillement G à faibles taux de déformations, dans les sols et les roches tendres, est possible.

L'obtention de ce paramètre est nécessaire pour le dimensionnement des pieux sous chargement cyclique. La sonde Monochambre Francis Cour®, décrite dans de récentes communications, est une sonde pressiométrique innovante offrant une précision de mesure améliorée. Elle permet d'accéder aux propriétés des géomatériaux dans le domaine des faibles déformations, usuellement réservé aux dilatomètres avec mesure ponctuelle de déformation, et le domaine des grandes déformations, comme les pressiomètres classiques. Les capacités de mesure de cette sonde ont été validées par des essais en conditions contrôlées en chambre d'étalonnage en laboratoire et à travers d'une campagne d'essais sur sites où les propriétés géotechniques ont été préalablement établies à partir d'essais géotechniques et de géophysique.

La communication porte plus particulièrement sur l'application de cette sonde à l'obtention de paramètres représentatifs pour la conception de fondations profondes soumises à une charge axiale cyclique. Des essais pressiométriques comportant plusieurs séries de cycles ont été réalisés sur des sites de référence où des essais de chargement cyclique de pieux à échelle réelle ont été antérieurement conduits dans le cadre du projet SOLCYP. Les résultats des premiers essais sont présentés et comparés à la réponse des pieux. Les effets du temps et du pré-cisaillement sont discutés. Un protocole d'essai adapté à la conception des pieux sous charges cycliques est suggéré, ainsi que les perspectives de recherche sur ce thème.

Mots clés : Chargement cyclique, essai pressiométrique, dimensionnement des pieux

ESSAI PRESSIOMETRIQUE ET RESISTANCE HYDRAULIQUE DES TUBULURES

PRESSUREMETER TEST AND HYDRAULIC RESISTANCE OF THE CONNECTING TUBES

Julien HABERT[1], Philippe REIFFSTECK[2], Jean-Pierre BAUD[3], Catherine JACQUARD[4], Michel RISPAL[4]
[1] *Terrasol, Paris, France*
[2] *IFSTTAR, Paris, France*
[3] *Eurogéo, Avrainville, France*
[4] *Fondasol, Avignon, France*

RÉSUMÉ – Le présent article aborde l'influence de la résistance hydraulique des tubulures sur l'évolution du volume de la sonde au cours de l'essai, qui perturbe aussi bien l'essai lui-même que la détermination préalable de la résistance propre de la sonde. Des principes de modélisation sont présentés pour tenir compte de ce phénomène, qui sont ensuite appliqués à un essai pressiométrique réel.

Mots clés : pressiométrique ; tubulures ; résistance hydraulique ; étalonnage

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 4A

Amélioration et renforcement des sols et des roches

TRAITEMENT ANTI-LIQUEFACTION PAR INJECTION SOLIDE REFOULANTE DANS DES DEPOTS DE LAGUNE

ANTI-LIQUEFACTION TREATMENT BY COMPACTION GROUTING IN COASTAL LAGOON DEPOSITS

Fanny MAUCOTEL[1], Julien DEVYNCK[1], François PLOUVIER[1], Killian COGHLAN[1]
[1] *MENARD, Orsay, France*

Résumé

Dans le cadre de la construction d'un projet immobilier situé au lieu-dit « Gustavia » sur la collectivité d'outre-mer de Saint-Barthélemy (aléa de sismicité fort, magnitude de 7.5), Menard a réalisé un traitement anti-liquéfaction sur l'ensemble du projet. A proximité immédiate du front de mer, le terrain est situé dans une ancienne zone de lagune comblée de nos jours. Le plan de prévention de la commune signale que cette zone présente un aléa liquéfaction. Ce dernier apparait sur une épaisseur de sol non négligeable. Pour pallier le risque de liquéfaction présent dans les dépôts de lagune sablo-argileux, Menard a proposé une solution d'amélioration de sols par injection solide refoulante (ISR). Cette technique a pour objectif principal de compacter le terrain latéralement par injection contrôlée d'un mortier sous pression. L'amélioration de sols par ISR permet d'atténuer le risque de liquéfaction via 3 principaux effets : revalorisation de la catégorie de sol, densification du sol et réduction des contraintes de cisaillement. Cet article s'est concentré sur l'effet de densification. Une campagne d'essais par pénétromètre dynamique avant et après traitement a été effectuée afin de justifier l'augmentation du niveau de sécurité par l'effet de densification (estimée de manière théorique dans le dimensionnement) vis-à-vis de la liquéfaction.

Mots clés : Amélioration et renforcement des sols et des roches, Injection Solide Refoulante, liquéfaction, densification, pénétromètre dynamique

UNE APPROCHE SIMPLIFIÉE POUR ESTIMER LA PORTANCE D'UNE SEMELLE SUR SOL RENFORCÉ PAR INCLUSIONS RIGIDES

A SIMPLIFIED APPROACH FOR ESTIMATING THE LOAD BEARING CAPACITY OF A FOOTING ON REINFORCED SOIL WITH INCLUSIONS

Nicolas FRATTINI[1], Fahd CUIRA[2]
[1] *Terrasol, Lyon, France*
[2] *Terrasol, Paris, France*

Résumé

Le dimensionnement de fondations sur inclusions rigides, de par la complexité des phénomènes mis en jeu (interaction sol-inclusion, répartition de la charge dans le sol et dans les inclusions, autorisation de déplacements irréversibles, etc…), fait souvent appel à des modélisations tridimensionnelles complexes. Néanmoins, le développement de ce type de fondations pour un nombre croissant de projets, d'envergure souvent modeste, nécessite d'établir une méthodologie de dimensionnement moins lourde en complexité et en temps.

Pour l'évaluation de la réduction des tassements par inclusions, les recommandations ASIRI proposent une méthode combinant l'étude d'une cellule élémentaire puis d'un modèle de sol homogénéisé. Néanmoins, aucune méthode d'ingénierie n'est proposée aujourd'hui pour les cas où les inclusions jouent un rôle dans la capacité portante de l'ouvrage, et pour lesquels il est nécessaire de vérifier la portance de la fondation tenant compte de la contribution résistante des inclusions.

Cet article présente un modèle simplifié dérivé de la méthode cinématique du calcul à la rupture et permettant d'approcher la limite de portance statique et sismique d'une fondation d'emprise limitée sur inclusions rigides. Dans le cas d'un sol non renforcé, les résultats obtenus sont très voisins de ceux issus des modèles analytiques présentés dans les Eurocodes 7 et 8. Dans le cas d'un sol renforcé par inclusions rigides, la mise en œuvre du modèle est illustrée à travers le cas de la fondation d'une pile de pont sur inclusions rigides pour laquelle des simulations numériques tridimensionnelles ont permis d'établir une estimation de la capacité portante de la fondation.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet national ASIRI+ qui vise à couvrir le dimensionnement des massifs renforcés par inclusions rigides lorsqu'ils sont soumis à des chargements plus complexes.

Mots clés : Inclusions rigides, diagramme de stabilité, portance sismique

LE PROJET ASIRI+ : AMELIORATION ET RENFORCEMENT DES SOLS PAR INCLUSIONS RIGIDES

THE ASIRI+ PROJECT: IMPROVEMENT AND RENFORCEMENT OF SOFT SOILS WITH RIGIDS INLUSIONS

Laurent BRIANÇON[1], Bruno SIMON[2], Luc THOREL[3]
[1] *Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, Villeurbanne, France*
[2] *TERRASOL, Paris, France*
[3] *GERS-GMG, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-44344 Bouguenais, France*

Résumé

En 2019 vient de démarrer le projet ASIRI+, en continuité du Projet National ASIRI (2005-2012), mais traitant de nouvelles problématiques qui n'avaient pas été abordées dans le précédent projet : mécanismes dans la plateforme de transfert de charge (avec ou non renforcement horizontal, en matériaux granulaire ou en sol traité), charge roulante, semelles, charges cycliques, sollicitations dynamiques et sismiques, impact environnemental.
Ce projet est structuré en 10 tâches dans lesquelles les sujets seront traités par des approches expérimentales in situ et en laboratoire associées à des modélisations numériques
Ce projet est financé par les cotisations des adhérents mais aussi une tâche est entièrement prise en charge par le projet FUI25 FEDRE traitant des fondations sous éoliennes et deux tâches seront traitées dans le cadre d'un projet de l'Agence Nationale de la recherche ANR ASIRIplus_SDS.
Une quarantaine de sociétés et d'organismes publics ont adhéré à ce projet. L'objectif de ce nouveau projet est de rédiger de nouvelles recommandations sur les sujets abordés.
Une communication détaillée de l'organisation et des objectifs d'ASIRI+ est présentée ici.

Mots clés : Amélioration des sols – Géosynthétiques – Inclusions rigides – Sollicitations dynamiques - Sollicitations sismiques

RENFORCEMENT DE SOL PAR INCLUSIONS RIGIDES SOUS RESERVOIRS D'HYDROCARBURES DE GRANDE HAUTEUR

SOIL REINFORCEMENT WITH RIGID INCLUSIONS UNDER HIGH OIL STORAGE TANK

Pascal SCHAUBER[1], Serge LAMBERT[2], Maxime MARTHE[3], Eric ANTOINET[4]

[12] Keller Fondations Spéciales, Strasbourg, France
[3] Antea Group, Lille, France,[4] Antea Group, Orléans, France

Résumé

Afin d'augmenter la capacité de stockages d'hydrocarbures, un renforcement de sol par inclusions rigides sous des réservoirs d'hydrocarbures de grande hauteur a été mis en œuvre dans la ville de Rotterdam (Pays-Bas). Le site d'installation, d'une taille d'environ 1100m de longueur sur 170m de largeur, présente 54 réservoirs d'une hauteur de 32m dont le diamètre varie de 14.2 à 44.7m. Le projet est très sensible en raison de la nature des ouvrages lourds, chargés à 320 kPa et reposant sur un sol hétérogène composé d'une formation de sable très dense comportant des lentilles d'argile très molle plus ou moins épaisses. Les enjeux ont été tout d'abord d'identifier ces hétérogénéités puis de les intégrer dans des modèles de calculs 3D pour ensuite définir les tassements absolus et différentiels. Le dimensionnement a été réalisés avec la méthode des éléments finis en considérant des modèles en 2D, confortés ensuite par des modèles en 3D. Suite à l'installation du renforcement de sol, des essais de chargement ont été réalisés sur des inclusions isolées avant la réalisation des tests d'étanchéité des réservoirs. Des modélisations aux éléments finis sont ainsi venus confirmer les résultats mesurés. Cet article aborde également les difficultés rencontrées sur le chantier, principalement liées au type d'outil utilisé pour réaliser les inclusions rigides et au sol rencontré.

Mots clés : Modélisation numérique, inclusions rigides, réservoirs d'hydrocarbures, sol hétérogène

APPLICATION DE LA CONSOLIDATION ATMOSPHERIQUE DANS LA VILLE DE MEXICO

VACUUM CONSOLIDATION IN MEXICO CITY.

Hamza MENACEUR[1], Jérôme RACINAIS[1], Cyril PLOMTEUX[1]
[1] Menard Group, 22 rue Jean Rostand, 91400 Orsay, France.

Résumé

Des travaux d'amélioration des sols par la technique de consolidation atmosphérique ont été envisagés dans le cadre de la construction d'un nouvel aéroport dans la ville de Texcoco, située à l'est de Mexico. Cette technique permet de créer une consolidation isotrope accélérée du sol compressible, qui élimine ou réduit le besoin de mise en place de remblais de préchargement temporaires pendant des durées importantes. Afin de tester l'efficacité in situ de cette technique, deux zones d'essai ont été réalisées pour comparer deux différents systèmes d'application de la pression atmosphérique, un avec le procédé Menard Vacuum, utilisé depuis la fin des années 80 pour des applications très variées, et l'autre avec le système Drain à Drain. Cet article présente le phasage des travaux et les résultats obtenus à partir de plusieurs instrumentations installées dans la zone d'essai Menard Vacuum. Le principe et les principaux résultats de la zone d'essai réalisée avec la méthode Drain à Drain seront également rappelés. Les résultats montrent que le procédé Menard Vacuum permet d'obtenir une meilleure efficacité.

Mots clés : Argile de Mexico ; consolidation atmosphérique ; drain ; préchargement ; zone d'essai instrumentée.

RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES RENFORCEMENTS DES LEVEES DE LOIRE EN DEEP SOIL MIXING : ADAPTATION DE FORMULATION DU MELANGE

DEEP SOIL MIXING FEEDBACK IN LOIRE LEVEES: ADAPTATION OF THE MIX FORMULATION

Lucile SAUSSAYE[1], Sébastien PATOUILLARD[2], Edouard DURAND[1], Clément AUGEARD[1], Loïc GERVAIS[2], Mathieu MONACO[2], Manuel SCHUHMACHER[2]
[1] Cerema, Blois, France
[2] DREAL Centre-Val de Loire, Orléans, France

Résumé

Les levées de la Loire moyenne assurent une protection contre l'inondation de la plaine alluviale en formant de grands systèmes d'endiguement totalisant près de 600 km d'ouvrages. Pour renforcer l'étanchéité d'une digue et de sa fondation, les techniques de mélange en place (*deep soil mixing*) sont désormais proposées. Elles consistent à désagréger le sol en place, le plus souvent à l'aide d'un outil de malaxage, et à y introduire un liant hydraulique afin d'en améliorer certaines caractéristiques. Ces techniques sont fondées sur un savoir-faire des entreprises plutôt que sur des normes techniques, nécessitant une réflexion préalable à la réalisation des écrans sur la formulation de mélange à adopter en fonction du site.

Depuis 2013, la DREAL Centre-Val de Loire a dirigé plusieurs chantiers utilisant des techniques de mélange en place par *deep soil mixing.* Ainsi, une vingtaine de kilomètres d'écrans ont été réalisés avec la technique de tranchée de sol mixé par voie sèche dont sept sur la levée d'Orléans. Le retour d'expérience a conduit à faire évoluer les approches de conception et de réalisation en exploitant au mieux la connaissance des sols.

Sur certains secteurs, la présence de matière organique a engendré des défauts localisés de prise. Plusieurs formulations chaux/ciment ont été testées en laboratoire puis sur le terrain afin de pallier à cette problématique. Les résultats de ces essais sont présentés dans cet article. Ils confirment une marge d'adaptation de la technique sur des sols de différentes natures et permettent d'ouvrir de nouvelles perspectives d'application de la technique pour restaurer l'étanchéité de digues anciennes en terre en fonction des types de sols rencontrés.

La zone test présentée ici fera l'objet d'un suivi in situ au cours des prochaines années afin de conforter les résultats obtenus à long terme.

Mots clés : géomatériaux, ouvrages hydrauliques, deep soil mixing, écran étanche, chaux vive

RENFORCEMENT D'UN REMBLAI AUTOROUTIER EN LIMITE DE STABILITE

SOIL REINFORCEMENT BY TRENCHMIX® AND CMC® RIGID INCLUSIONS UNDER AN EMBANKMENT AT THE SLOPE STABILITY LIMIT.

Laurent BRIANÇON[1], Fanny MAUCOTEL[2], François PLOUVIER[2], Jérôme RACINAIS[2], Hubert SCACHE[2] et Benjamin THOMAS[2].
[1] GEOMAS, INSA LYON, Villeurbanne, France
[2] MENARD, Nozay, France

Résumé
Dans le cadre de la construction de l'autoroute A304 reliant la France à la Belgique, un remblai a été mis en place sur un flanc de colline initialement en limite de stabilité. Une solution innovante a été proposée par la société Menard pour assurer la stabilité de ce remblai : elle consiste en la mise en œuvre de panneaux transversaux de soil mixing associés à des inclusions rigides. Les panneaux de TrenchMix de 6 m de profondeur permettent d'atteindre un coefficient de sécurité suffisant vis-à-vis des ruptures circulaires. Les inclusions rigides refoulantes de type CMC de 12 m de long et ancrées dans la marne saine permettent de décharger les panneaux de soil mixing assurant leur intégrité.
Pour s'assurer de l'efficacité de cette solution de renforcement de sol, il a été décidé d'instrumenter une section de remblai renforcé. Cette instrumentation a deux objectifs : vérifier l'efficacité de la solution à assurer la stabilité globale (et ce au fur et à mesure de la montée du remblai), valider les estimations des reports d'efforts dans les éléments structurels et confirmer leur intégrité.
L'instrumentation a consisté en la mise en place de capteurs de pression totale et des capteurs de tassement sur les têtes d'inclusions rigides, sur le sol et sur les parois de Trench Mix, un tassomètre magnétique en forage pour suivre le tassement du sol sur un profil vertical et trois inclinomètres installés en pied de talus pour s'assurer de la stabilité globale.
Cette instrumentation a fonctionné pendant la montée du remblai et l'auscultation géotechnique s'est prolongée pendant deux années. Les mesures ont mis en évidence un bon report de la charge vers les têtes d'inclusions, un tassement du sol maitrisé à la fin de la montée du remblai et une stabilité globale assurée par le renforcement de sol.

Mots clés : Remblai ; Stabilité ; Rupture circulaire ; CMC ; Trench Mix ; Instrumentation

REDUCTION DU RISQUE POTENTIEL DE LIQUEFACTION A L'AIDE D'UNE TECHNIQUE D'INJECTION

Mitigation of the liquefaction risk using grouted injection

Alexandre Hugon1, Erell Grimault1, Serge Lambert1.
1 Keller Fondations Spéciales

RÉSUMÉ

La réduction du risque potentiel de liquéfaction des sols en zone sismique est obtenue en général par l'utilisation de procédés qui permettent la densification des sols (vibrocompactage, colonnes ballastées, Compactage Horizontal Statique, …), le drainage (drains en gravier, colonnes ballastées) ou encore le caissonnage par jet-grouting ou Deep Soil Mixing. Cependant, parfois des contraintes strictes en terme d'environnement du chantier (emprise de chantier limitée, accès, bruit, vibration, voisinage, existants instables, etc…) ne permettent pas l'emploi de ces procédés courants. Un chantier en
2019 a été réalisé sur l'île de St Barthélemy pour mettre en oeuvre peut-être pour la première fois sur le territoire français, un procédé d'injection de coulis de ciment afin de supprimer tout risque de liquéfaction. La technique utilisée consiste à injecter un coulis par l'intermédiaire de tubes à manchettes scellés dans un coulis de gaine.
Ce procédé rentre dans la catégorie des améliorations de sol et est destiné dans le cas présent, à amener suffisamment de cohésion aux sables faiblement compacts pour éviter tout risque de liquéfaction sur les six premiers mètres du site. Cet article indique les paramètres à définir et à contrôler pour s'assurer de l'efficacité du procédé pour un traitement de la liquéfaction.

Mots clés : liquéfaction, injection

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 4B

Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages 2

DE L'IMPORTANCE DE PRESERVER LES BONNES CONDITIONS DE REALISATION DES ESSAIS DE LABORATOIRE

THE IMPORTANCE OF PRESERVING THE PROPER CONDITIONS FOR PERFORMING LABORATORY TESTS

Jean François SERRATRICE[1], Nathalie DUFOUR[1], Muriel GASC-BARBIER[1]
[1] Cerema, UMR 7329 GEOAZUR, Aix-en-Provence, France

Résumé

Afin de mieux garantir la qualité et la pertinence des résultats des essais de laboratoire, il convient d'en prescrire les meilleures conditions de réalisation. Si les références aux codes s'imposent, il est conseillé de ménager des délais appropriés et de promouvoir une exploitation optimale des échantillons, puis se mettre en capacité de pointer les écarts éventuels. Des illustrations sont présentées dans ce sens.

Mots clés : Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages – Essais en laboratoire – Reconnaissance des sites

MINE DES CAMOINS (MARSEILLE) – GESTION OPERATIONNELLE D'UNE MINE URBAINE A FAIBLE PROFONDEUR

CAMOINS MINE (MARSEILLE) – OPERATIONNAL MANAGEMENT OF A LOW DEPTH URBAN MINE

Laurence ARATHOON[1],
[1]*BRGM – DRP/DPSM – Unité Territoriale Après-Mine Sud, Gardanne, France*

Résumé

L'ancienne mine de soufre des Camoins est localisée dans un quartier résidentiel à l'Est de Marseille. Le Département Prévention et Sécurité Minière (DPSM) du BRGM est en charge de surveiller cette ancienne mine pour le compte de l'État (Ministère de la Transition Écologique et Solidaire - MTES). Ces visites réglementaires des installations de surveillance et des équipements de prévention des risques miniers gérés sont effectuées au titre de l'article L-174 1 à 4 du Code Minier.
La mine s'étale sous divers enjeux anthropiques situés à l'aplomb direct ou à proximité, tels que des habitations, des bâtiments annexes, et une voie publique. Indépendamment de la chaussée, neuf principaux enjeux exposés ont été répertoriés. Les aléas retenus au-dessus de la mine des Camoins sont l'aléa effondrement localisé par rupture de pilier ou rupture de toit sur une grande partie de la mine, ainsi que l'aléa effondrement en masse, localisé au Sud-Ouest du domaine minier et débordant sur la voirie.
Le protocole de surveillance de la mine repose sur des visites semestrielles par le fond pour suivre l'évolution des désordres et détecter d'éventuelles dégradations supplémentaires. A ces contrôles visuels sont associés des points de mesures de convergence manuelles et un relevé du niveau d'eau dans un secteur ennoyé. Les points de contrôle se répartissent sur 3 secteurs distincts de la mine dont l'état de stabilité est très variable.
En 2008, un comblement des vides sous l'emprise de la voirie a permis de sécuriser partiellement cette dernière. En 2016, une campagne de sondages et des travaux de comblement ont été menés au droit de plusieurs enjeux avec creusement d'un nouveau puits, mise en place de barrages et injection d'un béton fluide dans la cavité, non sans difficultés (pertes de coulis).
Ces travaux ont permis de réduire l'emprise des zones d'aléa effondrement généralisé et effondrement localisé et les secteurs à surveiller. Néanmoins, le soutènement mis en place lors des travaux pour sécuriser le parcours de visite présente ses limites compte-tenu des chutes de blocs au-dessus et au-dessous de celui-ci. Des perspectives de suivi instrumenté depuis le jour (sondages, caméra) sont à l'étude pour limiter les inspections par le fond dans les secteurs instables et inaccessibles.

Mots clés : Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages, mine, prévention, sécurité minière, enjeu

CARACTERISATION DES ALLUVIONS DE LA LOIRE ET CORRELATIONS SUR LE SITE DU NOUVEAU CHU DE NANTES.

CARACTERISATION OF DEPOSITS OF THE LOIRE AND CORRELATIONS ON THE SITE OF THE NEW HOSPITAL OF NANTES.

Olivier DAVID[1], Anne CHASSAING[1], Romain BRIELLES[1],
[1] FONDOUEST, Angers, France

Résumé

Le nouveau CHU de Nantes s'étendra en 2026 sur plus de 10 ha en plein cœur de l'Ile de Nantes, en lieu et place de l'actuel Marché d'Intérêt National.
Les campagnes de reconnaissances géotechniques réalisées depuis le lancement de l'opération ont comporté au total près d'une centaine de sondages pressiométriques, une cinquantaine de sondages carottés et autant d'essais CPT, des profils MASW, des essais Cross-hole ainsi que des essais d'identification et mécaniques en laboratoire.
A l'appui de cette importante base de données, cet article fait une présentation rapide de la lithologie du site et des données géomécaniques recueillies dans les faciès alluvionnaires et analyse plus particulièrement la relation entre :

- résultats pressiométriques et pénétrométriques,
- cohésion non drainée et résistance de pointe dans les argiles,
- angle de frottement effectif et essais in situ dans les sables,
- taux de consolidation, cohésions non drainée et effective et résistance de pointe,
- compressibilité œdométrique et teneur en eau,
- vitesse des ondes sismiques, module pressiométrique et valeurs pénétrométrique,
- module de déformation élastique pour différents taux de déformation et résultats des essais in situ et des essais à l'œdomètre.

Cette mise en perspective permet de préciser les corrélations entre les résultats d'essais et d'apprécier leur représentativité dans le contexte régional.

Mots clés : Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrage ; corrélations ; Nantes ; Alluvions ; Loire.

CARACTERISATION DU COMPORTEMENT EN MODE MIXTE DES FISSURES DE DESSICCATION PAR METHODE NON INVASIVE

BEHAVIOR IN MIXED MODE OF DESICCATION CRACKS BY NON INVASIVE METHOD

Stephen HEDAN[1], Valéry VALLE[2], Philippe COSENZA[1]
[1] *Université de Poitiers, IC2MP-HydrASA, CNRS UMR7285, ENSI Poitiers, France.*
[2] *Université de Poitiers, Institut PPRIME CNRS UPR 3346 Futuroscope Chasseneuil, France*

Résumé

La corrélation d'images numériques adaptée au milieu fracturé (H-DIC) a été mise en œuvre sur une série d'images enregistrant le front d'une galerie du laboratoire souterrain de Tournemire (IRSN, France) sur une période d'un an. L'analyse de ces images a permis de confirmer la présence de deux types de fissures parallèles et perpendiculaires à la stratification de la roche argileuse. L'algorithme utilisé et adapté au milieu fissuré permet de détecter automatiquement, sans intervention d'un utilisateur, si une fissure est présente en chaque pixel de l'image. De plus, cet outil permet d'extraire quantitativement et séparément l'ouverture locale et le glissement local entre les lèvres de la fissure. Cette étape a été répétée sur toutes les images de la période et les résultats ont été comparés à la température et l'humidité relative de la galerie. Les résultats montrent clairement que les amplitudes d'ouverture et de glissement sont du même ordre de grandeur (de l'ordre de 1mm). Après un cycle annuel d'analyse, les résultats montrent aussi que les fissures se referment complétement. Sur certaines d'entre elles, un phénomène d'hystérèse est observé entre les périodes de désaturation et de saturation du massif. Le comportement de ses fissures est principalement un mode mixte (ouverture + glissement) avec un mode d'ouverture prépondérant. Ces nouvelles grandeurs cinématiques permettent aussi d'accéder à la surface totale de fissures sur la zone d'intérêt et les résultats montrent que cette dernière n'est pas maximale lorsque le nombre de pixels fissurés est maximal.

Mots clés : Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages, fracturation ; mode mixte ; méthode optique, front rocheux

COMPARAISONS ET COUPLAGE DES MODULES DE DEFORMATION MESURES A L'AIDE DE PENETROMETRES DYNAMIQUES INSTRUMENTES

COMPARISONS AND COUPLING OF DEFORMATION MODULUS MEASURED WITH DYNAMIC INSTRUMENTED PENETROMETERS

Alexandre TEYSSIER[1], Catherine JACQUARD[1], Caroline FORESTTI OLIVEIRA[2], Quoc-Anh TRAN[2], Miguel-Angel BENZ-NAVARRETE[2]
[1] Fondasol, Avignon, France
[2] Sol Solution, Riom, France

Résumé

Dans cet article, nous présentons une étude comparative entre les mesures du module de déformation (E_{dP3}) réalisées à l'aide des pénétromètres dynamiques instrumentés - Panda 3® et Grizzly 3® - et le pressiomètre Menard. Ces valeurs sont également comparées avec celles obtenues par le biais des corrélations disponibles à partir des mesures au pénétromètre statique à pointe électrique CPT. Ces études sont effectuées sur la base des essais effectués sur plusieurs sites ayant des sols de nature différente, notamment un site constitué de sables fins dans le sud de la France. L'objectif principal est de confirmer la correspondance entre les mesures réalisées au pénétromètre Panda 3 et Grizzly 3 en termes de module avec celles issues de méthodes d'investigations traditionnelles. De plus, nous nous intéressons à l'évaluation de la pertinence du couplage entre les mesures obtenues en surface à l'aide des techniques Panda 3 et Grizzly 3 - ayant une forte résolution - et les mesures obtenues plus en profondeur à l'aide des techniques conventionnelles dont la résolution verticale des mesures est moins importante.

Mots clés : Module de déformation, Panda, Grizzly, Pénétromètre dynamique

DETERMINATION DE MODULES DE DEFORMATION AU COURS D'ESSAIS CLT

DETERMINATION OF DEFORMATION MODULUS DURING CLT TESTS

Alexandre TEYSSIER[1], Philippe REIFFSTECK[2], Michel RISPAL[1], Catherine JACQUARD[1]
[1] *Fondasol, Avignon, France*
[2] *IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France*

Résumé

L'application d'un chargement par paliers successifs au cours d'un essai de pénétration statique au piézocône, appelé Cone Loading Test (CLT), permet de construire la courbe de chargement / déchargement vertical du sol, impossible à obtenir avec d'autres techniques d'investigations in situ. Elle permet par la suite d'obtenir une estimation de modules de déformation sous la pointe, paramètre clé dans le dimensionnement d'ouvrages tels que les fondations. Dans cet article seront présentées, sur la base d'essais réalisés sur des remblais sableux, des estimations de modules obtenus par essais CLT comparés aux modules obtenus au moyen du pressiomètre Ménard, avec une application comparative sur des calculs de fondations.

Mots clés : CPTu, Cone loading test, module de déformation, pression interstitielle, tassement

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 4C

Matériaux et géomatériaux : caractérisation et modélisation 2

ESTIMATION DE LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS GROSSIERS À MATRICE

ESTIMATION OF THE SHEAR STRENGTH OF COARSE-GRAINED SOILS WITH MATRIX

N'guessan KOUAKOU[1,2], Olivier CUISINIER[1], Farimah MASROURI[1], Emmanuel LAVALLÉE[2], Tangi LE BORGNE[2]
[1] LEMTA (UMR 7563, Université de Lorraine – CNRS), Nancy, France
[2] Bouygues Travaux Publics, Guyancourt, France

Résumé

Les sols grossiers à matrice sont souvent utilisés dans la mise en place des remblais, digues, etc. La taille des grains constituant ces sols varie de quelques microns (particules argileuses) à plusieurs dizaines de centimètres (blocs rocheux). La présence de ces derniers constitue une problématique importante quant à la détermination du critère de rupture de ces matériaux par des essais dans les dispositifs usuels de laboratoire. En effet, la taille maximale des grains du sol est supérieure à la taille maximale admissible par ces dispositifs. Trois méthodes sont utilisées au laboratoire pour réduire la taille des grains de l'éprouvette à tester : l'écrêtement, la substitution et la granulométrie parallèle. Les résultats obtenus par Kouakou et al (2018) ont montré que la méthode de granulométrie parallèle permet d'estimer l'angle de frottement du matériau grossier initial. Cependant, sa cohésion est surestimée du fait de l'augmentation du pourcentage de fines (particules de taille inférieure à 0,08 mm) dans le matériau reconstitué. Cette étude se propose d'attribuer le pourcentage de fines du matériau initial au matériau reconstitué en vue d'une meilleure estimation de la cohésion du sol grossier initial. Pour ce faire, l'éprouvette à tester est reconstituée à partir de la méthode de granulométrie parallèle, mais les proportions des fractions constituant les 30% des grains les plus fins de l'éprouvette sont modifiées afin d'avoir le même pourcentage de fines que l'échantillon initial.
Le sol grossier support de cette étude est une grave naturelle de granulométrie 0-120 mm. À partir de ce sol, deux éprouvettes de granulométrie 0-30 et 0-15 mm sont reconstituées en utilisant la méthode décrite précédemment. Leurs critères de rupture sont déterminés puis comparés afin de déterminer l'effet de cette modification sur l'estimation de la cohésion et l'angle de frottement du sol grossier initial.

Mots clés : Matériaux et géomatériaux, sol grossier à matrice, granulométrie parallèle, angle de frottement, cohésion

EVALUATION DE LA PREDICTION DE LA CORUBE DE RETENTION PAR MACHINE LEARNING

EVALUATING THE PREDICTION OF THE WATER RETENTION CURVE BY MACHINE LEARNING

Adel ABDALAH[1]
[1]Université de Lorraine, LEMTA, CNRS UMR 7563, Nancy, F-54000, France

Résumé

La détermination des paramètres hydrodynamiques des sols non saturés (courbe de rétention de l'humidité et courbe de conductivité hydraulique) est requise pour la résolution de nombreux problèmes en Géotechnique et en Géotechnique de l'Environnement. Des essais de séchage ou d'humidification en laboratoire représentent le moyen le plus efficace pour cette détermination de manière directe (courbe de rétention) ou indirecte (conductivité hydraulique). Ces essais restent toutefois complexes, couteux et longs malgré les progrès réalisés depuis une trentaine d'années à la fois sur les méthodes expérimentales et les procédures d'interprétation. Les résultats de ces essais se limitent souvent à quelques points expérimentaux et il est en pratique, nécessaire de caler un modèle empirique ou semi-empirique pour pouvoir utiliser des courbes complètes pour des études de modélisation numérique. Plusieurs auteurs ont proposé des fonctions dites de pédo-transfert pour prédire les paramètres hydrodynamiques des sols non saturés à partir d'un certain nombre de paramètres physiques et géotechniques de base plus facilement accessibles tels que les résultats de l'analyse granulométrique (Arya & Paris, 1981 et Fredlund *et al.*, 2002 entre autres). Ces dernières années, les méthodes issues de l'intelligence artificielle et en particulier, du machine learning sont apparues comme des moyens puissants de prédiction dans différents domaines scientifiques et en particulier, pour différentes applications en géotechnique. La quantité et la qualité croissantes des données disponibles offrent de nouvelles possibilités pour traiter des problèmes complexes de classification et de régression. La base de données UNSODA (Leij *et al.*, 1996) est ici utilisée pour fournir des données mesurées de la courbe de rétention de l'humidité qui sont utilisées pour entraîner différents modèles d'apprentissage automatique. Certaines étapes importantes comme la préparation des données et la sélection des prédicteurs sont présentées et discutées et une évaluation des résultats des modèles sur les données permet de vérifier la cohérence des prédictions obtenues.

Mots clés : Matériaux et géomatériaux : caractérisation et modélisation, prédiction, régression, machine learning, courbe de rétention

STABILISATION DU GONFLEMENT D'UNE MONTMORILLONITE PAR L'UTILISATION D'α,ω–DIAMINOALCANES EN TANT QU'INHIBITEUR DE GONFLEMENT

MONTMORILLONITE SWELLING STABILIZATION USING α,ω– DIAMINOALKANES AS SWELLING INHIBITORS

Loren MASSON[1,2,3], Myriam DUC[1], Jeanne-Sylvine GUEDON[1], Ann BOURGES[4], Jean-Didier MERTZ[2,3], Emmanuel KEITA[5]

[1] GERS-SRO, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-77447 Marne-la-Vallée, France
[2] Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, Champs-sur-Marne, France
[3] Centre de Recherche sur la Conservation (CRC), MNHN-CNRS-MC, Paris, France
[4] C2RMF, Institut de Recherche Chimie Paris, Chimie ParisTech-CNRS UMR8247, Paris, France
[5] Lab Navier, Univ Gustave Eiffel, ENPC, CNRS, F-77447, Marne-la-Vallée, France

Résumé - Les travaux du Grand Paris permettant l'agrandissement du réseau ferroviaire francilien (travaux du Grand Paris) excavent de grandes quantités de terre contenant parfois des argiles sensibles aux variations d'humidité. Dans ce cas, leur valorisation par la construction en terre crue n'est envisageable qu'après stabilisation de ces minéraux argileux (diminution de leur affinité avec l'eau). En effet, ces argiles gonflent et se rétractent avec l'eau, créant à terme des pathologies (fissures, pertes de matière, desquamation) une fois la terre mise en œuvre. L'utilisation de tensioactifs modifiant l'affinité entre l'eau et l'argile est alors envisagée. L'effet de tensioactifs de la famille des diaminoalcanes (échangeurs cationiques) avec une longueur de chaîne carbonée variable (2 (DC2), 3 (DC3) et 8 (DC8) carbones) sur la prise en eau d'une argile montmorillonitique est testé à l'échelle macroscopique (éprouvettes argile-sable) et à l'échelle du feuillet (argile seule). Il apparaît que plus la longueur de la chaîne carbonée du tensioactif augmente et plus l'affinité entre l'argile et l'eau diminue, impliquant une diminution gonflement, que ce soit le gonflement cristallin ou le gonflement inter-agrégat/particules. En effet, des mesures gravimétriques de sorption d'eau (DVS) ont montré qu'avec le traitement la prise en eau à haute hygrométrie (90%) est divisée par deux avec le DC2 et par 3 avec le DC8. L'ajout de tensioactifs à la montmorillonite a également des impacts sur les propriétés mécaniques des éprouvettes avec une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de la longueur de la chaîne carbonée. Cette perte de propriétés mécaniques est due à l'augmentation de la porosité des éprouvettes après traitement (de 37,7% pour des éprouvettes non traitées à 38,3% pour des éprouvettes traitées au DC8), mais également à la modification microstructurale observable au MEBE suite à la perte de plasticité de la montmorillonite par la réduction des charges de surface après le traitement. Les diaminoalcanes sont bien efficaces sur la réduction du gonflement de la montmorillonite mais provoquent des effets secondaires indésirables. Une optimisation du traitement (quantité – taux de gonflement – propriétés mécaniques) est encore à réaliser.

Mots clés : Matériaux, Tensioactifs, Argile, Stabilisation, Diaminoalcanes

FISSURATION D'UNE ARGILE SOUS TRACTION INDIRECTE PAR FLEXION : ANALYSE PAR CORRELATION D'IMAGES

CRACKING PHENOMENON OF CLAYS UNDER INDIRECT TENSILE TEST BY BENDING: DIGITAL IMAGE CORRELATION ANALYSIS

Lamine IGHIL AMEUR[1], Mahdia HATTAB[2]
[1] *Cerema Normandie-Centre, Blois, France*
[2] *Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux – LEM3 (UMR 7239), Université de Lorraine, Metz, France*

Résumé

L'objectif de cette étude est de comprendre et tenter d'expliquer l'apparition et la propagation de la fissuration due à la dessiccation dans les sols argileux. Les fissures ont un impact important sur les paramètres physiques du sol et peuvent affecter sa stabilité. Plusieurs auteurs s'y sont intéressés en adoptant différentes approches notamment la traction par flexion (Ajaz and Parry, 1975b). L'investigation menée par Ighil Ameur (2016) tentait de caractériser une déformation critique à partir de laquelle l'amorçage de la fissuration se produit. Cela avait pour but d'identifier la résistance admissible du sol à la traction au-delà de laquelle il serait susceptible de se fissurer
Cette recherche présente un nouvel appareil développé pour tester la force de traction indirecte par flexion sur des poutrelles d'argile. L'objectif principal est d'analyser, par une approche expérimentale, l'impact de la succion initiale sur la force de traction et le phénomène de fissuration des échantillons de sols argileux non saturés. Une série d'essais de traction a été réalisée sur de petites poutrelles d'argile découpées dans le plan vertical et initialement soumises à différents niveaux de succion initiale (361 MPa, 110 MPa et 38 MPa). L'approche a d'abord consisté à étudier le comportement global en estimant la force de traction maximale F_{max} qui contrôle l'amorçage des fissures de traction. Le force F_{max} est obtenue entre 2,5 N et 3,6 N, elle varie différemment selon le niveau de la succion initiale imposée. Ensuite, à l'aide de la méthode de corrélation d'images numériques, la propagation des fissures a été suivie avec précision par le développement de déformations locales autour de la fissure et au niveau de la pointe de la fissure.

Mots clés : matériaux et géomatériaux, succion initiale, fissuration, traction par flexion, corrélation d'images

MODES DE LOCALISATION DE LA DEFORMATION DANS LES ROCHES CARBONATEES POREUSES

MODELLING THE FORMATION OF COMPACTION BANDS IN CARBONATE ROCKS

Youssouf ABDALLAH[1*], Jean SULEM[1], Michel BORNERT[1], Ioannis STEFANOU[1], Siavash GHABEZLOO[1]

[1] Laboratoire Navier, Ecole des Ponts ParisTech, Université Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée, France

Résumé - La déformation des roches sédimentaires peut donner lieu dans certains cas à la formation des bandes de compaction. Cette compaction localisée s'accompagne d'une forte réduction de porosité, ce qui peut avoir des conséquences importantes sur le rendement de différentes opérations sur les géo-systèmes. Contrairement aux grès, l'identification de ces bandes dans des échantillons des roches carbonatées testés au laboratoire présente un défi. Dans cette étude, la technique de corrélation d'images volumiques est appliquée sur des échantillons imagés aux rayons X sous différents niveaux de chargement. La procédure expérimentale a permis d'identifier les bandes de localisation de la déformation sur le calcaire de Saint-Maximin, sélectionnée dans cette étude pour sa haute porosité (38%). En se basant sur la cinématique de déformation, une méthode est proposée pour identifier la nature des bandes de localisation. D'autre part, les cartes de porosité 3D sont construites et superposées aux cartes de déformation afin de comprendre l'effet de l'hétérogénéité de la porosité sur le développement de ces bandes. Des bandes de compaction sont détectées sous chargement triaxial à des confinements relativement élevés, tandis que des bandes de cisaillement pur sont identifiées sous faibles confinements. On trouve que l'hétérogénéité de la porosité à l'échelle du centimètre contrôle l'orientation des bandes de compaction qui se développent essentiellement dans les zones les plus poreuses. Par contre, l'hétérogénéité de la porosité n'affecte que le comportement volumique local dans les bandes de cisaillement et pas leur orientation. En effet, ces bandes traversent les zones de haute et de faible porosité, s'accompagnant localement d'une compaction dans les zones de plus forte porosité et d'une dilatation dans les zones de plus faible porosité. Un phénomène d'écrasement granulaire est observé dans les zones les plus poreuses et une fissuration du ciment inter-granulaire a lieu dans les zones les plus denses. Macroscopiquement, un écrouissage est observé sous fort confinement et sous chargement isotrope, tandis qu'un comportement de radoucissement est observé sous faible confinement et un comportement élasto-plastique parfait est observé dans le régime transitoire. Un modèle élasto-plastique de type Cam-Clay Asymétrique (ACC), avec des lois d'écrouissage linéaires, est calé sur les données expérimentales et permet bien de représenter l'évolution de la surface de charge dans la phase plastique en considérant la déformation volumique plastique comme une variable interne d'écrouissage. De plus, les données expérimentales peuvent être utilisées pour caler

un modèle du type second-gradient afin de prédire la formation des bandes de compaction avec des épaisseurs finies.

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 5A

Ouvrages souterrains 2

METHODES 3D SIMPLIFIEES POUR EVALUER L'IMPACT DU BOULONNAGE AU FRONT : REX DU CHANTIER DE LA L11-GC03

SIMPLIFIED 3D METHODS TO EVALUATE THE IMPACT OF THE FACE BOLTING: BACK-ANALYSIS OF THE L11-GC03 METRO EXTENSION, PARIS

D. ZAPATA FRANCO[1], J-P. JANIN[1], C. DANO[1], H. LE BISSONNAIS[1], F. FALCONI[2], C. GERARDIN[3]
[1] *Terrasol, France*
[2] *Spie batignolles, Neuilly-sur-Seine, France*
[3] *RATP, Paris, France*

Résumé

Dans les années 1980, la technique du pré-soutènement au niveau du front de taille a été développée pour le creusement de tunnels dans des terrains difficiles. Aujourd'hui, la technique du boulonnage au front est très souvent employée pour le creusement de tunnels en méthode conventionnelle en site urbain, où les tassements doivent être maîtrisés. Pour évaluer l'effet du boulonnage sur les déplacements, la modélisation numérique 3D est la méthode qui permet de mieux prendre en compte le problème complexe qu'est le creusement d'un tunnel et de calculer les tassements engendrés dans le massif. Néanmoins, les modélisations numériques 3D nécessitent un temps de préparation et de calcul important.

Dans cet article, deux méthodes numériques 3D simplifiées, prenant en compte le boulonnage au front, sont présentées. Celles-ci ont été développées sur la base d'études en retro-analyse numérique sur les déplacements mesurés lors du creusement d'un tunnel faisant partie du prolongement de la ligne 11 du métro parisien (lot GC03). Le suivi du chantier et l'analyse des travaux réalisés et des mesures enregistrées in situ ont permis d'obtenir une base de données sur laquelle les études ont été réalisées. Les approches numériques développées se basent sur le concept des cuvettes instantanées longitudinales engendrées en surface par le creusement du tunnel. Elles permettent d'étudier l'apport du boulonnage en termes de stabilité au front, extrusion et tassements dans le massif, en réduisant significativement les temps de calcul par rapport à une modélisation 3D complète. Ce gain de temps rend ces approches particulièrement intéressantes en phase de conception et d'exécution et pour des calculs paramétriques.

Mots clés : Modélisation numérique - Tunnels urbain - Excavation en méthode traditionnelle - Boulonnage au front - Prévision des tassements

MODELISATION DES TUNNELS EXCAVES DANS LES TERRAINS FORTEMENT TECTONISES

MODELING OF TUNNELS EXCAVATED IN HIGHLY SQUEEZING GROUND

Yichun LIU[1], Jean SULEM[1], Didier SUBRIN[2], Huy TRAN-MANH[3], Emmanuel HUMBERT[4]
[1] Laboratoire Navier/CERMES, Ecole des Ponts ParisTech, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Marne-La-Vallée, France
[2] Centre d'études des tunnels, Bron, France
[3] Itasca Consultants SA, Ecully, France
[4] Tunnel Euralpin Lyon Turin, Le Bourget du Lac cedex, France

Résumé

Le projet de nouvelle liaison ferroviaire à grande vitesse Lyon-Turin qui permettra de relier France et Italie par un tunnel traversant les Alpes est un élément clé du nouveau réseau de transport trans-européen. Dans ce contexte, une descenderie (SMP2) a été excavée en méthode conventionnelle à Saint-Martin-la-Porte en France entre 2003 et 2010. Des difficultés d'exécution ont été rencontrées dans la formation du Houiller productif fortement tectonisé à 300 m de profondeur. Le Houiller productif se compose de grès, schistes noirs et veines de charbons, avec un degré de fracturation très élevé. En raison de ses faibles propriétés mécaniques, le terrain présente un comportement particulièrement poussant, caractérisé par des fortes déformations, différées et anisotropes autour du tunnel. Afin d'assurer la stabilité en paroi, un processus d'excavation en plusieurs phases associé à un reprofilage et un système de soutènement provisoire semi-rigide contenant des éléments de blocs compressibles a été adopté. Un programme intensif d'auscultation in-situ a été réalisé dans SMP2 pour suivre la réponse de terrain et du soutènement durant et après l'excavation. Récemment, une nouvelle galerie de reconnaissance (SMP4) a commencé à être excavée à Saint-Martin-la-Porte à 600 m de profondeur le long de l'axe du futur tunnel de base. Cette nouvelle galerie traverse les mêmes formations de Houiller productif que SMP2. Dans cet article, les analyses des données de terrain et la modélisation numérique de la réponse différée de SMP2 sont extrapolées et appliquées aux conditions rencontrées dans SMP4. La réponse à court terme peut être reproduite en tenant compte de la méthode d'excavation et du soutènement spécifique mis en place et des prédictions pour la réponse à long terme sont proposées.

Mots clés : Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages ; tunnels souterrains ; comportement poussant ; auscultation ; modélisation numérique

TUNNEL DE BASE DU LYON-TURIN – COMPORTEMENT POUSSANT DU HOUILLER PRODUCTIF

LYON-TORINO BASE TUNNEL – SQUEEZING BEHAVIOUR OF THE "HOUILLER PRODUCTIF"

Jean-Pierre JANIN[1] , Thomas ROSSI[1] , Angel SILVESTRE[2] , François LAIGLE[3]

[1] Setec Terrasol, Lyon, France
[2] Consultant, Valencia, Espagne
[3] EDF-CIH, Le Bourget du Lac, France

RÉSUMÉ

Le comportement fortement poussant des formations du Houiller Productif mis en évidence lors de l'excavation de la descenderie de Saint Martin la Porte (SMP1) a été de nouveau retrouvé lors du creusement à l'axe du Tube Sud du Tunnel de Base du Lyon-Turin (SMP4). L'analyse des auscultations a permis par le biais d'une rétro-analyse numérique d'approcher la réponse du massif rocheux en simulant le comportement diffèré de manière explicite.

Mots clés : Tunnel profond ; squeezing ; comportement différé

DIMENSIONNEMENT DES REVETEMENTS DE TUNNELS : REACTIONS HYPERSTATIQUES OU ELEMENTS FINIS ?

TUNNEL LINING DESIGN: HYPERSTATIC REACTIONS OR FINITE ELEMENTS?

Nicolas BERTHOZ[1], Sébastien BOUTEILLE[1], Wassim MOHAMAD[1], Didier SUBRIN[1]
[1] Centre d'Etudes des Tunnels (CETU), Bron, France

Résumé

Cet article compare deux méthodes de calcul des sollicitations dans les revêtements de tunnel : la méthode des réactions hyperstatiques (MRH), et la méthode des éléments finis (MEF). Conceptuellement, ces dernières sont différentes. Le calcul des sollicitations introduit dans le modèle MRH est basé sur un mécanisme de rupture, et les actions et réactions du sol sont découplées de manière artificielle. L'interaction entre le terrain et le revêtement est par contre modélisée de manière globale dans le calcul aux éléments finis, via une approche « en déformations ».
Les études paramétriques réalisées permettent d'illustrer les importances majeures du rapport entre les modules d'Young à court et long terme du terrain et du taux de déconfinement lors de la pose du soutènement sur les sollicitations calculées par la méthode des éléments finis (MEF). Dans le cas du calcul aux réactions hyperstatiques (MRH), la charge « active » verticale est le paramètre clé du problème : négliger les effets de voûte pour les faibles couvertures peut s'avérer très sécuritaire mais en tenir compte doit s'appuyer sur une analyse fine du contexte géologique et de l'agencement des terrains en voûte de l'ouvrage. A contrario, au-delà d'une profondeur H de l'ordre de 5.D, les sollicitations introduites dans le calcul MRH sont sous-estimées.
Moyennant un choix éclairé des paramètres, ces deux méthodes de calcul restent toutefois toutes deux dignes d'intérêt.

Mots clés : modélisation numérique ; tunnel ; revêtement ; réactions hyperstatiques ; éléments finis

IMPACT DES TUNNELIERS SUR DES FONDATIONS PROFONDES : MODÉLISATION NUMÉRIQUE 3D D'ESSAIS RÉALISÉS SUR MODÈLE RÉDUIT

IMPACT OF TUNNEL BORING MACHINES ON PILES: 3D NUMERICAL MODELLING OF TRIALS CARRIED OUT ON A REDUCED-SCALE MODEL

Agathe MICHALSKI[1], Nicolas BERTHOZ[1], Denis BRANQUE[2], Didier SUBRIN[1]
[1] Centre d'Études des Tunnels (CETU), Bron, France
[2] Université de Lyon, LTDS – UMR CNRS 5513, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE), Vaulx-en-Velin, France

Résumé

Un modèle numérique 3D consacré à l'étude et l'analyse de l'impact d'un tunnelier sur une fondation profonde est présenté. Celui-ci est construit et validé sur la base d'essais réalisés en laboratoire sur le modèle réduit de tunnelier à pression de terre de l'ENTPE (Bel, 2018). La procédure numérique de modélisation du creusement est calée sur les résultats expérimentaux obtenus en terrain vierge (sans pieu), puis la loi d'interface sol / pieu est calibrée grâce aux essais de fonçage des pieux réalisés sur ce même modèle réduit.
Les résultats du modèle numérique complet (interaction tunnelier / sol / pieu) sont confrontés aux résultats expérimentaux, tant en termes de déplacements du pieu, que d'efforts dans les pieux. Les résultats obtenus sont en assez bon accord. Pour un pieu ancré à hauteur du radier du tunnel, le passage du tunnelier génère des déplacements du sol dans la couverture pouvant conduire à l'apparition de frottement négatif le long du pieu, donc à une augmentation de l'effort axial dans celui-ci. Par ailleurs, le passage du tunnelier à proximité de la fondation génère des moments de flexion longitudinaux et transversaux dans le pieu d'amplitudes significatifs. Les moments longitudinaux sont directement fonction de la pression frontale exercée par le tunnelier : le modèle numérique présenté reproduit bien leur amplitude. Dans la direction transversale, les moments dépendent des conditions régnant autour de la jupe. Les conditions aux limites du modèle numérique, nécessaires pour reproduire les déplacements radiaux mesurés sur le modèle réduit, conduisent à des moments de flexion importants, supérieurs à ceux mesurés expérimentalement.

Mots clés : modélisation numérique ; tunnelier ; impact ; fondation profonde ; modèle réduit

EFFETS DE L'ISOTROPIE TRANSVERSE SUR LE COMPORTEMENT VOLUMIQUE THERMIQUE DE L'ARGILITE DU CALLOVO-OXFORDIEN

EFFECTS OF TRANSVERSE ISOTROPY ON THE THERMAL VOLUMETRIC BEHAVIOR OF THE CALLOVO-OXFORDIAN ARGILLITE

Philipp Braun[1], Pierre Delage[1], Siavash Ghabezloo[1], Jean Sulem[1], Nathalie Conil[2]

1 : Laboratoire Navier/CERMES, École des Ponts ParisTech (ENPC)
2 : ANDRA Meuse/Haute-Marne

Résumé

L'argilite du Callovo-Oxfordien (COx), roche hôte possible pour le stockage géologique profond des déchets à haute radioactivité en France, devrait être soumise à des températures pouvant atteindre 90°C produites par les déchets exothermiques. Pour mieux en comprendre la réponse volumique thermo-hydro-mécanique, des essais de chauffage drainés ont été réalisés sur échantillons sous conditions de contraintes effectives isotropes proches de celles in situ (10 MPa). Les déformations axiales et radiales étaient mesurées localement par jauges extensométriques collées parallèlement et perpendiculairement au litage. Une attention particulière a été accordée aux aspects anisotropes de la réponse volumique thermique.

On a observé une réponse volumique globale thermo-élasto-plastique, avec une phase thermo-élastique dilatante en dessous de 40 °C suivie d'une phase thermo-plastique contractante jusqu'à la température maximale appliquée de 90 °C, pour terminer par une phase de contraction thermo-élastique lors du refroidissement final. Cependant, les déformations radiales parallèles au litage lors du chauffage se sont révélées réversibles (thermo-élastiques), avec un coefficient de dilatation thermique linéaire proche de celui estimé par une moyenne pondérée en masse des coefficients de dilatation thermique des différents constituants de l'argilite (environ 42% de matrice argileuse illite/smectite, 25% de quartz et 30% de calcite).

La réponse volumique thermo-plastique est donc essentiellement due aux déformations perpendiculaires au litage, dans lesquelles interviennent les différentes couches d'eau adsorbée le long de la phase argileuse, soit au niveau intra-particulaire (avec deux couches d'eau le long des feuillets de smectites, Menaceur et al. 2016) ou au niveau inter-particulaire. L'irréversibilité des déformations serait ainsi due à l'expulsion irréversible, lors du chauffage, de certaines de ces molécules d'eau adsorbées.

Mots clés : Argilite ; Callovo ; Oxfordien ; déchets radioactifs ; stockage géologique ; température ; déformations thermiques

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 5B

Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages 3

FUSION DE DONNÉES GÉOTECHNIQUES ET GÉOPHYSIQUES POUR LA CARACTÉRISATION D'UN OUVRAGE HYDRAULIQUE

FUSION OF GEOTECHNICAL AND GEOPHYSICAL DATA FOR THE CHARACTERIZATION OF A HYDRAULIC STRUCTURE

Théo DEZERT[1,2], Yannick FARGIER[2,3], Sérgio PALMA LOPES[1], Philippe CÔTE[1]
1 IFSTTAR, GERS, GeoEND, 44344 Bouguenais, France
2 Cerema Direction territoriale Normandie-Centre, 41000 Blois, France
3 Univ Lyon, IFSTTAR, GERS, RRO, 69675 Bron, France

Résumé
En France, les digues de protection fluviales s'étendent sur plus de 8 600 km. Ces ouvrages sont très hétérogènes, de par leur mode de construction et leur historique (ruptures et réparations, rehausses…) ; leurs ruptures sont susceptibles de mener à des conséquences désastreuses telles que des pertes humaines et économiques. Des méthodologies reconnues pour l'évaluation des ouvrages hydrauliques incluant des méthodes de reconnaissance géotechniques et géophysiques peuvent être employées. Ces deux ensembles de méthodes sont complémentaires mais rarement combinés mathématiquement. Au mieux, les résultats de chacune des méthodes sont simplement superposés. Les méthodes géophysiques apportent une information physique sur de larges volumes de sols mais avec de potentielles incertitudes significatives. Il s'agit principalement de méthodes à grands rendements et non intrusives. Les incertitudes associées aux résultats sont notamment dues aux aspects indirects et intégrants des méthodes mais également à la résolution de problèmes inverses intrinsèquement mal posés. Enfin, les grandeurs physiques mesurées par les méthodes géophysiques ne rentrent pas dans les modèles de justification des ouvrages vis-à-vis des modes de rupture. Concernant les méthodes de reconnaissance géotechnique, elles sont intrusives et apportent une information plus ponctuelle spatialement, mais également plus précise et plus adaptée à l'analyse des modes de rupture. Etre capable de combiner les données acquises par les méthodes géophysiques et géotechniques, en tenant compte de leurs imperfections et distributions spatiales associées, est un enjeu essentiel pour l'évaluation des digues de protection. Nous proposons l'utilisation de modèles de fusion d'informations pour la combinaison de données issues de ces deux familles de méthodes de reconnaissance en retenant la théorie des masses de croyance. La méthodologie développée est détaillée et mise en oeuvre à partir de données expérimentales (Tomographie de Résistivité Électrique, pénétromètre, essais de granulométrie) acquises sur un véritable ouvrage hydraulique en terre. Cette méthodologie tient compte des particularités de chaque méthode de reconnaissance (niveau d'imperfection associé aux données, répartition spatiale de l'information) et permet l'amélioration de la caractérisation des ensembles lithologiques au sein des digues en renseignant sur le niveau de conflit entre les sources d'information et en proposant un indice de confiance associé aux résultats.

Mots clés : géophysique ; géotechnique ; fusion d'informations ; digues de protection

PREDICTION, SUIVI ET RETRO-CALCUL DES TASSEMENTS DE LA CENTRALE NUCLEAIRE DE BELLEVILLE

SETTLEMENT PREDICTION, MONITORING AND BACK-CALCULATION BELLEVILLE NUCLEAR POWER PLANT CASE HISTORY

Baptiste PELLETIER[1], Simon DEPINOIS[1]
[1] *EDF S.A. Service de Géologie & Géotechnique, Aix-en-Provence, France*

Résumé

Les centrales nucléaires sont des structures aux dimensions imposantes et fortement chargées, influençant un grand volume au sein du sol sur lequel elles sont fondées (les bâtiments principaux totalisent 260 000 t sur une surface de 1 ha). La majorité des 58 unités françaises sont construites sur des sols déformables, comme des alluvions ou des roches altérés. Il est nécessaire d'estimer correctement le comportement long terme des couches géologiques dans la mesure où l'ordre de grandeur des déplacements dépasse souvent la dizaine de centimètres. C'est pour cela que les tassements des ouvrages ont été largement étudiés avant les phases de construction, puis ont fait l'objet d'un suivi pendant le chargement et les dizaines d'années qui suivent. Le Service de Géologie & Géotechnique d'EDF S.A. possède la connaissance géologique des 20 sites nucléaires du parc français, depuis les études initiales dans les années 70 et 80 jusqu'aux travaux les plus récents. Cet article traite le cas du site de Belleville-sur-Loire : comparaisons entre les premières estimations et les tassements mesurés, modèles de calculs réalisés sur la base du suivi topographique et des nombreux essais de sol disponibles, calculs en retour et évaluations des tassements pour un projet neuf sur le même site.

Mots clés : Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages ; tassement ; auscultation ; radier ; modélisation

CORRELATIONS NOUVELLES ENTRE CPTU, PMT ET VBS POUR DONNER DE LA ROBUSTESSE AU MODELE GEOTECHNIQUE

NEW CORRELATIONS BETWEEN IN SITU TESTS LIKE CPTu, PMT AND BLUE METHYLENE VALUE TO GIVE ROBUSTNESS TO THE GEOTECHNICAL MODEL.

Matthias FERREIRA[1],
[1] *Directeur Grande Région Ouest, Hydrogéotechnique, Rouen, France*

RÉSUMÉ

Le pénétromètre statique est un outil très répandu dans le monde et riche d'une bibliographie importante. De nombreux auteurs ont travaillé sur des corrélations entre les résultats du CPTu et diverses caractéristiques géotechniques. Nous présentons ici une relation reliant le CPTu à la pression limite nette et à la VB_{0D} que nous confrontons dans un premier temps aux relations habituellement rencontrées dans la bibliographie, puis nous comparons celle-ci à une population de plus de 350 couples. Enfin, nous explicitons le lien avec la contrainte de pré-consolidation.

Mots clés : CPTu, pressiomètre, valeur au bleu, corrélation, contrainte de préconsolidation.

UNE NOUVELLE SONDE POUR DES ESSAIS D'EXPANSION EN FORAGE

A NEW PROBE FOR BOREHOLE EXPANSION TESTS

Théo BESSON[1,2], Catherine JACQUARD[1], Michel RISPAL[1], Philippe REIFFSTEICK[2], Fabien SZYMKIEVICZ[2],
[1] *Fondasol, Avignon, France*
[2] *Université Gustave Eiffel, Marne-la-Vallée, France*

Résumé

Cet article présente un nouvel outil de caractérisation des sols dont le but est de réaliser des essais d'expansion analogues à l'essai au pressiomètre Ménard. Inspiré des dilatomètres rigides de type Goodman ou Ettlinger, l'appareil consiste en deux coquilles rigides semi-cylindriques de 30 mm de large imbriquées dans un cylindre de 60 mm de diamètre. Piloté à vitesse d'expansion constante, l'appareil peut s'étendre jusqu'à une envergure de 90 mm, diamètre correspondant approximativement au doublement du volume initial de la cavité. Des tests préliminaires effectués dans un faux sol en polyuréthane permettent de comparer le prototype avec une sonde pressiométrique Ménard pilotée en pression ou en vitesse d'expansion. On observe des similitudes dans l'allure des courbes pression-déformation. Une chambre d'essai a été élaborée afin de reproduire cette étude comparative dans un sol sableux formé par compactage à l'aiguille vibrante. En faisant varier la durée d'application de l'aiguille, nous avons obtenu des sols de densité différente. Enfin, une étude numérique montre des similarités en termes de rigidité initiale entre la pénétration de poinçons semi-cylindriques et l'essai pressiométrique. Ainsi, cette communication pose les bases d'une étude comparative s'appuyant sur un modèle physique et des modèles numériques.

Mots clés : reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages; essais d'expansion en forage; module; chambre d'essai.

SUIVI A 10 ANS DU REMBLAI EXPERIMENTAL EN MATERIAUX TRAITES DE HERICOURT (FRANCE) : RESULTAT DU MONITORING

EXPERIMENTAL EMBANKMENT WITH TREATED SOIL IN HERICOURT (FRANCE) : 10 YEARS OF MONITORING AND RESULTS

Yasmina BOUSSAFIR[1], Dimitri MERCADIER[2], Katia BICALHO[3], Yu-Jun CUI[4]
[1] *GERS-SRO, Univ. Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-77447 Marne-la-Vallée, France*
[2] *Cerema Rouen – Centre d'Expérimentation et de Recherche – F-76121 Le Grand Quevilly cedex*
[3] *Universidade Federal do Espirito Santo - Departamento de Engenharia Civil - Centro Tecnológico, Vitoria, ES, Brasil*
[4] *Ecole des Ponts ParisTech – Laboratoire Navier/Cermes – F-77 455 Marne la Vallée*

Résumé

Le remblai expérimental de Héricourt a été construit en 2010 dans le cadre du projet ANR TerDOUEST. Ce remblai instrumenté et suivi depuis 10 ans devait permettre d'étudier la durabilité de matériaux traités en remblai d'infrastructure. Quatre modalités de traitement ont été testées : un limon A2 traité à 3% de chaux vive, le même limon traité à 3% de ciment CEMI, des argiles plastiques A3/A4 traitées à 4% de chaux vive et les mêmes argiles traitées à 2% de chaux + 3% de ciment.
L'ouvrage a été équipé de capteurs de succion et de teneur en eau volumique ce qui a permis de suivre les effets de l'environnement de Héricourt sur les différents sols en talus, sur la plateforme, en base et dans le cœur de l'ouvrage.
Les premiers résultats acquis ont montré que le climat de Héricourt n'est pas suffisamment intense pour désaturer le sol. Ces effets se caractérisent par une période de 3 mois de forte sollicitation en séchage durant l'été et une humidification le reste de l'année conservant le sol en talus dans un état quasi saturé. Les observations sur sondes TDR ont montré que les teneurs en eau volumiques des matériaux situés en cœur d'ouvrage évoluent modérément avec un décalage net dans le temps, signe que les infiltrations d'eau progressent vers le centre de l'ouvrage malgré les très faibles perméabilités. Les sondes en plate-forme montrent une évolution qui se manifeste après 2 années pratiquement sans infiltration dans le sol compacté.

L'intérêt d'un tel travail est de prouver qu'au bout de 10 années de suivi, le traitement de sol, y compris pour les matériaux argileux plastiques de type A3/A4 est une technique efficace pour assurer un réemploi durable en remblai de 5 mètres de hauteur. Ce travail a permis également de caractériser les effets du climat sur ces matériaux en remblai. À noter également le très bon retour d'expérience concernant l'utilisation de sondes Watermark et Thetaprobe sur de très longues durées.

Mots clés : Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages ; traitement de sol ; monitoring ; remblai ; interaction sol-climat

INSTRUMENTATION ET MODELISATION NUMERIQUE D'UN ESSAI DE CHARGEMENT STATIQUE REALISE SUR INCLUSION RIGIDE

INSTRUMENTATION AND NUMERICAL MODELLING OF A STATIC PILE LOAD TEST PERFORMED ON RIGID INCLUSION

Adnan SAHYOUNI[1,2], Laurent BRIANCON[2], Pierre BURTIN[1], Benoit QUANDALLE[1], Eric ANTOINET[3,] Charles PORQUET[4]
[1] *Menard, Chaponost, France*
[2] *Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, Villeurbanne, France*
[3] *Antea Group, Orléans, France*
[4] *Nordex, Paris, France*

Résumé

Les éoliennes terrestres ont une durée de vie comprise entre 20 et 25 ans et après cette durée la problématique de rééquipement du parc se pose donc à l'exploitant.
La technologie de l'éolien est en constante évolution. Aujourd'hui, la puissance du matériel a tendance à sensiblement augmenter, la hauteur de mât également. Ceci génère des efforts majorés à la base du mât. La semelle de fondation en béton armé n'est alors plus adaptée aux nouvelles sollicitations. La solution actuellement envisagée est de déconstruire complètement la semelle en béton armé pour en reconstruire une plus lourde. L'impact environnemental est ainsi important.
Le projet FUI25 FEDRE (Fondations d'Eoliennes Durables et REpowering) a pour objectif d'améliorer la compétitivité de la filière en optimisant les fondations des éoliennes et d'améliorer l'intégration de l'éolien dans le paysage énergétique français. Plusieurs pistes d'optimisation sont à ce stade envisagées pour les parcs éoliens à rééquiper afin de réutiliser les fondations existantes mais également pour les nouvelles fondations pour lesquelles une conception évolutive doit être envisagée.
Dans le cadre de ce projet, afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu dans la fondation, une éolienne construite sur sol renforcé par inclusions rigides de type CMC a été instrumentée de septembre à octobre 2019 sur le parc éolien de Ecoust-Saint-Mein dans le Pas de Calais. L'instrumentation consiste à mesurer le transfert de charge du mât de l'éolienne jusque dans le sol renforcé. La présente communication se focalisera sur le comportement du sol renforcé par inclusions rigides soumis aux sollicitations de l'éolienne. Dans ce but, deux essais de chargements statiques et cycliques ont été réalisés sur des colonnes isolées. Les mesures ont été comparées à des modélisations numériques sur PLAXIS.
Les résultats de ces analyses permettront de caler des modèles numériques qui serviront ensuite à simuler le comportement global du sol renforcé sous l'éolienne.
Les mesures de l'instrumentation de l'éolienne sont en cours, des analyses feront l'objet de communications à venir.

Mots clés : Eoliennes terrestres ; FEDRE ; Inclusions Rigides ; Instrumentation ; Modélisation numérique ; Essais de chargement.

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 5C

Modélisation numérique 1

MODELISATION DU BATTAGE DYNAMIQUE D'UN PENETROMETRE EN DIFFERENCES FINIES

FINITE DIFFERENCE MODELING OF DYNAMIQUE PENETROMETER DRIVING

Caroline FORESTTI OLIVEIRA[1,2], Pierre BREUL[1], Bastien CHEVALIER[1], Miguel Angel BENZ-NAVARRETE[2], Quoc-Anh TRAN[2], Claude BACCONNET[1]

[1]*Institut Pascal, Université Clermont-Auvergne, Clermont-Ferrand, France*
[2]*Sol Solution, Service Recherche et Innovation, Riom, France*

Résumé

L'essai au pénétromètre dynamique Panda 3® consiste à enfoncer par battage une tige munie d'une pointe conique dans le sol. Pour chaque impact, on mesure et découple les ondes se propageant dans les barres pendant l'enfoncement de la pointe. Cela permet d'obtenir une courbe de chargement dynamique en pointe (contrainte en fonction de l'enfoncement en pointe). Au-delà de la mesure de la résistance de pointe, l'exploitation de cette courbe pourrait permettre de caractériser le sol ausculté et déterminer certains de ses paramètres mécaniques.

C'est pourquoi, en vue de nous aider à exploiter la courbe de chargement, on souhaite mettre au point un modèle numérique en différences finies (code FLAC^{3D}) qualitativement et quantitativement représentatif de cet essai. La modélisation de la pénétration dynamique dans les sols reste un problème complexe (grande déformations, non-linéarité effort-déformation, phénomène transitoire…). Afin de mieux comprendre le phénomène nombreux travaux font appels à de modèles numériques continus (*e.g.* méthode aux différences finies, méthode aux différences finies). Toutefois, la plupart d'entre eux se focalisent sur le battage des pieux et pas sur l'essai au pénétromètre dynamique.

L'article présente la simulation de l'essai de pénétration dynamique au sein d'un matériau homogène. L'impact est simulé à l'aide de l'introduction d'une onde de contrainte sinusoidale à l'extrémité supérieur de la barre représentant la tige du pénétromètre, dont la géométrie a été simplifiée par des raisons numériques. Le massif de sol est modélisé suivant une loi élastoplastique parfaite associée à un critère de rupture de Mohr-Coulomb. Les résultats obtenus permettent d'une part d'obtenir des courbes charge-enfoncement numériques mesurées en pointe réalistes et d'autre part d'étudier l'influence de différents paramètres rhéologiques (module d'élasticité, cohésion et angle de frottement) sur l'allure des courbes charge-enfoncement.

Mots clés : Reconnaissance et auscultation des sites de des ouvrages ; Pénétromètre dynamique ; Différences finies ; Courbe charge enfoncement ; Paramètres rhéologiques du sol.

ÉVALUATION NUMERIQUE POUR PREDIRE L'EVOLUTION DU MODULE DE CISAILLEMENT ET DE L'AMORTISSEMENT DU SABLE ET SABLE CONSOLIDE DE LA REGION OUEST D'ALGER

NUMERICAL EVALUATION TO PREDICT THE EVOLUTION OF THE SHEAR MODULUS AND DAMPING OF CONSOLIDATED SAND AND SAND IN THE WESTERN REGION OF ALGIERS

Mohamed KHIATINE[1], Ramdane BAHAR[2]
[1] PhD, Département de Génie Civil, Université Yahia Fares de Médéa, Algérie; LEEGO, USTHB, Bab Ezzouar, Algiers, Algeria (khia.med@gmail.com).
[2] Professor, LEEGO, USTHB, Bab Ezzouar, Alger, Algérie (bahar_rm@yahoo.fr).

Résumé

Des progrès significatifs dans la dynamique des sols ont été réalisés au cours des dernières décennies, tant dans les études en laboratoire que dans les expériences sur le terrain. Ils ont permis de mieux comprendre le comportement des sols exposés à des charges cycliques, vibratoires, transitoires et dynamiques. Plus importants encore, ils ont fourni des techniques fiables pour mesurer les paramètres physiques qui sont essentiels pour les concepteurs de structures dans le calcul du comportement dynamique. En effet, les problèmes d'ingénierie géotechnique sismique nécessitent souvent la caractérisation des propriétés dynamiques des sols sur une large gamme de déformation intéressant les calculs de réponse dynamique des ouvrages de génie civil. La détermination des paramètres dynamiques, en particulier, le module du cisaillement G et d'amortissement D des sols et la connaissance de leurs évolutions des petites aux grandes déformations, et de leur variation suivant les chemins de contraintes deviennent donc des enjeux importants. Plusieurs courbes de dégradation du module de cisaillement $G(\gamma)/G_{max}$ et de l'évolution de l'amortissement $D(\gamma)$ en fonction de la distorsion sont proposées par différents auteurs pour les sols grenus et les sols fins. Les courbes de dégradation du module de cisaillement $G(\gamma)/G_{max}$ et de l'évolution de l'amortissement $D(\gamma)$ en fonction de la distorsion sont inexistantes pour les sols Algériens. Cette communication présente une analyse numérique pour évaluer la courbe de dégradation du module de cisaillement $G(\gamma)/G_{max}$ et l'augmentation de l'amortissement $D(\gamma)$ avec l'amplitude de déformation en cisaillement cyclique de la couche du sable et sable consolidé de la région de Zéralda, localisé à l'Ouest de la wilaya d'Alger, en utilisant des données résultant d'études géophysiques et géotechniques. Il s'agit de l'identification numérique de ces courbes en utilisant le code $FLAC^{2D}$. Le modèle élastique non linéaire proposé par Ramberg-Osgood et limitée par le critère de Mohr-coulomb est utilisée (Bagagli, Vincens et al. 2010). Les courbes empiriques données par Seed et Idriss (1970) pour les matériaux granulaires ont été utilisé pour calibrer les paramètres du modèle. Cette procédure peut constituer une approche préliminaire pour donner ces courbes ou servir de point de départ pour des situations où les mesures géotechniques sont insuffisantes.

Mots clés : Dégradation, Module de cisaillement, Évolution, Amortissement, Non linéaire.

APPLICATION DES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS A LA PREDICTION DES RESULTATS D'ESSAIS PRESSIOMETRIQUES.

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN PREDICTION OF PRESSUREMETER TEST RESULTS.

Soufyane AISSAOUI[1], Mohammed el Amin BOUROUIS[1], Abdeldjalil ZADJAOUI[1]
[1] Université Abou Bekr Belkaïd, Département de génie civil. 22 rue Abi Ayed BP 119 Tlemcen, Algérie.

Résumé

L'usage des techniques d'essais in situ est devenue systématique pour la plupart des ouvrages importants sur terre comme en mer dans le souci d'établir des règles de calcul fiables et économiques. L'essai pressiométrique est l'un des essais in-situ les plus utilisés dans le monde, il connaît, depuis sa mise au point en 1957, un essor considérable. Cet essai de reconnaissance du sol en place est associé à une méthode de calcul des fondations superficielles ou profondes. Il est utilisé pour évaluer la capacité portante des fondations et les tassements induits.

Le principe de l'essai consiste à dilater radialement, dans un forage réalisé au préalable, une sonde cylindrique et à mesurer la relation entre la pression appliquée sur le sol et le déplacement de la paroi de la sonde. Parmi les informations qui peuvent être déduites directement de cet essai, on note en particulier le module pressiométrique E_M, la pression limite P_L, et la pression de fluage P_f. Par contre, la détermination de ces paramètres nécessite une main d'œuvre qualifiée et un temps relativement important. Ceci se traduit généralement par un coût relativement excessif.

Cependant, certains chercheurs ont proposé des modèles d'estimation basant sur le réseau de neurones artificiels. Ce travail se veut comme une proposition d'un modèle de prédiction de ces paramètres pressiométriques sur la base d'une approche neuronale par exploitation d'une base de données enrichie de paramètres géotechniques facilement mesurables. Pour s'assurer de la fiabilité du modèle de prédiction choisi, les auteurs ont mené trois études en parallèles : régression simple, régression multiple et un réseau neurone artificiel multicouches. Les résultats montrent une bonne cohérence entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales ainsi le réseau neurone entrainé par l'algorithme One Step-Secant montre son apport de point de vue efficacité et rapidité. Les auteurs discutent également les avantages et les limites de cette contribution.

Mots clés : Modélisation numérique, Pressiomètre, Réseaux de Neurones Artificiels (RNA), analyse de régression, Prédiction.

COMPRESSION OEDOMETRIQUE D'UN MATERIAU GRANULAIRE: EVALUATION DES DIFFERENTES ENERGIES MISES EN JEU LORS DE LA RUPTURE A l'AIDE D'ELEMENTS DISCRETS

OEDOMETRIC COMPRESSION OF A GRANULAR MATERIAL: COMPUTATION OF ENERGIES INVOLVED DURING BREAKAGE WITH A DISCRETE ELEMENT MODELLING

François NADER[1], Claire SILVANI[1], Irini Djeran-Maigre[1]
1 Univ Lyon, INSA Lyon, GEOMAS, F-69621 Villeurbanne, France

Résumé

Les structures en enrochements sont parmi les ouvrages les plus usuels de génie civil (barrages, murs de soutènement). Des tassements importants peuvent apparaître tout au long de leur durée de vie et sont principalement dus à la rupture des blocs rocheux. Ce travail propose un modèle numérique permettant de simuler le comportement de matériaux granulaires présentant des ruptures de grains, en utilisant la méthode des éléments discrets, avec des méthodes de type "Non-Smooth Contact Dynamics". Un modèle de grain 3D est proposé afin de générer des blocs ayant des formes complexes. Le modèle est d'abord éprouvé lors de simulations d'écrasement de blocs cassables entre deux plaques puis testé lors de simulations de compression oedométrique d'enrochements. Des expérimentations numériques sont menées afin d'étudier les énergies mises en jeu dans ces essais lors de la rupture : énergie de redistribution et de création de surface. Une méthode est proposée afin d'estimer l'énergie de création de surface pour ce type de matériau. Les résultats sont proches des données de la littérature.

Mots clés : Modélisation numérique ; enrochements ; milieu granulaire ; éléments discrets ; rupture.

DISCUSSION SUR LA DEFINITION D'UN FACTEUR DE SECURITE PAR ELEMENTS FINIS, TRANSITION STATIQUE DYNAMIQUE

DISCUSSION ON THE DEFINITION OF A SAFETY FACTOR BY FINITE ELEMENTS, STATIC-DYNAMIC TRANSITION

Florent PRUNIER[1], Denis BRANQUE[2]
[1] *Laboratoire GEOMAS, Université de Lyon, INSA Lyon, Villeurbanne, France*
[2] *LTDS, Université de Lyon, ENTPE, Vaulx-en-Velin, France*

Résumé

Cet article propose une méthode pour décrire une rupture globale en géomécanique par la méthode des éléments finis. Lorsqu'on envisage une approche quasi statique, il est impossible de décrire correctement un état limite avant que la divergence numérique du calcul ne soit atteinte. L'idée principale de ce travail est d'utiliser une approche dynamique pour détecter la perte d'équilibre d'un problème quasi statique. Cependant, les événements qui se produisent après cet état de rupture ne sont pas pris en compte car la réponse de la géostructure n'est plus unique physiquement et mathématiquement. Le deuxième point développé dans cet article est la définition d'un facteur de sécurité approprié, qui peut être utile aux ingénieurs. Le critère de travail de second ordre sous des formes locales (problèmes homogènes) et globaux (problèmes de valeurs limites) est examiné pour déterminer les intérêts physiques et mathématiques de son utilisation. Des simulations par éléments finis sélectionnées sont présentées. La meilleure façon de définir un facteur de sécurité en utilisant de telles méthodes numériques est proposée.

Mots clés : Modélisation numérique, Stabilité des ouvrages, Transition statique dynamique, Facteur de sécurité, Travail du second ordre

EFFET DU CHOIX DE LA LOI D'ECROUISSAGE SUR L'ESTIMATION DES TASSEMENTS INDUITS PAR DES EXCAVATIONS PROFONDES

INFLUENCE OF THE HARDENING MODEL ON THE ESTIMATION OF SOIL SETTLEMENTS INDUCED BY DEEP EXCAVATIONS

Hiba EL ARJA[1], Emmanuel BOURGEOIS[1], Sébastien BURLON[2]
[1] Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-77454 Marne-la-Vallée, France
[2] TERRASOL, SETEC, Paris, France

Résumé

L'approche la plus simple pour modéliser le comportement des sols autour des excavations consiste à utiliser un modèle combinant une loi d'élasticité linéaire et un critère de rupture du type de celui de Mohr-Coulomb. Ce type de modèles surestime largement les déplacements verticaux derrière le soutènement. Il est donc nécessaire d'examiner comment on peut améliorer ces modèles. Une première possibilité consiste à opter pour une élasticité non linéaire en admettant que la plus grande partie du massif de sol n'atteint pas la rupture. L'autre possibilité consiste à considérer que, dans les cas des excavations, certaines zones du terrain derrière le soutènement entrent en plasticité dès les premières phases de l'excavation et que les tassements générés derrière le soutènement sont liés à des déformations plastiques significatives. De même, le sol au fond de fouille peut entrer dans le domaine plastique. Ces évolutions du comportement du sol pendant les phases de l'excavation donnent une importance particulière à la modélisation des déformations dans le domaine pré-rupture, et conduisent à préférer des modèles avec écrouissage. Dans cette communication, on se propose d'illustrer l'importance de la partie plastique dans les calculs des excavations profondes. Deux modèles de comportement élastoplastiques avec écrouissage sont étudiés : un premier modèle, appelé H1, dans lequel l'écrouissage est isotrope, et un deuxième modèle, H2, présentant une loi d'écrouissage cinématique non linéaire. Pour les deux modèles, une loi d'écoulement non-associée est adoptée. Le point clé de l'approche proposée est de combiner une loi d'écrouissage spécifique avec une règle d'écoulement conduisant à un comportement contractant du sol, de manière à limiter les soulèvements générés par le déchargement élastique pour bien estimer la cuvette de tassement en arrière de l'écran. Une analyse numérique d'un projet d'excavation dans les sables de Berlin est présentée. Elle montre que le modèle H1 permet d'obtenir une estimation réaliste des déplacements induits par les phases de l'excavation. L'écrouissage cinématique non linéaire proposé pour le modèle H2 donne des tassements et des déplacements horizontaux plus grands que le modèle H1. La variation de rigidité selon les chemins de contraintes introduit dans l'écrouissage cinématique non linéaire n'a qu'un effet limité sur les soulèvements au niveau du fond de fouille.

Mots clés : Modélisation numérique ; Ecrans de soutènement ; Modèle de comportement ; loi d'écrouissage ; Excavation profonde ; Cuvette de tassement

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 6B

Gestion des risques : aléas naturels, prévention et dispositif

APPLICATION DU MACHINE LEARNING A LA SURVEILLANCE MICROSISMIQUE D'OPERATIONS INDUSTRIELLES DU SOUS-SOL

MACHINE LEARNING APPLICATION TO THE MICROSEISMIC MONITORING OF UNDERGROUND INDUSTRIAL SITES

Jean-Bernard KAZMIERCZAK[1], Armand LIZEUR[2], Isabelle CONTRUCCI[2], Pascal BIGARRE[1]
[1] Ineris – Parc Technologique Alata – BP 2 – 60550 Verneuil-en-Halatte, France
[2] Ineris - Mines Nancy - Campus ARTEM - 92 rue du Sergent Blandan - BP 14234 - 54042 NANCY Cedex, France

Résumé

La surveillance microsismique est classiquement utilisée pour surveiller l'exploitation industrielle du sous-sol : mines, réservoirs, stockages géologiques, géothermie profonde entre autres. Dans certains cas, les anciennes exploitations souterraines font l'objet d'une activité microsismique résiduelle de long terme durant leur phase de post-exploitation, le temps nécessaire au sous-sol de retrouver un nouvel équilibre hydromécanique.
La surveillance microsismique est habituellement réalisée via l'enregistrement et l'analyse de signaux provenant de stations de surface ou en forages réparties autour de la zone d'intérêt à surveiller. Dans le cas de la surveillance d'anciennes mines, les signaux enregistrés peuvent bien évidemment être générés par l'endommagement et/ou la rupture d'une partie des ouvrages souterrains, mais également avoir pour origine des activités anthropiques de surface (travaux, bruits parasites divers, tirs) ou une origine naturelle (séismes naturels, orages et surtensions). Les signaux, issus de ces différents phénomènes, présentent des similarités et sont usuellement analysés dans un délai court par des opérateurs spécialistes, pour en déterminer l'origine (phase de qualification), les traiter (phase de traitement du signal et de calculs à la source) et ainsi aider l'expert à définir s'ils correspondent au déclenchement d'un évènement redouté. L'automatisation de la phase de qualification de données en quasi-temps réel et de manière fiable est donc un enjeu important.
Les méthodes d'apprentissage (Machine Learning) associées à l'Intelligence Artificielle sont bien adaptées pour réaliser de la classification automatique d'informations. On présente dans cet article l'étude d'évaluation de trois types de réseaux neuronaux (CNN, Inception et LSTM) de Machine Learning pour évaluer leur capacité à prédire, sans intervention humaine, 24h/24, l'origine des signaux microsismiques issus de travaux souterrains. Le cas d'application de l'ancien bassin minier de Gardanne, objet d'une microsismicité résiduelle de long terme, est utilisé car tout à fait représentatif de la surveillance d'opérations industrielles sismogéniques en milieu souterrain.

Mots clés : Gestion des risques : aléas naturels, prévention et dispositif ; Machine learning ; Intelligence Artificielle ; Microsismique ; Mine

EVALUATION PROSPECTIVE DES LOGEMENTS MENACES PAR LE RECUL DU TRAIT DE COTE EN FRANCE

PROSPECTIVE ASSESSMENT OF POTENTIAL HOUSING THREATENED BY SHORELINE EROSION IN FRANCE

François HEDOU[1], Boris LECLERC[1]
[1] Cerema, Brest, France

Résumé

Toutes les régions françaises sont concernées, à des degrés divers, par l'érosion littorale qui affecte près de la moitié des côtes sableuses françaises. Ce phénomène s'observe par le recul de la position du rivage et par la mise en œuvre d'ouvrages luttant contre les mouvements sédimentaires. Des bâtiments sont régulièrement atteints par la mer et de nombreux autres sont potentiellement exposés d'autant plus que la hausse du niveau marin induite par le dérèglement climatique pourrait aggraver les risques littoraux.

Les nouvelles connaissances homogènes sur l'ensemble des régions françaises (métropole et DROM) apportées par « l'indicateur national de l'érosion côtière » et par « la cartographie nationale des ouvrages et aménagements littoraux » (données téléchargeables sur Géolittoral) permettent d'envisager l'étude au niveau national des enjeux potentiellement atteints par le recul du trait de côte au cours de ce siècle. À la demande du MTES, le Cerema a projeté annuellement la position du trait de côte jusqu'en 2100 selon le taux d'évolution historique et selon une seconde hypothèse basée sur un recul généralisé. Des hypothèses sont également formulées sur le maintien ou non des ouvrages de protection. Les enjeux étudiés concernent actuellement les bâtiments et les logements. D'importants traitements géomatiques ont été nécessaires pour affecter les logements aux bâtiments de la Bd-Parcellaire IGN. La nouvelle base DV3F (demande de valeur foncière) a été exploitée pour la première fois au niveau national afin d'estimer la valeur des logements proches du littoral. Sous réserve des nombreuses limites méthodologiques de cet exercice, les résultats montrent qu'il existe globalement un facteur 10 entre le scénario le plus favorable et le plus défavorable avec des pertes cumulées de logements estimées entre 0,8 et 8 Mrd d'Euros à l'échéance 2100.

Mots clés : Gestion des risques, littoral, érosion, prospectif, logements

RETOUR D'EXPERIENCE APRES CHUTE DE BLOCS SUR INFRASTRUCTURES LINEAIRES – UN OUTIL DE CAPITALISATION POUR LES MAITRES D'OUVRAGES

FEEDBACKS POST ROCKFALL ON LINEAR INFRASTRUCTURE: A TOOL FOR ASSET MANAGERS

Belut Florence[1]*, Bérenger Nathalie[2], Colas Bastien[3], Lorentz Julien[4], Lescurier Anne[5], Le Bidan Valentin[6],...
[1] *SNCF Réseau, Paris, France*
[2] *Cerema, Aix-en-Provence, France*
[3] *BRGM, Montpellier, France*
[4] *Géolithe, Grenoble, France*
[5] *Conseil Départemental Savoie, Chambéry, France*
[6] *Conseil Départemental Isère, Grenoble, France*

Résumé

Dans le cadre du projet national C2ROP, engagé en 2015, un groupe de travail réunissant Maîtres d'Ouvrage, universitaires et bureaux d'études, a élaboré, sur la base d'éléments existants dans le domaine de la Sécurité Civile une méthodologie et un outil de capitalisation des retours d'expériences (REX) des événements de type chute de blocs et de leur impact sur les infrastructures linéaires telles que les routes et les voies ferrées. Il s'agit de favoriser le processus de REX et d'améliorer les pratiques dans la gestion du risque rocheux.
Les premières discussions ont montré que le contenu et l'intérêt des REX sont dépendants de la gravité et de la nouveauté de l'événement considéré. Ces contenus varient du plus simple (Niveau 1) au plus détaillé (Niveau 3). Afin de favoriser une homogénéité de traitement des événements, il est apparu nécessaire de trouver une méthode pour définir ce niveau. La définition de critères pour analyser ces événements et leurs conséquences, puis leur évaluation en termes de gravité les uns par rapport aux autres permettent, après pondérations, de déterminer ce niveau.
Cette méthodologie a ensuite été éprouvée à partir de retours d'expériences fournis par les Maitres d'Ouvrages soit une vingtaine de cas. Les tests ont permis de fixer les seuils de niveau de REX, en croisant la note obtenue avec le niveau ressenti de chaque MOA sur le REX fait (ou qui aurait pu l'être) pour les cas étudiés. De nouveaux tests ont réalisés ensuite pour consolider la méthode.
Trois niveaux de REX sont ainsi proposés selon l'ampleur de l'événement avec, pour chacun, un contenu adapté. Des fiches types avec un guide méthodologique sont en cours de finalisation pour aider les MOA à capitaliser leurs événements et à réaliser les retours d'expérience nécessaires à l'amélioration de la gestion du risque rocheux.
Cette méthode pourrait être étendue aux autres types de mouvements gravitaires touchant les infrastructures linéaires.

Mots clés : Gestion des risques, chute de blocs, retour d'expérience, infrastructures linéaires

DEUX EBOULEMENTS REMARQUABLES DANS LES GORGES DE L'ARLY (2014, 2019, SAVOIE, FRANCE)

TWO MAJOR ROCKFALLS IN GORGES DE L'ARLY (2014, 2019, SAVOIE, FRANCE)

Lionel LORIER[1]*, Anne LESCURIER[2], Alexandre MATHY[1], O. BRENGUIER[3], P. BOTTELIN[3]
[1] SAGE (Société Alpine de Géotechnique), Gières, France
[2] CD 73 (Conseil Départemental de la Savoie), Chambéry
[3] ADRGT (Association pour le Développement des Recherches sur les Glissements de Terrain), Gières, France

Résumé

Les gorges de l'Arly (RD1212) sont un accès critique pour un grand nombre de stations de ski Savoyardes, la vallée de Chamonix et au tunnel du Mont Blanc. L'itinéraire emprunte des gorges étroites et sinueuses qui sont le siège de nombreuses chutes de blocs et d'éboulements importants qui ont historiquement coupé la route pendant plusieurs mois. Du point de vue géologique, l'itinéaire recoupe des micaschistes extrêmement fracturés constitués par une alternance de bancs durs et de niveaux tendres plus déformables. Au sein des gorges, le site des Cliets est particulièrement actif, avec des phénomènes de fauchage de grande ampleur.

Ce site a connu deux crises majeures en 2014 et 2019, avec deux éboulements de 10 000 et 8 000 m3, respectivement. L'instrumentation géodésique déployée par la SAGE pour le compte du CD73 consistait en un suivi serré des déplacements de surface par théodolite automatique et extensomètres, avec un pas de temps ajustable. Les séries temporelles de mesure acquises sont de très bonne qualité et ont permis de montrer les points suivants :

- le massif rocheux montre des déplacements importants précurseurs à la rupture (> plusieurs dizaines de cm) vers l'aval et vers l'ouest. Ce comportement mécanique est en accord avec la géologie du site (micaschistes fracturés relativement ductiles) et le mécanisme de rupture (fauchage vers l'ouest/sud-ouest).
- l'interprétation des séries de déplacement par des géologues expérimentés a permis de distinguer la phase d'accélération terminale des accélérations ponctuelles précédentes. La date de rupture a pu être estimée via la méthode de Fukuzono et d'Azimi, ce qui a permis de prendre les décisions de fermeture de route respectivement 9 jours (2014) et 1 jour (2019) avant la rupture.

La RD1212 est actuellement fermée depuis ce nouvel éboulement avec un itinéraire de déviation mise en place par la route d'Héry. Une solution de tunnel court pour franchir la zone des Cliets est en cours de réalisation (L=240m) associé à un nouvel ouvrage de franchissement de l'Arly. La durée de fermeture prévisionnelle de la route est de 2 ans.

Mots clés : Gestion des risques, aléa naturel, éboulement, instrumentation, rupture

LA GESTION DES RISQUES, ATOUT MAJEUR DE LA CONCEPTION - CONSTRUCTION D'INFRASTRUCTURE

RISKS MANAGEMENT, THE MAIN COMPONENT FOR INFRASTRUCTURES DESIGN AND BUILT

Jacques ROBERT
ARCADIS, PARIS, France

Résumé

Les incertitudes résiduelles inévitables affectant la connaissance du contexte géotechnique et des avoisinants d'un projet nécessitent une bonne gestion des risques associés, gestion à mettre en place dès l'initialisation du projet. Elle sera partagée entre le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre au stade de la conception, puis avec l'entreprise lors de l'exécution des travaux.
Cette gestion des risques permet en premier lieu de finaliser pour le projet une conception robuste tenant compte des incertitudes restantes : elle ne doit surtout pas être utilisée pour une optimisation du projet au détriment d'une aggravation des incertitudes et des risques associés.
En phase réalisation, l'entreprise doit s'approprier cette gestion des risques mise en place afin que s'instaure un partenariat entre tous les acteurs de la construction, condition nécessaire à la réussite du projet en particulier sous l'angle sécurité des personnes, qualité, coût et délai de réalisation.
Une attention particulière doit être portée aux avoisinants car ils peuvent être à l'origine de nombreuses difficultés énergivores pouvant conduire à des dépassements de délai et de coût, tout en ternissant l'image du projet aux yeux des riverains. Pour cela, il est indispensable d'évaluer le potentiel d'endommagement de chaque avoisinant situé dans la ZIG du projet et d'adapter les dispositions constructives en fonction du risque de désordre accepté par le maître d'ouvrage.
Les trois axes d'amélioration à explorer pour cette gestion des risques concernent la qualité des investigations préalables permettant la réduction des incertitudes, les techniques de terrassement et de soutènement mises en œuvre permettant une adaptation si nécessaire sans bouleversement du marché, les techniques d'auscultation du terrain et des avoisinants afin de détecter au plus tôt tout écart de comportement par rapport aux prévisions permettant ainsi de mettre en œuvre si nécessaire les mesures correctives prédéfinies à temps.

Mots clés : risques, incertitudes, avoisinants, contractualisation, auscultations

CARACTERISATION GEOMECANIQUE D'UNE CARRIÈRE SOUTERRAINE ABANDONNEE PAR DES MESURES IN-SITU

GEOMECHANICAL CHARACTERISATION OF AN ABANDONED UNDERGROUND QUARRY USING IN-SITU MEASUREMENTS

Temenuga GEORGIEVA[1], Fanny DESCAMPS[1], Sara VANDYCKE[1], George AJDANLIJSKY[2], Jean-Pierre TSHIBANGU[1]
[1] Université de Mons, UMONS, Faculté Polytechnique, Mons, Belgique
[2] University of Mining and Geology « St. Ivan Rilski », Faculty of Geology, Sofia, Bulgaria

Résumé

Le site de la Malogne est une carrière souterraine abandonnée localisée au Bassin de Mons en Belgique, où les craies phosphatées ont été exploitées jusqu'en 1925. Le site couvre une surface de 76 ha et se trouve près d'infrastructures de surface, telle la ligne ferroviaire Paris-Bruxelles, l'autoroute R5 ainsi que diverses constructions civiles. Pendant et après son exploitation, plusieurs effondrements ont été enregistrés. Le dernier en 2015 avec une aire de 1.2 ha et d'une amplitude de 3 m a été relevé près de la ligne ferroviaire, et mettant en évidence le risque géotechnique potentiellement élevé.
La craie phosphate a été extraite à faible profondeur par méthode de chambres et piliers, car les dimensions et la disposition des piliers varie. Le niveau d'eau en souterrain varie avec les saisons, déterminant trois zones : sèche, transitionnelle et saturée. Les irrégularités géométriques, les conditions hydrogéologiques et l'historique de l'exploitation minière installent les conditions préalables à un risque d'instabilité accru, à la fois au niveau des cavités exploitées et en surface.
Afin d'établir l'état des cavités souterraines et pour qualifier le massif rocheux au sein desquelles elles ont été produites, les systèmes de classification RMR_{89} et le GSI ont été employés. A ces fins, des méthodes in-situ ont été implémentées, ce compris l'analyse structurale, le JRC (Joint Roughness Coefficient), le RQD (Rock Quality Designation) et le IRS (Intact Rock Strength). Les résultats mettent en évidence les différentes conditions hydrogéologiques dans la partie nord-ouest de la carrière.
Les données obtenues ont été utilisées pour évaluer la qualité géomécanique du massif. Du fait de la variété des conditions dans la carrière ainsi que de la qualité du massif, trois zones géomecaniques ont été identifiées sur la partie étudiée. La qualité varie de bon et moyen (typiquement dans la zone sèche) à médiocre (pour la zone de transition). L'approche utilisée donne une estimation pertinente des conditions sur le site de la carrière de la Malogne qui ont été confirmées par les observation in situ. Les résultats présentés pourraient être utilisés comme indicateurs pour préciser les zones d'aléas dans la carrière de la Malogne, ce qui permettrait de proposer des mesures préventives à envisager si nécessaire.

Mots clés : caractérisation et modélisation, géomécanique, qualités de rocher, risque géotechnique, mesures in-situ

GUIDE MÉTHODOLOGIQUE DE GESTION DU RISQUE CAVITÉS SOUTERRAINES SOUS INFRASTRUCTURES AUTOROUTIÈRES

RISK ASSESSMENT FOR UNDERGROUND CAVITIES BENEATH HIGHWAY INFRASTRUCTURE : A METHODOLOGICAL GUIDE

Elise TRIELLI[1], Nathalie BÉRENGER[2], Isabelle BERTOLUS[2], Céline BOURLIER[2], Raphaël BÉNOT[2], Véronique BERCHE[2], Charles KRÉZIAK[2], Cédric LEFÈBVRE[2], Aline LOMBARD[2], David MATHON[3], Emilie THIÉBAUD[4]

[1] *Direction générale de l'aviation civile, Aix-en-Provence, France*
[2] *Cerema, France*
[3] *Direction départementale des territoires 41, Blois, France*
[4] *Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement PACA, Marseille, France*

Résumé

L'apparition soudaine d'effondrement ou la découverte de cavités souterraines au droit des infrastructures autoroutières nécessitent des interventions en urgence pour d'une part, sécuriser les zones concernées et d'autre part, traiter les désordres et dommages. Les conséquences humaines, économiques et médiatiques associées à ces événements sont souvent importantes et peuvent engager la responsabilité des gestionnaires.

Un traitement curatif systématique de ces phénomènes étant rarement réalisable, le présent guide, publié à la demande de la Direction Générale des Infrastructures des Transports et de la Mer (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire), fournit aux gestionnaires d'autoroutes une méthodologie de mise en œuvre d'une politique préventive en phase d'exploitation.

Après une première partie consacrée aux cavités souterraines et aux enjeux associés à la gestion des risques mouvements de terrain induits au droit des infrastructures, le guide présente le déroulement d'une démarche préventive : il propose des critères de priorisation via la définition de niveaux d'aléa et de risque, ainsi que des mesures préventives associées à ces niveaux.

La gestion préventive ne garantissant cependant pas l'absence d'événements, des recommandations complémentaires, relatives à la définition par anticipation des mesures d'urgence à mettre en œuvre lors de l'apparition de désordres en surface, sont également fournies afin de garantir au mieux la sécurité des usagers et intervenants.

Enfin sont présentés quelques retours d'expériences et démarches préventives du risque d'apparition de cavités souterraines par des gestionnaires d'infrastructures.

Mots clés : Gestion des risques : aléas naturels, prévention et dispositif – cavités souterraines – infrastructures autoroutières – méthodologie – gestion préventive

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 6C

Écrans et ouvrages de soutènement

ALDILONDA : ANCRAGES PRECONTRAINTS SUR-MESURE POUR LA REALISATION D'UNE PASSERELLE SUSPENDUE AU-DESSUS DE L'EAU A BASTIA PAR NGE FONDATIONS

ALDILONDA: SUITABLE PRECONTRAINTS ANCHORAGE FOR SUSPENDED FOOTBRIDGE ABOVE THE SEA IN BASTIA

P.GIRARDI[1], A.HALARY[1], C.PERRUQUETTI[1], J.B GOUSSE [1]

[1]NGE FONDATIONS – Directeur Scientifique et Technique

Résumé

La réalisation d'une promenade sur la mer à Bastia, permettant de relier le Sud et le Nord de la ville, a nécessité la mise en œuvre de consoles en béton armé préfabriquées de portée 3 mètres, ancrées dans le rocher par des tirants précontraints de longueur pouvant aller jusqu'à 25 mètres.
Les contraintes environnementales et l'impossibilité d'accès par la mer ont rendu ce chantier très complexe pour réaliser des éléments structurels en suspension au-dessus de l'eau (450 ml de passerelle).
Les bureaux de méthode et le service matériel de NGE Fondations ont mis au point des outils spécifiques et des techniques innovantes pour la réalisation des ouvrages.

Mots clés : Ancrages ; Précontrainte ; Rocher ; Préfabrication ; Glissière

GRAND DEBLAI EN VERSANT INSTABLE – RECONSTRUCTION DU VIADUC DU CHARMAIX (73 MODANE)

HIGH EXCAVATION IN AN UNSTABLE SITE – THE NEW CHARMAIX VIADUCT (SAVOIE, FRANCE)

Bruno MAZARÉ[1], Nicolas MICHÉ[2] Jérôme PALISSE[1], Magali FRAYSSINES[3]

[1]EGIS GEOTECHNIQUE (STRUCTURE & ENVIRONNEMENT), Seyssins, France
[2]SFTRF, Modane, France
[3]Ex- EGIS GEOTECHNIQUE, Grenoble, France

Résumé

Le viaduc du Charmaix subit des efforts parasites liés à sa construction sur un versant instable. Ses fondations ayant fait l'objet d'une reprise en sous œuvre d'efficacité limitée dans le temps, SFTRF a engagé les études et travaux de construction d'un nouveau viaduc. L'article présente le contexte géotechnique du site, la conception des fondations et des murs de soutènement, les difficultés rencontrées lors des travaux et les moyens mis en œuvre pour les surmonter

Mots clés : Ouvrage, soutènement, versant, instabilité, surveillance

ENSEIGNEMENTS TIRES DE L'INSTRUMENTATION AVANCEE DE LA GARE DE FORT D'ISSY-VANVES-CLAMART

LESSONS LEARNED FROM THE ADVANCED INSTRUMENTATION OF THE FORT D'ISSY-VANVES-CLAMART METRO STATION

Khadija NEJJAR[1], Daniel DIAS[2], Gilles CHAPRON[1], Fahd CUIRA[1], Hervé LE BISSONNAIS[1]
[1] *Terrasol, Paris, France*
[2] *Laboratoire 3SR, Université de Grenoble Alpes, Grenoble, France*

Résumé

La gare de Fort d'Issy-Vanves-Clamart a fait l'objet d'une instrumentation avancée dans l'objectif d'étudier le comportement des soutènements d'excavations profondes. Les dispositifs mis en place comportent des inclinomètres, de la fibre optique, des jauges de déformations avec mesure de la température et des cellules de pression totale et interstitielle. Les mesures, réalisées régulièrement jusqu'à l'arrivée au fond de fouille (32 m de profondeur), ont permis de suivre l'évolution à la fois du déplacement horizontal, du profil du moment sur toute la hauteur de la paroi, des efforts dans les appuis et de la pression du sol de part et d'autre de l'écran.
L'analyse des mesures et leur confrontation avec les résultats des modélisations aux coefficients de réaction et aux éléments finis ont permis de tirer plusieurs enseignements. Moyennant un calage des paramètres, le déplacement de la paroi a été reproduit par les modélisations en termes d'allure et d'amplitude. Le moment maximal en ventre mesuré par la fibre est 33% plus faible que celui obtenu par les modélisations L'effet de la température sur les butons a été analysé à la lumière d'une méthodologie permettant d'intégrer l'effet de souplesse des extrémités du buton liés à la paroi. Les mesures ont permis de valider la méthodologie proposée. La redistribution des pressions derrière l'écran par effet de voûte a été mise en évidence par l'évolution des mesures des 4 cellules de pression disposées à l'interface sol/paroi. Enfin, le comportement de la couche d'Argile Plastique a été analysé à partir de l'évolution des mesures de la flèche et de la cellule de pression située au milieu de cette couche. La stabilisation de ces deux grandeurs avec le temps confirme la dissipation rapide des surpressions interstitielles et l'hypothèse de la prise en compte d'un comportement en conditions drainées de cette argile dans le cadre d'une excavation.
La confrontation des mesures avec les résultats des modélisations a permis de confirmer l'aptitude des deux méthodes à reproduire le déplacement et le moment de la paroi. Les efforts dans les appuis et la pression du sol sont mieux reproduits par la modélisation aux éléments finis, notamment pour les phases d'excavation profonde, grâce à une meilleure prise en compte des mécanismes de cisaillement horizontal dans le sol.

Mots clés : Ecrans et ouvrages de soutènement, Excavation profonde, Grand Paris, Instrumentation avancée, Rétro-analyse

TASSEMENTS DERRIERE UN ECRAN DE SOUTENEMENT : COMPARAISON ENTRE MESURES ET MODELES

SETTLEMENTS BEHIND A RETAINING WALL: COMPARISONS BETWEEN MEASUREMENTS AND MODELS

Tomasz DAKTERA[1,2], Emmanuel BOURGEOIS[2], Pierre SCHMITT[1],
Thierry JEANMAIRE[1], Nicolas UTTER[1], Philippe GOTTELAND[3]
[1] Soletanche Bachy, Rueil Malmaison, France
[2] COSYS-LISIS, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-77454 Marne-la-Vallée, France
[3] Fédération Nationale des Travaux Publics, Paris, France

Résumé

Les soutènements des gares de la Ligne 15 du Grand Paris Express permettent des excavations allant jusqu'à 30 m de profondeur. Les parois sont généralement soutenues par trois à quatre niveaux de butonnage. Les opérations de terrassement de l'intérieur des gares causent des déplacements horizontaux des parois ainsi que des tassements de surface, qui peuvent avoir un impact sur les ouvrages avoisinants pour les gares implantées dans des zones fortement urbanisées. On dispose de différentes techniques complémentaires et relativement classiques pour évaluer les déplacements horizontaux à l'aide d'instruments ou de cibles installés sur (ou dans) les parois ou les butons. En revanche, le suivi des déplacements verticaux du sol à l'arrière de l'écran est plus difficile car la surface du sol est souvent difficilement accessible et partiellement masquée en raison de l'exécution des travaux.
Cet article se concentre sur la construction de la gare Créteil L'Echat. Pour ce site, la profondeur d'excavation est de 28 m, la paroi moulée d'une épaisseur de 1.2 m est retenue par trois lits de butons métalliques. L'instrumentation suivante a été mise en place : des inclinomètres dans les parois moulées, des cibles topographiques sur les parois et des extensomètres à cordes vibrantes sur les butons. En complément, un inclinomètre horizontal de type Shape Accel Array (SAA) de 30m de long a été enterré dans une tranchée perpendiculaire à la paroi pour mesurer les tassements autour de la fouille dus aux terrassements. Cet article rappelle le principe de la mesure puis présente différents aspects de la mise en œuvre du SAA : son installation, les problématiques de chantier et le traitement des données. On présente également une comparaison des résultats avec deux approches de calcul : une méthode semi-empirique et des modélisations numériques par éléments finis.
Les premiers résultats obtenus montrent en particulier que la réalisation de modélisations aux éléments finis avec des modèles de sols avancés n'est pas la seule approche possible pour prévoir le tassement dû au terrassement derrière un écran de soutènement.

Mots clés : écrans de soutènement, instrumentations, Shape Accel Array, prévision de tassements, phases de terrassement

UNE ANALYSE COMPARATIVE DES REGLES DE JUSTIFICATION D'UNE PAROI CLOUEE SELON LA NORME NF P94-270

A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DESIGN RULES OF A NAILED SOIL ACCORDING TO THE FRENCH STANDARD – NF P94-270

Gilles VALDEYRON[1], Fahd CUIRA[2]
[1] *Cerema, Bordeaux, France*
[2] *Terrasol, Paris*

Résumé

La justification d'une paroi clouée se base traditionnellement sur l'exploration de surfaces de rupture circulaires ou en arcs de spirale pour lesquelles on examine la marge de sécurité disponible entre la résistance mobilisable et celle nécessaire à l'équilibre limite. La norme NF P94-270 de l'Eurocode 7 pour les massifs cloués et remblais renforcés, introduit un formalisme de justification distinguant explicitement trois mécanismes de ruine : instabilité par perte de résistance interne, instabilité par perte de résistance externe au massif et instabilité par perte de résistance mixte (correspondant au calcul traditionnel).

Cet article s'attache à mettre en évidence la continuité entre ces trois mécanismes de ruine à travers une analyse comparative réalisée dans le cadre du projet de révision de la norme actuelle. L'étude est menée à l'aide de la méthode cinématique du calcul à la rupture permettant d'explorer aisément des mécanismes comportant un, deux ou trois blocs en interaction. L'étude permet notamment d'établir, pour le cas d'une paroi clouée soutenant un terrain frottant, les seuils géomécaniques pour lesquels les mécanismes de stabilité externe ou interne deviennent dimensionnants par rapport à la vérification traditionnelle de stabilité mixte.

Ces résultats ont également pour vocation à éclairer l'application pratique des dispositions de la norme NF P94-270 pour la justification des massifs en sol cloué. À cette fin, des exemples d'abaques de stabilité qui permettent d'identifier les mécanismes dimensionnants sont proposées. Elles peuvent être utiles à l'ingénieur lors des phases de prédimensionnement et pourront être aisément complétées pour le dimensionnement au séisme des ouvrages.

Mots clés : Conception, réalisation et durabilité des ouvrages géotechniques – paroi clouée – stabilité – calcul à la rupture – Abaques de prédimensionnement

APPORT DE LA MODELISATION 3-D PAR ELEMENTS FINIS A L'ANALYSE D'ETANCHEITE D'UNE PAROI MOULEE

3-D FINITE ELEMENTS MODELING CONTRIBUTION TO EVALUATE THE PERMEABILITY OF A DIAPHRAGM CONCRETE

Nicolas BARRET[1], Thomas CAVALERA[2], Benoit PARIS[3]
[1] *Intera SAS, Lyon, France*
[2] *Intera SAS, Lyon, France*
[3] *Intera SAS, Lyon, France*

Résumé

Les défauts d'étanchéité de paroi moulée sont difficilement diagnostiqués par les méthodes d'interprétation classiques de tests hydrauliques, limitées à des géométries simplifiées, un milieu homogène, et des écoulements bidimensionnels. Cet article illustre l'apport de la modélisation hydrogéologique 3-D dans ce domaine à travers une étude portant sur les tests d'étanchéité de casiers expérimentaux construits à des fins de réhabilitation de sols contaminés. Quatre casiers étanches réalisés par parois moulées sont aménagés dans une zone industrielle contaminée à une dizaine de mètres de profondeur pour isoler le milieu testé du reste de l'aquifère. Des essais d'infiltration ont mis en évidence des défauts d'étanchéité sur deux ouvrages. INTERA a proposé d'analyser ces données de terrain à l'aide d'un modèle hydrogéologique 3-D utilisant la méthode des éléments finis. L'utilisation d'un modèle numérique 3-D permet en effet de prendre en charge des géométries complexes et de reproduire des écoulements tridimensionnels plus réalistes. Le maillage du modèle est discrétisé de façon à représenter les géométries pluri-métriques à pluri-centimétriques des ouvrages. La reproduction des tests sur les casiers étanches a permis de caler des valeurs de perméabilité des parois moulées, tandis que les résultats de simulation obtenus pour les casiers fuyards ont corroboré les hypothèses sur l'origine des fuites, à savoir un défaut d'ancrage dans le substratum. Pour conclure, la modélisation 3-D permet de modéliser des anomalies géométriques de conception (défaut d'ancrage, problème de brèche…) et constitue un guide à l'auscultation d'ouvrage hydraulique défectueux et/ou au dimensionnement d'essais de caractérisation hydraulique complémentaires.

Mots clés : Conception, réalisation et durabilité des ouvrages géotechniques ; modélisation 3-D ; hydrogéologie ; paroi moulée ; étanchéité

COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES MURS DE SOUTÈNEMENT T-WALL®

MECHANICAL BEHAVIOUR OF T-WALL® RETAINING WALL

Xuan-Phu NGUYEN[1], Marco CAMUSSO[1], Daniel BILLAUX[1], Yassin BENNANI-BRAOULI[2]
[1] *ITASCA Consultants S.A.S., Écully, France*
[2] *Terre Armée, Rueil Malmaison, France*

Résumé

L'interaction sol/structure dans les murs de soutènement de type T-Wall®, développés par Terre Armée, a été modélisée en utilisant le logiciel *FLAC3D*. Le mur se compose de différentes colonnes avoisinantes, constituées de la superposition de modules en béton en forme de « T ». Chaque module comporte une face rectangulaire permettant de retenir le sol et une poutre dentelée à l'arrière. L'interaction entre les modules est assurée par des clés de cisaillement placées dans des entailles de la poutre. Des plaques en néoprène sont placées entre les modules afin d'éviter le transfert d'efforts sur des clés de cisaillement. La construction du mur est réalisée par phases :

- pose d'un module de mur,
- remplissage de l'espace vide entre les colonnes du mur par un remblai granulaire compacté au rouleau compresseur,
- remplissage de l'espace derrière le mur par un remblai granulaire aléatoire.

Ces phases sont répétées jusqu'à atteindre la hauteur souhaitée. Plusieurs configurations sont possibles suivant les longueurs des poutres. Cet article présente quelques résultats pour la configuration dite standard, dans laquelle les longueurs des poutres diminuent avec la hauteur. L'objectif de l'étude étant d'optimiser la configuration des modules au vu des efforts développés dans le béton et la stabilité du système, la fondation et les remblais sont représentés par un modèle élastoplastique de type Mohr-Coulomb, les éléments en béton, par un modèle élastique, et les plaques en néoprène par des éléments d'interface. Les résultats montrent deux zones de cisaillement principales : une bande dans le remblai arrière, et une bande dans la fondation sous les faces des modules, due à la poussée horizontale du remblai. Cette poussée provoque également des contraintes de compression dans le béton à proximité des plaques en néoprène - les seuls points de contact entre modules, et des contraintes de traction à la jonction entre la face et la poutre, plus fortes pour les unités inferieures. Ces contraintes restent néanmoins dans une zone de fonctionnement admissible. Par ailleurs, l'étude a permis d'observer que les clés de cisaillement ne sont pas sollicitées, les déplacements horizontaux relatifs entre modules restant inférieurs au cm, et donc au jeu entre clés/module.

Mots clés : mur de soutènement, T-Wall, interaction sol-structure, FLAC3D

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session7A

Conception, réalisation et durabilité des ouvrages géotechniques 2

RETOURS D'EXPÉRIENCES ET RÉFLEXIONS SUR LA STABILISATION DE GRANDS GLISSEMENTS DE TERRAIN

FEEDBACK AND THOUGHTS ON THE STABILISATION OF LARGE LANDSLIDES

Jean-Pierre MAGNAN[1] et Dominique BATISTA[2]
[1] *Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France*
[2] *CEREMA Méditerranée, Aix-en-Provence, France*

Résumé

Les glissements de terrain de grande ampleur posent des problèmes difficiles. Leur confortement mécanique nécessite des efforts stabilisateurs extrêmement importants qui sont souvent hors de portée des techniques de confortement usuelles (clouage, tirant, berlinoise de pieux ou barrettes …) ou des capacités de financement des travaux (coût des travaux souvent prohibitifs par rapport aux enjeux)
L'article présente deux exemples de stabilisation de glissements de 0,3 à 0,5 millions de mètres cubes. La stabilisation a été obtenue par des rangées de pieux et de barrettes dimensionnées pour apporter un gain de 10% environ sur la stabilité. Dans les deux cas, les travaux ont été efficaces et les mesures valident les choix faits.
La stratégie appliquée dans ces deux cas, développée conjointement par le Cerema et l'Iffstar (Université Gustave Eiffel), s'appuie sur :

- l'expérience de dizaines d'années de stabilisation de pentes et glissements de terrains, qui a conclu que, suivant la technique de stabilisation utilisée, une augmentation de 10 à 30% de la stabilité par rapport aux conditions de rupture suffit à assurer une stabilité durable, ;
- l'utilisation systématique de mesures piézométriques et inclinométriques pour fiabiliser le modèle géotechnique et le calage géotechnique ;
- la focalisation de la stabilisation sur une partie du volume en glissement au lieu d'essayer d'améliorer l'ensemble du versant. Cette stratégie permet de limiter substantiellement les ouvrages de stabilisation nécessaires.

Les deux cas rapportés concernent la stabilisation d'un glissement de terrain de 21 m de profondeur (glissement de Terre Rouge-Verdun sur l'île Maurice) par une double rangée de pieux et la stabilisation du glissement des Pégons/Borne Romaine sur l'autoroute A8 par une paroi moscovite ancrée. Dans ce dernier cas, l'instrumentation mise en œuvre valide l'efficacité du confortement, qui visait un gain de stabilité pourtant inférieur à 10%. Les efforts dans les renforcements mesurés restent modestes et correspondent in fine à la mise en équilibre du système pour une approche de stabilité des pentes (stabilité mixte). A contrario, les efforts mesurés notamment dans les tirants sont beaucoup plus faibles que ceux évalués par une approche de type stabilité interne (au sens de la NF P 94-270).

Mots clés : Conception des ouvrages géotechniques. Gestion des risques. Stabilisation des glissements de terrain. Pieux. Paroi moscovite ancrée.

VALORISATION DE LA PAROI AU COULIS PROVISOIRE DE LA PART DIEU CINQUANTE ANS APRES SA CONSTRUCTION

VALUATION OF THE DIAPHRAGM WALL OF THE PART DIEU FIFTY YEARS AFTER ITS CONSTRUCTION

P. CAZES[1]*, R. KASTNER[2], C. JUSTINO[3], L. BRIANÇON [2], C. POINCLOU[4]

[1] Antea Group, Rillieux la Pape, France
[2] Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, Villeurbanne, France
[3] Soletanche Bachy France, Rueil Malmaison, France
[4] Antea Group, Orléans, France

Résumé

Construite en 1973, l'enceinte générale de la Part Dieu est une paroi au coulis qui a permis la réalisation des trémies Bonnel, tunnel Bonnel/Servient, trémie Servient, les infrastructures du centre commercial de la Part Dieu et de la station de métro. Cet ouvrage s'inscrivait dans le cadre d'une mutualisation des besoins en termes de rabattement de nappe entre ces différents ouvrages. A usage provisoire, son utilisation fut limitée dans le temps et son existence fut partiellement oublié.
Réalisé par SOLETANCHE BACHY, le voile d'étanchéité constitué en bentonite ciment dit « plastique » présentait alors un périmètre de 980 m, recoupait les alluvions du Rhône sur environ 15 m et s'ancrait dans la molasse sur 3 m. Il permettait un rabattement jusqu'à 8,5 m pour des débits de pompage de l'ordre de 1000 m^3/h.
Lors de l'exhaure de cette fouille, exceptionnelle à Lyon à cette époque, la SEMALY confia à l'INSA la mesure et le suivi des débits de pompage en relation avec l'évolution des rabattements. L'analyse de ces résultats a permis notamment une première évaluation de la perméabilité en grand du substratum molassique. Sur cette base et sur les nouveaux prélèvements, repérages, pompages d'essais et caractérisation en laboratoire menés en 2018, il a été possible d'évaluer l'évolution de l'ouvrage après 45 ans afin de lui envisager une nouvelle vie.
Aujourd'hui, cet ouvrage a pu être valorisé une nouvelle fois dans le cadre de la construction de l'extension du centre commercial Part Dieu avec un niveau d'efficacité tout à fait satisfaisant.

Mots clés : Durabilité des ouvrages - Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages – Paroi au coulis

COMPLEXITE GEOTECHNIQUE D'UN KARST SOUS-COUVERTURE : ETUDE D'UN PROJET DE NOUVEAU PONT SUR LA LOIRE

GEOTECHNICAL ENGINEERING OF COVERED KARST TERRAINS : CASE STUDY OF A BRIDGE PROJECT ACROSS THE LOIRE RIVER

Gildas NOURY[1*], Damien SALQUEBRE[1], Thomas JACOB[1], Jean-Michel BALTASSAT[1], Soraya BOULARAS[1], Etienne BUSCARLET[1], Nicolas COPPO[1], Pauline KESSOURI[1].

[1] Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Orléans, France

Résumé

Dans le cadre d'un projet de construction d'un nouveau pont sur la Loire, le BRGM évalue les risques géotechniques liés au karst sous-couverture alluviale marquant à cet endroit le calcaire de Beauce. Avec cette configuration géologique, le projet est confronté à deux aléas géologiques principaux : 1) des effondrements/affaissements de terrain peuvent atteindre la surface ; 2) les circulations d'eaux dans le réseau karstique peuvent être perturbées, soit par de tels mouvements de terrain, s'ils se produisent, soit par d'éventuels comblements, s'ils ne sont pas maitrisés.

Après avoir synthétisé les études préexistantes, le BRGM a complété et précisé l'analyse, en approfondissant, d'une part, la collecte documentaire initiale, et, en réalisant, d'autre part, de nouvelles investigations sur le terrain. La zone d'influence géotechnique du projet allant potentiellement bien au-delà de son simple tracé, ces recherches ont inclus l'ensemble des connaissances acquises sur le karst de l'orléanais, avant de se recentrer sur un secteur d'une trentaine d'hectares situé en rive gauche de la Loire. Elles intègrent les investigations réalisées précédemment et comprennent, actuellement, en-sus : un historique détaillé, un lever de terrain (ancienne gravière marquée par des fontis), des mesures microgravimétriques, deux nouveaux profils électriques, une centaine d'essais de pénétration statique, une dizaine de sondages destructifs pour la reconnaissance de vides et des inspections en forage. D'autres mesures sont prochainement prévues : elles viseront à préciser la connaissance du fonctionnement hydrogéologique du secteur.

Mots clés : zone d'influence géotechnique ; calcaire ; alluvions ; Loire ; karst ; cavité ; effondrement ; lever terrain ; géophysique ; sondage ; CPT ; pont

LES SEDIMENTS FLUVIAUX DE L'USUMACINTA ET LEUR VALORISATION

USUMASINTA'S FLUVIAL SEDIMENTS AND THEIR VALORIZATION

Irini DJERAN-MAIGRE[1], Daniel LEVACHER[2], Andry-Rico RAZAKAMANANTSOA[3], Stéphane VACHERIE[1]
[1] Univ Lyon, INSA Lyon, GEOMAS, 69621 Villeurbanne, France
[2] Université Caen Normandie, M2C, 14000 Caen, France
[3] Université Gustave Eiffel, 44344 Nantes, France

Résumé

Le projet pluridisciplinaire Val-Uses, financé par l'ANR et son homologue mexicain le Conacyt, propose d'aborder la complexité du bassin versant de l'Usumacinta, en prenant comme objet d'étude ses sédiments. La partie ingénierie du programme, intégrée dans un ensemble environnemental et social, pose la question de la valorisation et de la co-valorisation des sédiments en lien avec les usages actuels et passés et dans l'intérêt des habitants du bassin. L'objectif est le réemploi des sédiments comme ressource durable alternative et pour cela, il faut analyser les filières potentielles majeures de valorisation des sédiments de l'Usumacinta ; ce qui nécessite l'acquisition d'une connaissance approfondie du comportement des sédiments, à des échelles spatiales et temporelles différentes.

La toute première étape du projet, est celle du prélèvement des sédiments, les plus représentatifs du fleuve Usumasinta, pouvant avoir un intérêt pour la valorisation. Une organisation a été mise en place pour que les équipes mexicaines et françaises puissent se coordonner pour les prélèvements et le stockage respectif des sédiments précédant le transport par voie maritime. Deux lieux différents, Tenosique et Jonuta, ont été choisis et les prélèvements ont été réalisés sereinement grâce à la préparation et coordination en amont. Un volet logistique important a été mis en place pour assurer l'acheminement des sédiments et de l'eau du fleuve de Villahermosa à Lyon.

La caractérisation minéralogique, hydrique, rhéologique et mécanique des sédiments est un préalable à toute recherche visant leur valorisation ; ce qui exige l'identification et la caractérisation fine des sédiments prélevés. Une campagne de caractérisation complète est menée et les différentes filières de valorisation sont explorées : filière de fabrication des briques combinées aux déchets végétaux locaux ou non et filière géotechnique avec construction des routes de faible portance, non revêtues.

Ce travail a été financé par le projet « Des usages traditionnels à une valorisation intégrée des sédiments dans le bassin versant de l'Usumacinta (VAL-USES) » de l'Agence Nationale de la Recherche française (ANR-17-CE03-0012-01) et du Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología mexicain (FONCICYT-290792).

Mots clés : sédiments fluviaux, caractérisation approfondie, filières de valorisation

LES COLLINES DE LA VILLE LYON : NOTE GEOLOGIQUE

The hills of the Lyon: Geological Note

Catherine POTHIER[1], Claire CHAPPART[1], Louis VINET[2], Nicole BOULLIOD[2]

[1] Univ Lyon, INSA-Lyon, CNRS, LIRIS, UMR5205, F-69621, Villeurbanne, France
[2] Direction Prévention et Sécurité de la Ville de Lyon -Ville de Lyon -Lyon-France

Résumé

Le site géographique de Lyon, confluence entre le Rhône et la Saône, est marqué par une géologie en partie tertiaire et quaternaire avec une disposition non classique. Cette disposition est typique des formations détritiques de type littorale, glaciaire et fluviatile. Ces formations sédimentaires reposent naturellement sur un socle ancien de type granito-gneissique d'aire primaire.

Le relief collinéen Lyonnais est caractérisé par des versants très pentus dans les zones de rives le long du Rhône et de la Soane. L'urbanisation s'est développée depuis plus de deux millénaires sur cette topographie en y apportant un fort remaniement. Il en résulte des risques d'instabilités locales et des accidents : glissement de terrain (Fourvière 1930, Herbouville 1977…), éboulement rocheux, coulée boueuse (Chemin de Montauban 1989…) et fontis et cloche d'effondrement (parc Suter 2017). Ces risques font l'objet d'une action de prévention de la part de la ville de Lyon.

Les fondamentaux de la géologie lyonnaise ont été élaborés et décrits depuis la fin du XIX siècle à plusieurs reprises par de nombreux auteurs (Russo 1959, David 1967, Vinet 1991, Mongereau 2001...). Depuis les années 80, les opérations d'urbanismes s'accompagnent de reconnaissances géologiques et géotechniques approfondies, de plus les chantiers de grandes ampleurs (restructurations d'hôpitaux, doublement du tunnel de la Croix-Rousse…) ont fournis des données exhaustives. Les résultats des sondages ainsi obtenus ont été centralisés dans une bases de données au niveau de la Ville de Lyon. L'exploitation de cette dernière avec des outils d'analyses mathématiques a permis de préciser la connaissance de la géologie lyonnaise, et d'accéder à une meilleure corrélation des informations.

L'objectif de cet article est de présenter une nouvelle analyse quantitative de la géologie lyonnaise et des coupes spécifiques secteurs par secteurs à la fois pour les services techniques de la Ville de Lyon et les acteurs de la construction.

Mots clés : versant ; géologie ; risque géotechniques ; synthèse de données.

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 7B

Matériaux et géomatériaux : caractérisation et modélisation 3

RESISTANCE AU CISAILLEMENT DE GRAVES ARGILEUSES TRAITEES A LA CHAUX

SHEAR STRENGTH OF LIME TREATED CLAYEY GRAVELS

Sylvie NICAISE[1], Stéphanie LEMAIRE[2], Jérôme VARILLON[2], Faustine BYRON[1], Yves GRÉMEAUX[1]

[1] INRAE, Aix Marseille Univ, RECOVER, Aix-en-Provence, France
[2] Vinci Construction Terrassement, Morangis, France

Résumé

Dans le cadre de la réalisation de remblais d'assises de murs de soutènement sur le chantier d'élargissement de l'Autoroute A52, l'entreprise Vinci Construction Terrassement a proposé d'utiliser des graves argileuses traitées à la chaux. Cette fourniture vient en variante de la solution du projet, qui prévoyait l'emploi de graves traitées au liant hydraulique.
Afin de vérifier le dimensionnement, les paramètres de résistance au cisaillement des graves traitées doivent être connues. Pour les calculs de stabilité d'ouvrages en terre ou remblais contigus traités, il n'y a pas encore de consensus pour la prise en compte de cohésions pérennes dans les calculs. Cette prudence vient de retour d'expérience encore insuffisants. En l'absence de valeurs connues de résistance au cisaillement de graves traitées, des essais à la Grande Boîte de Cisaillement ont donc été réalisés par Inrae.
Après une présentation du matériau, de l'étude de traitement et du mode opératoire mis au point pour la confection des éprouvettes traitées de grandes dimensions, on expose les conclusions des essais de cisaillement direct sur la grave 0/31,5 mm traitée à 1 % de chaux, après 28 jours de cure. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus sur la même grave non traitée, testée dans les mêmes conditions : la cohésion apparente du matériau traité est supérieure d'environ 40 kPa à celle de la grave non traitée ; l'angle de frottement n'est pas modifié par le traitement.
La communication présente également les essais pressiométriques réalisés sur une planche d'essai en vraie grandeur après 3 et 6 mois de cure ; les résultats in-situ confirment le gain et la pérennité des résistances mécaniques des matériaux traités dans le temps.
La littérature offre peu de référence de résultats d'essais de cisaillement sur un matériau grossier traité : dans un contexte de valorisation optimale des matériaux, les résultats présentés apportent de nouveaux éléments.

Mots clés : matériaux et géomatériaux : caractérisation et modélisation, graves traitées, chaux, essai de cisaillement direct, remblai traité

DURABILITE DES BETONS DE SOL VIS-A-VIS DES CYCLES DE GEL-DEGEL ET DE LA CARBONATATION.

DURABILITY OF SOILCRETE MIXTURE SUBJECTED TO FREEZE-THAW CYCLES AND CARBONATION

Jacques Julius Hessouh[1], Javad Eslami[1], Anne-Lise Beaucour[1], Albert Noumowé[1], Fabrice Mathieu[2], Philippe Gotteland[3]
[1] L2MGC, CY Cergy Paris Université, Cergy-Pontoise, France
[2] Soletanche Bachy, Paris, France
[3] Fédération Nationale des travaux publics (FNTP), Paris, France

Résumé

Le Deep Soil Mixing est une technique de renforcement de sol par mélange du sol en place avec un liant hydraulique. Ce matériau est surtout utilisé pour réaliser des écrans d'étanchéité ou des soutènements temporaires. Compte tenu de son faible impact environnemental, l'utilisation du Soil Mixing peut devenir une alternative économiquement attractive aux méthodes traditionnelles de renforcement des sols ou de réalisation de soutènement définitif. Dans cet objectif, il s'avère indispensable d'améliorer la connaissance et l'évaluation de la durabilité du matériau, notamment vis-à-vis du phénomène de carbonatation et de la résistance aux cycles de gel/dégel jusqu'à présent très peu étudiés. Cet article présente une étude menée conjointement sur des matériaux prélevés sur site d'une part, et confectionnés en laboratoire à partir de sols prélevés in-situ d'autre part. Trois différents sites de construction ont été étudiés. Sur le premier site de construction (CS_1), la technique de Deep Soil Mixing (DSM) a permis de réaliser des parois de soutènement provisoires lors de la réalisation de l'excavation d'un sous-sol. Deux colonnes de Soil Mixing de diamètre 80 cm et de hauteur 3 m ont été spécialement réalisées pour cette étude. Sur le second et le troisième site de construction, la technique de Trenchmix a été employée pour renforcer l'étanchéité d'une digue. Sur ces sites, 48 échantillons et 22 échantillons de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm ont été prélevés respectivement sur le site CS_2 et sur le site CS_3. Par ailleurs des matériaux de sol-ciment ont été confectionnés en laboratoire à partir de deux sols différents prélevés sur le site CS_1 et des dosages en ciment variant entre 100 et 300 kg/m^3. Ces échantillons, initialement saturés, ont été soumis à une carbonatation naturelle à trois différentes humidités relatives, 40%, 65% et 85%. La profondeur de carbonatation ainsi que l'évolution de la masse en fonction du temps ont été mesurées. La cinétique de carbonatation des échantillons de béton de sol est plus élevée que celle des bétons ordinaires. L'effet du séchage semble avoir une forte influence sur les propriétés du matériau contrôlant ainsi la cinétique de carbonatation, comme la perméabilité et le degré de saturation en eau liquide. Les échantillons ont été soumis à des cycles de gel/dégel entre -10°C et +10°C. La vitesse des ondes P et la résistance en compression ont été mesurés au cours des 20 cycles de gel/dégel appliqués. La diminution des propriétés mécaniques et l'augmentation de la perméabilité en fonction du nombre de cycle varient fortement selon la résistance en compression initiale du matériau.

IMPACT DES PROPRIETES PHYSIQUES D'UN SOL SUR LES PROPRIETES MECANIQUES D'UN MELANGE SOL-CIMENT. EVALUATION DE SES PROPRIÉTÉS À LONG TERME.

IMPACT OF PHYSICAL PROPERTIES OF SOIL ON MECHANICAL PROPERTIES OF SOIL CEMENT TREATED MATERIALS.

Le Kouby, A. [1*], Saussaye, L. [2*], Duc, M. [1]

1 IFSTTAR, Cité Descartes, Champs sur Marne

2 CEREMA Blois

Résumé

La méthode de Deep-mixing est largement utilisée pour renforcer le terrain naturel. Il consiste à mélanger le sol avec du ciment ou de la chaux. Les réactions entre le ciment, le sol et l'eau augmentent la résistance et la rigidité du grand naturel.

Le niveau de renforcement dépend non seulement de la quantité de ciment ajoutée au sol mais également du sol lui-même, y compris de la dimension des particules de sol, de la minéralogie, de la température du sol, etc. Cette étude porte sur l'influence des propriétés du sol sur la résistance finale du mélange sol-ciment à long terme.

Pour cela, nous avons tout d'abord mélangé des sols artificiels avec du ciment pour analyser l'influence de la granulométrie et de la température. Huit pourcentages différents de sable et d'argile sont mélangés avec des teneurs en eau données. Tous les mélanges sont conservés dans des environnements spécifiques pour garantir la température de conservation. Ensuite, quelques mélanges avec différentes énergies de malaxage ont été réalisés et testés. Une première analyse permet d'en identifier les effets.

Dans le même temps, les résultats des expériences sont utilisés pour constituer une base de données de mélanges sol-ciment. La technologie de data-mining est appliquée pour établir un modèle de résistance du mélange, ce qui nous permet d'identifier l'influence des propriétés du sol sur la propriété du mélange sol-ciment.

Mots clés : soil mixing ; effet du pourcentage d'argile ; formulation ; base de données

ANALYSE DU CHEMIN DE CONTRAINTES AUTOUR DU PRESSIOMETRE

STRESS PATH ANALYSIS AROUND PRESSUREMETER

Younes ABED[1]

[1]Département de Génie-Civil , Faculté de Technologie, Université de Blida1, Algérie

RESUME :

Le travail présenté est basé sur une analyse du comportement à court terme des sols purement cohérents autour du pressiomètre. Une description de la loi de comportement du sol utilisée est présentée. Le sol est supposé suivre un modèle élastoplastique conforme à la théorie des matériaux standards généralises. Une visualisation des chemins de contraintes, en tout point de la discrétisation choisie et pour différents taux de chargement et de déchargement, est présentée. Les résultats obtenus nous ont permis de tirer quelques remarques sur l'évolution des contraintes autour du pressiomètre.

Mots clés : Module de cisaillement ; courbe contrainte ; déformation ; essai pressiométrique ; modèle de Prager ; critère de rupture de Von ; Mises.

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 7C

Dynamique des sols, chargement cyclique, fondations d'éoliennes

EVALUATION DES TASSEMENTS POST-LIQUEFACTION PAR LA METHODE SIMPLIFIEE A PARTIR DES ESSAIS *IN SITU* SPT ET CPT

POST-LIQUEFACTION RECONSOLIDATION SETTLEMENT EVALUATED BY APPLICATION OF THE SIMPLIFIED METHOD BASED ON SPT AND CPT

Emmanuel JAVELAUD[1], Manuel HOCDE[2], Denis MOIRIAT[3], Pierre MIRAILLET[1]
[1] *EDF DI-TEGG, Aix-en-Provence, France*
[2] *TERRASOL, Paris, France*
[3] *IRSN-SCAN, Fontenay-aux-Roses, France*

Résumé

Il existe plusieurs méthodes simplifiées empiriques permettant d'évaluer les tassements post-liquéfaction des sables saturés sous nappe à partir des essais géotechniques *in situ* de type SPT (Standard Penetration test) ou CPT (Cone Penetration Test), et des facteurs de sécurité à la liquéfaction FS_L obtenus par application de la méthode simplifiée développée par Seed. Pour chaque type d'essai SPT ou CPT, cet article se propose de comparer les résultats de deux méthodes courantes d'évaluation des tassements sismo-induits des sables saturés sous nappe afin de disposer de marges d'appréciation sur ces méthodes. Chaque méthode est d'abord rappelée succinctement avant la présentation des différentes comparaisons toutes réalisées en considérant un niveau d'eau de projet affleurant (situé au droit du terrain naturel). Tout d'abord, des exemples sont donnés en utilisant les valeurs d'essais SPT et CPT issues d'un benchmark réalisé en 2019 sur la méthode simplifiée d'évaluation du risque de liquéfaction. Puis, les différentes méthodes sont comparées de façon systématique. De manière générale, il apparaît que les tassements évalués à partir des abaques de Tokimatsu & Seed (1987) pour l'essai SPT et de Zhang *et al.* (2002) pour l'essai CPT sont en moyenne 30% à 40% plus faibles que ceux évalués par la méthode d'Idriss & Boulanger (2008) appliquée aux essais SPT ou bien aux essais CPT. La comparaison systématique des différentes méthodes a révélé de plus la présence de cas particuliers :

- Pour l'essai SPT, ils sont liés aux limites de la définition des courbes d'isovaleurs de la déformation volumique qui sont très proches, voire confondues sur l'abaque de Tokimatsu & Seed (1987) pour de faibles nombres de coups $(N_1)_{60}$.
  Un second abaque présenté par Tokimatsu & Seed (1987), valable lorsque FS_L est supérieur à 1, présente un intérêt pratique. Son utilisation permet de généraliser la conclusion sur les différences avec la méthode d'Idriss & Boulanger (2008).
- Pour l'essai CPT, le seul cas particulier est limité aux couples (coefficient de sécurité $FS_L > 1$; résistances de pointes normalisées $q_{c1N}<100$) du fait d'une mise sous forme d'équations différentes des deux abaques et du croisement des courbes de l'abaque d'Idriss & Boulanger (2008). L'effet est cependant faible en pratique car ce sont des cas où les tassements évalués sont au plus de l'ordre du pourcent.

Mots clés : Dynamique des sols, Liquéfaction, méthode simplifiée, tassements sismo-induits.

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'INFLUENCE DE FINES NON-PLASTIQUES SUR LA SUSCEPTIBILITE A LA LIQUEFACTION

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF NON-PLASTIC FINES ON LIQUEFACTION SUSCEPTIBILITY

Gobbi S.[1], Reiffsteck P.[1], Lenti L.[1,2], Santisi d'Avila M.P[3], Semblat J.F. [4]
[1] *Université Gustave Eiffel, IFSTTAR (GERS/SRO), Marne la Vallée, France*
[2] Cerema, Equipe-Projet MOUVGS, Sophia Antipolis, France
[3] *Polytech'Lab, EA UNS 7498, Université Côte d'Azur, Sophia Antipolis, France*
[4] *IMSIA (UMR9219), CNRS, EDF, CEA, ENSTA Paris, Institut Polytechnique de Paris, France*

Résumé
L'objectif principal de cette étude expérimentale est de clarifier et d'estimer l'influence de la teneur en fines non-plastiques dans le sable sur le déclenchement et le développement du phénomène de liquéfaction. Cette étude permettra de déterminer le potentiel de liquéfaction des zones sismiques et d'estimer la variabilité des paramètres de liquéfaction des sables.
Il est largement reconnu que la présence de fines influence significativement la résistance à la liquéfaction des mélanges sable-fines. Afin de clarifier l'effet des fines non-plastiques sur la réponse des mélanges, des sériés d'essais triaxiaux monotones et cycliques ont été effectués pour des échantillons de densité lâche, moyenne et dense en faisant varier la proportion de fines naturellement contenues dans le sable. Cette étude considère trois proportions de contenu de fines différentes et trois pressions de confinement initiales de 50, 100 et 200 kPa.
Les résultats révèlent que la résistance à la liquéfaction est fortement influencée par la teneur de fines et la densité relative du mélange. En particulier dans le cas de structure lâche ou moyennement dense, la résistance à la liquéfaction du mélange sable-fines augment initialement jusqu'à environ 5% de teneur en fines et diminue drastiquement avec un pourcentage majeur. Par contre, les essais sur les mélanges denses montrent qu'un pourcentage jusqu'à 10% est favorable pour l'amélioration de la résistance à la liquéfaction.

Mots clés : Dynamique des sols ; liquéfaction ; sables ; fines non-plastiques ; essais triaxiaux

PROPOSITION D'UNE METHODE DE NEWMARK AMELIOREE POUR L'ESTIMATION DES DEPLACEMENTS SOUS SEISME

PROPOSAL OF IMPROVED NEWMARK METHOD FOR DISPLACEMENTS ESTIMATION UNDER SEISM

Vincent SAVATIER [1], Gaëlle GINISTY [1], Rémi DELUZARCHE [1]

[1] *EGIS Géotechnique, agence de Balma, France* **Résumé**

Résumé

La méthode de Newmark permet, lorsque les calculs pseudo-statiques prédisent la rupture, d'estimer sur la base des accélérogrammes de calcul si cette rupture peut conduire à des déplacements préjudiciables pour l'ouvrage. L'intérêt de cette méthode est la simplicité des calculs permettant l'estimation de l'ordre de grandeur des déplacements sans recourir à des calculs par éléments finis, qui restent relativement lourds. Dans la pratique actuelle, on estime par la méthode pseudo-statique l'accélération a_{lim}/F donnant par rapport à la rupture un coefficient de sécurité acceptable. On considère ensuite qu'au-delà de cette accélération, on a une rupture fragile et un mouvement commandé par les lois de la cinématique. Il s'agit donc d'un calcul dans un modèle élastique fragile. L'amélioration de cette méthode proposée consiste à estimer a_{lim}, l'accélération donnant la rupture par la méthode pseudo-statique, et à considérer un comportement élasto-plastique pour une accélération comprise entre $a_{lim}/1,6$ et a_{lim}. Une présentation des modèles simplifiés utilisés est faite ainsi que des équations alors obtenues. Un exemple d'application au cas d'un remblai en zone de sismicité 5 projeté sur la déviation de la Boucan en Guadeloupe est présenté.

Mots clés : séisme ; méthode non linéaire ; déplacement ; accélérogramme de référence ; élastoplasticité

CARACTERISATION DYNAMIQUES DES SOLS RESIDUELS TROPICAUX COMPACTES

DYNAMIC CHARACTERIZATION OF PROPERTIES OF COMPACTED TROPICAL RESIDUAL SOILS

Lila MOUALI[1], Daniel DIAS[1], Eric ANTOINET[1], Jean Frederic OUVRY[1], GUILLAUME VEYLON[2], Jérôme DURIEZ[2], Claudio CARVAJAL[2], LAURENT PEYRAS[2].
[1]Antea Group, Orléans, France
[2] INRAe, Aix en Provence, France

Résumé

Dans les Antilles françaises, les matériaux disponibles pour la construction d'ouvrages géotechniques font partie de la famille des « sols résiduels tropicaux ». Ce sont des sols argileux provenant de l'altération en place de la roche mère, sous climat tropical. Certains minéraux constituant ce type de matériaux, comme les allophanes et les halloysites, rendent les propriétés physico-chimiques et mécaniques des sols résiduels très particulières et difficiles à appréhender.

D'autre part, compte tenu du fort aléa sismique en Guadeloupe, les projets de construction de barrages en remblai ont mis en évidence la nécessité d'améliorer la connaissance du comportement cyclique de ces sols, très peu étudiés dans la littérature.

Une étude expérimentale en laboratoire des propriétés monotone et dynamiques des sols résiduels tropicaux compactés a été menée à partir d'essais triaxiaux CU+u et CD, d'essais œdométriques ainsi que d'essais triaxiaux dynamiques et d'essais à la colonne résonnante. Le présent article a pour objet l'étude de l'influence de la densité sèche, de la pression de consolidation et du mode de constitution des échantillons sur le module de cisaillement en petites déformations (G_0), et sur les courbes de dégradation (G/G_0) et d'amortissement (D) en fonction de la distorsion (γ).

Mots clés : Barrage en remblai, Caractérisation dynamique, sols résiduels tropicaux, module de cisaillement (G), module d'amortissement (D).

MODÉLISATION PHYSIQUE ET NUMÉRIQUE DES MÉCANISMES DE TRANSFERT DE CHARGE DANS UNE FONDATION D'ÉOLIENNE.

PHYSICAL AND NUMERICAL MODELING OF LOAD TRANSFER MECHANISMS IN A WIND TURBINE FOUNDATION.

Janet MODU[1,2], Jean-François GEORGIN[1], Laurent BRIANÇON[1], Eric ANTOINET[2]
[1] Univ. Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, F-69621, Villeurbanne, France
[2] ANTEA Group, 45166 OLIVET, France

Résumé

La pratique actuelle pendant la phase de repowering des éoliennes est la déconstruction des fondations existantes et la construction de nouvelles fondations pour accepter des charges de vent plus importantes ou lorsque les fondations ont atteint la fin de leur durée de vie. Le projet de recherche FUI25 FEDRE (Fondations d'Eoliennes Durables et REpowering) donc vise à proposer des conceptions évolutives des fondations en réutilisant les fondations existantes qui seront utilisées sur 2 à 3 générations d'éoliennes. Pour cela, les développements du projet en cours reposent sur les études combinées des modèles numériques, d'une maquette 1/10 en laboratoire et de l'auscultation d'une fondation spécifique instrumentée in-situ.

Il est recherché dans le projet FEDRE une meilleure compréhension des mécanismes au niveau du sol et de la fondation sous des charges statiques et dynamiques. Le présent article se concentre sur le comportement de la fondation et en particulier sur: 1) l'effet des mécanismes couplés (thermo-hydro-mechanique-chimique) qui induisent des contraintes au cours du jeune âge dans la fondation en béton armé et 2) les considérations de facteur d'échelle dans la reproduction d'une fondation réelle en laboratoire. À l'aide des modèles 3D THMC implémentés dans le logiciel COMSOL Multi-physics©, l'analyse numérique a été réalisée pour simuler les transferts thermiques, l'hydratation du béton, le retrait (dessiccation et autogène) et le fluage au cours du jeune âge du béton. L'étude montre que les propriétés à jeune âge ont un effet important sur le potentiel de dommages dans les fondations des éoliennes à l'échelle réelle. Cependant, une prédiction du potentiel de dommages à l'échelle du laboratoire donne des différences significatives dans les contraintes au jeune âge par rapport à l'échelle réelle, en fonction de l'emplacement spatial dans la fondation et l'évolution des contraintes.

Mots clés : Fondations d'éoliennes, modèles THMC 3D, comportement au jeune âge, retrait du béton, béton armé.

COUCHE ABSORBANTE PARFAITEMENT ADAPTEE TRIDIMENSIONNELLE POUR LA PROPAGATION DES ONDES EN PRESENCE DE BARRIERE

THREE DIMENSIONAL PERFECTLY MATCHED LAYERS FOR WAVE PROPAGATION IN THE CASE OF WAVE BARRIER

Sijia Li[1] Michael Brun[2] Irini Djeran-Maigre[2] Sergey Kuznetsov[3]
[1] *Univ Lyon, INSA Lyon, LaMCoS, CNRS UMR 5259, 69621 Villeurbanne, France*
[2] *Univ Lyon, INSA-Lyon, GEOMAS, 69621Villeurbanne, France*
[3]*Institute for Problems in Mechanics, 119526 Moscow, Russia*

RÉSUMÉ – La protection des bâtiments contre les ondes sismiques et les ondes produites par vibrations industrielles devient un problème de plus en plus important. La barrière d'ondes a pour but de dissiper l'énergie d'ondes se propageant dans le sol et sa conception exige le développement d'outils numériques pour analyser son effet d'isolation. L'un des enjeux de simulation numérique de propagation d'ondes en présence de barrière d'ondes est de minimiser les réflexions parasites aux frontières du maillage. Par conséquent, une PML (Perfectly Matched Layer, couche absorbante parfaitement adaptée) tridimensionnelle est proposée pour la modélisation de domaines infinis. La formulation 3D des PML est couplée aux autres sous domaines dans le cadre performant et flexible des méthodes dites HATI (Heterogeneous Asynchronous Time Integrator). Cette approche de couplage, basée sur l'approche Schur duale, permet d'éviter d'introduire les coordonnées complexes dans le domaine intérieur et de traiter les sous-domaines avec différents intégrateurs temporels associés à différents pas de temps. Un problème de structure simplifiée sur un sol stratifié est mis en œuvre afin d'illustrer l'efficacité de la formulation hybride asynchrone des PML 3D en termes de précision et de temps de calcul. Enfin, une application 3D réaliste de la barrière d'ondes horizontale est étudiée, en prenant en compte quatre sous-domaines : le domaine du sol, une plaque excitée par la sollicitation dynamique, la barrière d'ondes et le domaine des PML.

Mots clés : Modélisation numérique, barrière d'ondes, propagation d'ondes, couche absorbante parfaitement adaptée, intégrateur temporel hybride asynchrone

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 8A

Enseignement et transmission en géotechnique et géologie de l'ingénieur

USAGE DES 'BIG-DATA' POUR LA VALIDATION D'UN COURS DE MECANIQUE DES SOLS.

THE USE OF BIG-DATA FOR COURSE VALIDATION

René-Michel FAURE[1]

[1] *ENTPE, Vaulx en Velin, France*

Résumé

La validation d'un cours de spécialisation de mécanique des sols (dernière année d'école d'ingénieurs) est un challenge pour le professeur qui doit permettre à ses élèves de montrer ce qu'ils ont retenu de son enseignement et d'exercer leur jugement sur des cas réels. La synthèse d'articles (en général 3 ou 4) portant sur des sujets voisins est une possibilité qui se heurte à l'important travail amont de recherche d'articles traitant de sujets semblables, tout particulièrement quand il faut définir à la promotion une bonne vingtaine de travaux différents.

L'usage des techniques de maniement de données massives ('big-data') permet de trouver les articles correspondants au thème défini par chaque binôme d'élèves. L'usage de l'internet s'étant révélé décevant pour cette quête (articles manquants ou payants ou hors sujet) un outil a été développé (en php et mySql) en se servant comme données des articles des nombreux congrès de mécanique des sols.
L'article proposé développe la problématique ci-dessus, déroule les étapes de construction de l'outil, montre son application sur les articles de congrès dont ceux des JNGG. Il conclut par les appréciations très positives des élèves, certains étant allés bien au-delà du travail de synthèse demandé. Pour le professeur, les rendus étant tous différents, la validation devient une tâche agréable.

Mots-clés : Enseignement, big-data, validation de cours, recherche d'articles

NOUVELLE APPROCHE D'INTERPRETATION DES ESSAIS PLAQUES REALISE SUR LE DALLAGE NON ROUTIER.

NEW APPROACH TO INTERPRETING PLATE TESTS PERFORMED ON OFF-ROAD PAVING.

Hamid Hosseini-Sadrabadi *[1,2], Maryame Nour[1], Christophe Dano[1], Pierre Riegel[2]

1 *Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR F-38000 Grenoble, France*

2 Equaterre, Bureau d'étude ingénierie 74960 Meythet, France

Résumé

L'essai à la plaque selon la norme NF P 94-117-1 permet d'évaluer la compacité du support d'une plateforme qu'elle soit destinée à une route ou à un dallage. Or ce dernier ne sera pas chargé de la même manière lors de leur utilisation : en particulier, en service, le niveau de chargement est souvent bien inférieur à celui mobilisé lors de l'essai de chargement de plaque Cette différence n'est pas prise en compte dans l'essai normalisé, ce qui peut entraîner une interprétation inadaptée des résultats sur le terrain.

Depuis des années, le Groupe Equaterre réalise des centaines de test de compactage de plateforme. Cette communication est le résultat de l'analyse de 380 essais sur le terrain. Les retours d'expériences ont montré les limites de cet essai dans certains cas, comme par exemple dans le cas des plateformes très résistantes (200MPa) mais pourtant qualifiées de non- compactes en raison d'un rapport EV1/EV2 inapproprié. Une mesure supplémentaire lors des essais de plaque (EV3) a été fait qui correspond à une troisième phase de chargement de la plateforme. Les retours d'expériences ont montré que cette valeur pourrait aider à identifier certaines pathologies de plateforme, comme par exemple le mauvais choix de compacteur.

Cette communication tente d'identifier les problèmes de compactage d'une plateforme avec une approche complémentaire à celle du DTU13.3 qui permet aussi de prendre en compte les déformations selon les types de dallages.

On a pu identifier 15 situations selon la norme NF P 94-117-1 et DTU 13.3 pour mieux comprendre le comportement de la plateforme de l'essai de chargement à la plaque. Cette catégorisation pourrait permettre aux ingénieurs de mieux comprendre et visualiser les pathologies liées aux plateformes dans les cas où elles ne sont pas validées par l'essai de plaque standard et trouver les solutions adéquates pour résoudre le problème sans forcément reprendre les plateformes.

Mots clés : Essai de plaque, NF P 94-117-1, DTU 13.3, plateforme industrielle, module EV3.

UN PROBLEME DE MASSE VOLUMIQUE DANS BELIDOR, 1729

A PROBLEM RELATED TO BULK DENSITY IN BELIDOR, 1729

Jean-David VERNHES[1], Bassam BARAKAT[1]
[1] *UniLaSalle, Beauvais, France*

Résumé

Dans son ouvrage La Science des Ingénieurs, publié en 1729, Bélidor a introduit au Livre I une théorie mécanique pour justifier la stabilité des murs de soutènement maçonnés. Dans celle théorie, il n'est pas de paramètre de la mécanique des sols qui soit explicite et mesurable, à l'exception de la masse volumique des matériaux. On aurait alors pu croire que le tableau de valeurs de « pesanteurs spécifiques » qu'il présente au livre III, incluant des masses volumiques de sols et des roches, l'aurait « logiquement » conduit à un niveau de paramétrisation supplémentaire de sa théorie, afin qu'elle prenne en compte au moins quelques-unes des catégories de sols listées. Dans un contexte où la nuance entre propriétés locales et effet d'un ensemble de propriétés locales pouvait le conduire à des digressions sans arbitrage possible, plus ingénieur que physicien dans son choix, Bélidor écarte cette option. Ainsi, il ne se fait pas trop d'illusions sur la nature particulière des sols et des roches par rapport aux métaux et autres liqueurs sur lesquelles il réfléchit aussi, et évite ainsi d'adopter une attitude excessivement normalisatrice à leur égard.

Mots clés : enseignement de la géotechnique, masse volumique, mur de soutènement, Bélidor, XVIIe siècle

LA FORMATION EN GEOTECHNIQUE DANS LES ECOLES D'INGENIEURS EN FRANCE

GEOTECHNICAL EDUCATION IN FRENCH ENGINEERING SCHOOLS

Pierre DELAGE[1], Claude PLUMELLE[2]
[1] *Ecole des Ponts ParisTech, Navier, CERMES, Marne la Vallée, France*
[2] *Professeur honoraire, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, France*

Résumé

La commission "Promotion de la géotechnique" du Comité Français de Mécanique des Sols (CFMS) a terminé en 2019 une enquête sur la formation en géotechnique dispensée dans les écoles d'ingénieurs en France, qui fait suite à celle présentée par Kastner (2000) au 1er Congrès International sur la formation en Géotechnique à Sinaïa (Roumanie). Cette enquête a permis d'obtenir les réponses de 42 écoles, comprenant 28 écoles généralistes avec option génie civil en 2ème ou 3ème année, 8 écoles de génie civil au sens large, 2 écoles avec enseignements approfondis en géotechnique et géologie et 2 écoles généralistes avec option géosciences. Ces écoles recrutent soit au niveau post-bac (réseaux INSA et Polytech, par exemple), soit après 2 - 3 ans de classes préparatoires, avec également diverses passerelles et procédures d'admission sur dossiers. Il est à noter que la quête, difficile, des informations relatives aux enseignements dispensés n'a pu être pleinement validée, du fait d'un manque significatif de confirmation de la part des écoles sollicitées. Il peut en résulter certaines inexactitudes. Le nombre d'ECTS (European Credits Transfer System, soit 25 – 30 h, comprenant cours et travail personnel) consacré à la géotechnique dans les établissements a pu être déterminé, montrant, dans les écoles Géotechnique/Géologie (Géologie Nancy et UniLasalle Beauvais) et dans certaines écoles du réseau Polytech particulièrement orientées vers la géotechnique, des offres en géotechnique importantes comprises entre 32 et 52 ECTS. D'après les chiffres obtenus, on a été amené à considérer qu'une formation comprenant au moins 15 ECTS correspondait en moyenne à l'investissement d'un élève ingénieur motivé par la géotechnique. Il ressort de cette enquête que, chaque année : 1475 ingénieurs sont diplômés d'écoles généralistes avec options génie civil, dont 121 ont suivi au moins 15 ECTS en géotechnique ; 976 ingénieurs sont diplômés d'écoles en génie civil, dont 60 ont eu au moins 15 ECTS en géotechnique. Dans les écoles n'abordant pas l'ensemble des disciplines du génie civil, 234 ingénieurs géologues/géotechniciens sont diplômés, dont 65 ont une formation approfondie en géotechnique (plus de 34 ECTS) et 30 ingénieurs sont diplômés avec 8 – 9 ECTS en géosciences (Mines ParisTech et Mines Nancy).

Mots clés : Formation ; enseignement ; ingénieur ; géotechnique ; génie civil

SECONDE GENERATION DE L'EUROCODE 7 : OU EN-EST-T-ON ?

SECOND GENERATION OF EUROCODE 7: WHAT IS THE SITUATION?

Sébastien BURLON[1] et Jean-Paul Volcke[2]
[1]*Terrasol - Setec, Paris, France*
[2] *Fayat Fondations, Paris, France*

Résumé

La seconde génération de l'Eurocode 7 est actuellement en cours de rédaction. Elle sera publiée vers la fin de l'année 2023. Il s'agit ici de présenter les principales modifications validées par le comité de rédaction par rapport à l'ancienne version et les sujets de discussion à fort enjeu.
L'Eurocode 7 inclut désormais trois parties : règles générales, investigations et calcul des ouvrages géotechniques.
La nouvelle première partie, l'Eurocode 7 – Partie 1, permet d'introduire le nouveau format de sécurité de vérification des ouvrages géotechniques ainsi que d'autres aspects relatifs aux calculs numériques, la fiabilité, le suivi des ouvrages géotechniques et l'exécution. De manière plus spécifique, deux nouvelles thématiques sont introduites : d'une part, la mécanique des roches de manière à traiter sur le même plan sols et roches et d'autre part, les chargements dynamiques (hors charge sismique) et cycliques.
L'Eurocode 7 – Partie 2 est organisée autour de la présentation des propriétés mécaniques, hydrauliques et thermiques des sols et des roches. Des développements spécifiques sur les propriétés de résistance au cisaillement et les modules de déformation sont présentés.
L'Eurocode 7 – Partie 3 est organisée autour de différents chapitres traitant les ouvrages géotechniques suivants : les pentes, les fondations superficielles, les fondations profondes, les soutènements, les tirants d'ancrage, les sols renforcés, l'amélioration des terrains. L'objectif est de fournir pour chacun de ces ouvrages géotechniques des méthodes de calcul permettant une application directe de l'Eurocode 7 – Partie 3 sans le besoin de faire appel à des normes d'application nationale.

Mots clés : Eurocode 7, Calcul géotechnique, Coefficient partiels, Calculs numériques

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 8B

Modélisation numérique 2

DE L'INTERET DE PRODUIRE DES MODELES 3D GEOLOGIQUES DE HAUTE QUALITE POUR LES PROJETS D'INGENIERIE CIVILE

ON THE INTEREST OF PRODUCING HIGH QUALITY 3D GEOMODELS FOR CIVIL ENGINEERING PROJECTS

Jean-Marie LEONARD,
EGIS, Seyssins, France

Résumé

L'intérêt de produire un modèle géologique en 3D de haute qualité est démontré à l'aide de quatre projets importants réalisés ces 20 dernières années.

Nos premiers modèles 3D sur des tronçons d'autoroutes ou de la LGV Est (Exemple 1) ont été réalisés avec la suite logicielle GDM (BRGM). Ils nous permettaient déjà de positionner des failles inconnues des cartes géologiques, et d'ajouter les sondages de sur les profils en long et en travers. La géométrie des couches étant ensuite récupérée pour les cubatures de ressources et le calcul du mouvement des terres.

Il est difficile de faire un modèle géologique en 3D pour une infrastructure linéaire avec seulement des sondages usuellement implantés à l'axe du projet et surtout si les sondages profonds ne sont positionnés que sur les déblais. La réalisation d'un modèle numérique du sous-sol pour le BIM nécessite de modifier la façon d'implanter les sondages afin d'optimiser les chances d'avoir un modèle 3D de qualité.

L'exploitation de bases de données nationales et des cartes géologiques vectorisées est indispensable pour obtenir un modèles 3D de bonne qualité. L'intégration de données géophysiques, comme l'interprétation de coupes sismiques nous a permis de réaliser le modèle de la Nouvelle Route du Littoral à la Réunion (Exemple 2).

Dans les Ardennes, les contours des formations de la carte géologique ont été intégrés pour réaliser les modèles 3D de l'autoroute A304 (Exemple 3). Les argiles du Pliensbachien et celles du Toarcien sont difficiles à distinguer sur le terrain. La modélisation en 3D de ces 2 couches a permis de séparer les échantillons de laboratoire et de démontrer que les argiles du Pliensbachien étaient réutilisables alors que celles du Toarcien restaient gonflantes et devaient être mises en dépôt.

Pour l'EPR d'Hinkley Point C, Summerset, Angleterre (Exemple 4), la modélisation des strates du Sinémurien et de l'Hettangien a bénéficié de l'apport de la biostratigraphie. L'interprétation de la carte géologique comme des sondages en biozones à ammonites a permis de faire des corrélations fines et de préciser la tectonique complexe du site fortement impacté par de nombreuses failles. Un modèle grossier et peu fiable aurait été obtenu, si on avait regroupé les différents niveaux calcaires en une seule formation.

Mots clés : Modélisation numérique, BIM, GDM, A304, EPR Hinkley Point C

TRANSFERT PAR INTEROPERABILITE DES MODELES 3D DEPUIS GDM-MULTILAYER VERS AUTODESK CIVIL-3D GRACE AU FORMAT RESQML V2.2

INTEROPERABILITY TRANSFER OF 3D MODELS FROM GDM-MULTILAYER TO AUTODESK CIVIL-3D USING THE V2.2 RESQML FORMAT

Jean-Marie LEONARD,
EGIS, Seyssins, France

Résumé

Le format RESQML v2.2, développé par le consortium pétrolier Energistics servant à échanger des modèles géologiques en 3D complets avec données de sondages entre géomodeleurs, a été choisi par EGIS pour transférer les modèles 3D réalisés avec GDM-Multilayer vers Autodesk Civil-3D de façon interopérable (BIM niveau 3) à l'aide de deux nouveaux logiciels RESQML Builder et RESQML-CAD.

Après un état de l'art sur les formats d'échange existants (LandXML, IFC, Geo3DML, etc..), nous expliquons les avantages offerts par le format RESQML v2.2 (maturité, disponibilité, gratuité) et nous présentons la solution logicielle EGIS.

Le format RESQML v2.2 repose sur un modèle conceptuel de données très développé et bien adapté non seulement à l'industrie pétrolière mais aussi aux géosciences, à l'industrie minière et à l'ingénierie civile

RESQML Builder lit les modèles 3D produits par GDM, les fichiers de données de sondages au format Excel et le modèle numérique de terrain au format LandXML pour les intégrer dans un modèle de données au format RESQML v2.

RESQML-CAD est un plug-in développé pour Civil 3D (versions 2018 à 2020). Il lit les fichiers RESQML et l'utilisateur peut tracer en 3D : les horizons, les failles et les sondages en 3D selon l'interprétation et le modèle 3D qu'il veut utiliser et représenter dans Civil-3D. Même les couleurs utilisées pour le tracé des objets dans Civil-3D sont celles choisies par le géologue qui a fait le modèle GDM. RESQML-CAD permet aussi la construction de coupes en 3D (Fence-diagrams) et de logs de sondages en 3D lesquels sont projetés sur les dessins de profil en long et les dessins de profils en travers. Les fichiers DWG 2018 obtenus sont transférables sans perte sous Navisworks et Infraworks et permettent ainsi d'intégrer les maquettes numériques BIM by EGIS.

Il n'est pas nécessaire de disposer d'un modèle 3D au départ, notre solution de transfert permet de représenter sous Civil-3D les sondages y compris à l'état prévisionnel.

Mots clés : Modélisation numérique, BIM, RESQML, Autodesk Civil 3D, GDM

COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'UNE STRUCTURE DE PROTECTION : ESSAIS D'IMPACT ET MODELISATION NUMERIQUE

DYNAMIC BEHAVIOUR OF A PROTECTIVE STRUCTURE: IMPACT TESTS AND NUMERICAL MODELLING

Agathe FURET[1,2,3], Stéphane LAMBERT[2], Pascal VILLARD[3], Jean-Philippe JARRIN[1], Julien LORENTZ[4]

[1] Géolithe, 181 rue des Bécasses, 38920 Crolles, France,
agathe.furet@geolithe.com
[2] Univ. Grenoble Alpes, INRAE, ETNA, 38000 Grenoble, France
[3] Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38000 Grenoble, France
[4] Géolithe Innov, 181, rue des Bécasses, 38920 Crolles, France

Résumé

La structure modulaire Bloc Armé®, composée de blocs préfabriqués en béton liaisonnés entre eux par des armatures métalliques, est destinée à la protection contre les risques naturels dont les chutes de blocs rocheux. L'étude présentée ici comprend des essais expérimentaux d'impact réalisés à différentes échelle et des modélisations numériques 3D développées avec le logiciel FLAC3D édité par Itasca. Les résultats expérimentaux démontrent la capacité de la structure à répartir les efforts et mettent en avant les différents modes de déplacement et de déformation de la structure. Le modèle numérique 3D intègre le comportement individuel de chacun des éléments de la structure de manière réaliste, et permet de simuler des impacts de faible ou forte intensité sur des murs de géométries variées. La confrontation avec les résultats expérimentaux montre que le modèle numérique rend compte de façon satisfaisante du comportement dynamique global de la structure. Par ailleurs, le modèle numérique donne accès à des informations complémentaires, difficilement accessibles expérimentalement, telles que les quantités d'énergie dissipées par déformation plastique du béton ou par les frottements entre blocs. A terme, le travail vise à proposer des recommandations et à développer des outils pour le dimensionnement de structures de protection utilisant la technologie Bloc Armé.

Mots clés : Modélisation numérique, chute de blocs, ouvrage de protection, impact, modélisation

APPORTS DE L'OBSERVATION ET DE LA MODELISATION A L'EVALUATION DE L'ALEA DE LA FALAISE DE BONIFACIO

CONTRIBUTIONS OF OBSERVATION AND MODELING TO THE ASSESSMENT OF THE CLIFF ROCKFALL PHENOMENON IN BONIFACIO

Christian FRANCK[1], Alain THORAVAL[1], Stella COCCIA[1], Baptiste VIGNEROT[2], Marie MALASCRABES[3]
[1] Ineris, Verneuil-en-Halatte, Nancy, France
[2] BRGM, Montpellier, France
[3] Cerema, Nice Sophia-Antipolis, France

Résumé

Pour la DDTM de Corse du Sud, le BRGM, le Cerema et l'Ineris mènent une étude pour améliorer la connaissance de l'aléa dit « éboulement de grande ampleur » de la falaise sous la Citadelle de Bonifacio. Ce secteur est caractérisé par un bâti ancien et dense, situé en aplomb d'un pied de falaise érodé présentant un encorbellement d'environ 20 mètres. Le mécanisme de rupture identifié *a priori* est une érosion par sape du pied de falaise, du fait des actions de la mer et météorologiques, qui conduit à la mise en surplomb de la partie supérieure. La rupture peut se produire sous l'effet de la perte de résistance à la traction du calcaire de la partie supérieure, et/ou de la perte de résistance au poinçonnement ou cisaillement des formations inférieures plus sableuses et érodables. L'extension de l'éboulement potentiel est conditionnée par le réseau de fractures, globalement perpendiculaire. L'étude vise à établir une meilleure connaissance de la falaise, des fractures la constituant, ainsi que de son environnement hydrogéologique et marin, afin de préciser l'aléa et proposer des mesures de gestion du risque. Un volet de l'étude consiste en l'observation de l'état et du comportement de la falaise et du massif : topographie par photogrammétrie aérienne et scan laser 3D différentiel, instrumentation en continu de la falaise par des fissuromètres, clinomètres et balises DGPS, et du massif calcaire par des extensomètres mis en place en forages, imagerie et écoute des modes de vibration naturelle du massif. L'ensemble de données est géré et mis à disposition des parties prenantes via le site internet e-cenaris. Il est établi un bilan de l'ensemble de ces investigations, tant sur l'apport opérationnel que sur l'analyse de la stabilité. Un autre volet consiste en la modélisation des conditions de rupture de la falaise sous la Citadelle et d'une zone de surplomb marqué proche. Des essais en laboratoire ont permis de mieux caractériser géomécaniquement les horizons lithologiques observés et définis. Des modèles géomécaniques 2D et 3D ont été établis à partir des modèles géométrique et géologique acquis lors de l'étude. Les variables étudiées sont notamment l'érosion progressive en pied de falaise, ainsi que la conjonction de deux réseaux de fracture qui découpent le massif. Il est établi une présentation des différentes simulations réalisées, et de leur apport d'une part sur l'évaluation des modes de rupture les plus pertinents et in fine sur l'évaluation de l'aléa.

ÉVALUATION DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES COLIS DE DÉCHETS RADIOACTIFS DANS LES OUVRAGES GRAVILLONNÉS DU CENTRE DE STOCKAGE DE L'AUBE

EVALUATING MECHANICAL BEHAVIOUR OF RADIOACTIVE WASTE CANISTERS IN GRAVELLED STRUCTURES AT CSA

Xuan-Phu NGUYEN[1], Marco CAMUSSO[1], Daniel BILLAUX[1], Antoine PASTEAU[2]
[1] ITASCA Consultants S.A.S., Écully, France
[2] Andra, Châtenay-Malabry, France

Résumé

Les déchets radioactifs de faible et moyenne activité à vie courte sont envoyés au Centre de Stockage de l'Aube (CSA) qui est exploité par l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets RAdioactifs (ANDRA). Une partie de ces déchets sont conditionnés dans des conteneurs en béton qui sont empilés les uns sur les autres au sein d'ouvrages gravillonnés. Une évaluation du comportement mécanique de ces ouvrages a été réalisée, avec le logiciel *FLAC3D*, par ITASCA, en collaboration avec EGIS. Des scénarios représentatifs et « enveloppes » ont ainsi été identifiés. Une approche de changements d'échelles ascendants et descendants a été adoptée afin de comprendre et d'évaluer le comportement mécanique à différents niveaux : colis individuel, pile de colis entourée de gravier, enfin assemblage de piles dans un ouvrage. À l'échelle d'un colis, plusieurs cas de figure ont été analysés pour étudier le transfert de charge (hétérogène) entre 2 colis superposés, en tenant compte de (i) quatre types de conteneurs (un cube et quatre cylindres), (ii) plusieurs mélanges de déchets et (iii) d'éventuels défauts du couvercle. À l'échelle d'une pile de colis, en plus des variations des colis individuels, différents calculs ont permis d'évaluer les effets d'une excentricité entre colis superposés. Les propriétés effectives des piles sans le gravier sus-jacent ont ainsi été estimées, et utilisées dans les modélisations à l'échelle de l'ouvrage complet de stockage, où divers agencements de piles ont été étudiés. Les efforts les plus critiques transférés sur les piles ont ainsi été identifiés, puis réutilisés pour les modèles des piles pour vérifier leur intégrité. L'étude a permis de confirmer les performances mécaniques des différents assemblages de colis et de piles, tout en détectant les configurations potentiellement les plus défavorables, afin d'optimiser les règles de fonctionnement du stockage.

Mots clés : stockage, déchets, béton, modèle adoucissant, *FLAC3D*

VIABILITE D'UNE EXPLOITATION GEOTHERMIQUE EN MILIEU URBAIN : EVITER LES INTERFERENCES

SUSTAINABLE EXPLOITATION OF GEOTHERMAL ENERGY IN URBAN AREAS: AVOID INTERFERENCE

Guillaume ATTARD[1*], Peter BAYER[2], Yvan ROSSIER[3], Philipp BLUM[4], Laurent EISENLOHR[1]

[1] Cerema, Direction Centre-Est, 46 rue Saint-Théobald, F-38081, L'Isle d'Abeau, France (auteur correspondant : guillaume.attard@cerema.fr)*

[2] Martin Luther University Halle-Wittenberg Institute of Geosciences and Geography, Allemagne

[3] Univ. Grenoble Alpes, Institut des Géosciences de l'environnement (IGE), Domaine universitaire, 1381 rue de la piscine, F-38400 Saint Martin d'Hères, France

[4] Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute of Applied Geosciences (AGW), Kaiserstrasse 12, 76131 Karlsruhe, Allemagne

Résumé

L'exploitation du sous-sol et des eaux souterraines comme source d'énergie géothermique suscite un intérêt croissant pour subvenir aux besoins de chauffage et de refroidissement des territoires. Des installations géothermiques, ouvertes ou fermées, permettent un échange de chaleur entre le bâtiment et le sous-sol. Le développement de cette filière géothermique, combiné à la présence de multiples sources de chaleur urbaines (ouvrages souterrains, réseaux, etc.) entraine de fortes sollicitations thermiques du sous-sol et des nappes, notamment en zone urbaine. Des interférences thermiques peuvent ainsi survenir entre des installations géothermiques voisines, et avoir pour conséquence une dégradation de leurs performances remettant en cause leur rentabilité. L'objectif de cette intervention est de présenter une démarche visant à éviter qu'un projet géothermique soit perturbé par d'autres installations ou autres sources de chaleur souterraines. Cette démarche repose sur la délimitation d'une zone de protection appelée « volume d'exploitation » conférant un droit exclusif d'exploitation, conformément au code minier, et permettant d'éviter que de nouvelles installations, trop proches, viennent remettre en cause la viabilité du projet. La démarche proposée est applicable à l'ensemble des installations géothermiques basse énergie verticales, ouvertes ou fermées en tenant compte des caractéristiques hydrogéologiques des sites. La première étape de cette démarche consiste à déterminer l'amplitude thermique acceptable pour maintenir les performances de l'installation sur la durée du permis sollicité. La seconde étape consiste à cartographier les probabilités que des transferts thermiques atteignent et perturbent le projet. Des modèles analytiques et numériques sont pour cela mis en œuvre. Leur utilisation requiert la connaissance des écoulements de la nappe (carte piézométrique) et des caractéristiques hydrauliques et thermiques des formations aquifères (conductivité hydraulique, porosité efficace, coefficient de dispersion, conductivité thermique et capacité thermique). La troisième étape consiste à calculer et cartographier la puissance thermique qu'il est acceptable d'exploiter autour de l'installation. Le pétitionnaire peut ainsi choisir la puissance thermique totale envers laquelle il souhaite protéger son installation pour en déduire la délimitation du volume d'exploitation du projet. La démarche est illustrée dans le cadre d'un projet géothermique situé à Lyon, dans un secteur où les écoulements de nappes sont influencés par des ouvrages souterrains, et où plusieurs installations géothermiques sont implantées. La détermination du zonage de protection en suivant la démarche proposée permet d'éviter les interférences entre installations géothermiques voisines et contribue à garantir le bon fonctionnement de l'installation sur la durée du permis sollicité.

Mots clés : Géothermie basse énergie ; hydrogéologie ; interférences ; impact thermique ; modélisation numérique

MODELISATION NUMERIQUE PAR ELEMENTS FINIS DE L'IMPACT DU PASSAGE D'UN TUNNELIER SUR DES FONDATIONS PROFONDES

FINITE ELEMENTS ANALYSIS OF THE IMPACT OF TUNNELING ON DEEP FOUNDATIONS

Wassim MOHAMAD1, Manuela Paule NJANKA NDIZEU1, Emmanuel BOURGEOIS1, Alain LE KOUBY1
1 Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-77454 Marne-la-Vallée, France

Résumé
Un des problèmes majeurs de la construction des tunnels en zones urbaines est l'évaluation des effets du creusement sur les ouvrages existants, en surface et en profondeur. Si l'analyse des tassements induits à la surface du massif de sol a fait l'objet de très nombreux travaux, l'effet du creusement sur des fondations profondes est moins bien cerné. L'excavation des tunnels induit des variations des champs de contraintes et de déplacements dans le terrain encaissant et peu modifier les efforts dans les fondations existantes, en particulier les pieux. Il est donc nécessaire de prévoir dans quelle mesure ces changements affectent le comportement du pieu lors du passage du tunnelier, et de s'assurer qu'ils n'ont pas une influence négative sur sa capacité portante et n'induisent pas des moments fléchissants inacceptables dans le pieu. Malgré les études déjà réalisées sur ce sujet, l'interaction sol-pieu-tunnelier reste difficile à anticiper de manière précise.

Cette communication a pour objectif de contribuer à la compréhension les mécanismes résultant du passage du tunnelier à proximité des pieux.
Pour cela, des calculs numériques ont été réalisés afin de tenter de reproduire l'effet du passage d'un tunnelier sous un pieu instrumenté faisant partie d'un plot expérimental lors de la construction de la nouvelle ligne ferroviaire entre Londres et le tunnel sous la Manche, dans le cadre du projet CTRL (Channel Tunnel Rail Link) au début des années 2000. Le plot expérimental a permis de mesurer les mouvements du sol lors du passage du tunnelier ainsi que la réponse de pieux construits à proximité immédiate, en termes de tassement, de distribution des efforts axiaux et des moments

Mots clés : tunnel ; pieu ; CESAR LCPC ; Éléments Finis

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 8C

Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages 4

ERREURS COURANTES DANS LES PROCEDURES DES CAMPAGNES GEOTECHNIQUES SELON L'EXPERIENCE AU LIBAN

COMMON MISTAKES MADE IN SITE INVESTIGATION PROCEDURES IN LEBANESE TERRITORIES

Youssam KAZAN
Université Libanaise, Roumieh, Liban

Résumé

Nous rappelons dans ce papier les conclusions des études déjà faites et publiées concernant des excavations profondes dans plusieurs formations géologiques au Liban. Ces conclusions ont montré que les écrans de soutènement correspondants ont été nettement surdimensionnés. Nous exposerons les résultats des comparaisons faites avec les analyses inverses et nous évaluerons l'écart entre les valeurs estimées et les valeurs réelles des paramètres mécaniques de plusieurs types de sols.

Nous exposerons par la suite toutes les raisons qui sont derrières cet écart significatif qui affecte considérablement l'optimisation de la structure. Parmi ces différentes raisons, l'interprétation des résultats des campagnes de reconnaissance de sols sera traitée en particulier.

Nous présentons par la suite les différentes méthodes de reconnaissance de sols utilisés selon chaque formation géologique. Ceci englobe un large intervalle allant des sols lâches jusqu'au roches très compactes, et dans les différentes conditions hydrauliques (présence ou absence de la nappe phréatique). Nous analysons les avantages et les inconvénients de chaque procédure technique en fonction de la nature et des caractéristiques de ces formations. Cette analyse sera faite après examen et justification de l'intervalle limité des résultats correspondant.

L'analyse faite dans ce papier englobe également les procédures d'échantillonnage et des essais in situ. Ainsi que le traitement des échantillons et les essais au laboratoire (choix de l'essai et interprétation des résultats).

Après l'exposition des différentes erreurs courantes et leurs ampleurs dans le domaine de la reconnaissance de sols, nous proposerons une nouvelle méthodologie pour tenter de remédier à la situation et proposer aux ingénieurs pratiquants une nouvelle méthodologie bien adaptée.

Mots clés : Reconnaissance, validation, suivi des mesures, formations géologiques, erreurs courantes

STRATEGIE D'UTILISATION DES IMAGES SATELLITES OPTIQUES POUR L'ETUDE ET LE SUIVI DES MOUVEMENTS DE VERSANT

STRATEGY FOR THE USE OF OPTICAL SATELLITE IMAGES FOR THE STUDY OF LANDSLIDE DEFORMATION

Marie-Aurélie CHANUT[1*], Laurent DUBOIS[1], Pierre AZEMARD[2], Marianne CHAHINE[3]
[1] Cerema Centre-Est, 25 avenue François Mitterrand, 69674 BRON Cedex
[2] Cerema Méditerranée, avenue A. Einstein, 13593 AIX-EN-PROVENCE Cedex 3
[3] Cerema Infrastructures de Transports et Matériaux, 110 rue de Paris, 77171 SOURDUN

Résumé

Le nombre de satellites d'observation de la Terre s'est fortement développé au cours des dernières années. Ils fournissent notamment des images optiques qui peuvent être utilisées pour l'étude et le suivi des mouvements de versant. Les images optiques sont caractérisées par leur résolution spatiale et leurs bandes spectrales. Ces caractéristiques sont très différentes d'un satellite à un autre. Par exemple, les images Pléiades sont acquises en multi-bandes (bleu, rouge, vert, infra-rouge) à la résolution 2,8 m et en panchromatique à la résolution 0,7 m. Ré-échantillonnées, les images Pléiades présentent une résolution de 0,5 m. Les images Sentinel 2 sont acquises en multi-bandes à la résolution de 10 m dans le cadre du programme européen Copernicus et sont gratuites.
Face à ce panel d'images et pour répondre au besoin des gestionnaires d'infrastructures et des autorités en charge de la sécurité publique, nous proposons d'étudier l'usage des images satellites optiques pour détecter, caractériser ou suivre des mouvements de versant. Une stratégie d'utilisation de ces images est construite pour mettre en adéquation la résolution des images, le phénomène à étudier et les traitements à réaliser. La stratégie proposée est structurée à partir du ratio des déplacements attendus sur la résolution de l'image :

- Si le ratio est supérieur à un seuil s1, les déplacements estimés sont très supérieurs à la résolution des images, la corrélation d'images est suffisante pour calculer les déplacements.
- Si le ratio est compris entre les seuils s2 et s1, les déplacements attendus sont du même ordre de grandeur que la résolution de l'image. Dans ce cas, un traitement plus sophistiqué doit être réalisé tel la multi-corrélation de paires d'images.
- Si le ratio est inférieur au seuil s2, les images satellites ne sont pas l'outil pertinent pour quantifier les mouvements.

La présente communication vise à définir les seuils s1 et s2 et à expliciter les méthodes de traitements des images satellites dans les différents cas.

Mots clés : Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages, télédétection, images satellite optiques, corrélation d'images, champs des déplacements

SPECIFICITE DE L'ECOUTE SISMIQUE PASSIVE EN CONTEXTE DE PRESQU'ILE

SPECIFICITY OF PASSIVE SEISMIC MONITORING IN PENINSULA FOR THE STUDY OF ROCKFALL HAZARD

Clara LEVY[1], E. Diego MERCERAT[2], Mickaël DELATRE[1], Marie MALASCRABES[3], Baptiste VIGNEROT[4], Etienne BERTRAND[2], Muriel GASC[5]
[1] BRGM, Orléans, France
[2] Equipe de Recherche MouvGS, CEREMA Méditerranée, Sophia-Antipolis, France
[3] Service Risques Géologiques, CEREMA Méditerranée, Sophia-Antipolis, France
[4] BRGM, Montpellier, France
[5] Equipe de Recherche MouvGS, CEREMA Méditerranée, Aix-en-Provence, France

Résumé

De l'écoute sismique a été réalisée par le BRGM et le CEREMA dans le contexte de la presqu'île de Bonifacio sur deux sites proches avec des caractéristiques morphologiques et géologiques similaires. Le déploiement des capteurs sismiques a été réalisé selon des géométries distinctes : 1) une instrumentation composée de sismomètres large-bande le long d'un profil en travers de la presqu'île (10 capteurs installés sur un profil de 100m de longueur pour durée de quelques heures) et 2) une instrumentation composée de sismomètres large-bande répartis selon un maillage dense (70 capteurs sur 16580 m² pour une durée de 1h30).
Les observations dans le contexte de la presqu'île de Bonifacio s'avèrent assez atypiques et différents des résultats classiques d'écoute sismique en falaise rocheuse qui mettent en évidence des pics en fréquence très marqués pour les zones instables par rapport à un spectre en fréquence assez proche du bruit blanc pour des capteurs en zone stable (i.e., sans pic marqué). En effet, ces observations montrent que tous les capteurs présentent un 1er pic en fréquence identique, correspondant à un grand mouvement d'ensemble de la presqu'île dans la direction nord-sud, avec une amplitude des mouvements verticaux plus importante sur les zones de surplomb en bord de falaise. La déformée modale de ce premier mode de résonance s'explique d'une part par la morphologie des sites et d'autre part par les propriétés mécaniques de couches qui composent le substratum.
La mise en évidence de zones potentiellement instables est donc plus complexe que dans un cas classique, puisqu'à la fois les zones stables et les zones potentiellement instables présentent des pics en fréquence. Par ailleurs, ces pics en fréquence peuvent être proches, voir se chevaucher, ce qui complexifie l'analyse des données. Plusieurs méthodes de traitement du signal ont donc été testées dans l'objectif de préciser l'interprétation des pics en fréquences observés uniquement pour un sous-ensemble de capteurs. En particulier, nous discutons la possibilité de l'existence de sous-blocs composants la presqu'île et de l'utilité des différentes méthodes de traitement du signal pour interpréter les résultats.

Mots clés : Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages, écoute sismique passive, risque rocheux, fréquence de résonance, Bonifacio

ETUDES CROISEES DE L'ALEA D'EBOULEMENT EN GRANDE MASSE EN CONTEXTE URBAIN

CROSSED STUDIES OF ROCKSLIDE HAZARD IN URBAN CONTEXT

Clara LEVY[1], Daniel RAUCOULES[1], Mickaël DELATRE[1], Mickaël FOUMELIS[1]
[1] BRGM, Orléans, France

Résumé

Le secteur de la Citadelle de Bonifacio est concerné par deux types de phénomènes pouvant affecter la falaise sur laquelle la ville haute est établie : la « chute de petits blocs » (<1 m3), et « l'éboulement en grande masse ». Ce dernier aléa est problématique puisque qualifié de fort à très fort dans le secteur de la Citadelle où la falaise forme un surplomb maximum d'environ 20 m.
L'écoute sismique passive est l'une des méthodes proposées par le BRGM pour l'étude détaillée de cet aléa. L'objectif de cette méthode géophysique est de mettre en évidence l'existence de blocs instables. Le principe est le suivant : les blocs rocheux instables vibrent préférentiellement à certaines fréquences, qui sont caractéristiques de leur géométrie, de leur masse, de la rigidité de la roche, mais aussi du degré d'attachement au massif stable. Grâce à des sismomètres, il est possible d'enregistrer ces fréquences, et de suivre leur évolution dans le temps. Dans le cas de la Citadelle de Bonifacio, l'objectif est de pouvoir délimiter les zones de comportement homogène en fréquence, et de s'assurer qu'elles correspondent à des limites de blocs potentiellement instables. Autant que possible, les caractéristiques des pics en fréquences (amplitude, direction, amortissement, etc.) ont été analysées afin d'en déduire des informations qualitatives sur la taille relative des blocs et leur degré de désolidarisation. Malgré le contexte urbain avec beaucoup de bruit sismique d'origine anthropique pouvant perturber les mesures, les enregistrements réalisés à la Citadelle montrent que cette méthode est adaptée pour cartographier des limites de blocs.
Parallèlement, des mesures vibrométriques basées sur des techniques interférométriques radar au sol, complémentaires de l'écoute sismique, ont été mises en œuvre. Il s'agit d'un autre moyen de mesurer de telles vibrations, mais offrant la possibilité de mesures à distance. La complémentarité et les limites de ces deux méthodes sont étudiées pour ce cas d'étude. Les résultats sont interprétés et utilisés pour une caractérisations détaillée du sous-sol local.
Finalement, une étude interférométrique satellitaire à partir de données Sentinel-1 a également permis de mettre en évidence une stabilité (dans les limites de sensibilité de la méthode) de la zone d'étude, ne permettant ainsi pas de faire ressortir de mouvement lent sur la période 2014-2018 pouvant être associé à l'aléa suivi.

Mots clés : Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages, écoute sismique passive, risque rocheux, interférométrie radar au sol, interférométrie radar satellitaire

APPORT DE LA FIBRE OPTIQUE POUR L'ETUDE DES ANCRAGES PASSIFS SCELLES AU ROCHER EN MILIEU FRACTURE

BEHAVIOR OF PASSIVE ROCKBOLT IN FRACTURED ROCKS ASSESSED BY OPTICAL FIBER METHOD

Anna LUSHNIKOVA[1,2], Patrick JOFFRIN[2], Christophe PRUVOST[2], Marion BOST[2], Aghiad KHADOUR[3], Wahiba SEDOUD[4], Ombeline FOREST[4], Philippe ROBIT[5], Yannick FARGIER[2]
[1] University Savoie Mont Blanc, LOCIE –CNRS UMR 5271, Chambéry, France
[2] Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, Bron, France
[3] Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, Marne La Vallée, France
[4] SNCF Réseau, Saint-Denis, France
[5] NGE Fondations, Saint-Priest, France

Résumé

Les ancrages passifs scellés au rocher représentent une technologie pertinente (économiquement et techniquement) dans la lutte contre le risque rocheux. Ce type d'ouvrage se retrouve ainsi particulièrement utilisé pour l'aménagement en domaine montagneux. La justification de tels ouvrages est souvent réalisée de manière sécuritaire engageant des coûts supérieurs. Dans ce cadre, améliorer notre compréhension de ces ouvrages en lien avec le type de roche sur lequel ils sont mis en œuvre est donc un enjeu important pour les gestionnaires d'ouvrage tel que la SNCF.
Pour évaluer le comportement à l'arrachement de ces ouvrages sollicités de manière axiale, plusieurs campagnes d'études sont réalisées au sein de massifs rocheux présentant des faciès lithologiques variés et présentant plusieurs niveaux de fracturation.
Nous introduisons des mesures par fibre optique permettant de suivre l'évolution de la contrainte de cisaillement observée de manière quasi-continue le long de la barre d'ancrage lors d'un essai d'arrachement. Pour cela, un interrogateur basé sur l'analyse de la réflectométrie fréquentielle sur fibre optique est employé. De plus, une chaîne d'acquisition à 100 Hz basée sur un capteur magnétostrictif, et des capteurs de précision de force et de pression sont également utilisés.
Pour l'étude du comportement à l'arrachement, plusieurs paramètres sont investigués, à savoir l'effet du matériau en place et de son niveau de fracturation, mais également l'effet de la longueur de scellement sur la mobilisation des mécanismes de rupture. Ces essais sont accompagnés de mesures à la fois endoscopiques et photogrammétriques. Pour chaque site, un minimum de six ancrages est étudié suivant la norme NF P94-444 à charge constante.
Les résultats obtenus mettent en évidence la pertinence de la technologie Fibre Optique et de la nouvelle chaine d'acquisition pour l'analyse du comportement des ancrages soumis à une sollicitation axiale. En effet, les résultats obtenus montrent que la contrainte de cisaillement mesurée le long de la barre est affectée par le niveau de fracturation variable suivant les sites étudiés.

Mots clés : Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages, Ancrages au rocher, Fibre Optique, Arrachement

APPORT DU LOGICIEL PYMERI-3D POUR L'IMAGERIE DES SITES A GEOMETRIE ET GEOLOGIE COMPLEXE

CONTRIBUTION OF PYMERI-3D CODE FOR IMAGING SITES WITH COMPLEX GEOMETRY AND GEOLOGY

Sam TAOUM[1], Ahmed SAYDY[1], Cyrille FAUCHARD[1], Raphaël ANTOINE[1], Antoine TONNOIR[2], Yannick FARGIER[3]
[1] CEREMA, ENDSUM, Rouen, France
[2] INSA, Rouen, France
[3] Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, Bron, France

Résumé

L'Imagerie de Résistivité Electrique (IRE) est une méthode géophysique permettant d'estimer la distribution (1D, 2D ou 3D) de la résistivité électrique du sous-sol et des ouvrages. Pour obtenir ce résultat d'imagerie, un traitement des données mesurées intègre la résolution d'un problème direct (modélisation numérique) et d'un problème inverse. La majorité des logiciels d'IRE sont généralement dédiés aux cas 1D ou 2D. C'est-à-dire, soit le milieu, soit sa topographie ne présente pas de variations dans les trois directions de l'espace. Un nouveau code libre d'inversion 3D est présenté ici. Il est basé sur l'utilisation d'un ensemble de logiciels libres et de codes Python. L'objectif est de permettre l'utilisation de la technique ERI-3D sur des ouvrages/milieux très hétérogènes intégrant une géométrie/topographie complexe.
Nous proposons dans ce papier le nouveau code PymERI avec un focus sur les aspects innovant de ce code. En effet, que ce soit pour le problème direct ou la gestion du problème inverse, des améliorations notables ont été apportées avec l'utilisation par exemple d'éléments infinis pour améliorer la prise en compte des conditions de frontières de type Dirichlet.
Cette étude propose deux cas d'études réels portant sur des problématiques différentes mais présentant à chaque fois des géométries complexes. La première concerne la caractérisation du site des Vaches Noires (Normandie). Le second site d'étude est un pilier de carrière souterraine crayeuse de Saint-Martin-Le-Nœud.
Les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'outils numériques 3D tel que PymERI est indispensable pour une bonne évaluation de ce type de site. En effet, les logiciels conventionnels (type Res2dinv) seraient mis en échec du fait des géométries des milieux auscultés. Ces résultats soulignent également l'apport et la complémentarité des techniques photogrammétriques pour l'obtention d'un MNT précis du milieu et pour l'interprétation des résultats d'imagerie obtenus.

Mots clés : Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages, Géophysique, Photogrammétrie, Effet 3D, Inversion.

jngg 2020

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 9A

Environnement, risques naturels ou anthropiques, enjeux sociétaux

PRESERVATION DE STALACTITES FISTULEUSES EXPOSEES A DES TIRS DE MINE : GROTTES DE CHORANCHE (VERCORS, FRANCE)

PRESERVING SODA STRAWS EXPOSED TO NEARBY BLASTING : CHORANCHE CASE STUDY

Bottelin Pierre[1*], Baillet Laurent[2], Mathy Alexandre[3], Garnier Laurent[4], Cadet Héloïse[1], Brenguier Ombeline[1], Allier Rémy[5], Cantalupi David[6]
*[1]Association pour le Développement des Recherches sur les Glissements de Terrain (ADRGT), 2 rue de la Condamine, 38610 Gières, France. *p.bottelin@adrgt.org*
[2]ISTerre, Université Grenoble Alpes, CNRS, F-38000 Grenoble, France.
[3]SAGE Ingénierie, 2 rue de la Condamine, 38610 Gières, France.
[4]Grottes de Choranche, 38680 Choranche, France
[5]CAN-Travaux d'accès difficile, Relut, 26270 Mirmande, France.
[6]Alpes Minages, 102 sentier de la salle, 74110 Morzine, France.

Résumé

Dans le cadre de travaux d'aménagement de l'accès piéton aux Grottes de Choranche (Vercors, France), des opérations de minage du rocher ont été réalisées. Les tirs de mine étaient localisés au niveau de la falaise extérieure de la grotte. Les tirs à effectuer étaient éloignés de quelques dizaines de mètres seulement par rapport aux concrétions les plus remarquables des grottes de Choranche : les stalactites fistuleuses. Ces stalactites creuses à paroi très mince présentent la particularité d'être extrêmement allongées : elles atteignent plusieurs mètres de longueur pour un diamètre d'environ 0.5 cm et une épaisseur de paroi de 0.5 mm. Leur élancement et leur finesse les rend particulièrement vulnérable aux vibrations.
En conséquence, la SAGE-ADRGT en lien avec le laboratoire ISTerre a entrepris une étude de vibration associant :

- la caractérisation statique et dynamique des fistuleuses en laboratoire ;
- des mesures de vibration in-situ sous tirs d'essais ;
- la modélisation numérique de la réponse dynamique des fistuleuses.

Les résultats ont permis de caractériser le module d'Young, la masse volumique et la résistance à la rupture des fistuleuses, de simuler les contraintes induites dans la population de fistuleuses en fonction de la sollicitation vibratoire, et de définir la loi de propagation entre les tirs de mine et la paroi interne de la grotte.
Nos travaux constituent la première étude spéléo-sismologique qui modélise le phénomène d'amplification dynamique de façon physique sur l'ensemble d'une population de stalactites.
Les résultats ont permis de définir la population de fistuleuse la plus exposée par l'amplification dynamique lors des tirs de mine. Une valeur de vitesse particulaire admissible a été définie et contrôlée en phase chantier, ce qui a permis aux entreprises de travaux d'adapter les quantités d'explosifs mises à feu.
Le chantier a été réalisé durant l'hiver 2018-2019 par la CAN et Alpes Minages, supervisé par la SAGE-ADRGT, sans aucun dommage causé aux concrétions des grottes de Choranche.

Mots clés : Environnement, risques anthropiques, minage, amplification dynamique

UNE APPROCHE SUD-EUROPEENNE DU RISQUE MOUVEMENTS DE TERRAIN EN ZONE COTIERE

A SOUTH EUROPEAN APPROACH FOR COASTAL LANDSLIDE HAZARD

Muriel Gasc-Barbier[1], Séverine Bernardie[2], Anne Chanal[1], Christian Iasio[2], Christophe Garnier[2], Nathalie Dufour[1]
[1] MouvGS, Cerema, Aix-en-Provence, France
[2] BRGM, Orléans, France
[3] BRGM, Bordeaux, France

Résumé

Riskcoast est un projet transfrontalier qui vient de démarrer dans le cadre d'un appel Interreg SudOE mené avec des partenaires espagnols (le CTTC, centre de télécommunication de Catalogne, l'IGME, institut géologique et Minier d'Espagne, l'UGR, Université de Grenade, Asitec, une PME Espagnole), portugais l'IGOT (Institut de Géographie de Lisbonne) et français (BRGM et Cerema). Y sont associés différents partenaires, issus des territoires concernés par le projet : des représentants de différentes institutions des territoires concernées. Le but de ce projet concerne l'étude des risques géologiques en zone côtière, liés au changement climatique, avec un focus sur l'amélioration de la coordination et de l'efficacité des moyens de prévention, gestion de catastrophe et réhabilitation de zones sinistrées.
Plus spécifiquement, il est prévu un partage d'information et des travaux croisés entre les différents pays, sur :

- L'utilisation et le traitement de données satellitaires (InSar) ou terrestre (GB-Sar, photogrammétrie à l'aide de drones) pour suivre l'évolution des côtes et aider aux systèmes d'alerte ;
- Le développement de nouveaux instruments de suivi des sites et prévention de risques liés au changement climatique sur les côtes ;
- Des échanges d'information interrégionale avec analyse des procédures de suivi et/ou de système d'alerte précoces existants ;
- …

Plus précisément le Cerema et le BRGM seront en charge de la réalisation d'exercices de gestion de crise qui permettront de tester les différents outils et cartes développés par les différents partenaires.

Mots clés : environnement, risques naturels et anthropiques, enjeux sociétaux – risque rocheux - prévention – gestion de crise

MOUVEMENTS DE TERRAINS LIES AUX MARNIERES (76, 27) – CHRONIQUES TEMPORELLES ET INFLUENCE DES INTEMPERIES

Underground chalk mines collapses in Normandy – Times series and role of rainfalls

Gildas NOURY[1], Pierre PANNET[2], Baptiste MEIRE[3]
[1] Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Orléans, France[2] Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Lille, France[3] Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Rouen, France

Résumé

En Normandie, l'hiver 1994-1995 et le printemps 2001, considérés par tous comme deux périodes anormalement pluvieuses, ont été marqués par une forte recrudescence d'effondrements et d'affaissements de marnières. Dans le cadre 'une réflexion globale sur ce risque, le BRGM précise et complète ce constat via L'établissement de chroniques de mouvements et leur comparaison avec une chronique pluviométrique.

Mots clés : cavité ; marnière ; effondrement ; chronique ; Eure ; Seine ; Maritime ; pluviométrie ; intempéries

ALEA MOUVEMENTS DE TERRAIN LIES AU KARST : CONTEXTES, METHODE ET CAS TYPE TRAITES EN VUE D'UN GUIDE NATIONAL

KARST COLLAPSE HAZARD : GEOLOGICAL SETTINGS, METHODOLOGY AND CASE STUDIES TOWARDS FRENCH NATIONAL GUIDELINES

Gildas NOURY[1], Emeric VEDIE[2], Frédéric CLEMENT[2], Eglantine HUSSON[1], Cyril RESPAUD[2], Pierre AZEMARD[3], Ludovic DORE[4], Sylvain HAUSSARD[5], Jérôme PERRIN[1]
1 Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Brgm), Orléans, France
2 Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), Bordeaux, France
3 Cerema, Aix-en-Provence, France
4 Cerema, Blois, France
5 Cerema, Autun, France

Résumé

Le Brgm et le Cerema collaborent pour proposer pour la première fois une méthode d'évaluation de l'aléa mouvements de terrain lié au karst. Un guide technique exposera d'ici 2021 les spécificités des contextes karstiques et la démarche proposée (analyse multicritère). Les cartographies prédictives pouvant ainsi être obtenues seront utiles aux réflexions locales d'urbanisme.

Mots clés : aléa ; karst ; mouvements de terrain ; guide ; urbanisme ; PPRN ; méthode ; multicritères ; processus

ANALYSE ET RETOUR D'EXPERIENCE SUR LE CONFORTEMENT D'UN GLISSEMENT DE TERRAIN ROUTIER A BEJAIA (ALGERIE)

ANALYSIS AND FEEDBECK ON LANDSLIDES REINFORCEMENT OF THE ROAD BEJEJA REGION (ALGERIA)

Omar SADAOUI1, Nassima ISSAADI2, Samir SADAOUI3 et Ramdane BAHAR4
1 Laboratoire LGEA, Faculté de Technologie, Université de Bejaia, Algérie
2 Bureau d'études et de réalisation en urbanisme- Bejaia, Algérie
3 Bureau d'Ingénieurs Conseils en Travaux Publics, Bejaia, Algérie
4 Laboratoire LEEGO, Faculté de Technologie, Université de Bab-Ezzouar, Alger (Algérie)

Résumé

La région de Bejaia est située à 250 km à l'est d'Alger, elle est caractérisée par de très grands glissements de terrain endémiques. La présente communication s'intéresse à un cas d'étude de glissement de terrain ayant affecté la route nationale RN24 reliant les wilayas de Bejaia et de Tizi-Ouzou au PK 226+300, lieu dit Assoumeth. Il s'agit d'une rupture brutale d'un versant de 2,2 Ha ayant engendré l'effondrement de la route sur 120m de longueur et un affaissement de l'ordre de 8m. Le diagnostic, l'étude géotechnique

Mots clés : Glissement ; Diagnostic ; numérique ; confortement ; mesures

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 9B

Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages 5

ESSAIS DE PENETRATION STATIQUE CHEMINS DE CONTRAINTE DANS LES SOLS NON SATURES

STATIC PENETRATION TEST WAY OT STRESS IN UNSATURATED SOILS

Vincent SAVATIER[1], Vincent SILVESTRE BRAC[2], Géraldine CAZAUX-GINESTET[3],
[1] *EGIS Balma, France*
[2] *Alios*
[3] *INSA Toulouse*

Résumé

RÉSUMÉ – Cet article présente les chemins de contrainte sur un diagramme de Cam-Clay lors de l'enfoncement d'une pointe de pénétromètre statique (CPT : Cone Penetration Test) dans le cas d'un sol argileux non saturé. L'état de contrainte existant autour de la sonde est décrit. Sont examinées les conséquences pour l'utilisation des abaques de Robertson dans les sols non saturés et pour la réalisation éventuelle de CPT avec mesure de la succion.

Mots clés : penetromètre statique ; piezocône ; sol non saturé ; abaque de Robertson

INFLUENCE DE LA QUALITÉ DU FORAGE SUR LES RÉSULTATS DES ESSAIS PRESSIOMÉTRIQUES

INFLUENCE OF DRILLING QUALITY ON THE RESULTS OF PREBORED PRESSUREMETER ESSAIS

REIFFSTECK Philippe[1], SAUSSAYE Lucile[2], HABERT Julien[3]
[1] *Université Gustave Eiffel, Paris*
[2] *Cerema, Blois*
[3] *Terrasol, Paris*

RÉSUMÉ – Cet article présente une étude de l'influence du mode de mise en place de la sonde pressiométrique sur les essais d'expansion en forage réalisés selon la procédure Ménard. Il analyse les résultats de plusieurs campagnes d'essais croisés, historiques et récentes, qui ont été réalisées sur des terrains de caractéristiques bien documentées, dans des sables, des limons, des argiles, de la craie, et des marnes, et avec différents modes de mise en place de la sonde. Les essais pressiométriques effectués dans un forage avec différentes techniques acceptées ou interdites, montrent plus d'influence sur les valeurs de module dérivées de l'essai que sur la pression limite. Les résultats présentée montrent qu'il semble néanmoins nécessaire lors de la réalisation des essais pressiométriques de s'assurer que l'équipement de forage est correctement sélectionné et que le forage est correctement effectué. Nous recommandons donc de suivre les règles fixées pour les sondages dans le cas d'essais pressiométriques normalisés synthétisant les conclusions de cette communication. Enfin, l'expérience montre que la pression limite est généralement insensible à la mise en œuvre, à condition que le forage soit bien calibré. En revanche, le module pressiométrique reste très sensible à celui-ci ; une mise en œuvre inadaptée peut faire chuter ce module de moitié ou plus.

Mots clés : pressiomètre, forage, mise en place, mode opératoire

PENETROMETRE DYNAMIQUE ET INDICE DE DENSITE DES SABLES. APPLICATION A L'EVALUATION DU RISQUE DE LIQUEFACTION DES MASSIFS SABLEUX

DYNAMIC PENETROMETER AND SAND DENSITY INDEX. APPLICATION TO THE EVALUATION OF THE RISK OF LIQUEFACTION OF SANDY MASSES

Sebastian Lopez Retamales[1,2], Jean Canou[1], Jean Claude Dupla[1], Miguel Benz Navarrete[2]

[1] Ecole des Ponts ParisTech, Paris, France.
[2] Sol-Solution, Géotechnique Réseaux, Riom, France.

RÉSUMÉ

L'évaluation du risque de liquéfaction d'un site ou d'un ouvrage est nécessaire pour éviter des dégâts humains et économiques. Les méthodes actuelles d'évaluation sont principalement basées sur l'essai de pénétration, SPT ou CPT. Ces méthodes permettent de caractériser le sol et estimer un facteur de sécurité contre l'occurrence ou la non-occurrence d'une liquéfaction. Cet article présente les premiers résultats des essais avec un pénétration dynamique complétement instrumenté (le P.A.N.D.A.3®) sur des échantillons de sable fabriques dans une chambre d'étalonnage (état K_0). Les résultats montrent une bonne corrélation entre la résistance à la pénétration dynamique q_d et l'indice de densité du sol I_d, permettant d'établir une équation générale qui relie ces paramètres et la contrainte de surcharge effective appliquée à l'échantillon.

Mots clés : pénétromètre dynamique ; liquéfaction ; séisme ; sable ; indice de densité

DIGUES EXPERIMENTALES DU CER DE ROUEN EN SOL LIMONEUX TRAITE A LA CHAUX OU NON TRAITE : EVALUATION APRES 7 ANS

EXPERIMENTAL DIKES IN SILTY SOIL TREATED WITH QUICKLIME AND UNTREATED: EVALUATION AFTER 7 YEARS

Lucile SAUSSAYE[1], Geetandjali DAS[2], Andry RAZAKAMANANTSOA[2], Erwann RAYSSAC[2], Dimitri DENEELE[2], Christophe CHEVALIER[2], Louis BATTIST[2], Gontran HERRIER[3], Didier LESUEUR[3], Nicolas PONCELET[4], Delphine JACQUELINE[1], Michel Froumentin[1], Cindy MAISONNAVE[1], Edouard DURAND[1], HarifidyRANAIVOMANANA[5]

[1] *Cerema, Blois, Le Grand-Quevilly, Aix-en-Provence, France*
[2] *Université Gustave Eiffel/GERS, Nantes, Marne-la-Vallée, France*
[3] *LHOIST Recherche et Développement, Nivelles, Belgique*
[4] *Université Libre de Bruxelles/Building, Architecture and Town Planning Dept (BATir)/Laboratoire de GéoMécanique, Bruxelles, Belgique*
[5] *IUT de St-Nazaire/Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique (*GeM*), St-Nazaire, France*

Résumé

En septembre 2011, sur le site du Centre d'Expérimentation et de Recherche (CER) de Rouen, deux digues expérimentales ont été construites. L'une est construite en limon (de classe GTR A1), la seconde est constituée du même limon traité à 2,5% de chaux vive, compacté du côté humide de l'optimum Proctor normal (OPN). L'objectif pour le groupe Lhoist est de développer le traitement des sols à la chaux aux ouvrages hydrauliques (digues, canaux…) et de vérifier, en vraie grandeur, les résultats de laboratoire acquis au cours de programmes de recherche antérieurs. Il s'agit alors de travailler sur l'homogénéité du traitement à la chaux d'un sol fin, au moyen d'une centrale de traitement, et sur la perméabilité du matériau ainsi traité et compacté, l'exécution étant réalisée avec des matériels de terrassement traditionnels.

La digue en limon non traité a un profil en travers asymétrique (pentes de 3H/2V et 2H/1V). Sa longueur est égale à 10,00 m en crête et 13,60 m à la base, sa largeur à 2,00 m en crête et 5,60 m à la base, sa hauteur à 0,90 m. La digue en limon traité a également un profil en travers asymétrique (pentes de 3H/2V et 2H/1V). Sa longueur est égale à 21,00 m en crête et 28,20 m à la base, sa largeur à 4,00 m en crête et à 10,30 m à la base, sa hauteur à 1,80 m. La construction des digues a fait l'objet d'un suivi fin, notamment en termes de teneurs en eau et de densité.

En octobre 2018, la déconstruction des deux digues expérimentales a été l'occasion d'effectuer des prélèvements de matériaux au niveau des talus des deux digues, afin d'évaluer leurs caractéristiques physiques, mécaniques, hydrauliques et microstructurales. Les objectifs sont alors d'évaluer l'homogénéité des matériaux, de comparer le comportement global des ouvrages, de mesurer les propriétés des ouvrages à long terme, y compris la perméabilité.

Le présent article fait état de la méthodologie déployée par l'équipe projet pour l'évaluation des caractéristiques des matériaux après 7 ans de cure, en environnement réel, y compris les difficultés rencontrées lors de la réalisation des prélèvements in situ, des éprouvettes en laboratoire puis des essais.

CONTROLE DU SOULEVEMENT D'UN FOND DE FOUILLE PAR UNE AUSCULTATION RENFORCEE
ENHANCED AUSCULTATION DURING AN EXCAVATION

Grégory MEYER[1], Arnaud GUICHARD[2]
[1] *Responsable géotechnique L15S T2, SYSTRA, Paris, France*
[2] *Responsable adjoint à la Direction Technique L15S T2, SYSTRA, IdF, France*

Résumé

Lors des travaux de terrassement d'un ouvrage annexe sur le tronçon T2 du Grand Paris Express ligne 15 Sud, des mesures d'auscultation renforcées ont été intégrées au phasage d'excavation de l'ouvrage. Ainsi, des cellules de pressions interstitielles et des mesures extensométriques ont été suivies sous le fond de fouille afin de vérifier l'absence de soulèvement global du sol en fiche, bien que le calcul assure la stabilité de l'ouvrage en prenant en compte du frottement entre le bouchon argileux et les parois moulées. Ces mesures ont permis de conduire le chantier en toute sécurité et de réaliser le génie civil de l'ouvrage sans renforcement de sol lourd en termes de planning et de coût.

Mots clés : Conception, réalisation et durabilité des ouvrages géotechniques, auscultation ; UPL

INFLUENCE DES PROTOCOLES D'ESSAIS PRESSIOMETRIQUES DANS LES LIMONS

INFLUENCE OF TESTING PROTOCOLS ON THE RESULTS OF PRESSUREMETER TESTS IN SILTY SOILS

Tomasz LEWCZUK[1], Lucile SAUSSAYE[1], Julien HABERT[2]
[1]Cerema, Le Grand-Quevilly, Blois, France
[2] Terrasol, Paris, France

Résumé

Le présent article présente les résultats et l'analyse d'un campagne d'essais pressiométriques comparatifs réalisés dans des matériaux limoneux selon le protocole Ménard. Une campagne complète de 48 essais pressiométriques a ainsi été réalisée sur un stock homogène de limons disponible au travers de travaux de terrassement, complétée par une campagne de caractérisation géotechnique (identification en laboratoire et pénétromètre dynamique).

L'influence des deux modes de forage préalablement à la mise en place de sonde pressiométrique, tarière à sec et tricône à l'eau, le recours à différents types de sonde, sonde nue et sonde en tube fendu, et à deux programmes de chargement, fixé par l'opérateur en fonction de son expérience et pas d'augmentation de pression constant de 0,2 bar, ont été étudiés.

Les essais pressiométriques effectués dans les limons d'un stock non compacté, avec les différentes techniques décrites précédemment, recommandées ou proscrites par la norme NF EN ISO 22476-4, montrent une influence plus importante sur les modules pressiométriques Ménard E_M que sur la pression de fluage pf ou la pression limite nette pl_M^*.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du Projet National ARSCOP.

Mots clés : reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages, pressiomètre Ménard, protocole d'essai, limons

10èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur

L'innovation et la formation pour relever les défis géotechniques de demain

Session 9C

Modélisation numérique 3

FONCTIONS D'IMPEDANCE D'UN RADIER ENFOUI DANS UN SOUS-SOL COMPLEXE

IMPEDANCE FUNCTIONS OF EMBEDDED SLAB IN A COMPLEX BASEMENT

Sébastien REYNAUD[1], Pierre-Louis REGAZZONI[1], Stéphane CAZADIEU[2], Florence REYMOND[3], Vincent BOUTIN[3], Laurent CADET[3]
[1] Egis Géotechnique, Seyssins, France
[2] Egis Industrie, Montreuil, France
[3] CEA DAM, Bruyères-le-Châtel, France

Résumé

La prise en compte de l'interaction sol-structure est une étape importante pour le dimensionnement des ouvrages sous sollicitations sismiques. Le calcul des fonctions d'impédance est un moyen de modéliser cette interaction dans le cadre d'une analyse modale spectrale de la structure. Plusieurs méthodes existent pour évaluer les fonctions d'impédance du sol. Nous présentons le calcul d'impédances d'un radier enfoui effectué à l'aide d'un modèle numérique aux différences finies FLAC 3D. Ce type de modèle permet de prendre en compte la géométrie précise du sous-sol caractérisée par des sous-couches alluviales à fort contraste de rigidité (variation de la vitesse des ondes de cisaillement Vs de 210 à 330 m/s) reposant sur un substratum marno-calcaire avec un fort pendage et une rigidité moyenne pour une formation rocheuse (Vs de 480 m/s). Cette modélisation permet de mettre en évidence l'influence des couches alluviales relativement rigides et l'influence de la présence du substratum, par analogie à la réponse d'un radier enfoui dans des configurations simples (demi-espace infini, monocouche reposant sur un substratum tabulaire et bicouche). Nous montrerons que la variation de rigidité des couches alluviales influence les impédances notamment au-delà de la fréquence propre du sous-sol considérée. Dans le cas étudié, cette influence est prépondérante par rapport à celle de la profondeur du substratum et ce quel que soit le degré de liberté.

Mots clés : modélisation numérique, interaction sol-structure, fonctions d'impédance, radier enfoui, comportement dynamique

MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS EN MILIEU URBAIN : IMPACT DU PASSAGE INFÉRIEUR AUX VOIES FERRÉES A BONNEUIL-SUR-MARNE

MODELING OF UNDERGROUND FLOWS IN URBAN AREA : IMPACT OF THE UNDERPASS TO THE RAILWAYS IN BONNEUIL-SUR-MARNE

Rémi SOAVE[1], Hugues GIROUX[1], Philippe GUEZENNEC[1]
[1] *Cerema Île-de-France, Le Bourget, France*

Résumé

D'après l'ONU, deux personnes sur trois habiteront dans les grands centres urbains mondiaux d'ici 2050. En Île-de-France, les nouveaux projets d'aménagements passent donc souvent par la construction d'ouvrages souterrains profonds qui peuvent impacter les nappes phréatiques. Dans le cadre du projet d'amélioration de la desserte du Port de Bonneuil-sur-Marne, le Cerema a étudié le fonctionnement hydrogéologique des sols afin d'évaluer les interactions entre la nature des terrains, l'eau souterraine et les caractéristiques du projet. Les aménagements prévus (un ouvrage d'art souterrain aux voies ferrées d'environ 50 mL, une trémie nord de 250 mL et une trémie sud de 100 mL) sont susceptibles de perturber les écoulements souterrains et d'engendrer l'apparition d'un effet barrage. Le Cerema cherche à quantifier cet impact en réalisant une modélisation hydrogéologique des écoulements souterrains de la nappe alluviale superficielle, en connexion hydraulique avec la Marne, et de la nappe semi-profonde du Marno-Calcaire de Saint-Ouen inférieur, en charge sous les Alluvions. Le Cerema a créé un modèle géologique multi-couches en interpolant les données de sondages avec le logiciel GDM standard (© BRGM). En plan, le modèle est subdivisé en deux grandes zones maillées : une zone dite « active » correspondant à l'aquifère alluvionnaire et une zone dite « inactive » correspondant à une zone imposée à flux nul pour simuler le projet. Les simulations sont réalisées en régime permanent. Un relevé piézométrique synchrone a été réalisé par le Cerema le 03 avril 2019 en période de hautes eaux, sur 54 piézomètres actifs recensés. Il a permis de caler l'état initial du modèle afin de reproduire les conditions hydrogéologiques avant travaux. Les niveaux piézométriques sont correctement reproduits puisque le coefficient de corrélation est de 0,89. Le calage du modèle est satisfaisant. Les ouvrages projetés ont ensuite été intégrés au modèle en créant un mur amont et aval faisant obstacles aux écoulements. Les mailles situées entre les deux parois ont été désactivées en leur imposant un flux nul. Des tests de sensibilité du modèle ont été réalisés en faisant varier différents paramètres hydrodynamiques tel que les perméabilités et l'angle d'incidence du projet avec la direction d'écoulement. Ces tests confirment la fiabilité du modèle. En l'état actuel, l'effet barrage modélisé est faible (± 20 cm) et jugé acceptable.

Mots clés : Modélisation numérique, infrastructures linéaires, ouvrages

ANSE DU PORTIER A MONACO : CALCULS DYNAMIQUE NON LINEAIRES POUR LA CONSTRUCTION DE LA PLATE-FORME DE L'INFRASTRUCTURE MARITIME.

ANSE DU PORTIER, MONACO: DYNAMIC CALCULATIONS FOR THE CONSTRUCTION OF THE EMBANKMENT OF THE MARINE INFRASTRUCTURE

Fabien Borsellino[1], Luc Boutonnier[2], Alain Pecker[3], Thibaut Perini[4]

1 Egis, Seyssins, France
2 Egis, Seyssins, France
3 Consultant, Paris, France
4 Bouygues Construction, Monaco

RÉSUMÉ

Dans le cadre de la réalisation de la plate-forme de l'Extension en Mer de Monaco au droit de l'Anse du Portier, de nombreuses problématiques géotechniques liées au séisme ont été traitées.

Pour la justification de la stabilité des ouvrages, les approches traditionnelles ont montré leurs limites. Afin de pallier cette faiblesse, des calculs temporels aux éléments finis en dynamique non linéaire (pour différents accélérogrammes) ont été implémentés au niveau de l'extrémité Nord du projet. La stabilité de la plate-forme a ainsi pu être démontrée en calculant les déplacements résiduels post séisme.

Pour l'examen du potentiel de liquéfaction des sédiments, sous plus de 15 m de couverture, des calculs aux éléments finis de type « colonne de sol » ont été réalisés. Dans cette configuration spécifique où les recommandations du NCEER ne sont plus adaptées, cette méthode a notamment permis de déterminer la valeur de la sollicitation sismique (CSR) à injecter dans les calculs

L'objectif est de présenter une synthèse des résultats de ces calculs en lien avec les dispositions constructives appliquées à la plate-forme de l'infrastructure maritime.

Mots clés : liquéfaction ; séisme ; dynamique non linéaire ; renforcement de sol ; travaux maritimes

MODELISATION D'ESSAI DE LIQUEFACTION DE FONDATION SUPERFICIELLE SUR TABLE VIBRANTE AVEC CODE_ASTER

MODELING LIQUEFACTION TESTS OF SHALLOW FOUNDATIONS ON UNIXIAL SHAKING TABLE WITH CODE_ASTER

Nagham A. A. CHEHADE[1], Vinicius ALVES FERNANDES[2,3,4], François HAMON[2], Fernando LOPEZ-CABALLERO[1,4]
[1] *Laboratoire MSS-Mat, CNRS UMR 8579, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay*
[2] *EDF R&D, Lab Paris Saclay, Palaiseau*
[3] *IMSIA UMR EDF-CNRS-CEA-ENSTA 9219, Palaiseau*
[4] Institut SEISM, http://www.institut-seism.fr

Résumé

Lors de grands séismes, la perte de résistance des dépôts granulaires saturés lâches liée au phénomène liquéfaction est un aspect prépondérant à prendre en compte pour évaluer la vulnérabilité sismique des ouvrages. En effet, les séismes de Nigata au Japon (1964) et celui d'Alaska aux Etats Unis (1964) ont mis en évidence l'importance de la prise en compte du phénomène de liquéfaction des sols dans ces conditions (Seed et Lee, 1966). La pratique courante d'estimation du potentiel de liquéfaction d'un sol se base sur des corrélations empiriques avec des essais in situ courants (*Standard Penetration Test*, SPT notamment). Ces critères permettent d'évaluer le besoin de réaliser des travaux de traitement contre la liquéfaction des sols, tels que des techniques de renforcement (e.g. colonnes ballastées, injection de coulis cimentaire).

L'utilisation des modèles numériques pour l'estimation de la vulnérabilité des ouvrages sur sol liquéfiable au cours des séismes intègre différentes sources de non linéarité du comportement des sols (couplage déviatorique-volumique, état critique, influence de la pression moyenne effective dans une approche hydro-mécanique couplée, …). Ce type d'approche requiert disposer des modèles de comportement et des approches de modélisation validées à partir des campagnes d'essai expérimentaux. Dans ce contexte, le Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) a réalisé un benchmark international en 2018 sur des essais sur table vibrante au cours desquels un conteneur laminaire, contenant une fondation superficielle posée sur sol liquéfiable, a été excité par un signal sismique unidirectionnel L'objectif de ce travail est de proposer une modélisation numérique de l'essai réalisé par PEER à l'aide du code éléments finis code_aster et le modèle de comportement Hujeux/ECP (Aubry et al., 1982 ; Hujeux, 1985), en intégrant à la fois la réponse sismique de la fondation et le calcul des tassements sismo-induits, dans un cadre de modélisation hydromécanique couplée. Les résultats très encourageants obtenus dans cette étude permettent d'enrichir le dossier de validation des outils utilisés par l'ingénierie d'EDF pour l'évaluation des dommages liés à la liquéfaction des ouvrages.

Mots clés : Modélisation numérique, liquéfaction, fondation superficielle, table vibrante, code_aster

PRISE EN COMPTE DU PHENOMENE DE CONTRACTANCE / DILATANCE DANS LA MODELISATION DE L'INTERFACE SOL-PIEU SOUS SOLLICITATIONS CYCLIQUES

TAKING INTO ACCOUNT THE PHENOMENON OF CONTRACTANCY / DILATANCY IN THE DESIGN OF SOIL-PILE INTERFACE UNDER CYCLIC LOADING

Mirna DOGHMAN[1], Hussein MROUEH[2], Sébastien BURLON[3]
[1] *Doctorante, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), Université de Lille, Villeneuve d'Ascq, France*
[2] *Professeur des universités, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), Université de Lille, Villeneuve d'Ascq, France*
[3] *Directeur, Terrasol-Setec, Paris, France*

Résumé

Plusieurs méthodes existent dans la littérature pour appréhender le comportement des pieux. Dans le cas des sollicitations axiales, la méthode la plus utilisée est celle des courbes de transfert (appelée méthode t-z), même dans le cas des sols à comportement complexe. Le principe de cette méthode est de déterminer la loi d'interaction sol-pieu dans le sens de la sollicitation et éventuellement à la base du pieu. Bien que cette méthode s'avère très efficace dans la pratique, elle présente un inconvénient majeur du fait de la non prise en compte de l'effet du sol dans la direction normale au pieu. En effet, une question majeure se pose sur l'influence de la variation de la contrainte normale autour de pieu qui peut affecter le mécanisme de frottement axial. Cette variation au niveau de l'interface sol-pieu peut être prise en compte dans les outils numériques en utilisant des lois de comportement existantes dans la littérature. Ces dernières peuvent simuler le comportement de contractance /dilatance de l'interface en faisant appel à de nombreux paramètres (physiques ou numériques) qui nécessitent d'être calibrées. Cet article présente une méthode alternative pour simuler le comportement de l'interface en tenant compte de la variation de la contrainte normale. Des courbes expérimentales présentant la variation du déplacement normal en fonction du déplacement tangentiel sont utilisées pour gérer le comportement normal de l'interface. Ces courbes sont couplés à un calcul direct par éléments finis, faisant ainsi l'économie de l'intégration numérique d'une loi de comportement non linéaire pour l'interface. Les calculs montrent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux.

Mots clés : Modélisation numérique, interaction sol-pieu, contrainte normale, contractance/dilatance, courbes expérimentales

MODELISATION NUMERIQUE D'UN MERLON PARE-BLOCS EN SOL RENFORCE

NUMERICAL MODELING OF A REINFORCED SOIL BUND

Oltion KORINI[1], Marion BOST[1], Jean-Pierre RAJOT[1], Yassine BENNANI BRAOULI[2], Nicolas FREITAG[2]
[1] IFSTTAR, Lyon, France
[2]Terre Armée SAS, Rueil Malmaison, France

Résumé

Les merlons en sol renforcé qui présentent une bonne capacité d'amortissement, sont des dispositifs utilisés en protection contre les chutes des blocs rocheux en zone de montagne. L'absence de théorie partagée sur leur comportement sous impact n'a pas permis jusqu'à présent l'établissement d'un référentiel technique et encore moins de norme pour la conception de ce type d'ouvrage. Différentes approches de modélisation numérique (éléments finis, éléments discrets) ont certes été développées pour simuler des impacts sur les merlons en sol renforcé. Mais les modèles sont généralement calibrés sur la base de résultats expérimentaux en vraie grandeur en nombre limité et les critères de rupture des matériaux ne comportent aucune variable dynamique. En d'autres termes, il est très probable que si la vitesse de l'impacteur était modifiée, les résultats du modèle numérique ne correspondraient pas à la réalité.
Un modèle numérique en éléments finis d'un merlon en sol renforcé intégrant un comportement dynamique du sol et de l'interaction sol-renforcement a été développé. Pour le sol, le critère de rupture de Drücker-Prager est complété d'une loi d'écrouissage fonction du taux de déformation tandis que l'interaction sol-renforcement est modélisée par un coefficient de frottement fonction du taux de glissement relatif entre les deux éléments.
Le modèle a été appliqué pour reproduire un essai d'impact réalisé en vraie grandeur sur un merlon en sol renforcé par des géogrilles. Il permet de reproduire la décélération de l'impacteur, la déformée du merlon sous l'impact, la déformation des renforcements et les pressions dans le sol à la base du merlon. La bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux confirme la pertinence des mécanismes internes de rupture qu'il a été choisi de reproduire numériquement. Le comportement interne d'un merlon en sol renforcé a ainsi été identifié. Cette analyse devrait contribuer à établir une méthode de dimensionnement pour ce type d'ouvrage.

Mots clés : modélisation numérique, éléments finis, merlon pare-blocs, géogrille, impact dynamique