

# Les posters

## **P1. Progrès dans l'estimation du taux de réemploi des sols de déblai et dans celle de la portance des sols de fondation en remblai**

**Cuinet J.-M.<sup>1</sup>, Gress Jean-Claud<sup>1</sup>**

1 - Hydrogéotechnique (France)

L'estimation du taux de réemploi des sols de déblai en remblai est un challenge majeur pour le géotechnicien en charge d'études géotechniques d'infrastructures. Nous développons ici des progrès récents dans cette approche, progrès également applicables à la caractérisation de la portance des sols de fondation en remblai.

## **P2. Fondations profondes exceptionnelles pour le projet Skyligth**

**Reboul Michaël<sup>1</sup>, Richard Stéphanie<sup>2</sup>, Tondji-Biyo Jacques-Jean<sup>1</sup>**

1 - TECHNOSOL, 2 - FRANKI FONDATION (France)

Le projet Skyligth consiste à la réalisation d'une résidence étudiante en R+18 enjambant le tunnel du RER A derrière la Grande Arche de la Défense. La géométrie du projet ainsi que le porte-à-faux créé par la présence du tunnel a conduit à des descentes de charges pouvant dépasser 5000 tonnes sur certains appuis. Dans ces conditions, afin de rendre le projet viable économiquement, TECHNOSOL, en partenariat avec FRANKI FONDATION, s'est orienté vers une conception de fondation sur groupe de pieux ancrés dans le calcaire grossier et dimensionnés selon une approche de mécanique des roches. Afin d'étudier les tassements du projet et son influence sur les tunnels du RER A, une modélisation éléments finis 3D été menée, prenant en compte l'ensemble des pieux de fondation du projet. Le dimensionnement a conduit à des pieux forés simple pouvant atteindre 1.5 m de diamètre et 28 m de profondeur. Leur exécution a été confiée à FRANKI FONDATION, sous la supervision d'exécution de TECHNOSOL.

Mots clefs : pieux, mécanique des roches, modélisation

## **P3. Benchmark aléa chute de blocs (cas de la déviation d'Ax-les-Thermes)**

**Merrien-Soukatchoff Véronique<sup>1</sup>, Gasc-Barbier Muriel<sup>2</sup>**

1 - Laboratoire Géodésie, Géomatique, Géosciences, Aménagement et Droit Foncier EA 4630, 2 - Cerema Toulouse

De nombreuses mesures ont été effectuées pour dimensionner les talus de grandes hauteurs nécessaires au passage de la déviation routière d'Ax-les-Thermes. L'arrêt des travaux en cours de construction a permis d'effectuer des mesures complémentaires et on dispose sur ce cas de mesures de fractures plus nombreuses que dans des cas standard de travaux équivalents. Un des talus de déblais susceptible de produire des glissements plan ou en dièdre a été boulonné. Le but de cet article est de présenter toutes les données et les analyses déjà effectuées sur ce cas afin que ces informations puissent servir à une comparaison nationale puis internationale sur le risque chute de blocs. En effet à partir de données de fracturation et d'une géométrie de talus les estimations de l'aléa chutes de blocs peuvent s'opérer selon diverses méthodologies, en utilisant divers logiciels. L'idée de ce Benchmark est de comparer les pratiques sur : - le regroupement des relevés en familles de fractures - la prise en compte des biais d'échantillonnage - les caractéristiques prises pour les discontinuités (déterministe ou stochastique) - l'estimation de l'aléa chute de blocs - les indicateurs de stabilités donnés suite aux analyses de stabilité. Ces indicateurs peuvent être variés par exemple on trouve des résultats en terme de Plus gros bloc instable Bloc moyen le plus probable (avec éventuellement un intervalle de confiance) en terme de volume et de poids Volume (poids) total instable le plus probable, dispersion autour de ce volume Nombre de blocs instable Déplacement des blocs Indicateur local ou global de la stabilité (facteur de sécurité, de fiabilité, etc.) - la prise en compte d'un renforcement (boulonnage) et de la présence d'eau dans l'évaluation de l'aléa - les logiciels utilisés pour ces différentes étapes - la prise en compte des incertitudes géométriques et sur les propriétés mécaniques.

Mots clefs : Ax-les-Thermes, benchmark, mécanique des roches, talus

## **P4. Projet RUFEX - Contribution à l'étude de la durabilité du matériau Deep Mixing**

**Le Kouby Alain<sup>1</sup>, Guimond-Barrett Antoine<sup>2</sup>, Szymkiewicz Fabien<sup>1</sup>, Reiffsteck Philippe<sup>1</sup>, Mosser Jean François<sup>3</sup>, Mathieu Fabrice<sup>3</sup>**

1 - IFSTTAR, 2 - SNCF, 3 - Solétanche-Bachy

Les principaux objectifs de ce papier, qui s'intègre dans le projet de recherche RUFEX, sont de parvenir à une meilleure connaissance des propriétés mécaniques à long terme des matériaux sol-ciment produits in situ par Deep Mixing. En particulier, l'objectif est d'évaluer l'impact de certains facteurs susceptibles d'influer sur la durabilité des sols traités. La présence de composés chimiques potentiellement perturbateurs (sulfate de calcium, chlorure de sodium et diesel) et les effets du séchage et de l'humidité relative sont les deux mécanismes de dégradation potentiels étudiés afin d'évaluer la durabilité des sols traités. Malgré une certaine dispersion, les résultats de cette étude mettent clairement en évidence les effets de différentes conditions de mélange et de cure sur les caractéristiques des sols traités. Les données accumulées dans ces travaux montrent qu'il est possible de définir, à partir de différents indicateurs, un cadre général pour l'évaluation de la durabilité des sols traités par Deep Mixing. La corrélation directe entre certains indicateurs potentiels et les paramètres de mise en œuvre (tels que le dosage en ciment et la teneur en eau) suggère qu'il est possible d'optimiser les propriétés des matériaux soil-mix dans les limites imposées par les conditions géologiques du site. Des classes de durabilité potentielle basées sur la porosité accessible à l'eau sont proposées pour comparer différents mélanges sol-ciment.

Mots clefs : résistance, soil, deep-mixing, durabilité

## **P5. Étude en chambre d'étalonnage du frottement sol-pieu sous grands nombres de cycles dans une argile saturée**

**Muhammed Rawaz Dlawar<sup>1</sup>, Canou Jean<sup>1</sup>, Dupla Jean-Claude<sup>1</sup>, Delmi Hocine<sup>1</sup>**

1 - École des Ponts ParisTech (France)

On présente dans cette communication les résultats d'essais du type modélisation physique réalisés en chambre d'étalonnage dans une argile saturée, destinés à étudier l'évolution du frottement local mobilisé lors de l'application de grands nombres de cycles (100000 cycles). Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet national SOLCYP, avec l'objectif de mieux comprendre le comportement global des pieux soumis à de grands nombres de cycles de chargement axial. Après une présentation du dispositif d'essai utilisé et du protocole expérimental mis en œuvre, on décrit un essai typique de chargement réalisé sur la kaolinite Speswhite. Le chargement axial, réalisé à déplacement contrôlé, pour une amplitude cyclique donnée, sur une sonde-pieu instrumentée, permet de mettre en évidence une première phase de dégradation du frottement local (radoucissement cyclique) suivie d'une phase de renforcement de ce frottement (durcissement cyclique). L'évolution du frottement local est quantifiée grâce à l'introduction d'un coefficient d'évolution qui permet de visualiser simplement les phases de dégradation et de renforcement. Des essais de chargement statique jusqu'à rupture sont réalisés avant et après la séquence cyclique, ce qui permet de quantifier l'influence des cycles sur le frottement statique mobilisable après les cycles par rapport au frottement statique initial. Les évolutions du frottement mobilisable sous chargement cyclique sont interprétées en termes de génération et de dissipation des surpressions interstitielles qui se développent lors de la séquence cyclique. On présente finalement l'influence de l'amplitude du déplacement cyclique sur les résultats observés, ce paramètre se révélant être déterminant sur l'évolution du frottement mobilisé lors des cycles ainsi que sur le frottement statique mobilisable après la séquence cyclique.

Mots clefs : dégradation, frottement sol-pieu, chargement cyclique, chambre d'étalonnage, modélisation physique, surpression interstitielle

## **P6. Solution terre armée dans un projet de soutènement sur la ligne ferroviaire Fianarantsoa côte est Madagascar**

**Ramasiarinoro Voahanginirina<sup>1</sup>, Andriamamonjisoa N.<sup>1</sup>, Andrianaivo Lala<sup>2</sup>, Ravokatra Fidiniavo<sup>1</sup>, Rakotondrabezaharinoro N.<sup>1</sup>**

1 - Département des Sciences de la Terre - Université d'Antananarivo (Madagascar), 2 - Laboratoire de Géotechnologie, École Supérieure Polytechnique - Université d'Antananarivo

Lors d'une étude de soutènement, les incidences d'un choix techniquement et économiquement judicieux sont particulièrement importantes. Le long de la ligne ferroviaire Fianarantsoa Côte Est (FCE) où le soutènement est lié en particulier à des problèmes de stabilité, on présente tout d'abord les résultats d'études géologiques, géotechniques, géophysiques, et on en tire des bilans relatifs au glissement de terrain. On traite ensuite les problèmes de stabilité mécanique du soutènement, de géométrie, d'adaptation au milieu ambiant et de mise en œuvre. On se propose dans ce manuscrit d'examiner et de comparer les solutions et on en tirera enfin un bilan sur les plans technique et économique.

Mots clefs : technique, stabilité mécanique, soutènement, glissements de terrain, économie

## **P7. Approche multi-échelle du traitement des argiles par la méthode du deep soil mixing**

**Le Kouby Alain<sup>1</sup>, Duc Myriam<sup>1</sup>, Marino-Paredes Joali<sup>2</sup>, Fanelli Sonia<sup>1</sup>**

1 - IFSTTAR, 2 - Université def Perugia (Italie)

Le soil mixing consiste à traiter le sol avec un liant hydraulique en le mélangeant mécaniquement en place pour améliorer ses propriétés mécaniques et/ou hydrauliques. Son attrait économique ainsi que son faible impact environnemental ont fait de cette méthode, jusque récemment cantonnée à l'amélioration de sols compressibles, une alternative compétitive aux méthodes traditionnelles de renforcements des sols, de soutènements (temporaires voire définitifs), de fondations et de travaux d'étanchéité. Les argiles étant reconnues comme étant des perturbateurs de prise dans les bétons par exemple, plusieurs argiles (illite, kaolinite, montmorillonite) ont été choisies et caractérisées du point de vue minéralogique et géotechnique (deux sols argileux naturels ont été étudiés pour comparaison). Ces matériaux ont ensuite été traités avec un ciment de fondation classique (CEMIII) à des dosages allant de 140 kg/m<sup>3</sup> à 210 kg/m<sup>3</sup> selon une procédure bien précise et établie lors de précédents tests. Les caractéristiques mécaniques des mélanges sol-ciment (matériaux complexes) tels que la résistance à la compression (Rc), la résistance à la traction (Rt) ainsi que les modules E50 locaux et globaux ont été déterminés expérimentalement en fonction du temps de cure et nous sommes intéressés plus particulièrement aux matériaux à 7 j et 28 j de prise. Grâce à une approche microstructurale et minéralogique (MEBE, DRX, porosimétrie mercure, etc.), nous avons essayé de détecter les différences de comportement à l'échelle micro entre les mélanges réalisés avec les différentes argiles et qui sont sans doute à l'origine de la diminution des performances mécaniques enregistrées. Comprendre les réactions qui ont eu lieu et qui dépendent du type d'argile impliquées est une première étape pour proposer des solutions potentielles (traitement) pour y remédier.

Mots clefs : porosimétrie, minéralogie, essais en laboratoire, deep soil mixing, argile

## **P8. Ouvrages d'accès au second pont sur le Wouri : fiabilisation du projet grâce à un remblai d'essai**

**Lefèvre Céline<sup>1</sup>, Juignet Arnaud<sup>1</sup>, Helas Olivier<sup>2</sup>**

1 - GEOS Ingénieurs Conseils, 2 - Dodin Campenon Bernard (France)

Dans le cadre de la construction d'un second pont sur le Wouri, au Cameroun, les ouvrages d'accès s'insèrent dans un contexte géotechnique délicat, caractéristique des estuaires, avec d'importantes épaisseurs d'alluvions compressibles, mais aussi des remblais mis en œuvre pour gagner des terrains sur le fleuve. Le profil en long est principalement en remblai, avec des hauteurs qui atteignent environ 8 m au niveau du raccordement au pont. En phase préliminaire, des tassements pouvant aller jusqu'à plus de 2 m d'amplitude ont été estimés. Pour diverses raisons, dont notamment la disposition lenticulaire des alluvions, les données de sondages et d'essais en laboratoire se sont avérées insuffisantes pour caractériser correctement la compressibilité et la vitesse de consolidation des sols supports à grande échelle, sous la charge des ouvrages. Le groupement de conception-construction a donc décidé de réaliser un remblai d'essai dans la zone la plus critique, au droit d'un ancien bras mort du Wouri. Le logiciel GEODEPL, développé par GEOS Ingénieurs Conseils, a été utilisé pour exploiter les mesures réalisées sur le terrain, et ainsi prédire l'évolution des tassements par application de trois méthodes différentes (Asaoka, Recordon et Al-Shamrani). À ce jour, le suivi du remblai d'essai a permis d'atteindre plusieurs objectifs : - la fiabilisation du modèle géotechnique retenu et des amplitudes de tassements (plus de 1,8 m mesurés au droit du remblai d'essai), - l'estimation d'un coefficient de consolidation vertical « équivalent » représentatif du comportement réel des sols compressibles mélangés du site sous les charges apportées par les remblais, - la caractérisation des phénomènes de fluage, qui n'avaient pas pu être quantifiés auparavant. Très concrètement, pour le projet, l'exploitation de ce remblai va permettre d'adapter le phasage, d'optimiser certains dimensionnements établis jusqu'alors de manière sécuritaire faute de données, et de fiabiliser le planning des travaux.

Mots clefs : GEODEPL, consolidation, remblai instrumenté, fluage, tassement

## **P9. Contribution à l'étude du comportement des couches d'assises renforcées par des matériaux recyclés**

**Hadidane Hocine<sup>1</sup>, Oucief Hocine<sup>1</sup>, Merzoud Mouloud<sup>1</sup>, Berredjem Layachi<sup>1</sup>**

1 - Laboratoire Matériaux Géomatériaux et Environnement, Université Badji Mokhtar - Annaba (Algérie)

L'activité de construction génère d'une part, l'épuisement des gisements naturels de granulats, d'autre part, l'accumulation de la quantité des déchets de construction, qui peuvent être estimée à des millions de tonnes par an dans les pays du monde notamment en Algérie. Le recyclage de l'ancien matériau offre de multiples avantages sur le plan environnemental : une économie de matériaux naturels, une forte diminution du trafic de poids lourds qui transportent ces matériaux et ainsi une grande économie d'énergie. Ce travail constitue une contribution expérimentale à l'étude de la durabilité des différents matériaux provenant de la démolition du bâtiment (béton, brique et parpaing) en vue de leur utilisation dans les infrastructures des chaussées souples. Les résultats obtenus sont extrêmement encourageants pour l'incorporation de ces matériaux recyclés dans le corps de chaussée.

Mots clefs : CBR, caractérisation, recyclage, parpaing, brique, béton, Proctor

## **P10. Projet SOLCYP : programme et objectifs des essais de chargement axiaux sur des pieux *in situ*, en centrifugeuse et en chambre d'étalonnage**

**Le Kouby Alain<sup>1</sup>, Puech Alain<sup>2</sup>, Thorel Luc<sup>1</sup>, Blanc Matthieu<sup>1</sup>, Silva Matias<sup>3</sup>, Canou Jean<sup>4</sup>, Dupla Jean Claude<sup>4</sup>**

1 - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, 2 - FUGRO, 3 - 3SR, 4 - ENPC

L'objectif ultime du projet SOLCYP (SOLlicitations Cycliques sur les Pieux) est de proposer des recommandations sur la prise en compte des cycles dans le dimensionnement des pieux. Il a été décidé d'établir une base de données d'essais pour caractériser la réponse d'un pieu sous chargement cyclique en termes d'accumulation des déplacements et d'évolution de la capacité portante (plus précisément du frottement latéral et de la résistance en pointe). Deux sols de référence ont été choisis : une argile surconsolidée et un sable. Une panoplie complète d'essais a été mise en œuvre : - essais *in situ* réalisés par l'IFSTTAR sur les sites expérimentaux de Merville (argile surconsolidée) et Loon-Plage (sable de Dunkerque) - essais en centrifugeuse à l'IFSTTAR (sable de Fontainebleau) - essais en chambre d'étalonnage au Laboratoire 3SR (sable de Fontainebleau) et au Laboratoire Navier Géotechnique (sable de Fontainebleau et argile). Ces essais, fortement instrumentés (extensomètres amovibles, jauges de contraintes) ont permis de mettre en évidence : - l'influence du mode de chargement (monotone, cyclique répété, cyclique alterné) - l'ordre d'application des chargements - la dégradation du frottement avec l'amplitude et le nombre de cycles et l'éventuel report des charges en pointe (essais en compression) - l'objectif de la communication est de : - décrire l'ensemble du dispositif expérimental mis en œuvre ; - montrer la spécificité et la complémentarité des différents procédés ; - mettre en lumière l'originalité des résultats obtenus.

Mots clefs : essais *in situ*, chargement cyclique axial, centrifugeuse, pieu, chambre d'étalonnage

## **P11. Impact du comportement des argiles gonflantes sur les soutènements**

**Meyer Grégory<sup>1</sup>, Boutonnier Luc<sup>1</sup>, Mazaré Bruno<sup>1</sup>**

1 - EGIS GEOTECHNIQUE (France)

La prise en compte des pressions de gonflement dans les projets d'interaction sol/structure (gares souterraines en parois moulées, tunnels, etc.) peut être à l'origine de surcoûts importants dans le dimensionnement des projets. En région parisienne, les formations concernées sont principalement les Argiles Vertes de Romainville, les Marnes d'Argenteuil et les Argiles Plastiques de l'Yprésien. Différentes procédures d'essais existent pour caractériser ce gonflement et peuvent donner des résultats différents : essais de gonflement en parallèle (norme XP P94-091), essai « Huder Amberg » (procédure International Society for Rock Mechanics, 1989), essai à déformation nulle (norme XP P94-090-1). Nous proposons de développer dans cette communication l'origine des pressions de gonflement mesurées sur les essais de laboratoire et de montrer l'influence de deux paramètres déterminants sur les pressions de gonflement : la pression d'eau initiale (positive ou négative, succion) et le déchargement mécanique lors du prélèvement des échantillons. Le poids de ces deux paramètres est évalué à la lumière du couplage hydromécanique calculé sur une sollicitation non drainée pour des sols quasi-saturés (Boutonnier, 2010 ; Mahmutovic et al., 2013). Cette analyse permet par la suite de proposer une méthode pour évaluer la pression de gonflement à prendre en compte sur les ouvrages. Quelques exemples d'application sont proposées pour illustrer la méthodologie.

Mots clefs : pression de gonflement, Huder Amberg, oedomètre, sols argileux, gonflement

## **P12. Suivi du vieillissement d'un remblai traité à la chaux et/ou au ciment à Héricourt (70) : quels enseignements sur la durabilité ?**

**Boussafir Yasmina<sup>1</sup>, Mercadier Dimitri<sup>2</sup>, Cui Yu-Jun<sup>3</sup>**

1 - IFSTTAR, 2 - CEREMA, 3 - ENPC

Dans le cadre du projet ANR TerDOUEST, un remblai réalisé en argile très plastique et en limon, tous deux traités à la chaux, ainsi qu'à la chaux et au ciment a été construit à Héricourt (70). Ce remblai de 5 mètres de haut, a été instrumenté afin de suivre l'évolution des propriétés des matériaux dans le temps, sous l'influence des aléas climatiques et des remontées de nappe. Des capteurs de teneur en eau volumique (TDR) et de succion ont permis d'acquérir pendant 4 ans des données couplées à des données météorologiques. La phase de construction du remblai a été suivie par les partenaires du projet TerDOUEST ce qui a permis d'acquérir des informations essentielles sur la composition initiale de l'ouvrage en terre et ses performances initiales. L'article présente les résultats acquis depuis 4 ans, en les mettant en parallèles avec les données météorologiques et leur localisation au sein du remblai. Ce travail tente de mettre en évidence l'influence des conditions extérieures à l'ouvrage sur les propriétés des matériaux de remblai, en base de remblai (soumise aux fluctuations de la nappe) et en talus (soumise à la météorologie : pluie, vent, évaporation, gel). Les résultats sont utilisés afin de tirer des enseignements sur l'optimisation du dimensionnement des remblais et sur les indicateurs pertinents permettant d'évaluer la durabilité de l'ouvrage en matériaux traités. Il sera notamment intéressant de commenter les fluctuations des valeurs de succion et de teneurs en eau, principalement en talus. Les résultats mettent en évidence le couplage avec la météorologie et la mécanique des sols non saturés.

Mots clefs : talus, ciment, chaux, sols traités, dimensionnement, météorologie, durabilité, instrumentation, remblai expérimental, base de remblai

## **P13. Étude de la variation de la pénétration dynamique de pointe en fonction de l'état hydrique dans les limons peu plastiques du plateau Normand et corrélations nouvelles**

**Ferreira Matthias<sup>1</sup>, Giudicelli Benoit<sup>1</sup>**

1 - Hydrogéotechnique (France)

Cette étude a pour objectif de caractériser la variation de la pénétration dynamique de pointe en fonction de l'état hydrique des limons peu à moyennement plastiques en Normandie (classe A1/A2 au sens du GTR). D'une manière générale, la plupart des régions du monde présente des cycles de variations hydriques au cours du temps rendant impératif aux géotechniciens de se poser la question de savoir ce que vaut le paramètre mesuré in situ : est-il dans des conditions de saturation ? La valeur mesurée est-elle constante dans le temps ? À partir de quelle profondeur les cycles de précipitations n'impactent plus l'état hydrique du sol ? L'objectif de cette étude est de donner de nouveaux outils pour anticiper les effets de la saturation et d'anticiper la dégradation de certaines valeurs mécaniques mesurées in situ. Un protocole expérimental mené pendant deux ans permettant de comparer, de manière hebdomadaire, un pénétrogramme couplé à un profil hydrique a permis d'établir une relation empirique reliant la résistance de pointe dynamique à la teneur en eau et par extension à une relation permettant d'estimer la résistance de pointe dynamique à saturation.

Mots clés : état hydrique, saturation, résistance dynamique, variation

## **P14. Conception d'un dispositif de réfection durable pour remédier à un glissement de terrain**

**Ayadat Tahar<sup>1</sup>**

**1 - Université de Prince Mohammad Bin Fahd (PMU University) (Arabie saoudite)**

1 - Université de Prince Mohammad Bin Fahd (PMU University) (Arabie saoudite)

La construction est un domaine périlleux. Parmi ces périls on peut citer par exemple les dommages et les désordres survenus dans les propriétés à cause des glissements de terrains. Le glissement d'une pente se produit lorsque les sollicitations déstabilisantes des matériaux du talus, dû à la gravité et les contraintes de cisaillement, dépassent la résistance au cisaillement. Plusieurs facteurs peuvent conduire à l'augmentation des contraintes de cisaillement ou à la diminution de la résistance au cisaillement, incluant l'érosion et altération de la géométrie du talus. Dans cette communication, une étude de cas d'un glissement de terrain sur un tronçon d'une route régionale a été menée. L'étude comprend une analyse de la stabilité du talus, le diagnostic des causes du glissement, la proposition d'un dispositif de réfection durable, ainsi que la méthode de mise en place de la méthode proposée. Les mesures correctives ont été conçues selon une perspective de performance, d'adaptabilité et de durabilité.

Mots clés : durabilité, stabilité, dispositif de réfection, talus, glissement

## **P15. Évaluation du procédé géotechnique VSoL® au regard des dispositions du cadre normatif français & étranger**

**Chikaras Michalis<sup>1</sup>, Chanteperdrix Benoit<sup>2</sup>**

1 - Consultant Indépendant (Grèce), 2 - Europe Fondations SA (France)

Cet article évalue le procédé géotechnique VSoL® dans le cadre normatif français fixé par la norme de référence pour les ouvrages en sol rapportés renforcés par armatures peu extensibles et souples NF P 94-270 qui constitue la norme d'application de l'EC7 pour la France en ce qui concerne les parois clouées et les ouvrages de soutènement en sol renforcé. Les points suivants ont été particulièrement examinés : la majoration des efforts de traction dus à la configuration en treillis ; La mobilisation des efforts d'interaction avec le remblai ; La durabilité des treillis métalliques soudés enterrés ; A propos de chacun des trois sujets majeurs de l'étude on compare les règles fixées par les principaux standards nationaux existants (USA, GB, AUS & HK), afin d'en discerner les points de convergence ou de divergence. On fait ensuite le point des connaissances et des données dont on dispose.

Mots clefs : VSoL®, sol renforcé, NF P 94-270, EC7, interaction

## **P16. Comportement des sols sous les fondations d'éolienne de grande hauteur** **Kachkouch Fatima Zahraa<sup>1</sup>, Rodriguez Diego<sup>1</sup>, Imanzadeh Saber<sup>2</sup>, Pantet Anne<sup>1</sup>, Lelen Benoît<sup>3</sup>**

1 - Laboratoire Ondes et Milieux Complexes – Université du Havre, 2 - LOFIMS - Insa Rouen, 3 - Freyssinet

Dans cet article, seront présentés les premiers résultats de la reconnaissance des sols à partir de SPT, pour l'implantation d'éoliennes terrestres de grande hauteur au Brésil. Le comportement du sol de fondation est examiné en déterminant la capacité portante par la méthode analytique et les déplacements par la méthode numérique, en utilisant les paramètres classiques de Mohr-Coulomb, déterminés à partir de corrélations.

Mots clefs : éolienne, méthodes analytique et numérique, standard penetration test, capacité portante, fondation superficielle

## **P17. Estimation de la dégradation de la résistance de l'interface sol-pieu sous chargement cyclique à partir d'essais de laboratoire** **Abchir Zineb<sup>1</sup>, Burlon Sébastien<sup>1</sup>, Puech Alain<sup>2</sup>**

1 - IFSTTAR, 2 - FUGRO (France)

Le présent article s'intéresse à la problématique du chargement cyclique axial des pieux mis en œuvre dans du sable. Une loi de réaction cycle à cycle nommée TZC est présentée. Son formalisme permet de rendre compte de l'évolution de la capacité portante d'un pieu au cours d'une séquence de chargements cycliques ainsi que de l'accumulation des déplacements en tête de pieu. Le modèle proposé inclut, en particulier, un paramètre traduisant l'évolution (dégradation ou amélioration) du frottement axial limite en fonction du nombre de cycles. Ce paramètre est estimé selon deux méthodes différentes qui reposent toutes deux sur l'exploitation d'essais de cisaillement en laboratoire. La première méthode nommée méthode ABC a été développée par l'Imperial College à partir d'essais de cisaillement simple et prend seulement en compte l'amplitude de cisaillement cyclique. La seconde méthode développée spécifiquement dans le cadre du Projet SOLCYP est basée sur des essais de cisaillement direct à contrainte normale constante et à rigidité contrôlée. L'implémentation de ces deux méthodes dans le modèle TZC est présentée et discutée. L'utilisation de ce modèle à l'échelle du calcul d'un pieu isolé soumis à un chargement cyclique est décrite. Un exemple complet d'application sur un pieu expérimental fait l'objet d'un article conjoint.

Mots clefs : déplacement, loi t-z, chargement cyclique, capacité portante, pieu, frottement axial

## **P18. Développement d'un macroélément 3D pour l'analyse du comportement sismique des fondations superficielles**

**Abboud Youssef<sup>1</sup>, Burlon Sébastien<sup>1</sup>, Semblat Jean<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> - IFSTTAR (France)

Cet article présente le développement d'un macroélément pour étudier l'interaction sol fondation sous sollicitations sismiques en considérant les non-linéarités du sol et de l'interface sol-fondation. L'idée de base est de formuler le mouvement de la fondation au moyen de variables généralisées (forces et déplacements) définies en des points particuliers de celle-ci. Toutes les non linéarités sont concentrées en ces points. La théorie de la plasticité classique est utilisée pour reproduire les non linéarités du macroélément ; les différents mécanismes plastiques (poinçonnement, renversement, glissement) sont couplés dans le cadre de la théorie des multi-mécanismes, et les surfaces de charge correspondantes sont basées sur les critères de l'Eurocode 7 et 8. Ce macroélément est implémenté dans CESAR-LCPC, un outil de calcul par éléments finis développé par l'IFSTTAR. Le macroélément permet ensuite de simuler le comportement tridimensionnel d'une semelle rectangulaire soumise à un chargement sismique et de comparer sa réponse aux limites imposées par les normes en vigueur. Nous nous intéressons notamment à la variation temporelle du coefficient de sécurité durant la sollicitation sismique, et aux effets de la prise en compte des non linéarités sur le dimensionnement des structures.

Mots clefs : calcul numérique, plasticité, séisme, fondation superficielle, macroélément, Interaction sol structure, dimensionnement.

## **P19. Mise en œuvre de l'approche graduée dans les études de liquéfaction**

**Javelaud Emmanuel<sup>1</sup>**

1 - EDF Ceidre TEGG (France)

Différentes méthodes permettent de quantifier le potentiel de liquéfaction des sols soumis à des sollicitations sismiques, et d'évaluer leur tassement sismo-induit. Cela va de méthodes simplifiées aux plus complexes impliquant des calculs en contraintes effectives. Les méthodes retenues doivent être autorisées par les règlements et sélectionnées en fonction des objectifs recherchés. Cet article présente une aide au choix des outils à mettre en œuvre pour les études, et présente une gradation des méthodes de la plus simple aux plus complexes.

Mots clefs : tassements sismo-induits, quantification du potentiel de liquéfaction, ouvrages, liquéfaction

## **P20. Phénomènes de liquéfaction et stabilité par colonnes ballastées dans le site de Heraoua (Alger)**

**Balla Nabila<sup>1</sup>, Sadou Ouassila<sup>1</sup>, Boutouatou Naâman<sup>1</sup>**

1 - Centre National de Recherche Appliqué en Génie Parasismique (Algérie)

La susceptibilité d'un site à la liquéfaction est étudiée à travers des critères empiriques issus de la compilation des cas réels de liquéfaction sismique. Ainsi, un site vérifiant ces critères fera l'objet d'une évaluation de son potentiel de liquéfaction. Ce dernier a été évalué au niveau du site de Heraoua réservé à la construction en considérant à la fois la nature du sol, l'intensité du séisme ainsi que les propriétés mécaniques et dynamiques des couches formant le site. Les résultats des sondages et des essais réalisés par le laboratoire géotechnique montrent que le site est constitué; par une couche de sable dont l'épaisseur varie de 3,2 m à 4 m reposant sur un substratum marneux de consistance raide à plastique, avec présence d'une nappe d'eau, les résultats des essais SPT ont fait ressortir l'existence du risque de potentiel de liquéfaction. Etant donné que toutes les conditions du risque de liquéfaction sont réunies nature du sol (sable) et présence de la nappe, le laboratoire a procédé à un traitement du sol en utilisant la solution des colonnes ballastées pour renforcer la compacité du sol et dépasser la valeur du coefficient de sécurité ( $F_s = 1,25$ ) fixé par le RPA99 version 2003.

Mots clefs : coefficient de sécurité  $F_s$ , essai SPT, coefficient d'uniformité, sable, nappe d'eau, liquéfaction, colonnes ballastées, RPA99 version 2003.

## **P21. Tramway de Valenciennes : une solution innovante de traitement du risque « cavités souterraines anthropiques »**

**Guerin Pierre<sup>1</sup>, Curtil Stéphane<sup>1</sup>, Moal Erwan<sup>1</sup>**

1 - GEOS Ingénieurs Conseils (France)

La ligne 2 du tramway de Valenciennes traverse, sur environ 1 km, une zone où de nombreux effondrements ont été constatés depuis le 18<sup>e</sup> siècle. Cette zone de risque historique résulte de l'exploitation en souterrain de la craie pour la fabrication de chaux depuis l'époque médiévale. L'évolution dans le temps des paramètres mécaniques constitue un facteur aggravant du risque d'évolution des cavités proches de la surface. GEOS a donc conduit un diagnostic global du risque d'effondrement s'appuyant sur des campagnes de sondages destructifs et d'inspections vidéo en forage et sur une analyse des mécanismes de dégradation des ouvrages. L'analyse multicritère des données a permis la sectorisation en zones homogènes en fonction du niveau de risque identifié afin d'optimiser les solutions de traitement. Les solutions de traitement « classiques » consistent à réaliser, depuis la surface, des barrages puis à combler les cavités au moyen de coulis fluides. Cette option n'est pas applicable au projet en raison de la difficulté d'exécution des barrages (cavités non accessibles, réseaux très connectés et non totalement identifiés) et du risque financier associé. Une méthodologie innovante adaptée au contexte a donc été imaginée afin d'assurer un traitement efficace et maîtriser sous la plateforme de tramway grâce à des injections de mortier qui permettent à la fois de combler les cavités en limitant les pertes latérales et de renforcer les horizons décomprimés par compactage horizontal. Le suivi renforcé des travaux (analyse de l'ensemble des paramètres des 396 forages, inspection vidéo des cavités de grandes dimensions, suivi journalier des quantités injectées) a permis à GEOS de confronter son analyse initiale aux travaux réalisés et de confirmer la validité du diagnostic et de la solution technique retenue.

Mots clefs : injection, transport urbain, fontis, cavité souterraine, comblement, diagnostic

## **P22. Approche analytique de l'influence de la plasticité pour la prévision des tassements différentiels d'une structure**

**Basmaji Bakri<sup>1</sup>, Deck Olivier<sup>1</sup>, Al Heib Marwan<sup>2</sup>**

1 - GeoRessources, Université de Lorraine

2 - Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (France)

L'objectif de cet article est de présenter un modèle analytique permettant d'évaluer la déflexion d'une structure située dans une zone de mouvement de terrain afin d'estimer sa vulnérabilité en prenant en compte les phénomènes d'interaction sol-structure (ISS) et en considérant un comportement élasto-plastique du sol. Lorsqu'un mouvement de terrain se produit, on peut distinguer la grandeur  $\delta_0$  qui représente le tassement que subirait une structure en l'absence d'ISS, et la grandeur  $\delta$  qui représente le tassement réel (appelé aussi déflexion) de la structure compte tenu de l'ISS. Un comportement élastique est souvent considéré dans les calculs analytiques d'ISS visant à prévoir le tassement d'une structure. Cependant, lorsque l'amplitude des mouvements est importante, la redistribution des contraintes verticales sous une structure est susceptible de conduire à une plastification du sol avant que le système n'arrive à son état d'équilibre final. Dans cet article, la problématique d'un bâtiment soumis à un tassement de sol  $\delta_0$  est étudiée en utilisant le modèle d'Euler-Bernoulli pour le bâti, et le modèle de Winkler pour calculer la rigidité du sol qui aura un comportement élasto-plastique. Un critère de Mohr-Coulomb associé aux formulations analytiques de calcul de la capacité portante des fondations est utilisé pour justifier les valeurs maximales admissibles des contraintes verticales sous le bâtiment. Les équations d'équilibre du système sont présentées, leur résolution est effectuée par l'intermédiaire de la méthode des différences finies, qui nous permet de calculer la déflexion finale du bâtiment. L'influence de la prise en compte de la plasticité du sol sur la déflexion du bâtiment est étudiée. Les résultats montrent une influence significative de cette plasticité qui tend à diminuer la déflexion finale du bâtiment et donc son endommagement.

Mots clefs : élasto-plasticité, mouvement de terrain, modèle de Winkler, interaction sol- structure

## **P23. Analyse et interrogations liées à l'effondrement de la carrière souterraine de craie de Lorroy en 1910**

**Kreziak Charles<sup>1</sup>, Watelet Jean-Marc<sup>2</sup>**

1 - CEREMA, 2- INERIS (France)

En 1910, la crue de la Seine et de ses affluents a provoqué l'enneigement d'une carrière de craie située en bordure de la vallée du Loing à Lorroy (commune de Château-landon - 77). L'effondrement brutal qui s'en est suivi a engendré un glissement de terrain de grande ampleur détruisant le canal et le hameau voisins et a fait 7 victimes. L'analyse de ce cas revêt un intérêt particulier pour appréhender la stabilité des carrières de craie situées dans un contexte analogue et pose question sur la compréhension du comportement des ouvrages souterrains en versants crayeux.

Mots clefs : effet de l'eau, craie, effondrement, carrière souterraine

## **P24. Élaboration d'une carte de vulnérabilité du sol aux effets induits par le séisme. Application à la ville de Chlef (ex El Asnam- Algérie)**

**Boutaraa Zohra<sup>1</sup>, Bensalem Nabila<sup>1</sup>, Benmahache Abderrazak<sup>1</sup>**

1 - Université Hassiba Benbouali Chlef (Algérie)

En Algérie, la ville de Chlef dont l'histoire sismique est bien connue, est implantée dans une vallée alluvionnaire augmentant le risque sismique auquel elle est soumise. En exploitant les données géotechniques disponibles et moyennant l'outil SIG, ce travail vise l'élaboration d'une carte de vulnérabilité du sol aux effets induits par le séisme pour cette ville-région, les cartes d'occupation de sol, les données géotechniques disponibles et moyennant l'outil SIG, ce travail vise l'élaboration d'une carte de vulnérabilité du sol aux effets induits par le séisme pour la ville de Chlef. La carte élaborée représente un outil d'aide à la décision destiné aux gestionnaires du risque sismique au niveau local.

Mots clefs : ville de Chlef, gestion du risque sismique, effets induits, vulnérabilité du sol, SIG

## **P25. Modèle de compréhension d'une coulée boueuse en site urbain, cas du conservatoire de Lyon**

**Pothier Catherine<sup>1</sup>, Vinet Louis<sup>1</sup>, Bouillod Nicole<sup>2</sup>, Delvallee Aurélie<sup>1</sup>**

1 - Université de Lyon, INSA de Lyon, 2 - Direction Prévention et Sécurité de la Ville de Lyon (France)

La propriété du Conservatoire National Supérieur de Musique et de Danse de Lyon occupe un versant très raide de la rive droite du Val de Saône de l'entrée de la Ville de Lyon en zone de Balmes, zones pentues des collines lyonnaises, gérée par la Direction Prévention et Sécurité de la Ville de Lyon. L'armature géologique de ce versant est constituée d'un socle gneissique surmonté par des argiles miocène puis des cailloutis quaternaires. Le Loess est en place sur le haut du relief et tapisse en colluvionnement le versant. Les jardins en haut de la propriété sont dominés par une voirie soutenue par un grand mur maçonné. À la base des jardins, une terrasse arborée est soutenue par un mur de 7 m de haut au-dessus de la salle de concert. Dans la nuit du mercredi 4 décembre 2013 une importante coulée boueuse dévale la pente sur une quarantaine de mètre avec un arrachement amont d'une quinzaine de mètres de largeur. L'accident en site urbain impactant des constructions importantes type ERP démarre sous la chaussée située à l'amont des jardins. La rupture d'une importante canalisation d'eau génère un grand volume de sol saturé tant sous la chaussée que dans le haut des jardins. Le mouvement crée une importante ravine et s'étale en boue liquide sur la terrasse aval ainsi que contre le mur. Cet article a pour but de fournir une interprétation géologique de zone accidentée s'appuyant sur un modèle topographique, géologique et géotechnique et une modélisation numérique permettant une rétro-analyse des conditions de stabilité initiale et de déclenchement du mouvement ; ainsi qu'une seconde modélisation en écoulement visqueux pour visualiser le déroulé de la coulée. Dans une perspective de gestion de risque des considérations seront apportées en fonction de l'historique du site sur la prévisibilité et la prévention de tel accident.

Mots clefs : analyse, glissement, risque, géologie, modélisation

## **P26. Gestion du littoral face aux risques : application de la méthode VSC**

**Lienard Isabelle<sup>1</sup>, Lefebvre Cédric<sup>1</sup>**

1 - CEREMA (France)

La question du risque de submersion marine s'inscrit dans les réflexions générées par les changements climatiques attendus au cours des décennies à venir. Les objectifs principaux de la mission du Cerema étaient de fournir un outil de recensement, d'évaluation et de suivi des défenses (naturelles ou artificielles) contre la submersion marine dans le Nord-Pas-de-Calais. Pour cette mission, le Cerema a choisi de mettre en œuvre les principes de la méthode des « visites simplifiées comparées » (VSC). Il s'agit d'une méthode générique élaborée en 1994 par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussée d'Angers, dont les fondamentaux ont été adaptés depuis à de nombreuses problématiques (ports, ouvrages d'art, sentiers littoraux, etc.) Cette méthode offre la particularité de ne pas nécessiter un relevé détaillé des désordres, mais d'analyser les processus de dégradation du fonctionnement mécanique de l'ouvrage. La programmation optimisée des travaux à effectuer en urgence ou en entretien courant, est obtenue en croisant l'évaluation de l'état (résultat des visites techniques) et l'importance stratégique (fixé par le gestionnaire). Pour l'évaluation technique, le patrimoine a été structuré (découpage en ouvrages et objets) et des règles d'évaluation ont été créées pour les ouvrages qui n'avaient pas encore fait l'objet d'une application de la méthode, notamment pour les ouvrages naturels comme les cordons dunaires. Comparé à d'autres patrimoines d'ouvrages, celui du littoral pose le problème de la diversité des gestionnaires et propriétaires. Cette mission a permis aux services de l'État d'avoir une vue d'ensemble des types d'ouvrages présents le long du littoral et de leur état structurel. Actuellement, les services de l'État continuent d'utiliser cette méthode et d'effectuer des visites annuelles. Des visites sont également programmées à la suite des événements tempétueux. Cette connaissance permet de définir les orientations pour une gestion durable du trait de côte sur le littoral.

Mots clefs : littoral, gestion du patrimoine, submersion

### **P27. Guide méthodologique : le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées**

**Mathon David<sup>1</sup>, Kreziak Charles<sup>1</sup>, Flahaut Reynald<sup>1</sup>, Berenger Nathalie<sup>1</sup>, Marty Frédéric<sup>2</sup>**

1 - CEREMA, 2 - Direction Interrégionale des Routes Méditerranée (France)

Le risque lié aux cavités souterraines est un risque avéré dans de nombreuses régions de France. Le Plan National Cavité démarré en 2011 a pour objectif de sensibiliser les acteurs à ces problématiques, souvent ignorées du grand public. Les cavités pouvant évoluer par manque d'entretien ou tout simplement par vieillissement, il est utile de savoir poser un diagnostic sur leur stabilité et leur éventuelle évolution. C'est dans cette optique que la DGPR a sollicité le CEREMA afin de rédiger un guide méthodologique intitulé « le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées ». Le document est le fruit du travail de cinq géologues-géotechniciens du CEREMA qui s'appuie sur une rédaction préparatoire ayant réuni des membres de l'IFSTTAR, des CETE et de l'IGC. Le guide propose aux bureaux d'études, un ensemble de recommandations et de méthodes permettant le diagnostic de stabilité interne des cavités souterraines. Les deux premiers chapitres permettent de définir les carrières souterraines concernées et la typologie des désordres rencontrés ainsi que les mécanismes qui les induisent. Le troisième chapitre décrit en quoi consiste exactement un diagnostic de stabilité et définit précisément son contenu, (utile en cas de sous-traitance et de commande). Quatre niveaux d'étude ont été identifiés. Les deux derniers chapitres s'adressent principalement aux géotechniciens qui établiront le diagnostic de stabilité : dans le chapitre quatre, les différents éléments nécessaires au diagnostic sont recensés et expliqués. Le chapitre cinq propose des méthodes permettant l'évaluation de la stabilité. Enfin, des exemples de diagnostic menés selon les 4 niveaux d'études sont présentés. Le guide peut constituer un des éléments permettant de dresser une cartographie d'aléa de surface dans le cadre d'un plan de prévention des risques. Les techniques de traitement et de surveillance des cavités font également l'objet d'autres documents méthodologiques qui compléteront utilement la lecture du guide.

Mots clefs : mécanismes, diagnostic, carrières souterraines, effondrement

## **P28. Le caissonnage en deep soil mixing ou en jet-grouting en zone sismique**

**Lambert Serge<sup>1</sup>, Quirin Léo<sup>1</sup>**

1 - Keller Fondations Spéciales (France)

Le caissonnage en Deep Soil Mixing (DSM) ou en jet-grouting est utilisé principalement pour remédier aux effets potentiels de la liquéfaction lors d'un séisme. Le caisson constitué de tranchées en sol-ciment agit comme une boîte de cisaillement confiné qui apporte une forte augmentation de la rigidité au cisaillement et de la résistance à des grands mouvements de terrain. Ce type de renforcement permet de réduire la distorsion dans le sol ralentissant de ce fait la génération des pressions interstitielles à l'origine de la liquéfaction et crée une barrière avec les zones extérieures non traitées. Le principe en vigueur de conception du caissonnage vis-à-vis de la liquéfaction se fonde sur la réduction de la distorsion du sol. Le sol renforcé par caissonnage peut être classé dans une nouvelle catégorie de sol dont les caractéristiques entraînent une réduction des sollicitations sismiques au sein de la structure. Il est même possible d'envisager un coût du renforcement de sol compensé par une diminution des coûts globaux de la construction. Cet article récapitule les résultats des dernières recherches sur le sujet et présente une application sur un cas concret.

Mots clefs : sismique, distorsion, caissonnage, jet-grouting, Deep Soil Mixing, interaction sol/structure, liquéfaction

## **P29. Étude de stabilité d'un talus - Terril au sein de la C.C.B. à Tournai (Belgique)**

**Vaillant Jean-Michel<sup>1</sup>, Pluquet Adrien<sup>2</sup>**

1 - FONDASOL (Belgique), 2 - FONDASOL (France)

La fosse d'extraction de calcaire au sein de la carrière de calcaire de la C.C.B. à Tournai (Belgique) a été démarrée il y a une quarantaine d'années, a pour dimensions 800 sur 1000 m environ pour une profondeur pouvant atteindre 250 m et est à ce jour en arrêt d'exploitation. Au préalable des travaux d'extraction de matériaux du socle primaire, les terrains de recouvrement quaternaire et tertiaire ont été découverts et mis en œuvre en terril à proximité, d'une emprise au sol de plus de 55 hectares avec une hauteur pouvant atteindre 70 à 90 m. Des glissements ont pu être recensés par le passé au droit de ce terril, et à ce jour, des aménagements de voirie nécessitent de longer ce terril et, sur un tronçon de l'ordre de 50 m, de venir empiéter de 5m environ sur la partie basse du terril, soit une suppression de la butée de pied d'un ouvrage potentiellement instable. Dans cet article, nous nous attacherons ainsi à détailler l'étude FONDASOL, pour : présenter le contexte géologique et la nature de l'ouvrage, décrire les différentes méthodes d'investigation géotechniques retenues, présenter les résultats des calculs de stabilité locale et globale, donner les conclusions de l'étude et préconisations de travaux.

Mots clefs : terril, talus, stabilité, investigations, glissement, carrière, butée, voirie

## **P30. Parade contre une catastrophe naturelle annoncée dans la vallée de l'Oisans, à Séchilienne (38)**

**Nicolini Alban<sup>1</sup>, Renac Laurent<sup>2</sup>, Lorier Lionel<sup>3</sup>**

1 - G.T.S., 2 - NGE, 3 - SAGE (France)

Dans un site des plus surveillés de France, le Conseil Général de l'Isère a missionné un groupement d'entreprises afin de sécuriser la vallée de l'Oisans en déviant le tracé de la RD 1091 au droit des Ruines de Séchilienne. En aval du village, au lieu-dit « L'Île Falcon », entre Vizille et Séchilienne, sur la rive gauche de la Romanche, se trouvent les Ruines de Séchilienne. Il s'agit d'une zone active d'éboulements du Mont-Sec qui forme l'extrême sud de la chaîne de Belledonne. Les différents scénarios d'éboulements donnent un volume de 3 millions m<sup>3</sup> qui se détacheraient en une ou plusieurs fois de la montagne dans quelques années seulement. Ce mouvement de grande ampleur formerait un « barrage naturel » dans la vallée constituant à son tour une menace (catastrophe naturelle) si celui-ci venait à céder sous l'effet de l'érosion rapide. Diverses parades ont été mises en place dès 1986 ; déviation routière, merlon de protection... Soucieux du risque majeur, le Conseil Général de l'Isère a prescrit une solution plus radicale par une déviation sur le versant opposé permettant un nouveau tracé sécurisé de la RD 1091. En faisant en sorte que ce nouveau tracé soit au-dessus du niveau de l'éboulement quand il aura lieu. Pour la réalisation des travaux s'enchaîneront des phases de terrassement, soit un déblai de 300 000 m<sup>3</sup> (dont 230 000 m<sup>3</sup> de minage), et de confortement afin de descendre une paroi clouée de 18 000 m<sup>2</sup> sur 47 mètres de haut. Dans un contexte géologique particulièrement complexe, le groupement d'entreprises a géré une forte co-activité en site exigu en adaptant au quotidien le planning des travaux multimétiers dans l'intérêt collectif. Une autre paroi clouée a été réalisée par G.T.S. selon le nouveau procédé AD/OC<sup>®</sup> sur 300 m<sup>2</sup> au-dessus de la future piste cyclable.

Mots clefs : terrassement déblais, innovation, drainage, paroi AD/OC<sup>®</sup>, paroi clouée, Confortement de grande hauteur, tirants, génie civil, minage

## **P31. Pont JJ. Bosc à Bordeaux, caractéristiques principales et problèmes géotechniques**

**Savatie Vincent<sup>1</sup>, Avesque Fabien<sup>1</sup>, Miralles Jean François<sup>1</sup>, Deluzarche Remi<sup>1</sup>**

1 - EGIS GEOTECHNIQUE- Toulouse (France)

Le projet du pont Jean-Jacques Bosc vise à relier les deux rives de Bordeaux entre les communes de Floirac et de Bègles. Ce pont est conçu comme une esplanade urbaine de 44 mètres de large et 549 mètres de long. Il est composé de 9 travées pour 8 piles. Deux trémies sont également au projet, en amont des 2 culées. Il est montré comment l'exploitation des archives a permis de définir un premier modèle géotechnique et de concevoir une campagne de reconnaissance adaptée en phase PRO. Dans ce contexte particulier, lié à la largeur de l'ouvrage et au fort marnage de la Garonne, l'objectif de cette campagne était de caler le toit du substratum avec précision et de définir l'influence de la Garonne sur les mouvements de la nappe alluviale de chaque rive, avec un grand nombre de sondages à réaliser en milieu fluvial. Cet article présente sur fond du projet du pont JJ. BOSC, la base de données d'archives disponibles et la campagne finalement retenue, campagne qui s'est avérée totalement adaptée pour les problématiques géotechniques identifiées. Il est également décrit la méthode utilisée pour le suivi de la nappe alluviale dans un contexte de fort marnage du fleuve au voisinage. Les résultats de ces mesures de suivi piézométrique en corrélation avec le niveau d'eau du fleuve, sont présentés, ainsi que l'utilisation pouvant en être faite pour la détermination des niveaux d'eau pour le dimensionnement des trémies et des culées de l'ouvrage. Au final, les principales caractéristiques de la conception géotechnique de l'ouvrage sont présentées et une dernière partie s'attache à discuter des conséquences économiques et de planning d'une densification ou d'un allègement de la campagne de reconnaissances géotechnique.

Mots clefs : économie des reconnaissances géotechniques, hydrogéologie en zone de marée, suivi de nappe, fondation d'ouvrage d'art fluvial

## **P32. Mise en sécurité d'un dépôt de résidus de traitement de minerai de plomb-argentifère, Pontgibaud, Auvergne**

**Pidon Arnaud<sup>1</sup>, Niemiec Dominique<sup>2</sup>, Sabourault Philippe<sup>1</sup>**

1 - Bureau de recherches géologiques et minières

2 - Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (France)

Le BRGM a réalisé, en tant que maître d'ouvrage délégué de l'État, la mise en sécurité d'un site de dépôts de résidus de traitement de minerai. Le district minier de Pontgibaud (Auvergne) a été au XIX<sup>ème</sup> siècle l'un des principaux centres de production de plomb-argentifère d'Europe (50 000 tonnes de plomb et 100 tonnes d'argent produites). Quatre unités de concentration ont existé dans le district. La principale, associée à l'usine minéralurgique, était située à Pontgibaud dans le quartier des Fonderies. Les résidus de traitement de minerai, stockés à proximité, sont issus du broyage, du concassage et de la séparation gravimétrique des particules métalliques par triage-lavage. L'impact potentiel de ces résidus sur l'environnement et les populations, du fait des fortes concentrations résiduelles en plomb et en arsenic notamment, a été mis en évidence dès la fin des années 1990. Suite aux études préalables (dont le modèle conceptuel) menées de 2009 à 2012, le BRGM a piloté entre 2013 et 2014 les travaux de mise en sécurité sur le site des Fonderies après obtention des autorisations administratives préalables (étude au cas par cas, déclaration « nomenclature eau » et permis d'aménager). Les travaux ont permis de réduire les impacts sur les eaux et les sols grâce à : - un regroupement et un remodelage des résidus ; - la mise en place d'une couverture de terre arable ensemencée en prairie pour favoriser l'insertion paysagère et la stabilisation des terrains ; - une gestion du ruissellement des eaux superficielles par des fossés périphériques. La mise en place de servitudes d'utilité publique au titre du code de l'environnement a ensuite été engagée par la DREAL pour limiter les usages du site. Le retour d'expérience de ces travaux permet de poser les bases pour les travaux de mise en sécurité des deux autres sites importants de stockage de résidus du district métallifère.

Mots clefs : argent, plomb, minerai, Pontgibaud, Auvergne, mine, après, DPSM, dépôt de résidus de traitement, BRGM, mise en sécurité.

## **P33. Valorisation des sols urbains : contraintes géotechniques et environnementales** **Bellagh Katia<sup>1</sup>, Lenoir Thomas<sup>1</sup>, Duc Myriam<sup>1,2</sup>, Paulus Hélène<sup>3</sup>, Magnan Jean-Pierre<sup>2</sup>, Ruban Véronique<sup>1</sup>**

1 - Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux  
2 - Département Géotechnique, Environnement, Risques naturels et Sciences de la terre, 3 - ESITC

La valorisation de déchets sous forme de granulats alternatifs en techniques routières est une pratique courante. Elle permet de limiter les coûts liés à leur élimination et d'économiser les ressources naturelles en granulats. En milieu urbain, les chantiers de terrassement sont une source importante de matériaux alternatifs (exemple du Grand Paris). Toutefois les terres excavées générées restent assez peu valorisées sur site en raison de l'emprise restreinte des chantiers. Elles sont alors placées en installations de stockage où elles prennent le statut de déchets. Leur réutilisation en techniques routières est subordonnée d'une part au respect des performances mécaniques compatibles avec un usage en remblai ou en sous-couche routière, et d'autre part à la vérification de l'innocuité de ces matériaux vis-à-vis de l'environnement. L'impact que peuvent avoir sur ces deux aspects les produits de démolition et de construction (granulats de bétons, plâtre, etc.), les biosolides, les scories et autres éléments issus de l'activité anthropique contenus dans les terres excavées, est mal connu. La présente communication présente la démarche de caractérisation géotechnique et minéralogique d'un sol urbain de la région Ile de France. Les premiers résultats montrent que, contre toute attente, la composition complexe du matériau testé à l'aide d'essais normés (mélange hétérogène de matériaux naturels et anthropiques avec la présence d'une teneur élevée en sulfates qui sont à l'origine généralement de pathologies sur les ouvrages) affecte assez peu ses caractéristiques géotechniques et les performances mécaniques requises pour une réutilisation en techniques routières. La suite du travail consiste à étudier l'impact des opérations géotechniques (de compactage et de traitement aux liants hydraulique et/ou chaux) sur le comportement des polluants contenus dans le matériau.

Mots clefs : terrassements, valorisation des déchets, sols urbains, sulfates

## **P34. Étude des propriétés hydromécaniques des matériaux granulaires soumis à des essais oedométrique sous fortes contraintes** **Salhi Aymen Seyf Eddine<sup>1</sup>, Guettala Abdelhamid<sup>1</sup>**

1 - Laboratoire de recherche Génie civil (Algérie)

L'objectif de ce travail est d'étudier l'évolution du comportement mécanique et hydraulique d'un sable soumis à une forte contrainte, à partir des essais oedométriques à haute pression sur différents types de sables. Ces essais sont suivis par des analyses granulométriques avant et après chargement et mesures de perméabilité à différents niveaux de chargement. Des scans tomographie à rayon X ont été également réalisés sous différents paliers de chargement (0 ; 2.5 ; 5 et 10 MPa) sur un sable carbonaté écrêté à 1,6 mm. L'évolution de la porosité et de la surface spécifique en fonction des contraintes appliquées peuvent être évaluée à partir des techniques de traitement et analyses d'images

Mots clefs : fluage, micro tomographe rayon X, sable, perméabilité, charge oedométrique, écrasement

## **P35. Analyse physico mécanique et stabilisation des déblais issus des sols latéritiques nickélifères d'Ambatovy (Madagascar)**

**Ravokatra Fidiniavo<sup>1</sup>, Ramasiarinoro Voahanginirina<sup>2</sup>, Andrianaivo Lala<sup>1</sup>, Andriamamonjisoa N.**

1 - Laboratoire de Géotechnologie, École Supérieure Polytechnique - Université d'Antananarivo

2 - Département des Sciences de la Terre - Université d'Antananarivo (Madagascar)

Le projet d'exploitation de nickel d'Ambatovy dans la région centrale de Madagascar suggère la gestion de déblais des sols latéritiques issus de l'excavation. Cette étude se propose d'établir une relation entre les propriétés physico-mécaniques des sols latéritiques et la pente de talus lors du déversement et terrassement. Trente-sept (37) échantillons de sols issus des différents horizons d'altération ont été analysés au laboratoire afin de les identifier et les classer selon les normes françaises. Les résultats des analyses sont élaborés et structurés sous forme de données géotechniques. Les méthodes d'analyse statistique Analyse Factorielle des Correspondances et Analyse en Composante Principale sont utilisées afin de révéler les interrelations entre ces différents paramètres mécaniques. Une superposition des informations géologiques des aires de prélèvement des échantillons à l'aide du Système d'Information Géographique avec les données géotechniques analysées conduit à la détermination de conditions de stabilité de la pente.

Mots clefs : géomécanique, stabilité de déblais, nickel, sols latéritiques, Ambatovy

## **P36. Comportement au fluage de l'argile sur chemin oedométrique**

**Zhao Dan<sup>1</sup>, Hattab Mahdia<sup>1</sup>, Yin Zhenyu<sup>2</sup>, Hicher Pierre-Yves<sup>2</sup>**

1 - Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux

2 - Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (France)

L'objectif de cette recherche est d'étudier le phénomène de fluage sur chemins oedométriques, du kaolin K13 et de l'argile de Shanghai. Les résultats ont permis de caractériser le coefficient de compression secondaire  $C_{\alpha e}$  ainsi que son évolution en fonction du niveau de contrainte, du temps, de l'indice de compression et de l'indice des vides, qui sera utilisé pour développer un modèle 1D de fluage non linéaire.

Mots clefs : argile molle, fluage, l'argile de Shanghai, kaolin, essais oedométriques

## **P37. Mesures des propriétés cycliques des sols limoneux ou argileux au laboratoire Serratrice Jean François <sup>1</sup>**

1 - Cerema (France)

La communication présente une méthode d'exploitation des essais triaxiaux cycliques réalisés au laboratoire pour mesurer les propriétés dynamiques des sols fins limoneux ou argileux. L'essai consiste à appliquer plusieurs séquences successives de cycles en condition non drainée, avec consolidation intermédiaire, dans une gamme de déformations axiales comprises entre  $10^{-4}$  et  $10^{-2}$  (essai étagé). Une approximation en séries de Fourier des courbes expérimentales permet d'effectuer l'identification précise du module d'Young sécant et de l'amortissement pendant les cycles stabilisés en fin de séquence de cycles. La dégradation du module d'Young et l'amplification de l'amortissement sont exprimées alors en fonction du niveau de déformation cyclique. Une illustration de la méthode est donnée à partir d'un exemple d'essai. Cet exemple permet d'indiquer aussi quelques traits caractéristiques du comportement cyclique des sols fins testés dans leur état naturel. Cela concerne notamment l'accumulation de la pression interstitielle au cours des cycles, qui, pour les sols limoneux ou argileux, ne prend pas l'allure de la réponse des sables. En pratique, les essais cycliques sont effectués à basse fréquence (0,5 Hz). Il apparaît néanmoins que les vitesses de chargement ainsi générées au cours des cycles sont plusieurs centaines de fois plus grandes que les vitesses de chargement appliquées pendant les essais de chargement monotone, avec une répercussion possible sur la mesure de la pression interstitielle. D'autres aspects de la pratique des essais triaxiaux cycliques sur les sols fins sont évoqués aussi.

Mots clefs : module d'Young, argile, laboratoire, amortissement, essai triaxial cyclique, dégradation

## **P38. Apports des argiles dans l'étude des ressources potentielles d'hydrocarbures du bassin du Markstein (Vosges)**

**Maison Tatiana<sup>1</sup>, Potel Sébastien<sup>1</sup>**

1 - Bassins Réservoirs Ressources (France)

Les bassins sédimentaires sont un enjeu majeur, car ils sont le réservoir et la source d'énergies fossiles (hydrocarbures, uranium) et renouvelables (géothermie, eau), ainsi que le lieu de stockage artificiel de ces énergies et de leurs sous-produits (e.g.,  $\text{CO}_2$ ). Les argiles présentes dans le bassin du Markstein ont été caractérisées par le biais de différentes méthodes afin de caractériser les conditions géologiques de formation des ressources potentielles en hydrocarbures.

Mots clefs : cristallinité, argiles, bassins sédimentaires, Vosges

## **P39. Analyse de l'évolution du réseau de fissures de sol proches de la saturation sur un chemin de drainage**

**Andrianatrehina Rinah<sup>1</sup>, Mahmutovic Dino<sup>2</sup>, Taibi Said<sup>1</sup>, Boutonnier Luc<sup>2</sup>, Monnet Jacques<sup>3</sup>, Fleureau Jean Marie<sup>4</sup>**

1 - Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, 2 - EGIS GEOTECHNIQUE, 3 - Gaiatech, 4 - Chaire Sciences des Systèmes et Défis Energétiques EDF/ECP/Supélec (France)

Le projet ANR Terredurable a commencé en 2012 et prendra fin en décembre 2016. Son objectif est d'améliorer la conception des ouvrages en terre (compactage et stabilité) en combinant recherche expérimentale et théorique avec le retour d'expérience des praticiens. A cet effet, ce projet a pour ambition de mieux comprendre la mécanique des sols non saturés et notamment celle des sols proches de la saturation. Ces derniers ont un comportement bien spécifique avec la présence de bulles d'air occluses. Cet état hydrique correspond par ailleurs à la majorité des ouvrages en terre anthropiques en sols fins (déblais, remblais, barrages en terre, digues, etc.). Cette communication s'inscrit dans le thème du projet « prise en compte du climat sur les remblais et ouvrages en terre ». Un dispositif expérimental en laboratoire a permis d'imposer une sollicitation hydrique, liée à une période de sécheresse, sur un échantillon de sol compacté à la surface d'un remblai. La variation de volume et l'évolution du réseau de fissures est observée pour différents sols pendant une dessiccation libre. Les résultats montrent que les fissures s'initialisent dans la phase quasi saturée d'un sol, c'est-à-dire avant l'entrée d'air. Les différentes causes possibles du processus d'amorçage de la fissuration sont également discutées (effet de la mouture, effet des hétérogénéités, effet de la succion, etc.).

Mots clefs : entrée d'air, succion, domaine quasi-saturé, fissuration, dessiccation libre

## **P40. Étude et valorisation des sédiments de dragage, cas du barrage de Kherrata dans la région de Bejaia dans le nord de l'Algérie**

**Banoune Brahim<sup>1</sup>, Rosquoet Frédéric<sup>2</sup>, Melbouci Bachir<sup>3</sup>, Langlet Thierry<sup>4</sup>**

1 - Laboratoire de Génie de la Construction et d'Architecture (Algérie), 2 - Laboratoire des technologies innovantes, 3 - Laboratoire de Géomatériaux, Environnement et Aménagement (Algérie), 4 - Laboratoire des technologies innovantes (France)

On dispose, dans la région de Bejaia au nord de l'Algérie, d'une grande quantité de sédiment obtenu lors de dragage successif de l'estuaire afin d'assurer le bon fonctionnement du barrage situé en amont. Afin de valoriser ce matériau, qui initialement était soit stocké ou rejeté en mer, nous avons réalisé une étude approfondie qui a pour objectif d'utiliser les sédiments de Kherrata dans le domaine routier. Cette étude a comme double avantage, d'une part de rentabiliser l'opération de dragage qui s'avère très onéreuse et d'avoir à disposition une grande quantité de matériaux de construction. Dans un premier temps, nous avons réalisé une caractérisation minéralogique, chimique, physique et mécanique des échantillons. Cette première étude a révélé la prédominance de particules fines avec un faible pourcentage d'argile et une présence importante de matières organiques. On montre qu'en l'état les sédiments ne peuvent être utilisés pour les structures de chaussées par exemple, car le comportement physique et mécanique du matériau ne répond pas aux critères imposés par les réglementations en vigueur. Il est donc nécessaire d'améliorer les caractéristiques physiques et chimiques des sédiments naturels. C'est pour cela que dans un second temps nous étudierons l'impact d'un traitement à base de chaux seul ou avec des additifs tels que les fines de carrière pour permettre de stabiliser ces sédiments et d'obtenir de meilleures caractéristiques physiques et mécaniques. Différentes formulations sont proposées afin de répondre aux exigences réglementaires. En faisant varier le taux de chaux et, ou en association avec une poudre de carrière il est possible d'améliorer de façon substantielle les sédiments de dragage. Une synthèse des caractéristiques mécaniques obtenues est proposée. Le matériau traité est désormais conforme aux normes et aux classifications exigées en technique routière.

Mots clefs : techniques routières, stabilisation, valorisation, caractérisation des sédiments, sédiments traité.

## **P41. Transfert couplé de chaleur et d'eau dans le sol environnant les câbles électriques haute tension**

**Eslami Hossein<sup>1</sup>, Cuisinier Olivier<sup>1</sup>, Masrouri Farimah<sup>1</sup>**

1 - Laboratoire d'énergétique et de mécanique théorique et appliquée (France)

La réalisation de nouvelles lignes à très haute tension passe de nos jours la plupart du temps par la mise en place de réseaux enterrés. Lorsqu'un courant circule dans un câble électrique, le conducteur chauffe et libère des calories qui se dissipent dans le milieu environnant. Il est donc indispensable d'assurer une dissipation efficace de cette énergie pour éviter un échauffement trop important du câble qui pourrait conduire à sa rupture. L'objectif de ce travail est d'évaluer l'impact des caractéristiques thermiques et hydriques du sol encaissant sur les transferts couplés thermo-hydriques autour des câbles à très haute tension. Une modélisation numérique par méthode des éléments finis a été mise en place à l'aide du logiciel Plaxis<sup>®</sup>. Les transferts hydriques ont été évalués en prenant en compte la non-saturation du milieu. Le flux de chaleur par convection et par advection ont été intégrés dans les calculs. Deux paramètres, le coefficient de la diffusion de la vapeur ( $D_v$ ) et le facteur d'accélération de la diffusion thermique ( $h$ ), permettent de coupler explicitement les transferts thermique et hydrique. L'impact de différents paramètres sur la température à proximité du câble et sur la saturation du sol encaissant a été évalué. Les variations du degré de saturation et de la température du sol encaissant ont été étudiées sur 180 jours de chauffage. Les résultats ont montré que le flux d'eau est principalement causé par le transport de la vapeur dû aux gradients thermiques. Ces résultats soulignent l'effet significatif des caractéristiques thermo-hydriques du sol encaissant. Le rayon d'influence du câble électrique peut également être évalué par cette modélisation couplée. L'étude de l'effet des conditions initiales saisonnières a montré l'assèchement du sol encaissant et le rayon d'influence moins important pour les conditions hivernales.

Mots clefs : diffusion thermique de la vapeur, flux d'eau, couplage thermo-hydrique, câble électrique

## **P42. Détermination des paramètres des modèles empiriques des propriétés hydrauliques des sols non saturés**

**Bouchemella Salima<sup>1</sup>, Alimi Ichola Ibrahim<sup>1</sup>**

1 - Laboratoire INFRARES, Univ Souk Ahras (Algérie)

Pour chaque modélisation de l'écoulement dans les sols non saturés, il est nécessaire de déterminer la courbe de rétention et la courbe de conductivité hydraulique des sols étudiés. Certains modèles empiriques utilisent les mêmes paramètres pour décrire ces deux propriétés hydrauliques. Pour cette raison l'estimation de ces paramètres est effectuée par ajustement des points expérimentaux de la courbe de rétention seulement, qui est plus facile à mesurer par comparaison à la courbe de la conductivité hydraulique. Dans ce travail, nous montrons que cet ajustement de la courbe de rétention  $\theta(h)$  n'est pas généralement suffisant pour décrire la courbe de conductivité hydraulique  $K(\theta)$  et la variation de l'humidité dans le sol  $\theta(z)$ . Les modèles utilisés dans cette étude sont les modèles de van Genuchten-Mualem (1980-1976), de Brooks & Corey (1964) pour deux types de sol ; argile du Gault et limon de Givors.

Mots clefs : modèle de Brooks & Corey, modèle de Van Genuchten-Mualem, ajustement, courbe de conductivité hydraulique, courbe de rétention

## **P43. Capacité portante d'une semelle filante sur un sol frottant soumise à une charge inclinée**

**Ouahab Mohamed Younes<sup>1</sup>, Mabrouki Abdelhak<sup>1</sup>, Benmeddour Djamel<sup>1</sup>, Mellas Mekki<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> - Laboratoire de Recherche en Génie Civil, Université de Biskra (Algérie)

Cette étude s'intéresse au calcul numérique des facteurs de portance d'une semelle filante, en utilisant le logiciel PLAXIS en éléments finis. La semelle est supposée rigide, rugueuse, et soumise à une charge inclinée centrée, sur un sol purement frottant. Les facteurs de portance obtenus sont utilisés afin de déterminer les coefficients d'inclinaison ; cette étude vise aussi à déterminer les surfaces de rupture dans le plan des charges verticales  $V$  et horizontales  $H$  ( $V-H$ ) pour différentes inclinaisons de la force appliquée. Les résultats des calculs numériques sont comparés à ceux déterminés par les expressions analytiques, ainsi que les valeurs calculées par différentes approches de la littérature sur le sujet.

Mots clefs : fondation filante, chargement incliné, capacité portante, diagramme d'interaction

## **P44. Analyse stochastique des paramètres relatifs aux sols gonflants**

**Dounane Nawal<sup>1</sup>, Trouzine Habib<sup>1</sup>, Djadouni Hachemi<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> - Laboratoire de Génie Civil & Environnement, Université de Sidi Bel Abbes (Algérie)

Les corrélations semi-empiriques ou purement empiriques ont toujours fait partie significative de la mécanique des sols. On présente dans ce travail plusieurs corrélations entre paramètres géotechniques mesurés en laboratoire afin d'estimer la pression et l'amplitude de gonflement des argiles expansives. Des régressions de types linéaires simples et multiples sont établies. Les correspondances entre paramètres proposés sont en très bonne concordance avec la littérature.

Mots clefs : régression linéaire, simple, multiple, sols gonflants, corrélations

## **P45. Mud pumping and interlayer creation in railway sub-structure**

**Duong Trong Vinh<sup>1</sup>, Cui Yu-Jun<sup>2</sup>, Tang Anh Minh<sup>1</sup>, Calon Nicolas<sup>3</sup>, Robinet Alain<sup>3</sup>, Dupla Jean-Claude<sup>1</sup>**

1 - Navier, 2 - Navier, 3 - SNCF (France)

The driving factors for the interlayer creation and mud pumping phenomena in railway sub-structure was investigated through physical model tests on a ballast layer overlying a sub-soil layer under different conditions in terms of water content, loading and sub-soil dry unit mass. The physical model was equipped with various sensors and devices allowing water content, pore water pressure, axial displacement to be monitored. Visual observations were also made using a digital camera. It was observed that the ballast behavior depends on the sub-soil state. Both the interlayer creation and mud pumping are related to the migration of fine particles, and the water content of the sub-soil is the most important factor for this migration. Under the unsaturated conditions, the ballast/sub-soil interface did not change. On the contrary, under the near saturated conditions, significant migration of fine particles occurred. In case of low dry unit mass, the dissipation of high pore water pressure in the sub-soil gave rise to mud pumping. In case of higher dry unit mass, the excess pore water pressure was lower due to the smaller volume change of sub-soil. As a result, the effect of water pressure dissipation was limited and the upward migration of fine particles was only due to the penetration of ballast into the sub-soil, thereby, forming the interlayer.

Mots clefs : mud pumping, interlayer creation, migration of fine particles, cyclic loading, physical model, railway substructure

## **P46. Étude numérique des écoulements hydrauliques autour des tunnels en régime transitoire**

**Zadjaoui Abdeldjalil<sup>1</sup>**

1 - Université de Tlemcen, Département de génie civil. (Algérie)

Le présent article traite les écoulements hydrauliques autour des tunnels creusés en terrains aquifères. L'auteur présente une synthèse des travaux antérieurs relatifs à ce sujet et les solutions proposées dans la littérature pour estimer la réponse hydraulique (pression interstitielle, débit et gradient hydraulique) du massif encaissant au creusement de l'ouvrage. La méthode des éléments finis a été utilisée pour analyser les écoulements autour de tunnels en conditions bidimensionnelles et en régime transitoire. Les résultats ainsi obtenu dans le cas d'un tunnel perméable, sont comparés à ceux donnés par les méthodes approchées. Une description des limites de l'application et l'apport de cette étude par rapport au régime permanent a fait l'objet des recommandations pour la pratique de l'ingénieur.

Mots clefs : débit, transitoire, tunnel, numérique, écoulement, gradient hydraulique

## **P47. Analyse adaptative de la réponse dynamique des poutres infinies**

**Mezeh Reda<sup>1</sup>, Sadek Marwan<sup>1</sup>, Hage Chehade Fadi<sup>2</sup>**

1 - Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), 2 - Centre de modélisation, université Libanaise (Liban)

Cette communication présente un schéma numérique adaptatif en éléments finis pour prédire les vibrations induites dans les poutres infinies soumises à des charges mobiles. Le schéma de calcul proposé est appliqué pour simuler le mouvement uniforme d'une charge harmonique. Les résultats obtenus montrent une forte efficacité de la méthode numérique proposée pour l'analyse des vibrations générées.

Mots clefs : dynamique des structures, méthode adaptative

## **P48. Simulation du déchargement mécanique d'un déblai avec un modèle quasi saturé**

**Mahmutovic Dino<sup>1</sup>, Boutonnier Luc<sup>1</sup>, Monnet Jacques<sup>2</sup>**

1 - EGIS GEOTECHNIQUE, 2 - Gaiatech (France)

Le projet ANR Terredurable a commencé en 2012 et prendra fin en décembre 2016. Son objectif est d'améliorer la conception des ouvrages en terre (compactage et stabilité) en combinant recherche expérimentale et théorique avec le retour d'expérience des praticiens. À cet effet, ce projet a pour ambition de mieux comprendre la mécanique des sols non saturés et notamment celle des sols proches de la saturation. Ces derniers ont un comportement bien spécifique avec la présence de bulles d'air occluses. Cet état hydrique correspond par ailleurs à la majorité des ouvrages en terre anthropiques en sols fins (déblais, remblais, barrages en terre, digues, etc.). Cet article s'inscrit dans l'un des thèmes de recherche du projet Terredurable qui est le développement d'un modèle théorique permettant de reproduire le comportement des sols proches de la saturation, et son application sur des ouvrages en terre. Une simulation numérique représentant l'excavation d'un déblai dans une marne du projet de l'A304 est présentée. L'estimation des pressions interstitielles et des gonflements pendant et après l'excavation sont calculés et comparés aux résultats des mesures *in-situ* (voir autre communication JNGG 2016). L'originalité du modèle est la prise en compte de la compressibilité du fluide interstitiel qui permet de modéliser la déformation « instantanée » (non drainée) et la déformation « différée » (drainée).

Mots clefs : déchargement mécanique, déblai, domaine quasi-saturé, loi de comportement, modélisation numérique, gonflement, succion

## **P49. Un modèle théorique de courbe de rétention pour les sols non saturés à granulométrie étendue**

**Monnet Jacques<sup>1</sup>, Mahmutovic Dino<sup>2</sup>, Boutonnier Luc<sup>2</sup>, Taibi Said<sup>3</sup>, Andriantrehina Rinah<sup>3</sup>**

1 - GAIATECH, 2 - EGIS GEOTECHNIQUE, 3 - Université du Havre,

Les contraintes hydro-mécaniques des ouvrages de terrassement nécessitent le développement d'un modèle capable de simuler les chemins de séchage et d'humidification du sol. Il existe plusieurs façons de modéliser les courbes de rétention. La première approche consiste à utiliser des corrélations expérimentales. C'est l'approche des modèles de Brooks et Corey (1964) Van Genuchten (1980) ou Gallipoli et al. (2003). La seconde approche consiste à simuler les courbes de rétention par un modèle élasto-plastique incrémental (Arairo W., 2013). Cette méthode nécessite la connaissance de la courbe expérimentale de saturation et d'imbibition pour prédire le comportement d'une autre courbe de rétention. Elle utilise ( $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $S_{rsat}$ ,  $S_{rrs}$ ) les paramètres de Van Genuchten (1980) et deux courbes limites de rétention. La troisième approche est de considérer la modélisation physique des sols non saturés. Avec cette méthode, il n'y a pas besoin de choisir a priori des formes particulières des courbes de rétention, qui sont considérées alors comme une conséquence des hypothèses physiques. C'est l'approche utilisée dans le présent document. La présente étude se focalise sur un modèle théorique basé sur des particules sphériques en agencement élastique, qui peut être considéré comme un procédé simplifié de DEM. Dans un premier temps un modèle uniforme est présenté avec un seul diamètre de particules du sol. Une deuxième étape étend l'utilisation du modèle aux sols à granulométrie étendue. Le modèle utilise seulement 5 paramètres physiques. Le résultat du modèle est comparé à la courbe de rétention expérimentale de deux échantillons différents de particules uniformes de verre (de 80 mm, 300 mm) et deux sols à granulométrie étendue, un échantillon de verre graduée (4-140 mm) et le limon de Livet-Gavet (2 mm-50 mm). Il montre sa capacité à prédire les courbes expérimentales de rétention et il permet une meilleure corrélation avec l'expérience que la théorie de Brooks et Corey (1964).

Mots clefs : paramètre physique, courbe de rétention, modèle constitutif, sol non saturé

## **P50. Chute de blocs rocheux par approche DEM de type NSCD**

**Ferrellec Jean-Francois<sup>1</sup>, Perales Robert<sup>2</sup>, Saussine Gilles<sup>1</sup>, Bredier Laurent<sup>1</sup>, Richard Franck<sup>1</sup>**

1 - SNCF - Ingénierie & Projets, 2 - AD'missions (France)

Le tracé des lignes ferroviaires dans les reliefs accidentés expose les voies aux risques de chute de blocs rocheux. La présence de ces blocs sur les voies peut entraîner l'arrêt complet des circulations. L'estimation du risque d'exposition à ce type d'événement demeure une tâche difficile et les solutions techniques adoptées pour prévenir ces accidents ont des coûts substantiels. La difficulté principale réside dans la prédiction la trajectoire des blocs rocheux avec précision pour la construction de solutions d'interception ou de déviation. La méthode des éléments discrets (DEM), une approche numérique qui modélise l'interaction entre objets et leur dynamique, constitue une alternative adaptée à l'analyse de chute de bloc rocheux le long de parois quelle que soit leur nature. L'objectif de ce travail a été d'évaluer cette méthode numérique pour prédire la trajectoire de blocs rocheux sur un versant le long d'une portion de voie ferroviaire qui a subi par le passé ce type d'incident. Cette étude a fait appel à une reproduction tridimensionnelle de la surface réelle du versant, à partir de relevés cartographiques basés sur la photogrammétrie, qui est intégrée dans le code de calcul LMGC90. Dans ce code qui est basé sur l'approche NSCD (Non-Smooth Contact Dynamics) le versant et les blocs rocheux sont représentés par des polyèdres rigides de formes complexes qui peuvent être en interaction les uns avec les autres. La trajectoire de chute individuelle ou en groupe de blocs avec ou sans ouvrage d'interception a été analysée. Cette étude paramétrique a permis de prédire des trajectoires possibles et ainsi de proposer des solutions pour empêcher les blocs d'atteindre la voie située en contrebas du versant en évaluant leur performance grâce à l'estimation du nombre de bloc stoppés.

Mots clefs : DEM, ferroviaire, bloc rocheux, chute, NSCD

## **P51. Simulation numérique 3D du foudroyage d'une exploitation par panneaux à grande échelle**

**Ahmed Samar<sup>1</sup>, Al-Heib Marwan<sup>2</sup>, Gunzburger Yann<sup>1</sup>, Renaud Vincent<sup>2</sup>**

1 - GeoRessources, Université de Lorraine, 2 - Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (France)

La simulation du foudroyage d'une exploitation par longues tailles est essentielle pour l'exploitation à large échelle. Afin d'évaluer les variations des champs de contraintes et de déplacement dans une mine de Provence, le foudroyage est simulé par modélisation numérique en prenant en compte sa géométrie et ses propriétés mécaniques équivalentes. L'évolution spatiale et temporelle des caractéristiques des matériaux foudroyés est simulée en appliquant une variation linéaire du module de Young, calée par rapport à des mesures d'affaissement en surface.

Mots clefs : panel excavation, stress redistribution, goaf simulation, numerical modeling

## **P52. Utilisation du modèle Hardening Soil Model dans l'étude du creusement de tunnels superficiels**

**Gilleron Nicolas<sup>1,2</sup>, Bourgeois Emmanuel<sup>2</sup>, Saitta Adrien<sup>1</sup>**

1 - EGIS GEOTECHNIQUE, 2 - Université Paris-Est, IFSTTAR, COSYS (France)

Le modèle Hardening Soil Model introduit au début des années 2000 a été intégré dans de nombreux logiciels éléments finis pour la géotechnique et est progressivement devenu d'usage courant dans les ingénieries pour le calcul de toutes sortes d'ouvrages : fondations, excavations et autres, notamment les tunnels superficiels. Ce modèle comporte une dizaine de paramètres et intègre plusieurs mécanismes complémentaires inspirés des lois de comportement développés dans la seconde moitié du vingtième siècle. Il contient en particulier un double écrouissage. On commence par rappeler les surfaces de charges, et la façon dont on les relie à l'état de contrainte initial. On étudie ensuite l'évolution des surfaces de charge dans l'étude des tunnels superficiels en déformations planes par la méthode de relaxation des contraintes. On discute la pertinence du mécanisme isotrope dans ce contexte, où le chargement est principalement de nature déviatorique. Le mécanisme déviatorique est à l'origine de la majeure partie des déformations dans le massif. On met en évidence l'influence de l'état de contrainte initial et de l'angle de frottement sur le module élastique tangent à proximité de la cavité. Dès lors, le rapport entre le module de déchargement/rechargement et ce module peut prendre des proportions significatives. On a ainsi mis en avant des points de vigilance sur l'utilisation du Hardening Soil Model dans le cadre de l'étude de tunnels superficiels. On se concentre sur un tunnel de métro avec un coefficient de pression des terres au repos inférieur à un. Les modélisations sont réalisées à l'aide PLAXIS 2D 2015.

Mots clefs : tassements, éléments finis, lois de comportement, tunnel

## **P53. Interaction butée des rideaux en vis-à-vis**

**Jassionnesse Christophe<sup>1</sup>, Cahn Martin<sup>1</sup>, Tsirogianni Alkisti<sup>1</sup>**

1 - GEOS INGENIEURS CONSEILS (France)

Tandis que de nombreux soutènements d'excavation profonde sont constitués de rideaux en vis-à-vis, les valeurs de butées limites utilisées classiquement et préconisées dans les Eurocodes ont été déterminées expérimentalement et analytiquement pour des milieux semi-infinis et pour un écran unique. Dans le cas d'écrans de soutènement en vis-à-vis, les cônes de butées peuvent s'intercepter en fond de fouille et les valeurs de butées limites se trouver modifiées. Dans le cadre du projet du Grand Paris, pour la conception de gares profondes en parois moulées, la question de la redéfinition d'une butée limite a été soulevée. Les développements qui ont été menés sont basés sur une méthode simplifiée d'analyse de type équilibre limite en milieu continu. Elle consiste en l'étude de l'interaction des deux mécanismes de butée pour différentes largeurs de fouille. L'interpénétration des deux mécanismes de butée ayant tendance à soulever le cône de terrain situé dans la zone de croisement, l'équilibre du coin de butée est étudié en considérant que toute hauteur en interaction constitue une surcharge. La force de butée minimale est alors recherchée pour tous les angles d'inclinaison physiquement admissibles. Cette approche analytique est comparée à des modélisations éléments finis où des forces triangulaires sont appliquées incrémentalement sur les bords rigides d'un modèle jusqu'à obtenir la rupture. Les résultats des modélisations éléments finis et analytiques montrent une bonne concordance. Celles-ci ont permis de démontrer qu'en fonction de la distance entre les parois, la butée mobilisable peut être soit augmentée, soit réduite. Des coefficients de majoration ou de minoration des valeurs de butée classiques sont proposés dans des cas simples.

Mots clefs : équilibre limite, écrans de soutènement, rideaux en vis à vis, interaction butée, modélisation éléments finis

## **P54. Analyse et rétro-analyse du comportement des fondations d'un ouvrage d'art de la LGV SEA**

**Nguyen Khoa Van<sup>1</sup>, Loriferne Pierre-Louis<sup>2</sup>, Mathoniere Florent<sup>3</sup>**

1 - TERRASOL, 2 - GTM Ouest, 3- Razel Bec

Dans le cadre des études d'exécution du pont rail PRA 0432 du projet LGV SEA, une solution variante de fondation a été étudiée et puis instrumentée. Basé sur les résultats d'auscultation, cet article présente les analyses et rétro-analyses des fondations de l'ouvrage sur deux sujets : amplitude et durée de tassement des remblais contigus, dispositif de réduction du frottement négatifs sur les pieux et son efficacité.

Mots clefs : auscultation, éléments finis, fondation, sol compressible, étude de cas

## **P55. Préprocesseur de découpage des massifs rocheux et effet du degré de fracturation sur l'effondrement des toits de carrières souterraines**

**Yaghkob Ikezouhene<sup>1</sup>, Dimnet Eric<sup>1</sup>, Guedon Jeanne-Sylvine<sup>1</sup>, Al Heib Marwan<sup>2</sup>**

1 - IFSTTAR, 2 - Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (France)

L'objectif de ce papier est la présentation d'un préprocesseur pour le calcul des massifs rocheux développé dans le cadre des travaux de thèse sur l'analyse de la stabilité des cavités souterraines. Le PDMR (Programme de Découpage des Massifs Rocheux) permet le découpage de massifs rocheux selon des directions de failles et de strates choisies et constitue un réseau de blocs de tailles variables et partiellement aléatoires (La taille des blocs est tirée aléatoirement dans un intervalle donné). Les blocs ainsi constitués sont des polyèdres séparés par les fissures orientées suivant les directions de faille et les plans de stratification. L'état de développement actuel du PDMR permet d'utiliser des angles d'inclinaison des plans de faille par rapport aux plans de strate allant de 5 à 90 degrés et l'élançement des blocs découpés peut varier de 1 à 6. Le PDMR ne réalise pas uniquement le découpage du massif, il constitue également un préprocesseur pour des calculs de stabilité et des calculs dynamiques d'effondrement de toits de carrières souterraines. En effet, il fournit les données au format STTAR3D, logiciel de calcul par éléments discrets développé à l'IFSTTAR. Une étude de l'effet du degré de fracturation du toit sur l'effondrement sera présentée. La taille des blocs ainsi que leurs coefficients de forme sont les deux paramètres choisis pour illustrer le degré de fracturation. Dans cette étude, le post processeur des calculs STTAR3D est réalisé grâce à la plateforme de post-traitement SALOME.

Mots clefs : carrières souterraines, effondrement, stabilité, découpage massifs rocheux, massif fracturé

## **P56. Identification des sols liquéfiables par pénétromètre statique : mesures *in-situ* et modélisation numérique**

**Hosseini Sadrabadi Hamid <sup>1</sup>, Chareyre Bruno<sup>1</sup>, Sibille Luc<sup>1</sup>, Riegel Pierre<sup>2</sup>**

1 - Sols, Solides, Structures-Risques, 2 - Equaterre : Bureau d'études géotechniques

Le Pénétromètre statique est utilisé pour la reconnaissance *in-situ* des couches de sol en sub-surface. Des versions avancées du CPT telles que piézocone ou vibrocone existent, elles permettent d'évaluer la sensibilité à la liquéfaction des sols. Les mesures réalisées le plus couramment restent la résistance de pointe  $Q_c$  et le frottement  $F_s$ . Le projet de recherche présenté dans cette communication vise à améliorer la méthode d'interprétation des mesures CPT pour la reconnaissance des sols liquéfiables. Il est établi sur une modélisation hydromécanique de ce dernier, à petite échelle. Le modèle numérique couplé est basé sur la Méthode des Eléments Discrets. Nous présentons ici la première étape de ces travaux portant sur la réalisation du modèle numérique du sol et de la pointe. Pour cela une première étude paramétrique est réalisée afin de caractériser, pour ce modèle, l'impact sur  $Q_c$  (i) du rapport de taille entre la pointe et l'échantillon de sol, et (ii) du confinement extérieur. Dans un second temps le modèle numérique de sol est calibré en sollicitation homogène (triaxiale) afin d'être représentatif de sols réels. Enfin des simulations d'enfoncement de la pointe sont conduites afin de mettre en relation les propriétés mécaniques (identifiées au préalable en sollicitation homogène) et les données pénétrométriques de base, à savoir : la résistance de pointe en mouvement de pénétration et à l'arrêt, ainsi que le frottement latéral. Les résultats numériques obtenus seront également confrontés à des données d'essais de pénétration réalisés *in-situ*.

Mots clefs : méthode éléments discrets (MED), CPT, pénétromètre statique, modèle numérique

## **P57. Potentiel de réutilisation des sols excavés par TBM et traités par additifs Djeran-Maigre Irini<sup>1</sup>, Dubujet Philippe<sup>2</sup>**

1 - Université de Lyon, INSA de Lyon, LGCIE, 2 - ENSISE

Les tunneliers de type TBM (Tunneliers à pression de terre) sont utilisés pour le creusement des tunnels en terrain meubles. L'injection d'agent tensioactif est alors classiquement utilisée pour faciliter le creusement, en modifiant les propriétés hydro-mécaniques du sol afin : de réduire le couple exercé au niveau du front de taille, d'augmenter la durée de vie des outils de coupe et de faciliter l'opération d'évacuation du sol. Les fines du sol excavé récoltées sont mises en décharge du fait de l'ignorance de leurs caractéristiques et surtout de l'impact des additifs sur leurs propriétés hydro-mécaniques. Dans un objectif de valorisation de ces sols traités, et en particulier des fines qui les composent, il faut connaître l'évolution de ces propriétés au cours du temps. Dans ce cadre, les mécanismes de dégradation des effets du traitement sont d'abord analysés et quantifiés. Deux mécanismes sont analysés: la dégradation physique et la biodégradation. L'étude permet d'évaluer et de comparer les temps de dégradation, et de déterminer l'influence de ces deux mécanismes sur les propriétés du sol traité. La question est de savoir si on arrive à retrouver les caractéristiques du sol non traité et le temps de ce recouvrement. L'évolution de diverses propriétés du sol sont ainsi examinées à partir d'essais hydro-mécaniques. Le sol modèle utilisé est un sable argileux composé de sable (d'Hostun) et de kaolinite. L'agent moussant est développé par la société CONDAT. Les paramètres mécaniques sont d'abord analysés : compressibilité, résistance au cisaillement. L'évolution des propriétés hydrauliques, et en particulier la perméabilité sont ensuite examinées. L'étude montre que l'état émulsionné des tensioactifs est l'élément moteur des modifications des propriétés. La demi-vie de cet état reste cependant assez courte concernant les propriétés mécaniques. Par contre, la présence du tensio-actif sous forme liquide affecte plus durablement les propriétés hydrauliques.

Mots clefs : additifs tensio-actifs, propriétés mécaniques, sols excavés, biodégradation, valorisation des fines

## **P58. Évolution de la structure d'une kaolinite et d'un mélange kaolinite+carbonate sous l'effet d'un traitement électrocinétique**

**Ben Hassine Abdelkader<sup>1</sup>, Souli Hanene<sup>2</sup>, Trabelsi-Ayadi Malika<sup>1</sup>, Dubujet Philippe<sup>2</sup>**

1 - Faculté des sciences de Bizerte (Tunisie), 2 - Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes - Univ Lyon, École Nationale d'Ingénieurs de Saint Étienne

La méthode électrocinétique est utilisée dans la dépollution des sols. Elle consiste à appliquer un courant électrique pour déplacer les polluants vers la cathode ou l'anode. Le but de ce travail est d'étudier le comportement électrocinétique d'une kaolinite et d'un mélange de (70 % kaolinite + 30 % carbonate) mélangés à l'eau et au plomb à une concentration de 0,1 M. L'évolution de la structure après les essais est étudiée par la porosimétrie au mercure. Les essais électrocinétiques sur la kaolinite et le mélange (70 % kaolinite + 30 % carbonate) ont montré que la conductivité de ces échantillons augmente en fonction du temps. Ceci est dû à la diffusion des cations H<sup>+</sup> au niveau de la structure. Cependant, la variation de la conductivité est plus marquée pour la kaolinite par rapport au mélange (70 % kaolinite + 30 % carbonate) Pour les échantillons mélangés au plomb, la conductivité diminue, ceci est dû au déplacement des cations Pb<sup>2+</sup> sous l'effet du courant électrique. En présence du carbonate, cette variation est moins marquée. Ceci est au fait que le plomb se fixe préférentiellement sur le carbonate ce qui rend son élimination difficile. Des mesures de quantité de plomb restant sur les deux échantillons ont montré que dans le cas de la kaolinite, la totalité du plomb est éliminé. Dans le cas du mélange (70 % kaolinite + 30 % carbonate), une faible quantité de plomb est éliminée. Les mesures de porosimétriques ont montré après les essais ont montré que le volume poreux varie très peu après avant et après les essais. La variation est plus marquée dans le cas des échantillons mélangés au carbonate. Ceci pourrait s'expliquer par la dissolution du carbonate durant l'essai. Au niveau de la taille des pores, les pores inter-granulaires (taille inférieure à 1,5 µm) sont influencés par le traitement électrocinétique.

Mots clefs : plomb, kaolinite + carbonate, kaolinite, électrocinétique, porosité

## **P59. Recyclage des sédiments marins issus de l'activité de dragage dans la formulation d'un remblai de béton allégé**

**Zambon Agnes<sup>1</sup>, Saiyouri Nadia<sup>1</sup>, Sbartai Zoubir-Mehdi<sup>1</sup>, Duplaine Hervé<sup>2</sup>**

1 - I2M - GCE, UMR 5295, 2 - Balineau

Aujourd'hui près de 45 millions de tonnes de sédiments marins sont dragués par an en France. La gestion des sédiments marins issus du dragage obéit à une législation qui les considère comme des déchets et impose leur mise en dépôt à terre. La valorisation de ces sédiments marins est donc un enjeu environnemental et économique important sur lequel l'entreprise bordelaise de travaux maritimes Balineau a décidé de miser en finançant ce projet. Il consiste à développer un béton innovant qui permettrait de réutiliser ces sédiments marins en tant que matière première et en remplacement des graviers traditionnellement utilisés pour le béton. L'étude de l'effet de l'activité des fines présentes dans les sédiments marins sur les caractéristiques du béton constitue un point clés de ce projet. Ce béton aurait la particularité d'être fabriqué à partir d'une mousse ce qui lui confèrerait une structure poreuse et une faible densité dans le but d'utiliser ce béton entant que remblais dans la rénovation de quais maritimes. Les travaux principalement expérimentaux visent à mettre au point une méthode de formulation et un processus de fabrication permettant d'obtenir les caractéristiques souhaitées pour le béton. Ces études seront menées en prenant en compte les conditions de mise en œuvre et l'environnement maritime auquel sera soumis le béton en service. Les premiers travaux ont permis d'établir un phénomène d'affaissement de la mousse lors de la fabrication du béton qui devra être minimisé en étudiant les paramètres qui en sont la cause. La méthode de formulation mise en place est basée sur la détermination d'un paramètre lié à la limite de liquidité des sédiments marins et qui permet de fixer la quantité d'eau à apporter pour la fabrication du béton.

Mots clefs : remblais allégés, stabilisation, fines, béton, sédiments marins, recyclage

## **P60. L'apport du dimensionnement de cavités par méthode laser 3D en forage**

**Riviere Franck<sup>1</sup>, Paille Josselin<sup>1</sup>**

1 - FONDASOL (France)

Afin d'appréhender au mieux la constitution du sous-sol et les aléas pouvant l'affecter, il est indispensable d'avoir une « vision » globale de la zone concernant un projet. Si l'on rappelle que l'information tirée d'un sondage est représentative d'une surface de quelques dizaines de cm<sup>2</sup>, on comprend aisément que l'utilisation de la géophysique, plus rapide et légère, trouve toute sa place dès que la surface d'étude pose la question du nombre et de la répartition des reconnaissances ponctuelles. Inclue dans les recommandations de diagnostics de cavités depuis de nombreuses années (voir recommandations du COPREC, CS78, guide technique LCPC), l'utilisation de la micro gravimétrie comme outil de détection n'est plus à démontrer. C'est dans cette optique que nous avons pu associer sur plusieurs campagnes de recherche de cavités anthropiques la méthode microgravimétrie, les sondages destructifs et la méthode laser 3D en forage. C'est un exemple de cette démarche que nous proposons avec le cas d'un chantier de recherche de catiches à Faches-Thumesnil. Cette campagne de détection a consisté en la réalisation de 764 stations de micro gravimétrie, 100 sondages destructifs avec enregistrement de paramètres, et des dimensionnements de cavité par sonde laser. Les dimensionnements réalisés sur des catiches ont donné des volumes de vides compris entre 150 et 300 m<sup>3</sup> et des formes très caractéristiques qui peuvent servir à établir un modèle gravimétrique. Ce modèle permet de valider l'emploi de la méthode et le choix de la maille de prospection. Le deuxième intérêt de la méthode laser est de contrôler, après la campagne de sondage, la corrélation entre anomalie résiduelle négative et vide rencontré. L'évaluation du volume et de la profondeur de la cavité permettent, de calculer l'anomalie théorique et de valider ou modifier le choix de l'anomalie régionale.

Mots clefs : dimensionnement, sondage, microgravimétrie, anomalie, cavité, sonde laser

## **P61. Inspection d'ouvrage d'art et diagnostic de parois rocheuses par lasergrammétrie et photogrammétrie**

**Barbier Quentin<sup>1</sup>, Roche François<sup>1</sup>, Guyoton Fabrice<sup>1</sup>, Vignon Violaine<sup>1</sup>**

1 - GEOLITHE (France)

La sécurité des constructions est l'une des priorités pour les maîtres d'ouvrage. En effet, un budget est consacré à la surveillance et au maintien en l'état de l'ouvrage afin de prévenir et minimiser les risques. De nombreux capteurs permettent le suivi ponctuel de sites naturels ou d'ouvrages d'art, mais avec le développement de nouvelles techniques topographiques, la modélisation 3D par lasergrammétrie et photogrammétrie joue un rôle de plus en plus prépondérant. Cette publication a pour objectif de comparer la lasergrammétrie par temps de vol couplé à un appareil photographique HD calibré et la photogrammétrie par multi-corrélation d'images. Ces techniques sont très adaptées pour la surveillance puisqu'elles permettent une inspection surfacique en trois dimensions de l'ensemble de la zone d'étude. Cette analyse comparative sera effectuée sur divers ouvrages (digue, tunnel, pont) mais également sur des sites naturels de type versant rocheux. Elle mettra en relief l'apport de chacune de ces techniques en fonction de l'objet à ausculter, de sa morphologie et de la distance le séparant de l'instrument. Dans un souci de précision, le modèle 3D de référence sera issu de la lasergrammétrie dans des conditions d'acquisition optimales. En effet, les données de référence seront acquises lors de conditions environnementales favorables et également de manière à limiter l'angle d'incidence à 45° afin de limiter l'influence sur les mesures. La finalité de cette étude est de mettre en place un protocole d'acquisition en vue d'optimiser le temps d'acquisition, tout en ayant une précision suffisante pour prévenir les risques.

Mots clefs : parois rocheuses, ouvrages d'art, photogrammétrie, lasergrammétrie

## **P62. Étude géophysique, géotechnique et historique d'une voie ferrée sur sol tourbeux**

**Boisson Joséphine<sup>1</sup>, Dhemaied Amine<sup>1</sup>, Rahmania Ibrahim<sup>2,1</sup>, Bodet Ludovic<sup>2</sup>, Pasquet Sylvain<sup>2</sup>, Brand Ludovic<sup>1</sup>, Calon Nicolas<sup>1</sup>, Terpereau Jean Marc<sup>1</sup>, Kahil Sirine<sup>1</sup>**

1 - SNCF Réseau - I&P LVE, 2 - Milieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols - Sorbonne Universités

Certaines zones du Réseau Ferré National nécessitent une maintenance accrue du fait de désordres récurrents impactant les voies et dont les causes peuvent être diverses. Dans le but d'optimiser les opérations de maintenance, il apparaît donc nécessaire de développer une meilleure compréhension des phénomènes mécaniques à l'origine de ces désordres. Et notamment de ceux liés au sol support de la plateforme ferroviaire.

Dans ce contexte général, nous avons mené une étude multi-méthodes pour mieux comprendre l'origine des désordres affectant la voie ferrée située dans le lit majeur de la Somme, à proximité d'Abbeville, le long de la ligne Longueau-Boulogne. Afin d'identifier la structure de la plateforme ferroviaire et du sol sous-jacent, des investigations géophysiques par géoradar et sismique par ondes de surface ont été menées. Cette dernière méthode permet également de réaliser une caractérisation mécanique des différentes couches situées sous la voie ferrée. Une analyse croisée des différentes données recueillies met en évidence 1) une variation latérale de la structure de la plateforme, 2) un milieu inversement dispersif et 3) un sol support présentant un module de cisaillement très faible. Les données historiques sur la zone montrent que les désordres existent par intermittence depuis les années soixante (liés principalement à l'introduction de nouveau matériel roulant lourd sur la ligne). L'étude ainsi que les travaux réalisés dans les années soixante-dix viennent consolider le modèle géophysique a priori. L'inversion des données sismiques est cohérente avec le modèle géotechnique et montre la présence d'une structure à trois couches mécaniquement distinctes. Cette analyse met en évidence le lien entre ces désordres et un défaut de portance du sol support (présence de tourbe) aggravé par des circulations lourdes (transport de marchandises).

Mots clefs : module de cisaillement, plateforme ferroviaire, géophysique, géotechnique, portance

## **P63. Instrumentation d'un déblai dans une marne - évolution des déplacements et de la pression interstitielle suite à un déchargement mécanique**

**Mahmutovic Dino<sup>1</sup>, Boutonnier Luc<sup>1</sup>, Monnet Jacques<sup>2</sup>, Leonard Jean-Marie<sup>1</sup>**

1 - EGIS GEOTECHNIQUE, 2 - GAIATECH (France)

Le projet ANR Terredurable a commencé en 2012 et prendra fin en décembre 2016. Son objectif est d'améliorer la conception des ouvrages en terre (compactage et stabilité) en combinant recherche expérimentale et théorique avec le retour d'expérience des praticiens. À cet effet, ce projet a pour ambition de mieux comprendre la mécanique des sols non saturés et notamment celle des sols proches de la saturation. Ces derniers ont un comportement bien spécifique avec la présence de bulles d'air occluses. Cet état hydrique correspond par ailleurs à la majorité des ouvrages en terre anthropiques en sols fins (déblais, remblais, barrages en terre, digues, etc.). Cette communication s'inscrit dans le thème du projet « étude expérimentale des ouvrages en terre après réalisation ». Un déblai dans des matériaux marneux de l'autoroute A304 a ainsi été instrumenté dans le cadre de ce projet de recherche. Les principaux résultats sont présentés dans cette communication. L'évolution du gonflement de la plateforme du déblai suite à un déchargement mécanique est analysée en fonction de l'avancement des travaux de terrassement et ceci jusqu'à 3 ans après la fin des travaux. Ces résultats sont complétés par des mesures de la pression interstitielle ainsi que des essais de laboratoire classiques (courbes granulométriques, IP, teneurs en eau, oedomètres, essais triaxiaux, etc.).

Mots clefs : déblai, déchargement mécanique, gonflement, succion, instrumentation

## **P64. Suivi des déformations mécaniques par extensométrie optique en paroi d'une galerie située à -445m du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne**

**Hedan Stephen<sup>1</sup>, Valle Valéry<sup>2</sup>, Noiret Aurélien<sup>3</sup>, Armand Gilles<sup>3</sup>, Cosenza Philippe<sup>1</sup>**

1 - Institut IC2MP, 2 - Institut Pprime, 3 - Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (France)

Cette communication présente les résultats d'une étude visant à quantifier l'influence mécanique de la dépose de cintres en galerie (localisée au niveau -445 m dans le Laboratoire Souterrain Meuse/Haute Marne ; couche supérieure du Callovo-oxfordien) sur le comportement mécanique des parois de cette galerie en effectuant des mesures sans contact par méthodes optiques. Cette étude devait donc permettre (i) de quantifier la déformation mécanique du massif avant et après la dépose des cintres et (ii) de déterminer la convergence et l'endommagement de la paroi de la galerie (Ø4,6 mètres). Deux surfaces d'investigation ont été privilégiées dans ce travail : Une surface située entre les cintres déposés 18 et 19 (au milieu de la zone de dépose) ; Une surface « témoin » située entre les cintres 14 et 15 (à trois mètres environ des cintres déposés). Les résultats présentés confirment l'intérêt des méthodes optiques, par nature non intrusive, pour le suivi sur plusieurs mois des déformations et des ouvertures/fermetures de fissures observées en paroi de galerie. Des résultats de mesure de déplacement hors-plan de la paroi (convergence) par méthode optique sont également présentés et discutés.

Mots clefs : déformation, stéréocorrélation, extensométrie optique, paroi de galerie

## **P65. Projet d'ouvrage d'art : justification du programme des reconnaissances complémentaires**

**Brach Aurore<sup>1</sup>, Saussaye Lucile<sup>1</sup>, Genereux Grégory<sup>1</sup>, Jandin Philippe<sup>1</sup>**

1 - CEREMA (France)

Justifier un programme de reconnaissances géotechniques complémentaires est parfois une mission ardue. En effet, ces actions exigent des dépenses importantes dès les phases amont d'un projet d'ouvrage d'art. L'objectif de la communication sera de présenter à partir d'un exemple, la progressivité des études menées jusqu'au stade actuel de la phase G2-AVP ainsi que les arguments apportés pour justifier d'une campagne complémentaire conséquente pour les phases G2-PRO et G2-DCE/ACT selon la norme NF P94-500. Le projet de pont concerne le doublement d'un ouvrage existant d'environ 1310 m de longueur. L'ouvrage, selon les deux variantes encore étudiées pourra être appuyé sur 18 ou 19 piles fondées chacune sur 4 pieux ancrés dans un substratum granitique. Le Cerema a réalisé les missions géotechniques de type G12 et G2 (entre 2010 et 2013) puis de type G2-AVP en 2015. Ces études interviennent de plus au moment de la refonte de la norme NF P94-500 sur les missions géotechniques. Les différentes études géotechniques ont pu se baser sur des reconnaissances géophysiques, des sondages et essais in-situ de type pénétromètre, pressiomètre et phicomètre, des essais en laboratoire sur échantillons intacts ainsi que sur des données bibliographiques de la zone étudiée, comme les coupes géotechniques ayant servi à la construction de l'ouvrage existant situé 40 m en aval. La justification du programme de reconnaissances complémentaires s'appuie sur l'absence de paramètres mécaniques suffisamment fiables (4 profils pressiométriques seulement pour 18/19 piles), sur des constats de variabilité locale importante du niveau du substratum rocheux, sur les principes mêmes de la norme NF P94-500 (ancienne et nouvelle version) et sur des estimations chiffrées des incertitudes géotechniques résiduelles. La communication présentera en détail les arguments qui permettront de justifier une dépense complémentaire afin de réaliser les reconnaissances pour les études de niveau projet de l'ouvrage et de ses fondations.

Mots clefs : fondations profondes, mission géotechnique, sondages, NF P94 500, reconnaissances

## **P66. Essais Cross Hole : Nouveaux développements pour la réalisation et l'interprétation**

**Bodard Christophe<sup>1</sup>, Mattiuzzo Jean-Luc<sup>1</sup>**

1 - INNOGEO (France)

L'essai sismique Cross Hole est utilisé par INNOGEO® pour la détermination des paramètres dynamiques du sol dans le cadre des calculs d'interaction sol-structure, et plus particulièrement encore en cas de risque de liquéfaction des sols au droit d'un ouvrage. L'essai Cross Hole permet de déterminer les vitesses des ondes de compression (Onde P) et de cisaillement (Onde S) afin de calculer les paramètres dynamiques des terrains, le coefficient de Poisson ainsi que la classe de sol sur la base de la moyenne harmonique VS30 définie par l'EUROCODE 8. Les expérimentations récentes associées aux retours d'expérience d'INNOGEO® ont permis de nouveaux progrès de la méthodologie d'acquisition et d'interprétation, en particulier pour les terrains moins propices à la transmission des ondes P ou S. Ces développements ont débouché sur une nouvelle procédure de mesure INNOGEO®, combinant la méthode Cross Hole à différentes méthodes géophysique d'acquisition sismique telles que l'essai Down Hole, la Tomographie sismique, la MASW, ainsi qu'à différentes sources sismiques. La méthodologie d'acquisition est ainsi décidée en amont de l'étude sur la base des données géologiques du site et peut être ensuite directement adaptée sur le terrain pendant les essais. L'interprétation conjointe des différentes données d'entrée (géologie, coupes de sondage, essais de laboratoire, acquisitions géophysiques, etc.) permet de contraindre le log des vitesses des ondes de cisaillement et de compression et ainsi de fiabiliser les résultats des essais sismiques.

Mots clefs : Liquéfaction, Cross Hole, Sismique, Géophysique, VS30, paramètres dynamiques

## **P67. Proposition d'une méthode de classification basée sur les paramètres de forage**

**Reiffsteck Philippe<sup>1</sup>, Benoît Jean<sup>2</sup>, Hamel Matthieu<sup>3</sup>, Vaillant Jean-Michel<sup>4</sup>**

1 - IFSTTAR, 2 - Geotechnical Engineering Research Group, University New Hampshire (États-Unis),

3 - FONDASOL IdF Est, 4 - FONDASOL Bruxelles - Enghien (Belgique)

Cette communication présente une démarche d'élaboration d'une classification des sols basée sur les paramètres de forages. Récemment les normes d'application nationales pour le dimensionnement des fondations superficielles et profondes de l'Eurocode 7, proposent d'utiliser un abaque de classification basé sur les résultats des essais pressiométriques. À l'instar de la classification des sols développée par Robertson à partir des résultats des essais de pénétration statique, cet outil définit des classes de sol dans un plan construit à partir de la pression limite normalisée et du rapport module sur pression limite. Dans l'étude présentée, les différents paramètres de forage combinés sont normalisés pour définir des axes similaires à ceux proposés par Robertson. La validation par comparaison à une base de données comportant ces différents essais permet de conclure sur la fidélité de cet abaque et propose quelques conseils pour son utilisation pratique. Une version plus élaborée tenant compte de l'état initial du sol est également soumise à validation.

Mots clefs : abaques, classification des sols, paramètres de forage

## **P68. Semelles sur inclusions rigides : validation du nouveau cahier des charges de Ménard**

**Baroni Maud<sup>1</sup>, Briançon Laurent<sup>2</sup>, Racinais Jérôme<sup>3</sup>, Maucotel Fanny<sup>3</sup>, Scache Hubert<sup>3</sup>**  
1 - Antea Group, 2 - LGCIE - INSA de Lyon, 3 - Ménard (France)

Dans le cadre de la rédaction d'un nouveau cahier des charges pour le dimensionnement et la mise en œuvre de colonnes à module contrôlé (CMC) sous semelle et sans plateforme de transfert de charge intercalée entre les CMC et la base de la fondation, la société Ménard et Antea Group ont réalisé un plot d'essai. L'objectif de ce plot d'essai était de vérifier le comportement d'une semelle directement posée sur quatre CMC sous des chargements verticaux centrés et excentrés et sous chargements horizontaux et de justifier les méthodes de dimensionnement utilisées par les bureaux d'études de la société Ménard. Le site a été préalablement caractérisé par des essais pénétrométriques statiques, pressiométriques et un forage carotté qui a permis de réaliser des essais d'identification et de caractérisations mécaniques des différentes couches de sol. Deux essais de chargement statiques ont été réalisés sur deux CMC isolées pour déterminer leur comportement jusqu'à la rupture. Enfin des essais de chargements verticaux centrés ont été menés sur une semelle directement posée sur le sol non renforcé par CMC pour servir de référence. Le plot d'essai et le plot de référence ont été particulièrement instrumentés pour suivre le tassement du sol sur un profil vertical, les déplacements verticaux des semelles, le transfert de charge sous chaque semelle et dans les CMC, les déplacements horizontaux du sol support, des CMC et de la semelle pour les chargements horizontaux. Ces essais ont validés le procédé d'amélioration de sol par CMC directement présentes sous semelle et leurs résultats ont été confrontés à des calculs analytiques et numériques (Plaxis). Cette confrontation a permis de justifier les méthodes de dimensionnement utilisées par la société Ménard. Cette étude a permis de rédiger un nouveau cahier des charges donnant des recommandations de dimensionnement et de mise en œuvre de CMC sous semelles.

Mots clefs : cahier des charges, expérimentation, amélioration des sols, modélisation

## **P69. Caractérisation et comportement de l'argile de Merville sous chargements monotone et cyclique**

**Dano Christophe<sup>1,2</sup>, Han Jian<sup>2,3</sup>, Hicher Pierre-Yves<sup>2</sup>, Yin Zhenyu<sup>2</sup>**

1 - 3SR - Univ. Grenoble Alpes, 2 - École Centrale de Nantes, 3 - School of Transportation Science and Engineering, Beihang University (Chine)

On propose dans cette communication la caractérisation physique et mécanique de l'argile de Merville (nord de la France), prélevée sur le site des essais de pieux en grandeur réelle réalisés dans le cadre du Projet National SOLCYP. L'argile de Merville est une argile plastique, fortement surconsolidée et structurée du fait de son histoire géologique particulière. Les principales caractéristiques physiques (limites d'Atterberg, teneur en eau, minéralogie, etc.) ont été identifiées sur une profondeur de l'ordre de la dizaine de mètres. On présente ensuite les résultats d'essais triaxiaux statiques, en compression et en extension, qui permettent de déterminer les droites de rupture pour l'argile reconstituée (la fissuration de l'argile naturelle ne permettant pas une analyse comparative des résultats). Enfin, force est de constater que les essais cycliques sur les sols sont généralement limités à quelques milliers de cycles et peu de résultats sur des argiles surconsolidées sont disponibles dans la littérature. On explore donc la réponse de l'argile de Merville reconstituée et surconsolidée lors d'essais triaxiaux cycliques à très grand nombre de cycles (jusqu'à 1 million) qui révèlent une évolution inattendue de la surpression interstitielle et l'existence d'un seuil en-deçà duquel les cycles ne semblent n'avoir aucun effet sur le comportement de l'argile et au-delà duquel la rupture peut être atteinte plus ou moins rapidement.

Mots clefs : essais triaxiaux, argile surconsolidée, chargement cyclique