

Conférence invitée en hommage à Jean-Paul TISOT

Comportement thermo-hydro-mécanique des argiles et argilites

Pierre DELAGE¹

1 - (Institut Navier - École des Ponts-ParisTech)

Une attention particulière a été portée depuis une vingtaine d'années au comportement thermo-hydro-mécanique des sols et roches argileuses dans le contexte du stockage profond des déchets radioactifs à haute activité exothermiques, intérêt renforcé récemment avec les développements de la géothermie. Une élévation de température dans les matériaux argileux peut avoir plusieurs conséquences à court et à long terme. A court terme, il s'agit de la surpression thermique de l'eau interstitielle due au fait que le coefficient de dilatation thermique de l'eau est largement supérieur à celui de la phase solide. Cette surpression thermique a pu être mesurée in-situ dans des expérimentations conduites dans les laboratoires souterrains de recherche (Bure pour l'Andra et Mont-Terri pour Nagra en Suisse), alors que peu d'expérimentations en laboratoire l'ont identifiée. On présente une expérimentation développée spécifiquement pour l'argilite du Callovo-Oxfordien (envisagée comme roche hôte possible en France), dont les résultats sont discutés par rapport aux données de la bibliographie. Ces surpressions se dissipent progressivement en fonction de la très faible perméabilité des roches hôtes, pour laisser place à une réponse drainée. Dans les argiles soumises à une élévation de température sous contrainte constante comme l'argile de Boom (Belgique), la réponse volumique drainée dépend de son degré de surconsolidation, avec une diminution de volume pour les sols normalement consolidés et une dilatation, suivie ou non d'une contraction pour les sols surconsolidés. Dans les argilites, peu de données sont disponibles car les essais sont longs et délicats du fait de leur très faible perméabilité (de l'ordre de 10-13 m/s). On montre sur l'argilite du Callovo-Oxfordien (France) et sur l'argile à Opalinus (Suisse) qu'une dilatation thermoélastique se produit jusqu'à la température maximum subie pendant l'histoire géologique, suivie d'une contraction plastique et on met en évidence un phénomène d'écrouissage thermique. On présente aussi des résultats sur l'effet de la température qui a tendance à réduire légèrement la résistance mécanique des argilites, et sur la remobilisation thermique de discontinuités de cisaillement, caractéristique de la zone endommagée par l'excavation (EDZ).

Mots clefs : argiles, argilites, température, surpression thermique, dilatation thermoélastique, contraction thermoplastique

Mercredi 6 juillet - 9h45 - Auditorium A 300

Conférence invitée CFMR

Caractérisation non destructive de la zone endommagée induite par l'excavation de roches argileuses

Philippe COSENZA¹

1 - Université de Poitiers, IC2MP-HydrASA, CNRS UMR7285, ENSI Poitiers, France

L'excavation d'infrastructures souterraines induit l'apparition d'une zone endommagée en paroi des galeries. Cette zone endommagée qui résulte de la redistribution du champ de contrainte et de la pression de pores constitue une zone fracturée plus ou moins importante dont l'extension dépend de la technique de creusement utilisée, du contexte géologique et des propriétés physiques de la roche. La caractérisation de cette zone endommagée dans les roches argileuses est devenue aujourd'hui un enjeu essentiel pour la sûreté des stockages géologiques réalisés dans ces formations.

Il s'agira ici de présenter une synthèse des méthodologies non destructives et non invasives utilisées pour la caractérisation et le suivi de la zone endommagée présente dans les ouvrages excavés dans les roches argileuses. Ces méthodologies relèvent principalement de deux familles de méthodes géophysiques :

- Les méthodes sismiques fondées sur l'étude de la propagation d'ondes élastiques (technique cross-hole, sismique réfraction, analyse de la dispersion des ondes de surface).
- Les méthodes électriques basées sur la mesure de différences de potentiel électrique induites par l'injection de courants électriques. On discutera notamment les potentialités des approches récentes dites de polarisation provoquée.

Pour chacune des méthodologies, les profondeurs d'investigation et les résolutions spatiales mises en jeu sont présentées.

Cet exposé synthétique s'intéressera également aux développements récents de méthodes optiques actuellement utilisées dans l'industrie pour le contrôle non destructif. Dans l'objectif d'une caractérisation et d'un suivi (« monitoring ») de la zone endommagée, ces méthodes sans contact se montrent intéressantes pour

- le suivi pluriannuel de la mesure de l'ouverture/fermeture de fissures en paroi,
- et la mesure sans contact et spatialisée de la convergence de galerie.

Des expérimentations récentes en galeries souterraines (station expérimentale de Tournemire et laboratoire souterrain de Meuse-Haute Marne) sont présentées à titre d'illustrations.

Mots clefs : zone endommagée, roches argileuses, méthodes géophysiques, méthodes optiques.

Mercredi 6 juillet - 13h40 - Auditorium A 300

Conférence invitée CFIGI

Glissement du Chambon : évolution du phénomène et gestion de crise

Laurent DUBOIS¹, Samuel DAUPHIN¹, Geneviève RUL¹

1 - Cerema Centre-Est, Bron, France (CEREMA)

Le déclenchement d'un grand glissement de terrain a entraîné la fermeture totale à la circulation du grand tunnel du Chambon le 10 avril 2015 et, par conséquent, de la route RD1091, reliant Grenoble et Briançon par la vallée de la Romanche dans les Alpes françaises (département de l'Isère).

La coupure de cet axe routier, unique en fond de vallée et sans déviation possible, pour une longue période, a eu et a toujours de lourdes conséquences sur la vie quotidienne des habitants et sur l'économie de la haute vallée de la Romanche.

Au mois de juillet 2015, les mesures de sécurité supplémentaires adoptées lors de deux phases de grands déplacements du glissement de terrain, pendant lesquelles une rupture brutale était redoutée, ont rendu encore plus difficiles les communications entre les deux parties de la vallée, malgré le déploiement de mesures exceptionnelles pour rétablir la continuité des déplacements locaux.

Le présent article fait le point sur la compréhension actuelle du phénomène et de son évolution temporelle, et présente notamment une interprétation des désordres géologiques comme les

Jeudi 7 juillet - 8h30 - Auditorium A 300

Conférence invitée CFMS

Sournoiseries de l'eau dans le sol sur le site de la 4^e écluse de Lanaye à Visé (Belgique)

Philippe WELTER¹

1 – Service Public de Wallonie, Direction Générale Opérationnelle des Routes et des Bâtiments, Département des Expertises Techniques, Direction de la Géotechnique, B – 4000 Liège, Belgique

Le Canal Albert, à vocation essentiellement industrielle, relie le bassin industriel de Liège à la zone portuaire d'Anvers et met en communication les bassins houillers liégeois et campinois. Inauguré en 1939 au gabarit de 2000 tonnes, il augmentait, dans le secteur mosan, les capacités de transport fluvial de l'ancien Canal Liège-Maastricht. Entre Liège et Lanaye (frontière avec les Pays-Bas), il est réalisé au pied du versant ouest de la vallée de la Basse Meuse, dont les flancs et le substratum mésozoïque sont essentiellement constitués des dépôts sédimentaires à prédominance calcaire et crayeuse. Les relèvements de son niveau d'eau, au cours des aménagements successifs qui ont suivi sa construction pour le porter au gabarit de 9000 tonnes, ont conduit à un profil transversal déblai-remblai et à la réalisation d'importants murs-digues en rive droite, notamment pour l'aménagement de zones portuaires et la protection des villages entre le Canal Albert et la rive gauche de la Basse Meuse.

Tout au long de son histoire, des travaux de drainage et de canalisation des eaux souterraines autour et sous le canal ont été menés. Plus ou moins régulièrement, des phénomènes d'écoulement souterrain se sont manifestés (fuite et érosion), nécessitant des travaux d'étanchéité et de protection contre l'érosion interne dans le sol. Ces problèmes se sont particulièrement concentrés au droit du "nœud de Lanaye", à la confluence des branches liégeoises et campinoises du Canal Albert avec le Canal de Maastricht, à la frontière avec les Pays-Bas.

Dans ce contexte, la construction d'une quatrième écluse au "nœud de Lanaye", mise en service en 2015, a nécessité des études et des travaux très spécifiques pour la maîtrise des eaux de surface et souterraines, sous la surveillance d'un important monitoring géotechnique.

Lors de la mise sous eau du bief de la 4^{ème} écluse, quelques "fuites" ont été observées, nécessitant des travaux de réparation et de confortement.

Au travers de différents épisodes rencontrés essentiellement ces dernières années, liés ainsi aux sournoiseries des écoulements souterrains, l'article illustre le combat souvent délicat et permanent que nos infrastructures hydrauliques nécessitent pour tenter de réguler les effets de l'eau dans le sol.

Mots clefs : infrastructures hydrauliques, eau dans le sol, drainage, érosion, mouvements de sol

Jeudi 7 juillet - 10h25 - Auditorium A 300



Julie D'AMATO

Apport des bases de données d'éboulements rocheux obtenues par scanner laser dans la caractérisation des conditions de rupture et processus associés

L'étude de la rupture des masses rocheuses, conduisant aux éboulements rocheux, est primordiale dans l'évaluation des risques d'éboulements rocheux, mais reste un problème complexe. Les incertitudes liées au fait que nous n'avons pas accès à l'intérieur du massif sont toujours importantes, et l'évaluation quantitative du risque est donc très difficile. Ce travail de thèse a consisté à établir une base de données d'éboulements rocheux la plus exhaustive possible (pour des volumes supérieurs à $0,1 \text{ m}^3$) pour une paroi rocheuse active dominant l'agglomération grenobloise. Il s'agit d'une falaise de plusieurs kilomètres en bordure du massif de la Chartreuse, constituée de deux barres de différentes géologies, l'une en calcaire lité, l'autre en calcaire massif. La combinaison de données de scanner laser et de photographie a permis dans un premier temps d'aborder la problématique des configurations préférentielles de rupture, en lien avec la structure, la morphologie et l'évolution de la falaise. Dans un second temps, la problématique des facteurs déclenchant des éboulements rocheux a été étudiée notamment pour les facteurs météorologiques.

Les nuages de points issus du scanner laser permettent de reconstituer la falaise et les compartiments éboulés en 3D. Les données de surface des falaises, ainsi que des informations sur la localisation, les dimensions, le mécanisme de rupture propre à chaque compartiment ont été analysées pour caractériser l'évolution morphologique des deux falaises. Il apparaît que la falaise inférieure, dont la morphologie dépend fortement de la fracturation et de l'érosion torrentielle des marnes sous-jacentes, présente une fréquence d'éboulement 22 fois plus importante que la falaise supérieure, de morphologie et pente régulière. De plus, dans la falaise inférieure, le taux d'érosion est 4 fois plus élevé entre 900 et 1000 m d'altitude, qu'entre 1000 et 1100 m. Cela montre que le régime d'érosion de cette falaise est transitoire, alors que celui de la falaise supérieure pourrait être permanent.

Les éboulements rocheux détectés ont également été datés par un suivi photographique pendant 2,5 ans. Un suivi quasi-continu (1 photo toutes les 10 min), avec un objectif grand angle a permis de dater 214 éboulements de plus de $0,1 \text{ m}^3$. Un suivi mensuel, avec un téléobjectif, a permis de dater 854 éboulements de plus de $0,01 \text{ m}^3$. L'analyse de ces deux bases de données montre que la fréquence d'éboulements rocheux peut être 7 fois plus grande lors d'un épisode de gel-dégel que sans événement météorologique particulier, et 4,5 fois plus grande lors d'un épisode de pluie. De plus, elle devient 26 fois plus grande si l'intensité depuis le début de l'épisode est supérieure à 5 mm/h . A partir de ces résultats, une échelle de 4 niveaux d'aléa a pu être proposée pour la prévision de l'aléa.

La base de données plus précise et la définition des épisodes de gel-dégel ont permis de distinguer différentes phases dans un épisode de gel-dégel : refroidissement à température négative, réchauffement à température négative, et dégel (à température positive). Il apparaît que les éboulements rocheux se produisent plus fréquemment lors des périodes de réchauffement (à température négative) et de dégel que lors des périodes de refroidissement. Cela suggère que les éboulements sont causés par la dilatation thermique de la glace plutôt que par la dilatation due au changement de phase. Ils peuvent cependant ne se produire que lors du dégel, car la cohésion de l'interface roche-glace peut-être suffisante pour tenir le bloc jusqu'à la fonte de la glace. Des expériences *in situ* et en laboratoire ont permis de mesurer la pression de glace dans une fissure avec écoulement d'eau. Elles montrent que la glace formée par accréation (gel de gouttes ou films d'eau) n'exerce pas de pression sur les parois rocheuses.

Mercredi 6 juillet - 16h10 - Auditorium A 300



Guillaume CHAMPAGNE DE LABRIOLLE¹

Amélioration des méthodes analytiques basées sur des concepts simples pour le dimensionnement des tunnels superficiels et profonds en sol meuble

1 - ARCADIS

La méthode Convergence-Confinement, de par sa facilité d'application, est fréquemment employée pour le calcul des tunnels, car elle permet de simuler en 2D, l'effet 3D de la présence du front de taille, le tout grâce à trois courbes : la courbe de réaction du massif (GRC), la courbe longitudinale de convergence (LDP), et la courbe de confinement du soutènement (SCC). Cependant, dans la pratique des ingénieurs, la plupart des hypothèses régissant les résultats les plus habituels sont souvent ignorées, en dehors de l'hypothèse d'un tunnel circulaire suffisamment profond. Et du côté des chercheurs, de nombreux travaux portent essentiellement sur les GRC par le biais de lois de comportement complexes, mais avec peu de lien avec la LDP et la SCC.

Le cadre conceptuel de la méthode Convergence-Confinement a été établi pour un matériau isotrope dans un champ de contraintes initialement isotropes. Ces deux hypothèses, quoique restrictives, donnent à cette méthode de calcul une approche fortement pédagogique. La méthode a été également complètement traitée pour un matériau avec un comportement élastique linéaire en condition de contraintes initialement anisotropes. Pour passer rigoureusement du cas isotrope, où le soutènement est chargé uniquement radialement, au cas anisotrope, il est appliqué la théorie des coques associée à une condition de contact massif/soutènement. Et c'est en particulier cette condition qui rend le traitement de l'anisotropie très fastidieuse par rapport au cas isotrope.

Les équations de la théorie des coques sont citées dans des publications depuis 1975, mais s'étendent peu sur les hypothèses et simplifications qui ont été établies. Il s'avère que les équations utilisées sont celles de la théorie des coques minces selon Flügge (valables pour un rapport épaisseur sur rayon $t/R < 1/20$ et pas $1/10$ comme on peut parfois le lire), en opposition avec celle des coques très minces ($t/R < 1/250$), cette dernière étant largement utilisée dans l'industrie. Le domaine de validité de la théorie des coques minces se situe déjà hors de nombreux cas usuels pour les revêtements de tunnels, ce qui conduit à se poser des questions sur l'approximation induite par l'utilisation de cette théorie à des revêtements d'épaisseur trop forte par rapport au rayon d'excavation.

L'objectif de ce travail a donc été de remettre en lumière l'ensemble des hypothèses de la méthode Convergence-Confinement, pour généraliser une application pratique sur la base de concepts simples, en particulier grâce à l'établissement de la théorie des coques épaisses sous chargement anisotrope.

Jeudi 7 juillet - 9h - Auditorium A 300



Jean-Pierre JANIN¹

Simulation numérique tri-dimensionnelle de tunnels réalisés en méthode conventionnelle ou mécanisée

1 - TERRASOL

Alors que les agglomérations urbaines se densifient de plus en plus, la réalisation d'ouvrages souterrains, tels que parkings, tunnels métropolitains, routiers, ferroviaires etc., est devenue un enjeu prioritaire dans le cadre des politiques de réorganisation des espaces, d'amélioration de la viabilité et de développement des transports en commun. Le creusement de ces ouvrages pose la question de l'interaction avec les bâtiments en surface et les structures déjà existantes en souterrain. L'approche de l'ingénieur doit ainsi tenir compte de deux problématiques : d'une part assurer le bon déroulement des travaux en préservant la stabilité de l'excavation, et, d'autre part, contrôler les déformations du massif encaissant pour limiter l'interaction avec les constructions avoisinantes.

La pratique courante de dimensionnement des tunnels, notamment vis-à-vis des déformations, s'appuie principalement sur les principes de la méthode convergence-confinement, où la modélisation du creusement du tunnel est faite par des calculs numériques bidimensionnels en déformations planes, simulant les phases successives de creusement, en intégrant la notion de taux de déconfinement. Cependant, cette méthode, dont la fiabilité est directement liée au choix du taux de déconfinement, est souvent utilisée dans des situations où les hypothèses de base ne sont pas respectées (tunnel peu profond, massif hétérogène et anisotrope, excavation phasée, etc.). Le recours à une modélisation tridimensionnelle devient ainsi incontournable pour étudier le problème dans toute sa complexité et se rapprocher au mieux de la réalité.

Lors de mon travail de thèse, réalisée en convention CIFRE entre l'INSA de Lyon et TERRASOL, j'ai pu me consacrer au suivi régulier du chantier du deuxième tube de Toulon. Cette expérience a été très enrichissante car elle m'a permis d'appréhender la complexité des différentes problématiques caractérisant un chantier de tunnel. La mise en place et l'exploitation de deux sections instrumentées m'ont également aidé à comprendre le caractère tridimensionnel du champ de déformation provoqué par le creusement du tunnel et de bâtir une base de données utilisée dans un deuxième temps pour une retro-analyse numérique menée sous le code de calcul PLAXIS 3D.

Le modèle numérique, dont la validité a été vérifiée par la bonne concordance avec les mesures *in situ*, a mis en évidence l'importance d'une simulation correcte du présoutènement (particulièrement celui au front) et du phasage des travaux, pour bien évaluer le déconfinement et les déformations engendrées dans le massif. Le résultat de ce travail a été mis au profit de plusieurs projets sensibles où le recours à un modèle 3D a été la clé de la réussite des études.

Jeudi 7 juillet - 9h30 - Auditorium A 300



Huy Tran-Manh¹⁻², Jean Sulem¹,
Didier Subrin²

Comportement différé et anisotrope des tunnels en terrain poussant

1 - Université Paris-Est, Laboratoire Navier/CERMES, École des Ponts-ParisTech, IFSTTAR, CNRS, 77455 Marne la Vallée, France

2 - Centre d'Etude des Tunnels (CETU), 69500 Bron, France

Le projet de liaison ferroviaire Lyon-Turin s'inscrit dans la perspective des grandes traversées alpines, confrontées à la problématique du creusement de tunnels à grande profondeur. La descenderie de Saint-Martin-la-Porte, pour la reconnaissance du projet de tunnel de base Maurienne-Ambin, a connu des difficultés d'exécution à partir de la rencontre des schistes charbonneux du Houiller productif. Les matériaux rocheux fortement tectonisés, rencontrés dans les terrains traversés par ce tunnel, sont caractérisés par un comportement particulièrement poussant (désigné par les anglophones sous le terme « squeezing ground ») qui se manifeste par des convergences élevées et des effets différés importants, et de plus une anisotropie due à l'orientation préférentielle des plans de faiblesse mécanique.

L'objectif de la présente étude est, d'une part, l'analyse complète des données d'auscultation du tunnel relevées au cours du creusement et, d'autre part, le développement analytique et numérique de modèles de calcul prenant en compte à la fois l'anisotropie du massif et l'effets du temps.

Dans un premier temps, nous avons développé une méthode robuste pour le calage des données de convergence qui permet de caractériser la cinématique observée dans la descenderie et de mettre en évidence de directions principales de déformation. Les déformations principales sont étudiées dans le cadre d'une loi de convergence empirique afin de prévoir leurs évolutions dans le temps ainsi que les convergences finales.

Dans un second temps, un modèle de comportement viscoplastique avec des plans de faiblesse a été proposé et implémenté dans le logiciel aux différences finies FLAC3D. L'application de ces développements numériques aux simulations de la réponse de la descenderie de Saint-Martin-La-Porte montre une très bonne reproduction du comportement observé.

Jeudi 7 juillet - 13h40 - Auditorium A 300



Solenn Le Pense¹, Ahmad Pouya¹

ex aequo

Modélisation hydro-mécanique du couplage endommagement-plasticité dans les géomatériaux non saturés

1 - Laboratoire Navier, UMR 8205, École des Ponts, IFSTTAR, CNRS, UPE, Champs-sur-Marne, France

L'étude de la rupture des masses rocheuses, conduisant aux éboulements rocheux, est primordiale dans l'évaluation des risques d'éboulements rocheux, mais reste un problème complexe. Les incertitudes liées au fait que nous n'avons pas accès à l'intérieur du massif sont toujours importantes, et l'évaluation quantitative du risque est donc très difficile. Ce travail de thèse a consisté à établir une base de données d'éboulements rocheux la plus exhaustive possible (pour des volumes supérieurs à 0,1 m³) pour une paroi rocheuse active dominant l'agglomération grenobloise. Il s'agit d'une falaise de plusieurs kilomètres en bordure du massif de la Chartreuse, constituée de deux barres de différentes géologies, l'une en calcaire lité, l'autre en calcaire massif. La combinaison de données de scanner laser et de photographie a permis dans un premier temps d'aborder la problématique des configurations préférentielles de rupture, en lien avec la structure, la morphologie et l'évolution de la falaise. Dans un second temps, la problématique des facteurs déclenchant des éboulements rocheux a été étudiée notamment pour les facteurs météorologiques.

Les nuages de points issus du scanner laser permettent de reconstituer la falaise et les compartiments éboulés en 3D. Les données de surface des falaises, ainsi que des informations sur la localisation, les dimensions, le mécanisme de rupture propre à chaque compartiment ont été analysées pour caractériser l'évolution morphologique des deux falaises. Il apparaît que la falaise inférieure, dont la morphologie dépend fortement de la fracturation et de l'érosion torrentielle des marnes sous-jacentes, présente une fréquence d'éboulement 22 fois plus importante que la falaise supérieure, de morphologie et pente régulière. De plus, dans la falaise inférieure, le taux d'érosion est 4 fois plus élevé entre 900 et 1000 m d'altitude, qu'entre 1000 et 1100 m. Cela montre que le régime d'érosion de cette falaise est transitoire, alors que celui de la falaise supérieure pourrait être permanent.

Les éboulements rocheux détectés ont également été datés par un suivi photographique pendant 2,5 ans. Un suivi quasi-continu (1 photo toutes les 10 min), avec un objectif grand angle a permis de dater 214 éboulements de plus de 0,1 m³. Un suivi mensuel, avec un téléobjectif, a permis de dater 854 éboulements de plus de 0,01 m³. L'analyse de ces deux bases de données montre que la fréquence d'éboulements rocheux peut être 7 fois plus grande lors d'un épisode de gel-dégel que sans événement météorologique particulier, et 4,5 fois plus grande lors d'un épisode de pluie. De plus, elle devient 26 fois plus grande si l'intensité depuis le début de l'épisode est supérieure à 5 mm/h. À partir de ces résultats, une échelle de 4 niveaux d'aléa a pu être proposée pour la prévision de l'aléa.

La base de données plus précise et la définition des épisodes de gel-dégel ont permis de distinguer différentes phases dans un épisode de gel-dégel : refroidissement à température négative, réchauffement à température négative, et dégel (à température positive). Il apparaît que les éboulements rocheux se produisent plus fréquemment lors des périodes de réchauffement (à température négative) et de dégel que lors des périodes de refroidissement. Cela suggère que les éboulements sont causés par la dilatation thermique de la glace plutôt que par la dilatation due au changement de phase. Ils peuvent cependant ne se produire que lors du dégel, car la cohésion de l'interface roche-glace peut-être suffisante pour tenir le bloc jusqu'à la fonte de la glace. Des expériences in situ et en laboratoire ont permis de mesurer la pression de glace dans une fissure avec écoulement d'eau. Elles montrent que la glace formée par accréation (gel de gouttes ou films d'eau) n'exerce pas de pression sur les parois rocheuses.

Jeudi 7 juillet - 13h55 - Auditorium A 300

Les thématiques

Conception et durabilité des ouvrages géotechniques

Dynamique des sols, chargement cyclique, fondations d'éoliennes et offshore

Gestion des risques

Grands ouvrages

Massifs rocheux, géothermie, stockage de déchets en surface et souterrain.

Matériaux et géomatériaux

Modélisation numérique, physique, simulation, effet d'échelle

Processus biogéochimiques

Reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages



Les résumés

mercredi 6 juillet

1. Apports du calcul à la rupture dans la conception des soutènements

Cuira Fahd¹, Simon Bruno²

1 - TERRASOL, 2 - TERRASOL

L'approche cinématique du calcul à la rupture est le cadre théorique rigoureux en référence duquel peuvent être évalués certains schémas de calcul couramment adoptés pour évaluer les états limites de poussée ou butée contre les écrans de soutènement. Les exemples traités dans cette communication illustrent que certaines approximations sont pessimistes et d'autres peu sécuritaires.

Mots clefs : poussées dynamiques, modélisation, poussée/butée, soutènement, calcul à la rupture

2. Procédés constructifs innovants dans la réalisation du tramway T6, en région parisienne

Gutjahr Ira¹, Frattini Nicolas¹

1- Solétanche-Bachy

Dans le cadre de la réalisation du tramway T6, qui relie Chatillon à Viroflay en banlieue parisienne, une section souterraine a été réalisée sous la ville compte tenu de la forte densité urbaine de Viroflay. Cette section comporte 2 stations ainsi qu'un puits d'entrée, et est réalisée avec un tunnelier à pression de terre. Ce chantier a été l'occasion de mettre en œuvre deux procédés innovants : un pavé au coulis auto-stable pour l'attaque du tunnelier, et des liernes cintrées dans les stations.

Pavé au Coulis : le puits d'entrée du tunnelier doit répondre à deux objectifs : offrir un soutènement avec une surface d'attaque plane pour le tunnelier, et permettre sa mise en pression progressive, la couverture des terrains sur les premiers mètres étant faible. La solution envisagée initialement était une paroi armée de fibres de verre et butonnée, associée à des injections à l'arrière. Cet article décrit la variante innovante réalisée : un pavé au coulis auto-stable, non armé, qui se substitue à la paroi moulée et aux injections, avec le gain de temps et d'espace que cela engendre.

Liernes cintrées : les stations étant réalisées en taupe, et la circulation à la surface devant être maintenue, seule une trémie permettait l'accès aux stations en phase travaux. Une lierne cintrée a été réalisée devant la paroi, afin de permettre un espacement plus important des boutons et ainsi éviter un bouton provisoire traversant au droit de la trémie. Cet article décrit la justification de cette technique et ses résultats.

Mots clefs : stable, pavé auto, puits d'entrée tunnelier, lierne, boutons

3. Optimisation d'un confortement par clouage vertical suite à retour d'expérience
Talfumière Vincent¹, Belut Florence¹, Lucas Fatima¹

1 - Direction I&P, SNCF

La ligne ferroviaire Paris-Le Havre, circulée depuis le milieu du 19^{ème} siècle, est établie en grand remblai sur versant à hauteur de la ville de Pavilly. En 1961, suite à des travaux majeurs d'élargissement de plate-forme pour éviter un tunnel en très mauvais état, le remblai ferroviaire s'est en partie effondré. Le glissement impacte la voie sur une centaine de mètres et débouche en pied de versant à 150 mètres en aval de l'ouvrage (13000 m³). Malgré plusieurs phases de confortement, l'ouvrage comporte toujours des mouvements actifs qui nécessitent une nouvelle phase de traitement pour assurer sa stabilité et la sécurité des circulations ferroviaires. Ces travaux consistent en un clouage vertical par pieux forés armés de gros diamètre (800 mm), de profondeur 23 m, dont le dimensionnement demande un maillage dense, compte tenu des masses à reprendre et de la profondeur de la surface de rupture. Devant l'ampleur des travaux, des réflexions ont été menées pour rechercher des pistes d'optimisation. Ainsi, un retour d'expérience a été entrepris sur ce type de confortement, utilisé depuis plus de 40 ans sur le réseau ferré national : ce REX a montré que les mouvements étaient réduits très tôt après la mise en place des clous, avec des déplacements bien inférieurs à ceux estimés en phase conception. Il est donc apparu possible d'optimiser le dimensionnement en diminuant l'objectif d'amélioration du coefficient de sécurité et donc le maillage des pieux. Après les travaux de confortement, il conviendra de suivre l'évolution du site de façon à observer l'influence de la diminution du maillage sur la durée et la vitesse de stabilisation du site. Cela permettra d'alimenter le REX en cours et de faire évoluer les critères de dimensionnement du clouage vertical appliqués actuellement sur le réseau ferré national.

Mots clefs : confortement par clouage vertical, désordres et surveillance, optimisation, ouvrages en terre ferroviaires

4. Stockage de chaleur dans les sols compactés

Boukelia Ahmed^{1,2}, Rosin-Paumier Sandrine², Masrouri Farimah², Le Borgne Tangi³

1 - ESITC de Metz, 2 – LEMTA, Université de Lorraine, 3 - Bouygues TP

Afin de répondre aux enjeux environnementaux liés au réchauffement climatique, le recours au stockage d'énergie dans des remblais et des massifs de terre pour son utilisation ultérieure est envisagé. La mise en place des circuits géothermiques nécessaires à cette méthode engendre des questionnements sur l'impact des variations de températures sur les propriétés des matériaux et sur la possibilité d'optimiser l'efficacité de ces procédés dans le cas où le massif de stockage est anthropique (sols compactés). Les caractéristiques du sol compacté influençant l'efficacité du stockage sont la nature minéralogique, les paramètres de compactage (teneur en eau et densité), la conductivité et la capacité thermique. Par exemple, une augmentation de la teneur en silice du matériau augmente sa conductivité thermique. A proximité des échangeurs, la température du sol évolue. Ce comportement n'est pas pris en compte dans les modèles classiques, alors qu'il pourrait engendrer une variation des propriétés thermiques du fait de l'évolution du volume des constituants des sols et des propriétés d'écoulement. L'objectif de cet article est de quantifier l'effet couplé de la teneur en eau, de la densité sèche et de la température sur les paramètres thermiques des sols. Trois matériaux ont été étudiés, un limon, et deux mélanges sable-limon. Les sols compactés sont préparés à différents états correspondant à différents points de la courbe Proctor normal puis soumis soit à 20°C soit à 50°C. Les résultats montrent que la conductivité thermique des matériaux atteint un maximum aux alentours de l'optimum Proctor, tandis que la capacité thermique calorifique atteint un plateau du côté humide de l'optimum Proctor. L'augmentation de la température provoque une légère augmentation des propriétés thermiques. Ces résultats permettent de définir un état de compactage optimal pour le stockage de la chaleur, et de prendre en compte l'effet de la température sur les capacités de stockage de chaleur.

Mots clefs : capacité de stockage, paramètres thermiques, température, sols compactés

5. AccuTher : Un stockage géothermique piloté dans un sol reconstitué et structuré Le Borgne Tangi¹, Hamonet Vincent¹, Rolland Sébastien²

1 - DTP, 2 - Bouygues Energie et Services

Le concept AccuTherTM est né de la volonté d'utiliser des ouvrages de terrassement pour des fonctionnalités énergétiques. Utiliser les propriétés des matériaux constitutifs pour stocker de la chaleur s'est imposé comme présentant le meilleur potentiel, et les premières estimations thermiques ont montrées que le concept, à conditions égales, était technico-économiquement assez proche mais plus efficient qu'un champ de sondes sèches verticales qui constitue le dispositif de référence en stockage intersaisonnier. Imaginez alors un remblai, dans lequel vous avez disposez judicieusement un ensemble 3D de canalisations parcourues par un fluide caloporteur, permettant d'échanger avec le sol de la chaleur (ou du froid). Les performances et les dimensions de cet échangeur thermique sont fonctions des caractéristiques thermiques des matériaux et de la géométrie du champ de sondes. Un système de pilotage de l'ensemble du dispositif, établi au moyen de simulations thermiques numériques, permet de répondre aux besoins thermiques du client, en termes de taux de couverture, de fréquence de stockage/déstockage. Les études d'optimisation des performances et des dimensions d'un dispositif AccuTher passent par : - l'obtention à partir des matériaux disponibles sur site des caractéristiques thermiques (capacité, conductivité et diffusivité) adaptés pour obtenir une structuration du remblai, afin de disposer de zones conductrices, stockeuses, ou isolantes thermiquement. Pour cela on peut travailler sur les paramètres de mise en œuvre : densité, teneur en eau ou sur l'amélioration des matériaux par ajout d'adjuvant, tout en conservant des propriétés mécaniques satisfaisantes. - la réalisation d'une simulation numérique de l'échangeur, pour optimiser : - La longueur de chaque boucle de l'échangeur - L'écartement entre chaque tuyau, dans les 3 dimensions - Le diamètre des tuyaux, la vitesse de circulation du fluide - la structuration et le volume de l'ouvrage.

Mots clefs : géothermie, échangeur thermique, paramètres thermiques des matériaux, modélisation

6. Éléments de justification des écrans de soutènement énergétiques

Habert Julien¹, Burlon Sébastien²

1 - Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement,

2 - Sols, Roches et Ouvrages Géotechniques

Les géostructures énergétiques sont des ouvrages géotechniques assurant initialement une fonction mécanique (fondations profondes, écrans de soutènement, etc.), étant également utilisés comme échangeurs géothermiques. Pouvant satisfaire les besoins énergétiques des constructions en termes de chauffage et de climatisation, elles présentent un intérêt économique et environnemental certain. Néanmoins, les variations de température associées au fonctionnement de ces ouvrages induisent des chargements spécifiques susceptibles de conduire, en première approche, à i) des déplacements complémentaires, ii) des efforts structuraux additionnels et iii) une modification de la résistance géotechnique. Bien que non couverts par les normes de calcul actuelles, ces effets mécaniques doivent être évidemment pris en compte dans la justification des géostructures. Concernant les fondations profondes énergétiques, des approches fondées sur un calcul mécanique d'interaction sol-structure (en utilisant par exemple la méthode aux courbes de transfert $t-z$) permettent de rendre compte des différents résultats expérimentaux (essais de chargement en vraie grandeur, suivis d'ouvrage réels, etc.) et des modélisations numériques plus complexes. Les tassements et les efforts normaux additionnels, mais aussi l'évolution de la sécurité vis-à-vis de la portance, peuvent être ainsi correctement appréhendés. Pour les écrans de soutènement énergétiques, du fait de l'interaction entre les équilibres verticaux et horizontaux, mais également de leur association à des dispositifs d'appui (radier, butons, etc.), des problématiques complémentaires apparaissent. Il convient, en particulier, de s'intéresser à l'évolution des moments fléchissants, efforts tranchants et déplacements horizontaux, ainsi qu'à l'éventuelle modification de la sécurité vis-à-vis du défaut de butée qui est spécifique à ces ouvrages. Afin d'analyser en détail le comportement des écrans de soutènement énergétiques, une configuration type est étudiée, en proposant une méthode de modélisation numérique adaptée. Les résultats obtenus permettent de préciser les grandeurs les plus pertinentes dans le dimensionnement des écrans de soutènement énergétiques et de proposer une esquisse de règles de justification.

Mots clefs : écrans de soutènements, justification, géostructures énergétiques, géothermie

7. Retour d'expérience sur le confortement des coteaux sous-cavés de Touraine par les technologies de clouage et de boulonnage

Philippe Alexandre¹

1 - Syndicat Intercommunal Cavités 37

La Touraine présente une des densités de sous-cavage les plus importantes de France. Les développements souterrains ont été aussi bien creusés pour l'exploitation de la pierre de tuffeau que pour de l'habitation. Creusés dans les niveaux de craie sableuse de la fin du Crétacé, ils sont aujourd'hui dégradés à des niveaux divers et susceptibles de générer des effondrements ou éboulements. Dans un souci de prévention et de gestion de ces risques à l'échelle départementale, le Syndicat Intercommunal Cavités 37 a été créé en 1985. Sous son impulsion et celles des acteurs locaux publics et privés, un regain d'intérêt croissant pour l'habitat troglodytique et le patrimoine souterrain s'est propagé sur le département. Les cavités et fronts rocheux associés ont fait l'objet de nombreux travaux de consolidation et de protection. Le secteur d'activité s'est structuré autour d'un réseau régional d'entreprises et d'artisans intervenant tant pour le compte de maitrises d'ouvrages publiques que pour des particuliers. Les ouvrages exécutés reposent essentiellement sur les technologies de clouage et de boulonnage. Sur des sites déjà renforcés, il apparaît toutefois qu'en l'absence de dimensionnement préliminaire et de contrôle qualité, les risques d'effondrements ou d'éboulements ne sont pas réellement maîtrisés. Deux cas du département seront discutés. Le premier intéresse le toit d'une carrière souterraine effondré malgré un renforcement par clouage. Le deuxième site concerne un coteau éboulé ayant fait l'objet de travaux de stabilisation par clouage et de protection par grillage. Ces deux exemples de situation, parmi d'autres, montrent l'importance d'harmoniser à l'échelle locale les étapes clés de la conception et de l'exécution des ouvrages de renforcement. Cela est d'autant plus important que pour la maîtrise d'ouvrage novice, la présence de clous ou boulons sur le site est, pour elle, un gage de sécurité.

Mots clefs : conception, effondrement, éboulement, boulonnage, clouage, carrière, cavités, durabilité

8. Analyse systémique d'anomalies dans la craie liées au battement de la nappe - Métropole lilloise (59)

Pluquet Adrien¹, Vaillant Jean-Michel²

1 - FONDASOL, 2 - FONDASOL (Belgique)

La métropole lilloise, concernée essentiellement par un recouvrement de dépôts d'ères Tertiaire et Quaternaire, présente une bande Est-Ouest où la craie est affleurante. Celle-ci correspond à l'anticlinal du Mélantois au cœur duquel se trouve notamment les horizons du Crétacé, horizons qui ont été à l'origine de nombreuses exploitations (A. Pluquet et JM. Vaillant ; 2014) et qui sont le siège de la nappe phréatique. Au travers de nombreuses études effectuées par FONDASOL dans la région lilloise, nous avons observé des passages très lâches, décomprimés et mécaniquement très faibles à des profondeurs correspondant sensiblement au battement de la nappe phréatique et non à des exploitations de craie. Ces anomalies difficilement appréciables et observables tant qualitativement que quantitativement à l'échelle locale nous ont conduits à revoir notre analyse géotechnique tant en terme d'investigations (profondeur, essais, etc.) qu'en terme de conclusions (système de fondations, préconisations, etc.). Dans cette optique, nous avons procédé à une compilation des données obtenues sur plusieurs chantiers réalisés sur la métropole lilloise dans le but de réaliser une analyse systémique des anomalies rencontrées dans les horizons crayeux liés au battement de la nappe phréatique, ceci afin de se prémunir d'éventuelles contraintes et retards de chantiers de fondations profondes. Dans cet article, nous détaillerons les études ainsi menées par FONDASOL, pour : présenter le contexte géologique et hydrogéologique de la métropole lilloise, décrire les différentes méthodes d'investigation du socle crayeux, présenter une compilation de données obtenues sur chantiers et leur analyse, proposer des solutions méthodiques de suivi de chantier.

Mots clefs : fondations profondes, étude de cas, dissolution, craie, nappe phréatique, battement de nappe

9. Les fontis du val d'Orléans : étude des mécanismes de formation afin d'améliorer la prévision

Perrin Jérôme¹, Pasquier Sylvain^{1,2}, Gutierrez Alexis¹, Salquèbre Damien¹, Vanoudheusden Emilie¹, Joigneaux Emmanuelle³, Château Christophe³, Guirimand-Dufour Audrey², Jozja Nevila², Défarge Christian², Binet Stéphane²

1 - Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, 2 – CETRAHE, Université d'Orléans, 3 – DSA Technologies

L'apparition de fontis dans le Val d'Orléans est un phénomène récurrent qui peut avoir des conséquences économiques et sociétales significatives (impactant des secteurs habités et d'activités commerciales, des infrastructures telles que digues, routes, ponts, etc.). L'origine des fontis est liée à la présence de cavités karstiques dans les calcaires de Beauce situés sous une couverture peu épaisse d'alluvions déposées par la Loire. Deux mécanismes de formation sont envisagés : 1) le soutirage des matériaux de couverture vers les cavités karstiques entraînant la formation d'un vide au sein des alluvions qui va progressivement remonter jusqu'à atteindre la surface ; 2) la rupture du toit d'une cavité karstique suite à une évolution de la taille du vide et/ou des variations de pression hydrostatique et/ou une fragilisation du toit calcaire. Un site expérimental a été mis en place et instrumenté afin de chercher à préciser les mécanismes évolutifs menant à la rupture. Il comprend trois piézomètres (niveaux d'eau, turbidité) et des inclinomètres en surface. Les premiers résultats montrent des variations piézométriques pluri-métriques à l'échelle saisonnière et métrique à l'échelle d'une crue ; ces variations sont similaires dans la nappe des alluvions et la nappe karstique avec toutefois un léger déphasage en période de décrue pouvant favoriser le soutirage. La comparaison de la chimie des eaux de la Loire et de la nappe karstique en plusieurs points montre une dissolution très active du calcaire à proximité de la Loire (des pertes de Loire alimentant la nappe karstique). Ce phénomène doit contribuer à une évolution relativement rapide de la taille des cavités karstiques dans ce secteur du Val et donc potentiellement à la rupture du toit de ces cavités. Les résultats obtenus permettent de progresser sur les pistes de gestion de ce risque géologique (cartographie de l'aléa, méthodologie de surveillance).

Mots clefs : soutirage, capteurs, surveillance, val d'Orléans, karst, fontis, effondrement

10. Surveillance du risque d'instabilité dans les cavités superficielles par méthode acoustique

Bouffier Christian¹, Bennani Mustapha¹, Bigarré Pascal¹

1- Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques [Verneuil en Halatte]

La présence d'anciennes cavités minières peu profondes et potentiellement instables représente un réel danger pour les enjeux de sécurité publique au droit de ces zones d'aléa. Si un traitement définitif du risque par le comblement des vides est la solution à long terme, dans la plupart des situations, sa mise en œuvre généralement onéreuse requiert souvent des délais importants et incompressibles. Le déplacement des populations menacées ou la suppression des enjeux présentent les mêmes inconvénients. La surveillance s'impose alors comme solution d'attente ou solution pérenne, selon que le diagnostic envisage une cinétique rapide ou lente du phénomène. Les solutions « classiques » de surveillance (inspection visuelle, instrumentation géotechnique, microsismique, etc.) ne répondent que rarement de manière satisfaisante au besoin, et ce en raison des étendues souvent importantes à surveiller, de l'environnement contraignant des cavités peu profondes en zone urbaine, des complications liées à la présence humaine pour les cavités aménagées, etc. C'est dans ce contexte que la méthode de surveillance acoustique en cavité instable a été développée, testée et déployée avec succès dans différentes configurations. La surveillance acoustique repose sur une écoute passive et permanente des signaux de chute de blocs ou de rupture, fonctionnant sur le principe du seuil de déclenchement. Les situations inhabituelles ou critiques sont identifiées sur la base de critères dépendant du site (nature des terrains et environnement sonore) et de son état de dégradation. La mise en place d'un tel réseau passe par une phase préliminaire pour garantir l'efficacité et le meilleur rapport coût-bénéfice. Un protocole de dimensionnement et d'implantation du réseau a été développé en ce sens. Il repose notamment sur l'évaluation du bruit de fond, la caractérisation du plus petit événement à détecter et des paramètres locaux de propagation et d'atténuation acoustiques. Cette méthode est aujourd'hui utilisée en routine.

Mots clefs : risques, cavités instables, acoustique, surveillance

11. Un nouvel outil de prévention des risques du sous-sol en Wallonie (Belgique) - Application au cas des anciennes carrières souterraines de la Malogne (Mons) **Kheffi Ali¹ , Pacyna Daniel²**

1 - Institut Scientifique de Service Public (Belgique), 2 - Service Public de Wallonie - Direction générale opérationnelle Agriculture, Ressources naturelles et Environnement - Service géologique de Wallonie (Belgique)

Partie méridionale de la Belgique, la Wallonie a hérité d'une géologie très complexe, qui lui confère nombre de ressources économiquement importantes (charbon, métaux, calcaires, craies, marnes, phosphates, etc.), intensivement exploitées de nos jours, mais surtout dans le passé. Aujourd'hui, s'y retrouvent de nombreux objets souterrains, géologiques (karsts, carrières souterraines, marnières) et miniers (puits, galeries, etc.), pouvant engendrer une menace pour la sécurité des personnes et des biens. S'y ajoute un sous-sol carbonaté intensément karstifié, présent sur un tiers du territoire. Confrontée à une densité d'occupation du sol toujours plus importante, l'administration wallonne y mène une politique de prévention des risques principalement basée sur la réduction de l'exposition à la menace connue et sur la capitalisation des données relatives aux objets souterrains et à leur contexte géologique, pédologique et géotechnique. Afin de généraliser et simplifier la gestion administrative de ces risques, l'ISSEP et le Service géologique de Wallonie ont développé ensemble une méthodologie d'évaluation et de cartographie des zones d'aléas de mouvements de terrain engendrées par les objets souterrains. Largement inspirée de la méthodologie française, elle vise la production d'un zonage à l'échelle du territoire wallon et a recours à une proto-cartographie des formations superficielles, complétant la nouvelle carte géologique de Wallonie. Cette méthodologie est illustrée par l'effondrement généralisé survenu en avril 2015 à l'aplomb des anciennes carrières souterraines de la Malogne (Mons). Ce site constituait l'une des zones-tests choisies pour valider la méthodologie, et une cartographie des zones d'aléas y avait été élaborée 6 mois avant l'accident, pointant notamment la zone effondrée en aléa très fort. Ce cas d'étude démontre comment les cartographies d'aléas constituent un outil d'aide à la gestion intelligente de l'aménagement du territoire wallon, basée notamment sur la considération des menaces potentielles du sous-sol et de l'adéquation de leurs effets redoutés envers les actuels et futurs enjeux.

Mots clefs : effondrement, gestion, aménagement du territoire, cartographie, risques, prévention, aléas, Wallonie, objets souterrains

12. Surveillance du risque d'effondrement localisé dans une exploitation de sel par dissolution

Coccia Stella¹, Kinscher Jannes¹, Limam Sami¹, Bigarré Pascal¹

1- INERIS

L'exploitation de gisements de sel peut induire des mouvements de terrains qui ne se limitent pas aux seuls affaissements en grand. C'est le cas d'une exploitation de sel en Toscane (Italie) : par forages profonds et, par injection contrôlée d'air et d'eau douce, afin d'extraire la saumure. L'implantation de SOLVAY en Italie remonte au début du XX^{ème} siècle. Actuellement, SOLVAY exploite la concession de « Buriano » (démarrée vers 1930) et, depuis plus récemment, la concession dite « Saline ». Depuis son début, l'exploitation de la concession de Buriano a connu environ 160 effondrements localisés, avec des diamètres d'ouverture variant de quelques mètres jusqu'à des cratères supérieurs à 50 m. Ces phénomènes récurrents, induits par les cavités de dissolution et la géologie complexe du gisement, peuvent aussi s'accompagner de glissements de terrain, notamment en présence de failles dans une géomorphologie très vallonnée. Ils soulèvent un risque lié à la sécurité du personnel intervenant régulièrement sur les concessions, ainsi qu'un risque d'impact environnemental lié aux sorties de saumure en surface, même si une grande partie de ces sorties est récupérée via des rigoles conduisant à un bassin de récupération des eaux de surface. Pour anticiper et bien gérer ces risques, l'exploitant a mis en place, dès les années 80, un dispositif de surveillance microsismique en quasi temps réel. Le dispositif a pour objectif de détecter et de localiser les zones en évolution vers la rupture en surface, à l'aide d'indicateurs basés sur la quantification de cette activité. Les auteurs se proposent de présenter le contexte général de l'exploitation minière, le déploiement, le fonctionnement et l'usage opérationnel de ce dispositif. Des cas d'effondrements récents anticipés, grâce à la surveillance microsismique et à un travail collaboratif étroit avec l'exploitant, seront décrits. Le caractère « exclusif » de la méthode de surveillance sera détaillé et discuté dans l'article.

Mots clefs : télésurveillance microsismique, effondrements, gestion du risque

13. Modélisation de la microsismicité induite lors des processus de soft stimulation en géothermie EGS

Guillon Théophile¹, Blaisonneau Arnold¹, Rachez Xavier¹, Gentier Sylvie¹

1 - BRGM

L'usage de la géothermie pour la production d'électricité nécessite de faire circuler un fluide dans un sous-sol à haute température. Dans la grande majorité des cas, les sites présentant des températures satisfaisantes sont également faiblement perméables, et des opérations de stimulations sont requises pour obtenir une injectivité et/ou une productivité suffisantes dans les puits opérationnels (Enhanced Geothermal Systems, EGS). Les processus de stimulation visent à augmenter de manière irréversible la transmissivité des structures hydrauliques préexistantes dans les réservoirs géothermiques, les zones de faille. En particulier, les méthodes de soft stimulation consistent à surélever la pression dans un puits d'exploitation, surpression qui sera transmise aux zones de faille recoupées par le puits. Sous l'effet de la surpression, la contrainte normale agissant sur les zones de faille diminue, et avec elle leur résistance au cisaillement dû à l'état de contrainte in situ. Lors du cisaillement, l'énergie mécanique accumulée est en partie libérée sous forme de microséismes qu'il convient de contrôler pour réduire les risques potentiels de magnitudes dépassant les critères d'acceptabilité. Dans l'objectif de pouvoir prédire la microsismicité induite par les opérations de soft stimulation, nous proposons un modèle couplé hydromécanique intégrant l'évaluation des phénomènes microsismiques. Le modèle ? basé sur la méthode des éléments distincts (3DEC?) ? permet de prendre en compte explicitement la présence des zones de faille sous la forme de joints actifs hydromécaniquement. En analysant la répartition des cisaillements sur ces joints, il est possible d'estimer des événements microsismiques induits, événements qui dépendent fortement de la loi de comportement considérée pour les zones de faille.

Mots clefs : EGS, couplage hydromécanique, éléments distincts, microsismicité induite

14. Première approche d'une stratégie opérationnelle combinant architecture de puits et stimulation hydraulique pour le développement des EGS

Blaisonneau Arnold¹, Gentier Sylvie, Guillon Théophile, Peter-Borie Mariane

¹ - BRGM

L'exploitation de type EGS (Enhanced/Engineered Geothermal System) des systèmes géothermiques est un enjeu majeur pour le développement à court et moyen terme de la géothermie profonde, notamment sur le territoire métropolitain. Afin de limiter les risques liés à l'incertitude sur la perméabilité et les ressources disponibles et dans le but d'optimiser techniquement et économiquement l'exploitation de ces ressources, différentes solutions sont envisagées à ce jour en fonction du contexte géologique : la réalisation de forages déviés voire horizontaux pour l'exploitation des fonds de bassins sédimentaires et le recours à des méthodes de stimulations, hydrauliques et/ou chimiques, pour les réservoirs de socle. Le travail présenté ici vise à proposer une approche pour aider à ébaucher une stratégie opérationnelle coordonnant architecture de puits (orientation, position, etc.) et stimulation hydraulique du réservoir en fonction des différents contextes géologiques et hydrauliques rencontrés tout en s'assurant d'un minimum de risque mécanique (stabilité des forages) au niveau de la foration des puits. Pour cela une approche de modélisation 3D de la stimulation hydraulique du réservoir faillé/fracturé est mise en œuvre, permettant de tester différentes trajectoires de puits. Les modèles numériques reposent sur la construction de modèles conceptuels à partir des connaissances géologiques et des données de site issues de la bibliographie. Pour chaque modèle, à partir des résultats des différentes simulations, la trajectoire de puits permettant de maximiser les ouvertures hydrauliques irréversibles induites par la stimulation hydraulique est identifiée. Pour cette trajectoire optimale, une pré-étude de la stabilité mécanique du puits lors de sa foration est réalisée, avec une approche particulière, afin de s'assurer qu'elle ne présente pas de risque d'instabilité mécanique majeure en fonction des faciès des roches et de l'état des contraintes in situ. Une application à un réservoir de socle dans un contexte tectonique de fossé d'effondrement sera présentée.

Mots clefs : puits, réservoirs profonds fracturés, EGS, stimulation hydraulique

15. Étude expérimentale de la tenue de puits d'injection dans le cadre du stockage géologique de CO₂

Randi Aurélien¹, Sterpenich Jérôme¹, Morlot Christophe¹, Pironon Jacques¹, Caumon Marie-Camille¹, Jobard Emmanuel¹

1 - Laboratoire GeoRessources (Université de Lorraine/CNRS/CREGU)

Le stockage de CO₂ en réservoirs géologiques peut contribuer de façon importante à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il est généralement envisagé de stocker le CO₂ sous sa forme supercritique dans des réservoirs déplétés d'hydrocarbures ou dans des aquifères salins. Une autre possibilité consiste à dissoudre le CO₂ dans une saumure extraite d'un aquifère profond puis à réinjecter cette saumure saturée en CO₂ dissous après en avoir récupéré les calories, couplant ainsi géothermie et stockage de CO₂. Quelle que soit la forme du CO₂ stocké, la dissolution de ce gaz induit la formation d'acide carbonique qui peut interagir avec la roche réservoir et la couverture mais aussi avec les matériaux de puits, ciments et cuvelage, qu'il s'agisse des puits d'injection ou d'anciens puits d'exploitation. Les réactions qui vont se produire peuvent engendrer des dissolutions et des précipitations de minéraux susceptibles d'induire la fracturation des matériaux et des différentes interfaces. Il peut ainsi en résulter une faiblesse du puits d'injection qui pourra à terme créer un drain permettant la fuite vers l'atmosphère du CO₂ stocké. Ce papier présente une approche expérimentale innovante à partir de deux bancs d'essai MIRAGES et MIRAGES2 qui reproduisent un puits d'injection à une échelle 1/20^{ème}. Ces dispositifs originaux permettent d'injecter du CO₂ supercritique ou une solutions saline saturée en CO₂ à des pressions pouvant atteindre 200 bar et 200°C. La combinaison de différentes techniques d'observation et analytiques (spectrométrie Raman, tomographie X, ICP, MEB, etc.) permet de suivre l'évolution des différentes interfaces entre roches et matériaux de puits. Les résultats sont interprétés en termes de tenue et de longévité des puits d'injection face à l'action du CO₂ à haute pression et haute température. Projets ANR GEOCARBONE-INJECTIVITE et CO2-DISSOLVED

Mots clefs : haute pression, expérimentation, CO₂, stockage

16. Suivi géologique du creusement des galeries du CMHM : de l'observation à la modélisation 3D

Arnould Apolline¹, Baudouy Lucie, Toussaint Antoine¹, Dottesi Anthony², Righini-Waz Céline

1 - GEOTER, Fugro-Group, 2 - FUGRO GEOID SAS

Dans le cadre de l'étude de faisabilité d'un stockage géologique profond sur le site du laboratoire souterrain du Centre de Meuse/Haute-Marne (CMHM) de l'Andra (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs), GEOTER effectue le suivi géologique des galeries et des forages. Pour le suivi géologique des galeries, il a été développé une méthode innovante de levé géologique Très Haute Résolution (THR) à l'aide d'un scanner laser 3D. La synthèse des observations sur forages et en galeries a permis de contraindre le modèle de fracturation induite par l'excavation des galeries, creusées de parallèlement à la direction de la contrainte principale orientée N155°E et d'obtenir une modélisation tridimensionnelle. Depuis le début du creusement des galeries et des forages au niveau du Laboratoire, aucune structure d'origine tectonique n'a été observée. L'ensemble des fractures formées est lié aux travaux souterrains et au phénomène de déconfinement qui accompagne le creusement d'une galerie ou d'un forage. Le terme « fracture » utilisé dans ce rapport désigne donc exclusivement des fractures induites par le creusement des galeries ou des forages. Ce document présente la méthodologie de levé géologique par scanner laser 3D, puis les observations structurales sur forages et l'analyse correspondante afin de les synthétiser en un modèle 3D cohérent pour les galeries orientées N155°E.

Mots clefs : galeries, excavation, forages, scanner laser 3D, géologie, modélisation, argilites, fracturation

[illegible]

17. Relations entre la microstructure et les propriétés de rétention d'eau de l'argilite du Callovo-Oxfordien

Menaceur Hamza^{1,2}, Delage Pierre², Tang Anh-Minh², Talandier Jean³

1 - Lemta, 2 - Navier/Cermes, 3 - Andra

L'effet des variations de succion sur la microstructure de l'argilite du Callovo-Oxfordien le long de chemins de séchage et de remouillage a été étudié à l'aide d'essais de porosimétrie au mercure sur des éprouvettes soumises à différentes succions. En se basant sur le modèle de briques, les changements de l'épaisseur moyenne des plaquettes d'argile (interstratifiés illite-smectite) qui constituent la matrice argileuse (50 % de l'ensemble) sont interprétés comme la conséquence de l'adsorption successive des couches de molécules d'eau le long des surfaces des smectites, comme démontré depuis un certain temps dans les smectites pures. Cette interprétation montre le rôle prépondérant joué par la fraction de smectite dans le comportement de l'argilite du Callovo-Oxfordien lorsqu'elle est soumise à des changements de succion à conditions libres.

Mots clefs : porosimétrie au mercure, propriétés de rétention d'eau, microstructure, argillite, succion

[illegible]

18. Stockages souterrains et REX miniers, méthodologie pour l'application des notions de taux de défruitement

You Thierry¹, Laurent Sophie¹

1 - Geostock

Les stockages souterrains d'hydrocarbures sont soumis en France depuis 2001 au règlement minier. A ce titre les exploitants doivent naturellement justifier de l'exclusion de certains risques dont font partie les effondrements. Certaines règles méthodologiques simplifiées, énoncées par le législateur et résultant des retours d'expériences miniers internationaux, peuvent être utilisées pour justifier de l'exclusion de risques liés au souterrain dans les études de danger. Le principe retenu dans les guides est par exemple pour l'effondrement généralisé que « le phénomène pourra être écarté lorsque le taux de défruitement est inférieur à 50 % ». Le texte proposé commentera donc l'utilisation des notions de taux de défruitement aux stockages souterrains parfois conçus en chambres et piliers mais le plus souvent constitués d'une ou deux galeries parallèles. Une galerie unique doit-elle être alors considérée comme correspondant à un défruitement de 100 % ? Comment les bordures extérieures du stockage, protégées réglementairement de toutes nouvelles excavations, participent-elles ? Y a-t-il une notion de pilier représentatif sur un stockage classique en cavité minées ? Des cavités conçues pour durer avec les méthodologies les plus récentes doivent-elles être soumises aux difficiles retours d'expériences de l'après mine ? Le législateur avait anticipé la problématique de règles trop simples (purement géométriques) ou trop rapidement énoncées « l'exploitant pourra également proposer une démonstration étayée du caractère irréaliste d'un effondrement généralisé ... » Après une présentation de ces règles et des méthodologies récentes de conception des stockages souterrains d'hydrocarbure, nous présenterons l'analyse mono- bi- et tri-dimensionnelle qui a été faite aux éléments finis sur un cas réel de stockage, pour comparer le chargement réaliste des zones non excavées avec l'utilisation de l'approche classique des aires tributaire base de la recommandation de l'administration.

Mots clefs : stockage, pilier, roche, souterrain, méthodologie

19. Projet RUFEX - Détermination des propriétés mécaniques des matériaux traités par la technique du deep soil mixing

Le Kouby Alain¹, Guimond-Barrett Antoine², Szymkiewicz Fabien¹, Reiffsteck Philippe¹
1 - IFSTTAR, 2 – SNCF

La tâche 3 du projet RUFEX (Renforcement et Réutilisation des plateformes Ferroviaires et des Fondations Existantes) s'est intéressée plus particulièrement à la caractérisation mécanique du matériau en place mélangé à un liant de type ciment. En effet, le matériau obtenu diffère d'un béton et présente des dosages en liant (ciment) très supérieurs à ceux habituellement utilisés pour le traitement des sols en masse. Néanmoins, les moyens mis en œuvre pour la réalisation des massifs sont assez proches. Les caractéristiques mécaniques et hydrauliques des échantillons élaborés dans le cadre des études de formulation peuvent être obtenues par des essais normalisés applicables aux matériaux traités par liants hydraulique. La résistance à la compression simple est déterminée conformément à la norme EN 13286-41 (AFNOR 2003). En ce qui concerne les modules de déformation obtenus à partir d'essais de compression simple menés à la rupture, le dispositif expérimental requis est décrit dans la norme EN 13286-43 (2003). Les déformations longitudinales des éprouvettes sont mesurées localement dans la partie centrale à l'aide de capteurs ou jauges de déformation et au niveau global. Le module local est le plus représentatif de la réponse du matériau. Le module utilisé pour le dimensionnement d'ouvrages en soil mixing est le module sécant E50 calculé à l'aide de la méthode proposée dans EUROSILSTAB (1997). Dans cette communication, on s'intéresse aux méthodes de détermination des modules E50 issus des essais à la rupture (R_c , R_t) et également aux corrélations qui existent entre les modules et les résistances à la compression (R_c) et à la traction (R_t). Cette communication présentera également les corrélations obtenues entre les paramètres issus de méthodes non destructives (mesures des vitesses d'onde de compression V_p) et les méthodes destructives (R_c , E50).

Mots clefs : vitesse d'onde de compression (V_p), module E50 global et local, propriétés mécaniques, deep soil mixing

20. Renforcement des digues de Loire par la technique du deep soil mixing ; deux méthodes proposées - suivi sur deux ans

Le Kouby Alain¹, Saussaye Lucile², Fargier Yannick², Boussafir Yasmina¹, Durand Edouard², Chevalier Christophe¹, Ananfouet Yannick², Patouillard Sébastien³, Manceau Nathalie³, Gervais Loïc³, Auger Nicolas²

1 - IFSTTAR, 2 - CEREMA - Direction Territoriale Normandie-Centre, 3 - DREAL Centre Val de Loire

Les écrans étanches sont l'une des techniques mises en œuvre sur les digues de Loire afin de parer au risque d'érosion interne. Réalisés depuis la crête jusqu'à une profondeur suffisante pour renforcer l'intégralité du corps de digue, ils n'ont pas pour objectif de modifier la résistance structurelle de l'ouvrage mais d'assurer l'étanchéité de la levée vis-à-vis de cette problématique. Le présent article s'intéresse aux écrans étanches mis en œuvre par la méthode du TRENCHMIX®. Le principe de cette technique, s'appuyant sur l'utilisation d'une trancheuse malaxeuse, consiste en la réalisation d'un voile étanche par mélange du sol en place avec un liant hydraulique et de l'eau sur toute la hauteur de l'ouvrage. Le liant hydraulique peut être introduit sous forme pulvérulente dans une prétranchée de 1 m de profondeur préalablement creusée, l'adjonction d'eau se faisant lors du malaxage (méthode sèche). L'hydratation du liant est réalisée par l'action combinée de l'adjonction d'eau et de l'eau contenue dans le sol. Le liant hydraulique peut aussi être introduit par l'intermédiaire d'un coulis avec le sol en place (méthode humide). Le papier proposé présente deux plots d'essais réalisés afin de pouvoir comparer ces deux méthodes. Un suivi a été réalisé pendant la réalisation des écrans, durant trois mois après la réalisation, puis à 1 et 2 ans. Il s'organise autour de sondages carottés et de sondages destructifs avec enregistrement de paramètres sur toute la hauteur du panneau de sol mixé. Des essais de conductivité hydraulique en laboratoire et in situ sont effectués pour voir si les objectifs fixés sont atteints. Des essais mécaniques sont aussi réalisés afin de vérifier l'homogénéité du matériau. Les résultats montrent des différences entre les deux méthodes en termes d'homogénéité du matériau, de propriétés hydrauliques et mécaniques. Des différences apparaissent également entre les mesures effectuées en laboratoire et sur site.

Mots clefs : méthode humide, méthode sèche, deep soil mixing, digue, suivi d'ouvrage

21. Étude sur modèle physique du frottement sol-inclusion en soil-mix sous chargement monotone et cyclique

Le Van Cuong¹, Dupla Jean-Claude¹, Canou Jean¹, Cui Yu-Jun¹, Tang Anh Minh¹, Delmi Hocine¹

1 - Université Paris-Est, Ecole des Ponts ParisTech, laboratoire Navier

On présente dans cette communication les résultats d'essais du type modélisation physique réalisés sur un tronçon modèle instrumenté dans un massif de limon reconstitué (sol modèle). L'objectif principal a été d'évaluer le frottement latéral unitaire le long de ce tronçon de « soil-mix », sous chargements monotones et cycliques. On s'est intéressé à l'évolution du frottement latéral sous chargement cyclique à déplacement contrôlé à grand nombre de cycles. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet RUFEX (Renforcement et réUtilisation des plates-formes ferroviaires et des Fondations EXistantes), dont l'objectif était de développer la technique de soil mixing à la fois pour le renforcement de plates-formes ferroviaire, mais également pour la réutilisation et le renforcement de fondations existantes. Après une présentation du modèle physique, et plus particulièrement son élément principal à savoir le tronçon de colonne en soil-mix, on détaille le protocole expérimental mis en œuvre. Dans la suite, on décrit un essai typique de chargement réalisé à déplacement contrôlé, pour une amplitude cyclique donnée, sur le tronçon instrumenté sur le massif reconstitué. Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence une première phase de dégradation du frottement local suivie d'une phase de renforcement de ce frottement. Des essais de chargement statique jusqu'à rupture, réalisés après la séquence cyclique, ont permis de quantifier l'influence des cycles sur le frottement statique mobilisable après les cycles par rapport au frottement statique initial mesuré lors d'essais de chargement statiques. Ces évolutions du frottement mobilisable sous chargement cyclique sont interprétées en termes de redistribution des contraintes autour de l'inclusion qui se développent lors de la séquence cyclique. On présente finalement l'influence de l'amplitude du déplacement cyclique sur les résultats observés.

Mots clefs : frottement local, chargement cyclique, soil-mix, inclusion, modélisation physique, dégradation

22. Recommandations pour l'étude de la formulation du matériau Deep Mixing **Guimond-Barrett Antoine¹, Szymkiewicz Fabien², Le Kouby Alain², Reiffsteck Philippe², Mosser Jean-François³, Matthieu Fabrice³**

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

Le Deep Mixing est une technique permettant d'améliorer les caractéristiques mécaniques ou hydrauliques d'un sol en le malaxant in situ avec un liant hydraulique : elle est applicable de manière courante pour une large gamme de sols, allant des sables et graviers denses jusqu'aux argiles molles et ce quel que soit leur degré de saturation. Le traitement d'autres types de sols tels que les sols très fortement perméables, les sols organiques, les tourbes et les sols pollués est envisageable, mais doit faire l'objet d'études spécifiques détaillées. Les applications de cette technique sont multiples :

- amélioration des caractéristiques mécaniques du sol, par la construction de colonnes ou de panneaux permettant d'assurer des fonctions de soutènement, de reprise de charges verticales, de reprise d'efforts de cisaillement ou encore de limitation de tassements ;

amélioration des caractéristiques hydrauliques des sols ou des ouvrages géotechniques par exemple par écrans de faible perméabilité ;

- traitement in situ des zones contaminées ou polluées : soit en réduisant fortement la mobilité des polluants en emprisonnant le sol pollué dans une enceinte de très faible perméabilité ; soit en emprisonnant le terrain pollué dans une matrice cimentaire (inertage ou traitement en masse). Pour évaluer la faisabilité du traitement, il est nécessaire de procéder à des essais préliminaires en laboratoire. Cette communication donne des recommandations pour la réalisation de ces études de formulation des mélanges, en complétant les recommandations de la norme NF°EN°14 679. Son objectif n'est pas d'interpréter les réglementations et recommandations existantes, mais plutôt de préciser certains points particuliers concernant l'estimation et la vérification du niveau de performance d'un sol traité. Ces recommandations ont été établies dans le cadre du projet de recherche RUFEX, concernant la réalisation de colonnes de sol traité avec un coulis, mais sont également transposables à une gamme plus large de procédés (panneaux, tranchées, groupes de colonnes, etc.).

Mots clefs : performance, mécanique, deep mixing, soil, formulation

23. Argile des Flandres : Influence du mode d'installation sur la réponse des pieux

Le Kouby Alain¹, Rocher-Lacoste Frédéric²

1 – IFSTTAR, 2 - DRIEA IF/DiRIF/SIMEER/DIO

Durant les vingt dernières années, les argiles surconsolidées des Flandres dans le nord de la France ont été le lieu de plusieurs campagnes d'essai de chargement de pieux. On peut notamment citer les campagnes d'essais effectuées dans le cadre des projets de recherche tels que l'étude des fondations mixtes ainsi que les projets nationaux Vibrofonçage et SOLCYP (SOLlicitations Cycliques sur les Pieux). Différents mode d'installation de pieux ont été testés : les pieux refoulants tels que les pieux aciers battus ouverts et fermés, béton préfabriqués battus, acier vibrofoncés, vissés ainsi que les pieux non refoulant (forés). Des essais de compression et de traction ont été réalisés. L'influence du mode d'installation sur la réponse d'un pieu se traduit sur les mesures de frottement latéral et de résistance en pointe. Nous nous appuyons sur des essais de chargement avec une instrumentation de type extensomètre amovible de l'IFSTTAR. Ces essais nous permettent de représenter la distribution des efforts le long du pieu et de mettre en évidence les différences en termes de frottement latéral et de résistance en pointe pour une géologie donnée. Dans le cas des pieux battus, l'influence du diamètre ainsi que l'effet de bouchon (pieu ouvert et fermé) sont étudiés. Les résultats des mesures globales et locales sont comparés avec les estimations à partir de l'EUROCODE 7 (NF-P-94-262) et l'API.

Mots clefs : capacité portante, mode d'installation, pieu, argile des Flandres

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and extend across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

24. Effect of fine particles on the hydraulic behavior of interlayer soil

Duong Trong Vinh¹, Cui Yu-Jun¹, Tang Anh Minh¹, Dupla Jean-Claude¹, Calon Nicolas²

1 - Navier, 2 - SNCF

The conventional railway substructure in France was built by emplacing ballast directly on sub-grade. Over years of operation, the inter-penetration of ballast and sub-grade created a soil layer between them. Under different conditions, this naturally formed layer, namely interlayer, can contain different quantities of fine particles, becoming more or less sensitive to changes in water content. As the water content changes are governed by the hydraulic behavior of interlayer soil, assessing the influence of fine particles content on the hydraulic behavior of interlayer soil is of importance. To this end, the hydraulic behavior of an interlayer soil taken from Sénissiat (near Lyon, France) was investigated using two infiltration columns, a large-scale column equipped with tensiometers and TDR for suction and volumetric water content measurements, respectively, and a smaller column equipped with high capacity tensiometers only. Different fines contents were considered and wetting-drying cycles were applied to the soil specimens. The hydraulic conductivity was determined by applying the instantaneous profile method. The results obtained showed that i) hysteresis exists for both the soil water retention curve and the hydraulic conductivity changes with suction; ii) the effect of wetting-drying cycles is insignificant; iii) adding 10 % fine particles to the natural interlayer soil gives rise to changes in soil water retention curve but does not induce significant changes in hydraulic conductivity; iv) the unsaturated hydraulic conductivity of interlayer soil with 10 % fine particles added is close to that of soil sieved at 2 mm, suggesting that the unsaturated hydraulic conductivity of interlayer soil is mainly governed by fine particles through suction effect. By contrast, in saturated state, the value for the interlayer soil with 10 % fine particles added was found higher, suggesting that in this case the hydraulic conductivity is mainly governed by the water transfer through macro-pores.

Mots clefs : instantaneous profiles method, fines content, interlayer soil, railway substructure, hydraulic conductivity

25. Étude de l'influence du degré de saturation sur le comportement des sols à la liquéfaction

Vernay Mathilde¹, Breul Pierre^{2,1}, Morvan Mathilde¹

1 - Institut Pascal, 2 - Polytech Clermont-Ferrand, Université Blaise Pascal

La liquéfaction des sols non saturés est un sujet d'étude relativement récent. En effet, traditionnellement, on considère que si le sol n'est pas totalement saturé, il n'y a pas de risques de liquéfaction. Or plusieurs auteurs (Unno, 2008 ; Sherif et al., 1977) ont mis en évidence que bien que les caractéristiques mécaniques des sols soient améliorées par la diminution du degré de saturation, les sols non saturés peuvent eux aussi liquéfier. Néanmoins, le comportement des sols non saturés, notamment lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations cycliques ou dynamiques n'est pas parfaitement connu, et on ne sait pas encore totalement gérer ces risques. L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement d'un sol non saturé sous sollicitation cyclique, et de déterminer dans quelle mesure le degré de saturation, et notamment la succion influencent le comportement du matériau. L'objectif final est de comprendre les mécanismes qui interviennent, déterminer les liens entre paramètres physiques et mécaniques, et définir des seuils critiques en termes de degré de saturation pour lesquels le risque de liquéfaction existe. Pour cela, des essais triaxiaux monotones et cycliques ont été réalisés sur des échantillons de sable de Fontainebleau à différents niveaux de saturation, par la technique de translation d'axes. Des essais de cisaillement direct, en conditions saturées et non saturées ont également été réalisés. La courbe de rétention du sable de Fontainebleau a été établie par la méthode du papier filtre. Les résultats montrent que si la diminution du degré de saturation permet de retarder la liquéfaction, et d'augmenter la résistance et la rigidité du matériau, les sols non saturés peuvent eux aussi liquéfier. Ils permettront également l'établissement d'un seuil de degré de saturation, afin de pouvoir mieux gérer les risques de liquéfaction en milieu non saturé.

Mots clefs : essai triaxial, degré de saturation, sols non saturés, liquéfaction

26. Microsismicité en contexte minier - Le Bassin houiller de Gardanne (Bouches-du-Rhône, Provence)

Dominique Pascal¹, Nedellec Jean-Louis¹

¹ - Bureau de recherches géologiques et minières

En novembre 2012, la population des quartiers ouest de Fuveau et nord de Gréasque (Bouches-du-Rhône) a fortement ressenti des vibrations pendant plusieurs jours. Cette soudaine activité a conduit l'État à renforcer le dispositif de surveillance microsismique de l'est du Bassin houiller de Provence en complétant celui qui a été mis en place en 2008 pour alerter des risques éventuels d'affaissement minier. Dès avril 2013, le BRGM/DPSM a déployé cinq stations microsismiques de surface dans la zone de l'événement. Ce dispositif provisoire, complémentaire du réseau permanent en place, avait pour objet de mieux comprendre l'activité microsismique dans ce secteur, et d'aider à l'interprétation des résultats enregistrés par les stations permanentes. L'analyse de la microsismicité sur la période allant de juin 2013 à octobre 2015 comprenant la petite crise sismique de décembre 2014, fortement ressentie par la population, permet de dénombrer plus de 600 événements de faible magnitude. L'apport du réseau temporaire du BRGM/DPSM permet de parfaitement cerner l'activité de ce secteur ouest de Fuveau aussi bien en termes de détection, de localisation hypocentrale et de quantification (magnitude). Un bruit de fond sismique apparaît seulement en présence de la nappe minière. Il semble migrer de quelques centaines de mètres au gré de l'avancée ou du retrait de cette nappe dans les travaux miniers. Enfin, la profondeur des événements de la crise spatialement très délimitée de décembre 2014 s'établit entre 400 m et 800 m. Cette zone active est quasi systématiquement localisée sous les travaux miniers dont la profondeur sur ce secteur est de l'ordre de 300 m. Le déclenchement de ces crises sismiques (2012, 2014) s'est produit après un délai de l'ordre d'une dizaine de jours après un pic de pluie efficace. Ce délai pourrait permettre de mieux anticiper les périodes d'activité à venir potentiellement ressenties par les populations riveraines.

Mots clefs : sismicité, mines, contexte minier, Gardanne, Provence, microsismicité, Fuveau, Gréasque

27. Rétroaction sur le dimensionnement des fondations et des efforts sismiques appliqués aux bâtiments à risque normal après densification des sols

Brulé Stéphane¹, Duquesnoy Sébastien¹

1 - Ménard

Les techniques de densification des sols telles que le compactage dynamique ou le vibrocompactage peuvent conduire à une modification significative des propriétés mécaniques initiales des sols. Cette amélioration est qualifiée en terme d'atteinte ou de dépassement de critères définis au préalable (valeurs de résistance de pointe q_c , pression limite nette p_l^* , vitesse des ondes de cisaillement V_s , etc.). Pour des raisons de délais de construction, ces nouveaux paramètres de sol ne sont pas facilement réintroduits comme données de rétroaction sur le dimensionnement des fondations et du bâtiment lui-même en situation sismique. Dans cet article, nous montrons les conditions nécessaires à un changement de classe de sol de l'Eurocode 8 et du NEHRP suite à densification des sols, puis nous quantifions cette modification sous forme d'évolution des efforts sismiques globaux pour le cas d'un bâtiment à risque normal de cinq niveaux.

Mots clefs : NEHRP, Eurocode 8, densification des sols, analyse modale

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue or grey ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are approximately 20 lines visible. The paper has a slight shadow on the right side, suggesting it's resting on a surface.

28. Suivi de l'érosion par imagerie satellite et fouille de données spatio-temporelles **Pothier Catherine¹, Andreoli Remi², Meger Nicolas³, Rigotti Christophe⁴**

1 - Université de Lyon, INSA de Lyon, 2 - Bluecham S.A., 3 - Laboratoire d'Informatique, Systèmes, Traitement de l'Information et de la Connaissance, 4 - Laboratoire d'Informatique en Image et Systèmes d'information

Les séries temporelles d'images acquises avec des méthodes de télédétection basées sur les images satellites présentent un fort potentiel pour la compréhension et le suivi de la dynamique de surface de la Terre. Notamment en ce qui concerne le suivi et la compréhension de l'érosion des sols, ainsi que sa prévention. Les méthodes d'analyse de séries temporelles de données de télédétection visent à effectuer des simplifications spatiales et/ou temporelles sur le signal brut pour ne représenter qu'une partie de l'information mais sous forme interprétable (cartes ou courbes). Une approche provenant des techniques dites par « extraction de connaissances » basée sur les pixels a été employée dans cette étude pour aider à la compréhension cinématique de l'érosion du site. Ces évolutions pixelaires sont nommées des motifs séquentiels fréquents groupés. Les résultats sont présentés sous forme de cartes de localisation spatio-temporelle de chaque motif. Cette méthode a été appliquée sur une série de 16 images Landsat 7 de résolution 513 par 513 pixels avec une résolution à 30 m prises entre 2000 et 2011 dans une zone au sud-est de la Nouvelle Calédonie caractérisée par un site minier d'extraction et de transformation de classe mondiale. Les motifs extraits ont permis de mettre en évidence les zones d'érosions dues à l'exploitation de la mine, les évolutions temporelles des dolines et du maquis minier dans le but de surveiller et prévoir le risque érosif. Les interprétations des motifs ont été effectuées à l'aide de Qëhnelö™, hub géospatial permettant de croiser des informations de sources distribuées avec des données ou informations à valeur ajoutée issues des satellites d'observation de la Terre. Le hub Qëhnelö permet au travers de modules et d'applications clé en main, de mettre à disposition des décideurs municipaux de nouvelles informations issues des acquisitions satellitaires et des analyses des experts du domaine.

Mots clefs : érosion, prévention, risque naturel, télédétection, fouille de données

29. Aléa rocheux diffus : du qualitatif au quantitatif

Hantz Didier¹, Rossetti Jean-Pierre^{2,1}, Ventroux Quentin¹, Berger Frédéric³

1 - ISTerre, 2 - Alp'Georisques, 3 - Erosion torrentielle neige et avalanches

Une nouvelle approche est proposée pour estimer quantitativement la fréquence d'impact sur un enjeu situé sous une paroi rocheuse, à partir du taux volumique de recul de la paroi et d'une simulation des trajectoires des blocs. Le taux de recul (en $\text{m}^3.\text{an}^{-1}.\text{hm}^{-2}$) peut être déterminé à partir de mesures diachroniques de la paroi par scanner laser terrestre (ou estimé par analogie). Le nombre et la taille des blocs tombant annuellement sont déterminés à partir de la loi de distribution des volumes de bloc, établie à partir d'un relevé de blocs sur le versant. Enfin les fréquences d'impact sur le versant sont déterminées par simulation numérique des trajectoires des blocs en utilisant le logiciel Rockyfor3D. La méthode est appliquée au versant du Mont Saint-Eynard au nord-est de l'agglomération grenobloise. Les fréquences d'impact obtenues sont comparées aux niveaux d'aléa (fort, moyen, faible) habituellement utilisés en France dans les cartes d'aléa.

Mots clefs : évaluation quantitative, aléa rocheux, fréquence, éboulement

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue or grey ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are approximately 20 lines visible. The paper has a slight shadow on its right side, suggesting it's resting on a surface.

30. Suivi expérimental d'une maison instrumentée sinistrée par la sécheresse à Langon (33)

Mathon David¹, Godefroy Arnaud¹

1- Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Dans le cadre de l'opération ARGIC 2 réunissant 17 partenaires français sur la thématique du retrait-gonflement des argiles et de son impact sur les constructions, une maison sinistrée par la sécheresse a fait l'objet d'une instrumentation poussée pour appréhender en taille réelle les phénomènes étudiés. La maison se situe dans le département de la Gironde à Roaillan, au lieu-dit « le Laurier ». Ainsi, en collaboration avec l'université Bordeaux 2, le BRGM, la société SOCABAT (Expert M. Bechade) et avec l'accord des propriétaires, le CEREMA a disposé des capteurs dans le sol de la parcelle étudiée. Les capteurs sont des capteurs tensiométriques mesurant la succion des sols jusqu'à une profondeur de 3 mètres (dans un premier temps). Ils sont disposés selon un profil entre le garage de l'habitation et un chêne suspecté de provoquer des désordres sur la maison. Les mesures sont effectuées depuis octobre 2011, elles sont transmises quotidiennement au Laboratoire de Blois par messagerie. Parallèlement, des sondages carottés ont été réalisés permettant une bonne appréhension de la géologie de la parcelle. Il apparaît que les formations géologiques sensibles au retrait-gonflement sont présentes entre 1 et 4,5 mètres de profondeur. Les enregistrements montrent un phénomène cyclique d'humidification/dessiccation dont le plus profond est également le plus important. La période d'assèchement débute en juin/juillet et s'achève généralement en octobre. L'impact des racines de l'arbre est clairement mis en évidence dans la répartition des suctions des sols. La pose de nouvelles sondes tensiométriques en profondeur a ainsi été entreprise pour avoir une meilleure représentation de la dynamique de dessiccation. Une quantification théorique des tassements basée sur un essai d'étalonnage succion/teneur en eau a été tentée. Elle a abouti à un tassement pluri-centimétrique qui semble plus important que celui observé. Cette approximation est probablement due à la simplification nécessaire à l'établissement du modèle géotechnique.

Mots clefs : tensiométrie, maison, sécheresse, argile, Langon, France

31. Recommandations SOLCYP pour le dimensionnement des pieux sous chargements cycliques

Puech Alain¹, Garnier Jacques²

1 - FUGRO Geoconsulting, 2 – IFSTTAR

Le programme de recherche et développement du projet SOLCYP, piloté par l'IREX, a conduit dans la période 2008-2014 sous la forme deux volets complémentaires : un projet - dit ANR-SOLCYP - qui a obtenu un financement auprès de l'Agence Nationale de la Recherche et le label du Pôle Génie Civil Écoconstruction, et un projet - dit PN-SOLCYP - organisé sous forme de Projet National avec le soutien financier du ministère du développement durable (MEDDE). Le programme a été restreint au domaine des fondations sur pieux.

Le projet SOLCYP s'est attaché à améliorer les connaissances sur le comportement des pieux de fondations soumis à des sollicitations cycliques et à proposer des procédures permettant la prise en compte de l'effet des cycles dans le dimensionnement des ouvrages de génie civil ou maritime. Une approche méthodologique et systématique a été développée de manière à parvenir à une compréhension approfondie des phénomènes physiques complexes régissant d'une part la réponse des sols aux sollicitations cycliques et d'autre part le comportement des pieux soumis à des sollicitations cycliques verticales ou horizontales.

L'étape ultime du projet se concrétise par la rédaction d'un ouvrage de recommandations, comportant 11 chapitres, qui :

- décrit les phénomènes physiques gouvernant la réponse des pieux soumis à des sollicitations cycliques axiales ou latérales ;
- expose la méthodologie de dimensionnement des pieux sous chargements cycliques développée dans le cadre du projet SOLCYP ;
- fournit un ensemble de recommandations susceptibles de servir de base pour initier des actions prénormatives en vue de l'introduction de ces nouveaux acquis dans la normalisation nationale ou internationale.

32. Calibration du programme SCARP de calcul des pieux sous chargements cycliques axiaux

Delimi Zine¹, Puech Alain¹

¹ - FUGRO Geoconsulting

Le logiciel SCARP a été développé à l'Université de Sydney par le Professeur H. Poulos (1988). Il a pour objectif d'aider au dimensionnement des pieux de fondations dans les sables soumis à des chargements cycliques axiaux. La dégradation de la résistance cyclique le long du fût est prise en compte selon la méthode de Matlock et Foo (1979) Un facteur de dégradation D ? est appliqué pour chaque cycle sur le frottement de pic d'un élément. La vitesse de dégradation est gouvernée par un facteur (λ) de dégradation et une valeur minimale D_{min} avec D : valeur actuelle du facteur de dégradation pour le frottement ; D' : valeur du facteur de dégradation pour le frottement pour le cycle précédent ; D_{min} : valeur minimale du facteur de dégradation ; ? : paramètre du taux de dégradation. Les déplacements permanents sont calculés de manière explicite à partir d'une expression empirique basée sur le travail de Diyaljee et de Raymond (1982) avec : B : déplacement permanent généré par le premier cycle d'un faible niveau de chargement ; N : nombre de cycles ; m, n : paramètres déterminés expérimentalement ; X : niveau de chargement correspondant au ratio Q_{max}/Q_u . Les paramètres, m, n sont à déterminer expérimentalement. Les recommandations actuelles sont essentiellement basées sur les résultats d'essais de pieux modèles en laboratoire. La base des données expérimentales constituée par les essais de pieux réels de Loon-Plage réalisés dans le cadre du projet SOLCYP et des données issues des essais réalisés par l'Imperial College sur le site voisin à Dunkerque (Jardine et Standing, 2000 et Rimoy et al., 2013) ont été utilisées pour procéder à une calibration systématique des paramètres de SCARP. La communication présente la procédure de calibration retenue et les paramètres recommandés.

Mots clefs : chargements cycliques, pieux, calibration, SCARP

33. Cisaillement direct cyclique sol-structure en vue du calcul des pieux

Pra-Ai Suriyavut¹, Pittos Georgios², Boulon Marc³, Puech Alain⁴

1 - ATTDC School of eng'g, Université Phayao (Thaïlande), 2 - OTM Engineering (Grèce), 3 - Labo 3sr Grenoble, 4 - FUGRO Geoconsulting

On présente ici des travaux réalisés dans le cadre de l'ANR et du programme national SOLCYP, d'une part une campagne d'essais de cisaillement direct sol-structure, d'autre part leur interprétation en vue d'un calcul simple du comportement des pieux sous chargement axial cyclique. Le sol est le sable de Fontainebleau NE34, le matériau de structure une plaque d'acier rugueuse (sable collé). Les paramètres de la série d'essais à contrainte normale constante (CNL) sont l'indice de densité du sable, la contrainte normale initiale, le cisaillement cyclique moyen normalisé par le cisaillement de pic, l'amplitude des cycles de cisaillement. Selon la valeur des paramètres, on mobilise contractance ou dilatance cyclique. Une seconde série d'essais, à rigidité normale imposée (CNS), a été menée, avec les mêmes paramètres plus la rigidité normale. Tous les essais ont été conduits jusqu'à 10000 cycles (N) chaque fois que possible, parfois au-delà pour quelques essais CNS. Une particularité de tous les essais CNS est la décroissance continue, plus ou moins rapide selon la valeur des paramètres, de la contrainte normale cyclique moyenne, due au fait que les cycles de cisaillement génèrent des cycles de contrainte normale. Ce point est particulièrement important pour la compréhension de la « dégradation cyclique ». L'interprétation de ces essais est orientée vers la formulation analytique de cette chute de contrainte normale, sur chemin cyclique moyen, en référence au pseudo-fluage cyclique, en vue de l'application au calcul du frottement latéral des pieux sous chargement axial cyclique. Cette formulation est une fonction des 6 paramètres ci-dessus. Des abaques synthétiques issus de cette formulation, sont présentés. Deux communications parentes sont proposées à ces journées, concernant le comportement de pieux instrumentés de taille soumise à arrachement cyclique, l'une utilisant l'une la méthode t-z, l'autre la méthode des éléments finis, intégrant la chute de contrainte normale cyclique moyenne identifiée ci-dessus.

Mots clefs : rigidité normale imposée, cycles, structure, sol, cisaillement direct, dégradation cyclique

34. Nouvelles procédures pour le dimensionnement d'un pieu sous charge latérale cyclique dans une argile

Khemakhem - Ben Amor Meriam¹, Garnier Jacques², Rosquoet Frédéric³, Puech Alain¹

1 - FUGRO Geoconsulting, 2 - IFSTTAR, 3 - LTI - Université de Picardie Jules Verne

Dans le cadre du projet SOLCYP, une nouvelle approche est proposée pour dimensionner les pieux sous charges latérales cycliques dans une argile. En effet, les méthodes ou les normes actuelles ne permettent pas de prendre en compte l'effet des cycles pour dimensionner les fondations. Sur la base des essais réalisés sur des modèles réduits centrifugés, une nouvelle analyse des données a permis de mettre en avant deux méthodes originales de dimensionnement : la méthode globale et la méthode locale. La méthode globale consiste à évaluer l'accumulation des déplacements en tête du pieu et du moment maximum sous l'effet des cycles. Une loi de type puissance donnant le déplacement ou le moment relatif en fonction du nombre de cycles, de l'amplitude cyclique et de la charge moyenne est proposée. La méthode locale s'intéresse aux courbes P-y basées sur le modèle de Winkler. Nous avons introduit un coefficient d'abattement qui permet de prendre en compte l'effet des cycles en modifiant les courbes P-y statiques. Le coefficient d'abattement proposé est fonction de plusieurs paramètres : le nombre de cycles, l'amplitude des cycles, la charge maximale et une charge limite conventionnelle. Un article parent décrit une procédure similaire applicable au cas des matériaux sableux (Rosquoët et al.)

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and extend across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

35. Utilisation d'une loi t-z cyclique pour le calcul d'un pieu isolé soumis à un chargement axial cyclique

Abchir Zineb¹, Burlon Sébastien¹, Pittos Georgios², Boulon Marc³, Puech Alain²

1 - IFSTTAR, 2 - FUGRO Geoconsulting, 3 - Laboratoire sols, solides, structures - risques [Grenoble]

Cet article traite de l'estimation des déplacements et de la capacité portante cyclique des pieux soumis à des chargements cycliques. Les calculs sont réalisés au moyen de la méthode des courbes de transfert et mettent en œuvre la loi de réaction t-z cycle à cycle TZC, développée à l'IFSTTAR et décrite dans un article conjoint. Celle-ci combinée, soit à la méthode ABC développée par l'Imperial College, soit à la méthode mise au point dans le cadre du Projet SOLCYP, permet de rendre compte de l'évolution du frottement axial unitaire à l'interface sol-pieu. Le présent article propose une application de ces deux modèles à un exemple théorique et à un pieu réel sur lequel des mesures des déplacements et de la portance ont été réalisées. L'exemple théorique est tout d'abord décrit puis les résultats obtenus avec différentes combinaisons de chargement sont analysés et discutés. Les effets de la charge moyenne, de l'amplitude du chargement cyclique et du nombre de cycles sur les déplacements et la capacité portante du pieu sont mis en évidence. L'application du modèle TZC sur un pieu réel expérimental (programme SOLCYP) est par la suite présentée afin de tester sa validité. Les résultats numériques sont confrontés aux résultats expérimentaux à la fin de l'article.

Mots clefs : cycle à cycle, loi t-z, chargement cyclique, pieu, frottement axial unitaire

[illegible]

36. Nouvelle procédure pour le dimensionnement d'un pieu sous charge latérale cyclique dans un sable

Rosquoet Frédéric¹, Garnier Jacques², Khemakhem - Ben Amor Meriam³, Puech Alain³

1 - Laboratoire des technologies innovantes, 2 - IFSTTAR [Marne-la-Vallée], 3 - FUGRO Geoconsulting S.A.S.

Les charges latérales cycliques sur les pieux sont généralement induites par des sollicitations mécaniques telles que les vagues ou le vent sur des structures offshore, l'accostage ou l'amarrage de bateaux, les surcharges variables ou les dilatations thermiques. Dans le cadre du projet SOLCYP, une nouvelle approche est proposée pour dimensionner les pieux sous charges latérales cycliques dans un sable. Sur la base d'essais réalisés sur des modèles réduits centrifugés, une nouvelle analyse des données a permis de mettre en avant deux méthodes originales de dimensionnement : une dite globale et une seconde dite locale. De nombreux auteurs ont montré qu'il est possible de prendre en compte l'effet des cycles en étudiant le déplacement en tête du pieu ainsi que le moment maximum ; c'est la méthode globale. Nous proposons une loi de type logarithmique donnant le déplacement ou le moment relatif en fonction du nombre de cycles. Un paramètre de dégradation permettant de prendre en compte l'effet des cycles est obtenu dans les deux cas. La méthode locale est basée sur les courbes P-y qui utilisent le modèle de Winkler. Ce modèle définit le sol comme étant un empilement de tranches indépendantes. Nous avons introduit un coefficient d'abattement qui permet de prendre en compte l'effet des cycles en modifiant la réaction des courbes P-y statiques. Le coefficient d'abattement proposé est fonction de plusieurs paramètres : le nombre de cycles l'amplitude des cycles, une charge limite ainsi que la rigidité à la flexion du pieu. Un article parent décrit une procédure similaire applicable au cas des matériaux argileux (Khemakhem-Ben Amor et al.)

Mots clefs : sable, chargements cycliques horizontaux, pieu

38. Une nouvelle méthode d'estimation du chargement des piliers de mine et les perspectives envisageables

Hauquin Thomas¹, Deck Olivier¹, Gunzburger Yann¹

¹ - Laboratoire GeoRessources, Université de Lorraine, CNRS, CREGU, École des Mines de Nancy

La stabilité des ouvrages miniers représente un enjeu majeur pour les exploitants de minerai mais également, dans le cas des exploitations abandonnées, pour les communes situées à l'aplomb des anciens travaux. La stabilité des mines repose principalement sur la capacité des piliers laissés en place à soutenir la sollicitation verticale à laquelle ils sont soumis sous l'effet du poids du recouvrement. Traditionnellement, les piliers sont considérés comme stables lorsque le rapport résistance/chargement vertical moyen (Facteur de Sécurité) est significativement supérieur à 1. De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude de la résistance des piliers mais assez peu l'ont été à l'étude de leur chargement rendant la détermination du dénominateur du facteur de sécurité relativement incertaine. Encore récemment, la principale méthode de détermination analytique (aire tributaire) du chargement des piliers n'était valable que dans le cas de piliers de géométrie régulière et uniforme. Par conséquent, de manière à pouvoir maîtriser les performances des piliers, les exploitations se font généralement suivant des grilles régulières. Aucune méthode analytique, en revanche, n'était suffisamment fiable pour évaluer la sollicitation des piliers d'anciennes mines abandonnées, généralement de géométrie très irrégulière. Nous présentons ici une nouvelle formulation analytique du chargement de piliers irréguliers qui, après comparaison à des résultats de modélisation numérique, s'avère être plus précise que les deux principales méthodes préexistantes. La fonction proposée présente l'avantage de ne dépendre que de 3 paramètres géométriques accessibles et offre de nouvelles perspectives quant au dimensionnement de futures exploitations souterraines et à l'évaluation de la stabilité des ouvrages existants.

Mots clefs : méthode analytique, facteur de sécurité, contrainte verticale moyenne, modélisation numérique, piliers de mine

39. Le Grizzly 3[®] à énergie variable : Nouveaux développements de l'essai de pénétration dynamique DPSH

Escobar Esteban¹, Benz Miguel¹, Gourves Roland¹, Breul Pierre², Chevalier Bastien²

1 - Sol-Solution Géotechnique Réseaux, 2 - Institut Pascal

Bien qu'en France, environ 75 % des fondations soient dimensionnées sur la base du pressiomètre et le reste à partir du CPT ; l'essai de pénétration dynamique n'en est pas moins intéressant. En effet, à l'exception des quelques pays d'Europe, cet essai est la technique d'auscultation la plus utilisée à travers le monde. Son usage concerne non seulement la reconnaissance géotechnique, mais aussi le contrôle d'ouvrages en terre et le dimensionnement de fondations. Toutefois, les pénétromètres dynamiques présentent différents problèmes. En effet, on peut constater qu'il s'agit d'une technique qui n'a pas su intégrer les avancées technologiques des capteurs et des chaînes d'acquisition associés. De même, l'interprétation et l'exploitation de la valeur la plus significative, la résistance de pointe q_d , demeure largement empirique. Enfin, le caractère fortement dynamique des pénétromètres lourds est considéré comme un désavantage important pour l'auscultation de sols meubles ou saturés. Par ailleurs, depuis plus d'une vingtaine d'années Sol Solution et l'Institut Pascal de Clermont- Ferrand travaillent ensemble afin d'améliorer la technologie, l'interprétation et l'exploitation du pénétromètre dynamique. Les travaux réalisés autour du Panda[®] et du Panda 3[®] ont permis de montrer que l'on peut aller beaucoup plus loin dans l'interprétation d'un tel essai. Dans cet article nous présentons le Grizzly 3[®], pénétromètre dynamique à énergie variable assisté par ordinateur et permettant de mesurer une courbe charge-enfoncement en pointe pour chaque impact du mouton. L'application des méthodes d'analyse développées à partir du Panda 3[®] permet de déterminer la résistance en pointe dynamique q_d et pseudo statique q_s , le module d'élasticité E pénétrométrique, la vitesse des ondes de compression V_c et le coefficient d'amortissement du sol J_s . L'asservissement de l'énergie de battage, permet d'adapter automatiquement l'énergie de battage en fonction de la raideur du sol rencontré et d'améliorer ainsi la sensibilité de mesures réalisées en sols meubles.

Mots clefs : instrumentation, DPSH, pénétromètre dynamique, caractérisation de sols, Grizzly 3[®], Panda 3[®]

40. Amélioration pour le calcul des tassements sous des remblais ou des radiers de grandes dimensions

Cuinet Jean-Michel¹, Gress Jean-Claude²

1 - Hydrogéotechnique, 2 - ACE Géotechnique

L'estimation de tassement sous des remblais ou des radiers de grandes dimensions est un challenge important pour le géotechnicien confronté à des études d'infrastructures linéaires ou à celle de plateformes logistiques par exemple. Nous présentons ci-après l'utilisation de résultats connus en géodynamique afin de parfaire nos estimations.

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

41. Répliques virtuelles de joints rocheux : simulation par éléments discrets du comportement en cisaillement

Marache Antoine¹, Varela Valdez Alberto¹, Morel Stéphane¹, Riss Joëlle¹

1 - I2M - Université de Bordeaux

La compréhension du comportement mécanique en cisaillement des joints rocheux sous contrainte normale ou rigidité constante a une longue histoire. Les études successives ont, en particulier, eu pour but de déterminer l'influence de la morphologie des épontes des joints sur leur comportement. Un problème majeur tenait à ce que, une fois cisailé, le joint, endommagé, ne pouvait plus être réutilisé pour de nouveaux essais ; il ne pouvait y avoir de comparaison d'essais à morphologie des épontes constante. Pour pallier cette difficulté diverses méthodes ont été mises au point dont celle de Ladanyi et Archambault (1969) qui ont utilisé des joints artificiels à la morphologie géométriquement simple ou, celle développée par Flamand (2000) qui a utilisé des répliques en mortier, toutes identiques, d'une même fracture naturelle. Ces répliques ont été cisailées sous plusieurs niveaux de contrainte normale, dans plusieurs directions en s'arrêtant à différents niveaux de déplacement horizontal et en utilisant à chaque nouvel essai une nouvelle réplique. Cette méthode s'est avérée riche d'enseignements mais lourde à mettre en place et onéreuse. On propose, ici, une méthode d'obtention de joints rocheux numériques utilisables pour des simulations du comportement en cisaillement et s'appuyant sur la méthode des éléments discrets. La méthodologie mise en œuvre afin de reproduire la rugosité des épontes de la fracture naturelle à l'origine des répliques utilisées par Flamand sera présentée. Dans cette étude, les éléments discrets reproduisent le squelette granulaire du mortier tandis que la cohésion assurée par la matrice cimentaire est modélisée par un maillage de poutres entre particules. Les stratégies mises en place pour garantir des temps de simulations raisonnables (code PFC3D, Itasca) tout en garantissant un contrôle de la morphologie des joints seront détaillées. Enfin, les résultats des simulations de cisaillement seront présentés et comparés aux essais en laboratoire de Flamand.

Mots clefs : cisaillement, éléments discrets, joints rocheux, rugosité

42. Simulation de la rupture en mode I avec la méthode aux éléments discrets

Hamdi Jabrane^{1,2}, Scholtes Luc¹, Souley Mountaka², Al-Heib Marwan²

1 - Laboratoire GeoRessources, Université de Lorraine, CNRS, CREGU, École des Mines de Nancy, 2 - Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

Un code aux éléments discrets a été utilisé pour modéliser explicitement l'initiation et la propagation des fissures dans les matériaux fragiles. Des essais classiques de mécanique des roches ont été simulés sur des échantillons numériques préalablement calibrés sur le granite du lac du Bonnet. Le comportement mécanique, le développement de la fissuration et l'énergie libérée ont ainsi été étudiés pour des essais de compression uniaxiale et triaxiale, de traction sur des échantillons avec et sans entaille et de flexion trois points. Dans un premier temps, ce travail a permis de démontrer la robustesse de la méthode vis-à-vis de sa capacité à reproduire un comportement similaire à celui observé lors des essais en laboratoire et ce, quel que soit les chemins de chargement appliqués. Une étude de sensibilité a ensuite été réalisée afin de calculer la ténacité (KIC) correspondant au critère de rupture en mode I et d'identifier l'influence des différents paramètres du modèle sur sa valeur. Nous avons notamment étudié l'influence de la géométrie du modèle (dimensions, orientation de la fissure pré-existante), de sa discrétisation (nombre de particules) ainsi que celle de l'amortissement numérique sur le comportement à la rupture. Les comparaisons ont été effectuées à travers l'analyse de la contrainte, de l'énergie élastique de l'échantillon, de l'énergie dissipée dans les microfissures et du nombre des microfissures créées en fonction de la déformation. Pour l'essai de traction directe, nous avons pu mettre en évidence l'indépendance de la réponse du modèle vis-à-vis de la discrétisation et de l'amortissement numérique. Ces caractéristiques, qui ont été également constatées sur l'essai de flexion trois points, résultent, d'une part, de la quasi-staticité des simulations réalisées, et d'autre part, de la formulation particulière du modèle qui permet d'assurer un bilan énergétique indépendant de sa discrétisation spatiale.

Mots clefs : comportement des roches, méthode des éléments discrets, mode I de rupture

43. Lois anisotropes pour la prévision des tassements dus au creusement de tunnels superficiels

Gilleron Nicolas^{1,2}, Bourgeois Emmanuel², Saitta Adrien¹

1 - EGIS GEOTECHNIQUE, 2 - Université Paris-Est, IFSTTAR, COSYS

La grande majorité des modèles numériques bidimensionnels ou tridimensionnels de creusement de tunnels superficiels pour la prévision des tassements est réalisée à l'aide de lois de comportements du sol isotropes. Ces lois, aussi compliquées soient elles, ne parviennent pas à prédire les profils de tassement constatés et en particulier la largeur des cuvettes de tassement. On étudie ici l'influence d'un comportement anisotrope transverse du massif de sol. Dans le plan horizontal, les propriétés élastiques sont isotropes mais l'axe vertical représente une direction privilégiée. On met d'abord en évidence la prééminence des déformations de glissement ε_{zy} rapportées aux déformations verticales ε_{zz} dans le cas d'un tunnel superficiel au regard d'autres ouvrages géotechniques ce qui justifie l'intérêt d'étudier ce type de modèle. Il existe dans la littérature de nombreuses publications discutant l'intérêt de cette approche. Cette littérature, qui s'étend sur une trentaine d'années et rassemble une grande variété de modèles analytiques et numériques présente la particularité d'être fortement contradictoire dans ses conclusions. On détaille cette littérature et explique cette contradiction. Certains auteurs montrent que la prise en compte d'un module de cisaillement plus faible améliore la forme de la cuvette de tassement mais d'autres, utilisant des modèles d'anisotropie plus complets où ce module est relié au rapport des modules verticaux et horizontaux, ne retrouvent pas cette évidence et mettent en doute l'opportunité de l'étude de l'anisotropie du massif. La formulation et le choix des paramètres tiennent ainsi un rôle clé dans l'influence ou non d'un comportement anisotrope transverse sur le profil de tassement. Cette étude nous permet en conclusion de formuler quelques pistes sur l'utilisation de ce type de modèle pour la prévision des tassements lors du creusement de tunnels superficiels. Les modélisations sont réalisées à l'aide de CESARv6.

Mots clefs : tunnel, tassements, éléments finis, anisotropie

44. Estimations analytique et numérique de la chaleur extraite d'une galerie de mine noyée

Suryatriyastuti Maria Elizabeth¹, Deck Olivier¹, Gloriant François², Nassar Chady³, Defer Antoine³, Hervé Steve³

1 - Laboratoire GeoRessources, Université de Lorraine, CNRS, CREGU, École des Mines de Nancy,

2 - Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie, 3 - Département Géomécanique, Mines Nancy

L'intérêt porté à la gestion de l'après mine s'est accru depuis ces dernières années. Une des solutions novatrices pour valoriser des anciennes mines est d'utiliser l'eau contenue dans des galeries inondées en tant que source de chaleur. Associée à une pompe à chaleur, ce système s'inscrit dans l'exploitation de la chaleur géothermique à basse enthalpie. N'étant pas encore mis en place en France, plusieurs études sur la faisabilité de la performance énergétique des bassins miniers français sont en cours. Dans cet article, est proposée une solution analytique pour estimer l'évolution de la température de l'eau dans une galerie géothermique sans la prise en compte de l'écoulement souterrain. Le modèle est basé sur l'analogie unidimensionnelle de la résistance thermique en régime stationnaire. Puis, une comparaison entre les résultats analytiques et ceux obtenus à partir d'un modèle de mécanique des fluides numériques est effectuée sur la base d'une mine de charbon en Lorraine. Après l'étude en régime stationnaire, une analyse numérique en régime instationnaire est menée permettant de compléter le modèle analytique proposé. Ces deux approches permettent de donner une bonne estimation de la puissance d'extraction et de l'épuisement thermique afin de caractériser la réponse globale d'une mine géothermique.

Mots clefs : convection forcée, géothermie à basse enthalpie, mine noyée, transfert hydrothermique

45. Préparation de recommandations pour le dimensionnement des fondations d'éoliennes offshore

Puech Alain¹, Berthelot Patrick²

1 - FUGRO Geoconsulting, 2 - Bureau Veritas

Suite aux appels d'offres lancés par la puissance publique, quatre champs d'éoliennes offshore sont en cours de développement dans les eaux territoriales françaises pour une puissance totale à installer d'environ 2400 MW. Les profondeurs d'eau atteignent les 40 mètres et les types de fondations envisagées incluent les fondations sur monopieux de grands diamètres et les embases gravitaires. Les conditions sont diverses et complexes : craies, marnes compactes, calcarénites, roches granitiques. La conception, le dimensionnement et l'installation des structures supports de ces éoliennes représentent des défis importants pour l'industrie. À ce jour, il n'existe en France aucun texte de nature normative ou réglementaire applicable à ce type de structure et d'environnement. De la même manière aucun document professionnel ne fournit de guide pour l'exécution des reconnaissances de sols à réaliser avant l'implantation d'éoliennes offshore de même que pour procéder à la conception et au dimensionnement des fondations. Face à ce constat, le Comité Français de Mécanique des Sols a mis en place début 2013 une commission d'experts pour rédiger des « Recommandations pour la conception et le dimensionnement des fondations d'éoliennes offshore ». Un premier document traitant des « reconnaissances de terrain » à exécuter avant l'implantation d'éoliennes en mer a été produit. Trois sous-groupes sont actuellement actifs pour traiter du dimensionnement des monopieux, des pieux, et des embases gravitaires. La communication proposée a pour objectif de donner un aperçu du contenu du futur document en mettant en lumière la philosophie retenue, les spécificités des développements dans les eaux françaises (conditions de sols) et les avancées en cours notamment dans le domaine des chargements cycliques liées à la houle et au vent.

Mots clefs : éoliennes offshore, Fondations, recommandations

46. Sols structurés sous sollicitations sismiques

Brulé Stéphane¹, Enoch Stefan², Guenneau Sébastien²

1 - Ménard, 2 - Institut FRESNEL

Les travaux réalisés ces 15 dernières années en Optique et en Acoustique, notamment dans le domaine des cristaux photoniques et phononiques, ouvrent de nouveaux axes de recherche pour des applications aux ondes sismiques au travers du concept des sols structurés et métamatériaux. D'une part, les codes sismiques de construction de dernière génération, dont l'Eurocode 8, renforcent l'approche interaction sol-structure pour les ouvrages et d'autre part, les métiers des fondations profondes, du renforcement et de l'amélioration des sols analysent d'avantage les effets cinématiques et inertiels dans leurs documents techniques de référence. C'est ainsi qu'en renforcement de sol, la notion d'homogénéisation (sol et inclusions) s'intègre au dimensionnement des infrastructures pour agir comme une réduction de déformabilité des sols afin de réduire les effets d'amplification de signaux sismiques dans les couches superficielles et limiter les effets de liquéfaction des sols. Dans ce contexte, les chercheurs, examinent, soit par des approches numériques, soit par des modèles physiques ou encore par des expériences en vraie grandeur, la possibilité de solliciter un effet complémentaire apportés par les milieux naturels accentués en anisotropie par l'incorporation de pieux ou d'inclusion selon un maillage régulier ou non : création de bandes de fréquences interdites, directivité de certains types d'onde, etc.

Mots clefs : métamatériaux, sols structurés

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins or other markings on the paper.

47. Renforcement de sol par jet-grouting sous diesels d'ultime secours de la centrale nucléaire de Chooz

Depinois Simon¹

1 - EDF

Faisant suite à l'accident de Fukushima, EDF a engagé la conception et la construction de nouveaux bâtiments sur ses centrales nucléaires de production d'électricité (CNPE), dont les bâtiments diesels d'ultime secours, dits « bâtiments DUS ». Ceux-ci visent à garantir la sûreté des installations face à des événements agresseurs « extrêmes », au-delà du dimensionnement usuel, en pérennisant l'alimentation électrique des tranches nucléaires en cas de défaillance des autres sources. Ces bâtiments doivent entre-autre se montrer robustes vis-à-vis de niveaux d'agression sismique « au-delà du dimensionnement », dits « Séisme Noyau Dur » ou SND. Cela implique pour les sols de fondations des vérifications des états-limites géotechniques à des conditions non usuelles, en particulier s'agissant du risque de liquéfaction. Sur le CNPE de Chooz, les investigations géotechniques au droit des futurs DUS ont mis en évidence des horizons potentiellement liquéfiables sous niveaux SND. Ces conclusions ont conduit le Service Géologie-Géotechnique d'EDF-Ceidre-TEGG à préconiser la réalisation d'un renforcement des sols de fondation. La technique mise en œuvre repose sur la réalisation de colonnes sécantes de jet-grouting, pour constituer un réseau de voiles de forte inertie sous l'emprise des bâtiments. Par ce maillage et un taux de substitution élevé (de l'ordre de 30 % du volume de terrain préexistant), les horizons sujets à la liquéfaction sont confinés, tout en diminuant les contraintes de cisaillement s'appliquant sous séisme à ces sols. De fait, cette solution inédite sur une centrale nucléaire en France permet de se prémunir contre le risque de liquéfaction, tout en apportant dans le même temps des marges de dimensionnement vis-à-vis d'autres états limites géotechniques et des phénomènes d'interaction sol-structure.

Mots clefs : renforcement de sol, liquéfaction, jet-grouting

48. Offshore cable burial depth using a risk based approach

Doan Dinh-Hong¹, Macnay Lucy², Savadogo Aboubacar¹, Smith Kevin³

1 - FUGRO Geoconsulting, 2 - Anatec Ltd (Royaume-Uni), 3 - Fugro Consultants (États-Unis)

Un réseau de câble en mer est vulnérable à un large éventail de dangers potentiels. La forme de protection la plus fiable pour ces câbles demeure l'enfouissement sous le fond marin. L'objectif de cet article est de décrire une nouvelle méthodologie pour déterminer les profondeurs d'enfouissement par une approche basée sur le risque, pour efficacement et économiquement protéger les câbles sous-marins.

Mots clefs : vessel anchoring, fishing, risk, burial depth, offshore cable, probability, anchor penetration

[illegible]



Les résumés

jeudi 7 juillet

49. Requalification des berges de la Seine - Conception et suivi de travaux d'ouvrages de protection des berges

Ouvry Jean-Frédéric¹, Autrand Olivia¹, Guillermin Anne-Laure¹, Rouen Anne-Sophie¹

1 - Antea Group

Le site de l'ancienne raffinerie d'huiles de la Mailleraye se situe sur la commune de Le Trait (76), en bordure de Seine. Les berges en limite du site présentent une érosion plus ou moins marquée suivant les secteurs. Le site est situé en zone de marnage de la Seine d'une amplitude de 4.8 m. L'érosion est de plus accentuée par la circulation fluviale importante. Cette érosion déstructure les berges en place ce qui a pour conséquence d'entraîner dans les eaux une partie des plateformes. La géologie au droit de la zone d'étude et de travaux est constituée par des alluvions modernes et anciennes sur un substratum crayeux, constituant d'un point de vue géotechnique une alternance de couches classifiées GTR de type A1, A2, B5 et F12 (alluvions récentes). Un mur poids en gabions de 4 m de hauteur a été conçu et dimensionné par Antea Group, avec un dispositif anti-affouillement de type matelas Reno en pied du mur et mise en œuvre d'un remblai compacté à l'arrière du mur de gabion jusqu'au profil de berge existant. La justification de la stabilité externe et de la stabilité interne du mur en gabions ainsi que la justification de la capacité portante du sol de fondation ont été évaluées dans le cadre des études préliminaires. Les travaux ont été réalisés du 15 mai au 30 septembre 2013 par l'entreprise spécialisée SNV Maritime dans un contexte où la sécurité du chantier était un des éléments prédominants. L'entreprise a proposé et mis en œuvre un renforcement en enrochement percolé aux extrémités du mur-poids en gabions afin d'assurer un raccordement pérenne au perré existant. L'ouvrage fait l'objet d'un suivi topographique annuel depuis sa réception ne montrant pas de déformation significative.

Mots clefs : gabion, berges

50. Autoroute A150 - viaduc de l'Austreberthe : confortement d'une anomalie karstique par jet-grouting

Curtil Stéphane¹, Juignet Arnaud¹

1 - GEOS Ingénieurs Conseils

Le viaduc l'Austreberthe est un des ouvrages majeurs de l'autoroute A150, en Normandie. Long de 480 m pour une hauteur au-dessus du sol atteignant 40 m, traverse la vallée de l'Austreberthe qui entaille le substratum crayeux du Crétacé supérieur qui est caractérisé par altération plus ou moins marquée (craie altérée à fracturée), généralement en tête de la formation. Sur les bords de plateau la craie est surmontée par des formations résiduelles à silex tandis que le substratum apparaît sur les versants. Dans ce contexte géologique, des poches de dissolution et cavités karstiques peuvent être rencontrées au sein de la craie. Elles sont généralement remplies, partiellement ou totalement, par des formations résiduelles à silex, accompagnées parfois de sables et de limons argileux. S'agissant de structures susceptibles d'évoluer dans le temps à l'échelle humaine, ces phénomènes constituent un aléa important pour la construction durable des ouvrages. Dans le cadre de la construction, une anomalie de type karstique a été mise en évidence lors de sondages de contrôle, sous les pieux de fondation, au droit de l'une des piles du viaduc implantée en partie basse du versant. Cette situation ne permettant pas de garantir la pérennité des fondations de l'ouvrage, l'aléa découvert se devait d'être traité. Après une phase de diagnostic approfondi et d'analyses géologiques et structurales destinées à cerner la géométrie et le périmètre de l'anomalie, une solution de confortement au moyen de colonnes de Jet Grouting a donc été conçue de manière à garantir à long terme la pérennité de la fondation. La mise en œuvre s'est accompagnée d'un suivi géotechnique renforcé, destiné à garantir la qualité des travaux mais également à pouvoir adapter les méthodes selon les observations en cours de réalisation.

Mots clefs : Jet grouting, Fondation profonde, Karst, Risque naturel, Ouvrage d'art, Suivi géotechnique d'exécution

51. Apports de l'interaction sol-structure dans la conception des fondations

Cuira Fahd¹, Simon Bruno¹

1 - TERRASOL

De quelles méthodes dispose-t-on pour traiter l'interaction sol-structure ? Un passage obligé pour appréhender d'une manière réaliste le comportement des ouvrages. Pour l'ingénieur en charge de dimensionner la structure, cela implique que les outils couramment considérés pour représenter la réponse du sol ne sont pas des propriétés intrinsèques. Pour le géotechnicien, cela signifie que la réponse du sol est modifiée par la présence de la structure qu'il supporte. En dehors des projets de grande envergure pour lesquels l'ingénieur dispose de « moyens » suffisants pour aborder le comportement du système « sol + structure » dans son ensemble, cette communication s'attache à donner quelques éléments d'ordre pratique pour mettre en œuvre une démarche d'interaction sol-structure éprouvée. Les enjeux conceptuels liés à cette démarche sont mis en évidence à travers de cas concrets.

Mots clefs : déformations, conception des ouvrages, structure, Interaction sol, modélisation

[illegible]

52. Méthode observationnelle pour le préchargement des futures voiries IKEA-IICB à Bayonne (64)

Binda Jonathan¹, Baguelin François², Mansuy Christian³, Serre Jean-Baptiste⁴

1 - Directeur Travaux, Colas Sud Ouest, 2 - Consultant FONDASOL, 3 - Responsable Laboratoire, Colas Sud Ouest, 4 - Chargé d'Affaires, GEOLITHE

Le site, à l'intersection de l'A63 et l'A64, est un ancien marais choisi pour l'implantation d'un magasin sur près de 8 ha. Une épaisseur de 20 à 50 m de nature argilo-sableuse vasarde, constitue le remplissage alluvionnaire de cet ancien bras de méandre de l'Adour. Afin de consolider ces matériaux très compressibles, traités au préalable par drains verticaux, des remblais de préchargement pouvant aller jusqu'à 5 m de hauteur ont été mis en œuvre sur l'ensemble des futures voiries et parkings. L'objectif de ces préchargements était de répondre aux deux principales obligations du marché, à savoir : d'une part, 90 % de consolidation atteint au bout de 4 mois et d'autre part, un tassement de fluage, après 10 ans de mise en service, inférieur à 10 cm. La problématique était de mesurer avec fiabilité les tassements produits, dans le but de valider, au fil du chantier, les prévisions des tassements verticaux, du pourcentage de consolidation et de l'estimation du fluage à 10 ans. Des méthodes compensatoires devaient être anticipées le cas échéant. Ceci a été rendu possible grâce à une méthode observationnelle optimisée et une instrumentation abondante : CPI (électriques et à cordes vibrantes) par forage et par fonçage, profilomètres simple et double (avec zone de recouvrement), tassomètres magnétiques de profondeur, cellules tassométriques, essais de dissipations, mesures CPTu avant et après préchargement, plots et piges topographiques. Cette instrumentation, regroupée par profils (13u), a permis de fiabiliser les mesures par concordance en intégrant des intervalles de confiance. Sur le même site, deux projets différés d'un an environ, avec des problématiques techniques similaires, ont permis l'amélioration de la nature, du nombre et de l'implantation des instruments de mesure en intégrant le développement d'un outil de gestion des données à apporter visibilité et confiance dans ce partenariat Colas ?

Mots clefs : préchargement, méthode observationnelle, instrumentation

53. Le caissonnage en deep soil mixing ou en jet-grouting en zone sismique

Quirin Léo¹, Lambert Serge¹

1 - Keller Fondations Spéciales

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 : Deep Soil Mixing, jet-grouting, caissonnage, distortion, sismique, interaction sol/structure, liquéfaction

[illegible]

54. Dimensionnement d'inclusions rigides soumises à des poussées latérales Meyer Elodie¹, Trinh Viet-Nam¹, Ravel Hugo¹

¹ - Systra

Dans le cadre de la construction d'une ligne ferroviaire, la présence d'horizons compressibles peut générer des tassements importants. La méthode classique consiste à prévoir des remblais de préchargement permettant de consolider les horizons compressibles préalablement à la mise en œuvre de la structure de voie et des ouvrages d'art. Cette méthode nécessite cependant des temps de consolidation importants, parfois incompatibles avec le planning travaux. Nous avons été sollicités lors de la construction d'une ligne à grande vitesse au Maroc pour la réalisation de l'étude d'exécution d'une solution variante au droit d'un ouvrage. La solution initiale prévoyait la construction de remblais de préchargement sur une hauteur de 12 m. Le temps de consolidation prévisionnel était d'environ 1 an. Les retards rencontrés en phase chantier ont entraîné la nécessité de proposer une solution permettant d'améliorer ces temps de consolidation. La solution variante proposée consiste en la mise en œuvre d'inclusions rigides sous le futur ouvrage et ses blocs techniques. Le dimensionnement de ces inclusions doit donc respecter les critères classiques de tassement et de déformations sous ouvrage ferroviaire et sous bloc technique. Cependant, le phasage travaux entraîne une complexité supplémentaire de conception. En effet, les remblais de préchargement, initialement prévus sur toute la zone, seront réalisés à proximité directe de l'ouvrage et de ses blocs techniques, postérieurement à la mise en œuvre du renforcement de sol. Il est donc nécessaire de considérer, dans le dimensionnement de ces inclusions rigides, les sollicitations latérales résultant du déplacement horizontal de l'horizon compressible, sous l'action de la charge de remblai. Les points durs de ce dimensionnement résident dans les contraintes imposées par l'Entreprise, notamment vis-à-vis du diamètre maximal des inclusions, qui ont nécessité des adaptations techniques particulières pour assurer le dimensionnement du ferrailage permettant de reprendre les efforts horizontaux.

Mots clefs : renforcement, inclusions, poussées

55. Modèle réduit d'un massif de sol renforcé par inclusions rigides sous chargement cyclique

Houda Moustafa^{1,2}, Jenck Orianne², Emeriault Fabrice²

1 - Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement, 2 - Laboratoire sols, solides, structures - risques [Grenoble]

Le concept de renforcement de sols compressibles par inclusions rigides verticales implique que les têtes d'inclusion ne sont pas liées à la structure en surface : une plate-forme de transfert de charge (PTC) est érigée entre le sol de fondation renforcé par inclusions et la superstructure. Cette technique de renforcement a été largement étudiée sous chargement monotone, mais le comportement sous chargement cyclique pose encore question et nécessite donc des travaux de recherche supplémentaires. Cette étude expérimentale porte sur l'analyse des mécanismes qui se développent dans la PTC, constituée d'un matériau granulaire, lors de cycles lents de chargement-déchargement en surface. Des expérimentations ont été réalisées en laboratoire, sur un modèle réduit à l'échelle 1/10 sur les longueurs, sous gravité normale. Le modèle consiste en une cuve rigide de section carrée de 1 m² contenant 20 inclusions, placées à travers un sol compressible analogique (mélange de sable et de billes de polystyrène expansé), qui ne présente pas de phénomène de consolidation et qui permet alors l'application de cycles lents en un temps d'essai raisonnable. La PTC est constitué d'un gravillon 2-4 mm, dont le comportement mécanique a été caractérisé par une campagne d'essais triaxiaux sous chargement cyclique. Le modèle est instrumenté en capteurs d'efforts et de déplacements en zone centrale et l'application d'une méthode de corrélation d'images à travers une fenêtre latérale du modèle donne accès au champ de déplacement dans le massif. Une importante campagne d'essais sous chargements monotones et cycliques a été réalisée. L'analyse de certains paramètres comme les conditions aux limites (présence d'une dalle rigide en surface ou surcharge uniformément répartie) et la séquence de chargement appliquée permet de mettre en évidence les mécanismes qui se développent dans la PTC et qui se traduisent par une accumulation de tassement et une variation de l'efficacité du système.

Mots clefs : corrélation d'images numériques, chargement cyclique, modèle physique, inclusions rigides, renforcement de sol

56. Modélisation 3D d'un système d'interaction sol-pieu-structure pour un groupe de pieux géothermiques

Borely Cyril¹, Caira Fahd¹, Okyay Umur¹

1 - TERRASOL

Les pieux géothermiques sont des fondations profondes équipées de pompes à chaleur. Ces pieux sont utilisés comme source d'énergie pour le chauffage ou le refroidissement des bâtiments. Les pieux géothermiques sont soumis à des variations de températures provoquant des tassements et des sollicitations dans la structure. Cet article présente une modélisation de l'interaction sol-pieu-structure pour un groupe de pieux géothermiques. Ce modèle calcule les sollicitations et les déplacements dus à un chargement thermique. Dans ce modèle, les pieux sont modélisés par la loi de Hooke, l'interaction sol-structure par la loi de Frank et Zhao (1982) et la structure est représentée par une matrice de rigidité. Ce modèle a été appliqué au cas de Sept-Sorts, un projet de station d'épuration sur pieux géothermiques. À la suite de ces calculs, plusieurs remarques sont faites. Ce modèle permet de prendre en compte des effets structurels (rigidité latérale de la structure et réaction des pieux non géothermiques) qui ne peuvent être traduits dans des modélisations plus simples. Le cas d'un bâtiment où tous les pieux subissent le même chargement thermique peut être simplifié en un modèle où les pieux sont libres en tête.

Mots clefs : modélisation, interaction sol/structure, pieux géothermiques

[illegible]

57. Prise en compte de l'écoulement hydraulique sur la performance thermique des parois moulées géothermiques
Rammal Dina¹, Mroueh Hussein¹, Burlon Sébastien², Suryatriyastuti Maria Elizabeth³
1 - Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), 2 - IFSTTAR, 3 - ITECH

Les structures géothermiques, en plus de leur traditionnel rôle mécanique de fondations ou d'écrans de soutènement, présentent un intérêt certain du fait de leurs avantages économiques et environnementaux pour satisfaire les besoins énergétiques des constructions tant en matière de chauffage que de climatisation. Cette technique tire profit de la température plus ou moins constante du sol en surface en l'utilisant alternativement comme une source de chaleur ou un dissipateur de chaleur. L'efficacité des structures géothermiques dépend de la chaleur échangée avec le sol et des ressources thermiques de ce dernier. La puissance thermique peut être échangée par conduction et par advection, en particulier en présence d'une nappe d'eau souterraine en mouvement, ce qui contribue à augmenter la performance du système. Dans cet article, l'influence des paramètres thermiques (conductivité thermique, chaleur massique) et hydriques (conductivité hydraulique) du sol ainsi que la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine sont analysées à partir de différentes simulations numériques. L'étude porte plus précisément sur les transferts de chaleur à partir de parois moulées géothermiques pour la construction de stations de métro souterrains. Le Nombre de Péclet est introduit pour déterminer l'importance relative des phénomènes convectifs et diffusifs pour diverses conditions d'écoulement de l'eau. L'effet de la longueur active des panneaux de parois moulées sur le processus d'échange de chaleur est étudié. Les résultats doivent permettre de mieux appréhender les échanges de chaleur entre les stations de métro thermoactives et le terrain environnant.

Mots clefs : nombre de Péclet, parois moulées géothermiques, puissance thermique, advection, conduction

58. Réalisation d'un déblai de grande hauteur dans le cadre d'un marché de conception-réalisation

Antoinet Eric¹, Bourguet Renaud¹, L'heure Vincent², Plaindoux Daniel², Sauterey Daniel³

1 - ANTEA, 2 - Roland, 3 - Conseil Départemental d'Eure-et-Loir

Le tronçon de déviation de Nogent-le-Roi (Eure-et-Loir) recoupe une colline séparant deux cours d'eau. Pour limiter la déclivité de la route, le franchissement de cette colline a nécessité la réalisation d'un déblai de grande hauteur, avec des terrains sableux en partie supérieure puis des terrains crayeux. Compte tenu de la complexité de conception géotechnique de ce grand déblai, le Conseil Départemental a retenu une procédure de marché en « conception-réalisation » pour ce tronçon. Un des objectifs principal était d'équilibrer au mieux les volumes de déblai/remblai pour minimiser les coûts de transport et les impacts environnementaux, nécessitant de réaliser un déblai fortement penté. Sur la base des données disponibles dans le dossier de consultation, la partie inférieure du talus était attendue dans des matériaux crayeux. La conception était envisagée depuis le haut : Un talus à 2H/1V dans des sables, sur 10 m de hauteur, Un talus à 1H/1V avec mise en place d'un masque de protection en matériaux traités sur 8 m de hauteur, Un talutage subvertical dans les terrains crayeux, sur une douzaine de mètres, avec clouage. Les données géotechniques disponibles au stade de l'appel d'offre laissaient penser que la base du talus devait être excavée dans une craie, litée de silex. En réalité une paléo-érosion découverte lors du creusement de la base du talus a nécessité le creusement de la base du déblai dans un amas de silex de tailles variables, entourés de matériaux argileux. Ceci a conduit à une adaptation pendant le chantier avec un clouage important couplé à une épaisseur accrue de béton de projeté en parement. Cet article présente les conditions géotechniques attendues, la conception géotechnique qui a découlé puis s'attarde sur le confortement réellement mis en œuvre suite à la découverte d'un contexte différent et montre les capacités d'adaptation de la solution technique du mur cloué.

Mots clefs : silex, craie, clouage, déblai, calculs de stabilité

59. Diamètre équivalent d'un drain plat et suivi de la consolidation sur un cas de préchargement

Baguelin François¹, Finiasz Arnaud²

1 - Consultant FONDASOL, 2 - FONDASOL

Le calcul de la vitesse de consolidation de sols compressibles traités par drains verticaux et chargés par un remblai fait appel au diamètre du drain ; dans le cas de drains plats foncés, il s'agit d'un diamètre équivalent. On utilise en pratique l'une des deux valeurs suivantes : soit la demi-largeur du drain plat, soit le diamètre d'un cercle de même périmètre. On applique la théorie des champs laplaciens à l'écoulement du plan horizontal de la maille du réseau de drains, ce qui permet d'obtenir une solution analytique. Elle montre que la valeur théorique correspond à la première option et elle met en évidence que les lignes équipotentielles deviennent des cercles à mieux que 1 % au-delà d'une distance égale à 2,5 fois la largeur du drain. La possibilité d'un remaniement du sol autour du drain et les incertitudes liées aux variations stratigraphiques et à la dispersion des valeurs des coefficients de consolidation font qu'il est nécessaire de vérifier sur le terrain les vitesses de consolidation. On présente les comparaisons faites sur le chantier IKEA à Bayonne où les alluvions, atteignant 50 m d'épaisseur, ont été préchargées par un remblai haut de 3 m à 5 m, selon les zones. L'interprétation de l'évolution du tassement en fonction du temps pendant les quatre premiers mois de chargement a été faite en ajustant une courbe théorique de consolidation radiale sur les points de mesure. Cette procédure a été préférée à celle d'Asaoka, car elle permet de combiner plusieurs types de mesures (profilomètres, tassomètres, plots topographiques), d'exploiter des mesures à intervalles de temps irréguliers et de mettre en évidence la part de tassement régie par la consolidation des strates argileuses. On a ainsi pu valider les durées de consolidation prévues sur la base du diamètre équivalent égal à la demi-largeur du drain plat.

Mots clefs : modélisation numérique, drains verticaux, tassement, sols compressibles

Vernhes Jean-David¹, Barakat Bassam¹

1 - Institut Polytechnique LaSalle Beauvais

En 1729, Bélidor, professeur du Génie, publie à Paris « La Science des Ingénieurs ». Pour la première fois en géotechnique, un modèle de dimensionnement physiquement pertinent est utilisé, pour résoudre un problème de taille : l'évaluation de la sécurité des murs de soutènement du Profil général de Vauban (1684). Coulomb (1773) l'ignore. C'est seulement avec Rankine (1856) que le paradigme de Bélidor réapparaît.

Mots clefs : histoire de la géotechnique, dimensionnement, mur de soutènement, sécurité

[illegible]

61. Mesures des propriétés mécaniques d'une argile surconsolidée au laboratoire
Serratrice Jean François¹

1 - Cerema

La communication présente les résultats d'un programme expérimental destiné à identifier les propriétés mécaniques d'une argile surconsolidée en laboratoire. L'argile a été prélevée par carottage en grand diamètre (170 mm) vers vingt mètres de profondeur. Il s'agit d'une argile grise compacte homogène, localement indurée. Ses propriétés physiques déduites des essais d'identification font état d'une argile peu plastique. Le programme d'essais mécaniques comprend des essais triaxiaux consolidés non drainés en compression et en extension, à basse pression et à haute pression (jusqu'à 3 MPa). Le programme comprend aussi des essais triaxiaux à chargements proportionnels. Le programme est complété par des essais oedométriques KO à haute pression (jusqu'à 3 MPa). Les courbes contrainte-déformation et les chemins de contraintes permettent d'identifier les principaux paramètres mécaniques de l'argile surconsolidée, en particulier les modules de déformation sous les différents types de chargements. Il apparaît un bon accord entre les consolidations triaxiales et les chargements oedométriques de l'argile. Sur le plan des résistances, les cisaillements en compression et en extension, les chemins proportionnels et les chemins KO permettent de délimiter le domaine pseudo-élastique de l'argile par une courbe d'état limite. Cette limite ne s'exprime pas nettement comme une frontière étroite du côté des pressions isotropes, mais plutôt comme une zone de transition, en l'absence de pressions de préconsolidation marquées de l'argile surconsolidée. Comme il est souvent observé avec les terrains testés dans leur état naturel, les propriétés mécaniques de l'argile sont dispersées. Néanmoins et à l'issue de ce programme expérimental, il apparaît que les traits principaux du comportement des sols indurés se manifestent aussi pour cette argile.

Mots clefs : haute pression, oedomètre, triaxial, argile, laboratoire, Essais, état limite

62. Identification des propriétés élastiques d'une argile remaniée par propagation d'ondes ultrasonores sur chemins triaxiaux complexes

Ighil Ameur Lamine¹, Robin Guillaume¹, Hattab Mahdia¹

1 - Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux – Université Lorraine

L'objectif de cette recherche est d'analyser l'endommagement dans une éprouvette argileuse sous chargement triaxial à différents chemins et niveaux de contrainte. L'endommagement progressif du sol affecte les propriétés élastiques du matériau, celles-ci peuvent être approchées par la mesure des vitesses d'ondes ultrasonores que l'on sait sensibles à la variation des caractéristiques élastiques du matériau (Hall et al., 2007). Un système d'investigation expérimental original a été développé au laboratoire qui permet de mesurer la vitesse d'onde de compression dans un échantillon d'argile saturée. L'approche expérimentale consiste dans un premier temps à réaliser sur des éprouvettes d'argile remaniée saturée, normalement consolidées ou surconsolidées, différents chemins triaxiaux drainés (isotropes, $\bar{\sigma}^2/3 = \text{constante}$ et $p' = \text{constante}$). Des échantillons provenant d'éprouvettes ainsi sollicités sont ensuite récupérés pour des essais ultrasons. Les essais ultrasons sont réalisés après déchargement mécanique de l'éprouvette. Les résultats obtenus montrent que la vitesse d'onde est influencée par le sens de la déformation volumique lors du chargement mécanique (comportement contractant ou dilatant du matériau).

Mots clefs : anisotropie, déformation localisée, endommagement, propagation ultrasonore, chemin triaxial, argile, module élastique dynamique

[illegible]

63. Valorisation des sédiments du barrage Taksebt (Algérie) dans les corps de chaussées

Boudlal Omar¹, Ferri Nassima¹, Khattaoui Mohammed¹, Idres Saadia¹, Ouerd Ryma¹

1- Laboratoire de recherche en géomatériaux, Environnement et Aménagement. Département de génie civil, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (Algérie)

Le travail réalisé a pour objectif, la valorisation des sédiments du barrage de Taksebt dans la construction routière en Algérie. Pour ce faire, des échantillons en mélanges de granulats routiers et de sédiments sont reconstitués au laboratoire, soumis ensuite à plusieurs types de sollicitations mécaniques. Les essais réalisés ont montré des résultats très intéressants, notamment pour des proportions de sédiments entre 5 et 10 %.

Mots clefs : corps de chaussées., valorisation, mélanges, granulats routiers, Sédiments de barrage

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue or grey ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are approximately 20 lines visible. The paper has a slight shadow on the right side, suggesting it's resting on a surface.

64. Description rhéologique du gonflement des bentonites naturelles et calcique activée

Barast Gilles¹⁻³, Razakamanantsoa Andry Rico², Djéran-Maigre Irini¹, Williams David³

1 – LGCIE, Université de Lyon, INSA de Lyon, 2 – IFSTTAR, 3 – University of Queensland (Australie)

La bentonite constitue la composante principale des matériaux utilisés pour la conception des barrières de faible perméabilité. La perméabilité est alors le paramètre clé de conception et de dimensionnement. La durée de sa mesure est longue. Des indicateurs de performances ont été développés pour palier à ce problème. On distingue en particulier l'essai de gonflement libre. Or, malgré la facilité de mesure de ce paramètre, son usage est limité uniquement à la qualification du potentiel de performance du matériau. De plus, les ingénieurs ont besoin de paramètres quantitatifs de dimensionnement pour la conception de ces ouvrages et ce paramètre peut en être un candidat très utile. On se propose d'utiliser la rhéologie pour décrire les propriétés de gonflement de différents types de bentonite : sodique naturelle, calcique naturelle et activée. Les mesures rhéologiques sont effectuées dans des conditions statiques et dynamiques. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus avec l'essai de gonflement à l'oedomètre (état solide) et ceux du gonflement libre (état liquide). Le gonflement, pour tous les essais, est modélisé à l'aide du ratio de gonflement, qui permet de décrire l'état d'imbibition des particules de bentonites. Ce modèle simple est proposé pour permettre la comparaison des résultats issus des essais rhéologiques à l'état liquide, et ceux obtenus à partir de deux des essais de gonflement, un à l'état liquide et l'autre à l'état solide. Les résultats montrent une bonne concordance entre l'indice de gonflement libre et les paramètres rhéologiques de la bentonite. Le ratio de gonflement permet de mettre en évidence la différence de la minéralogie entre les bentonites. De faibles corrélations sont observées entre le ratio à l'oedomètre et le ratio rhéologique. Par contre, une bonne corrélation est observée entre le ratio de gonflement libre et le ratio de gonflement rhéologique à l'état statique plutôt qu'à l'état dynamique.

Mots clefs : rhéologie, gonflement oedométrique, indice de gonflement libre, bentonite calcique activée, bentonite naturelle, ratio de gonflement

65. Modélisation de la fissuration hydrique du sol argileux par la méthode fissure cohésive

Vo Thi Dong¹, Pouya Ahmad², Hemmati Sahar¹, Tang Anh Minh²

1 - IFSTTAR, 2 - ENPC

La fissuration sous l'effet de l'évaporation est un phénomène courant dans les sols, surtout les sols argileux. La présence des fissures augmente en effet la perméabilité effective du milieu et le réseau des fissures forme des chemins préférentiels d'écoulement. La fissuration dans les remblais ou les barrages en terre affecte aussi leurs propriétés de résistance mécanique et peut conduire à des problèmes d'instabilité de ces ouvrages. Les mécanismes essentiels de l'initiation et de la propagation des fissures hydriques ne sont pas bien compris dans la littérature et par conséquent, la méthode pour prédire, contrôler ou éviter de la fissuration hydrique reste encore une question ouverte. L'objectif principal de cette recherche est d'étudier l'évolution des champs des suctions de déformation dans un sol argileux ainsi que l'initiation et la propagation des fissures sous l'effet d'évaporation en utilisant le code aux éléments finis 2D Porofis. Pour la modélisation, des interfaces d'épaisseur nulle ont été mise en place dans le modèle de l'éprouvette et la loi constitutive des fractures cohésives a été adoptée pour simuler le développement des fissures en fonction du temps. L'interaction entre les fissures est pleinement prise en compte. La comparaison entre la simulation numérique et des données expérimentales existant permet de calibrer les paramètres et de valider du modèle. Le modèle a permis de prédire la manière satisfaisante l'espacement moyen des fissures qui est un paramètre important pour modéliser les effets de la fissuration les propriétés mécaniques et hydrauliques.

Mots clefs : propagation des fissures, pression capillaire, évaporation, dessiccation, modélisation numérique, sol non saturé

66. Comportement des bétons de sol soumis aux cycles humidification/séchage **Helson Olivier¹, Beaucour Anne-Lise¹, Eslami Javad¹, Noumowé Albert¹, Gotteland Philippe²**

1 - Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil, 2 - Direction Technique Recherche

Le soil-mixing et le jet-grouting permettent de mélanger directement le sol en place avec un liant afin de réaliser des éléments structuraux dédiés à reprendre des charges (pieux) ou remplissant des fonctions d'étanchéités (panneaux). Ces procédés intéressent les industriels pour leurs avantages économiques et s'accordent avec les nouvelles exigences environnementales. Cependant contrairement aux matériaux préfabriqués, à cause des incertitudes liées à l'hétérogénéité des sols, aux conditions environnementales et à la qualité du malaxage sur chantier, il est difficile de prédire les propriétés du matériau obtenu. Seul le type et la quantité de liant, la valeur d'E/C, et l'énergie de malaxage peuvent être adaptés selon le cahier des charges. La granulométrie (argile) et les constituants indésirables du sol (matière organique, pollution) sont eux plus délicats à contrôler. Aujourd'hui, il est difficile de proposer à partir de la littérature des seuils à ne pas dépasser. Il existe peu d'études paramétriques, faisant varier les constituants du sol, et reliant les propriétés de formulation aux propriétés physico-mécaniques. De plus, la question de la durabilité de ces matériaux se pose, afin de valider la pérennité des ouvrages. Les travaux de recherche en cours, concernent plusieurs formulations constituées de sable, d'argile, de ciment et d'eau. Différents taux de substitution de sable par l'argile et deux dosages en ciment sont testés. L'objectif est d'analyser l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés mécaniques et d'évaluer le potentiel de durabilité des bétons de sol. Les résistances en compression sont déterminées en conditions de cure endogène en fonction du temps et en condition de vieillissement accéléré au fil de cycles humidification/séchage. Les indicateurs de durabilité sont également déterminés (porosité et perméabilité à l'eau). Les résultats montrent qu'au-delà de 10 % d'argile dans le sol, une quantité plus importante de ciment est nécessaire pour conserver une durabilité adéquate.

Mots clefs : ciment, résistance en compression, durabilité, soil-mixing, argile

67. Considérations pratiques autour de modèles numériques de certaines gares du futur grand Paris

Chapron Gilles¹, Nejjar Khadija², Cuiira Fahd¹, Le Bissonnais Hervé¹

1 - TERRASOL, 2 - Laboratoire 3SR

Lors des études d'avant-projet et de projet du tronçon Sud-Ouest de la ligne 15 du Grand Paris, la réalisation de modèles éléments finis a été privilégiée et systématisée pour le dimensionnement des gares, particulièrement profondes (autour de 40 mètres). Nous présentons des illustrations de certains constats et propositions formulées à cette occasion, en lien en particulier avec le comportement non drainé et la justification de la stabilité du massif en butée.

Mots clefs : comportement non drainé, soutènement, interaction sol structure, modélisation, défaut de butée

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins or other markings on the paper.

Bel Justin¹, Branque Denis¹, Wong Henry¹, Viggiani Giulia², Losacco Nunzio²

1 - École Nationale des Travaux Publics de l'État, 2 - Department of Civil Engineering [Rome]
(Italie)

Dans le cadre du projet Européen NeTTUN, une importante campagne expérimentale sur modèle réduit de tunnelier vise à étudier l'impact du creusement d'un tunnel en terrain meuble sur des fondations profondes avoisinantes. Dans cet article, le modèle réduit de tunnelier à pression de terre est brièvement décrit et des résultats clefs concernant l'interaction tunnel-pieu-sol sont présentés dans le cas d'un pieu situé à l'aplomb du tunnel.

Mots clefs : creusement de tunnel en terrain meuble, fondation profonde, tunnelier à pression de terre, interaction tunnel, sol, pieu

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue or grey ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are approximately 20 lines visible. The paper has a slight shadow on its right side, suggesting it's resting on a surface.

69. Calcul des tunnels au tunnelier sans taux de déconfinement : est-ce possible, voire souhaitable ?

Demay Bruno¹

1 - GEOTUN

Les progrès récents réalisés dans l'utilisation des tunneliers posant des voussoirs permettent d'envisager aujourd'hui la réalisation de projets de tunnels jugés autrefois impossibles à réaliser pour cause de conditions géologiques trop difficiles. On assiste ainsi à une extension du domaine d'utilisation de ces machines vers des projets de tunnels longs, profonds, à forte couverture et/ou à forte charge hydraulique, creusés dans des terrains souvent difficiles, ayant tous pour caractéristiques communes des délais de réalisation courts. Cette extension du domaine d'emploi des tunneliers à voussoirs remet en cause certains concepts usuels de dimensionnement des tunnels creusés avec ces machines. Cette communication présente à partir de quelques exemples-types, une méthode de pré-dimensionnement du revêtement basée sur le concept fondamental de la convergence des terrains limitée de fait par la présence du tunnelier agissant comme un soutènement provisoire. En fonction des caractéristiques géométriques de la machine, et en fixant des hypothèses géotechniques réalistes, on peut ainsi évaluer rapidement le risque de blocage de la machine, de sous-dimensionnement du revêtement ou encore d'un tassement excessif des terrains sus-jacents. On montre ainsi que le calcul du revêtement en voussoirs via l'évaluation du taux de déconfinement est un problème complexe dépendant de nombreux facteurs comme le confinement au front de taille, les dimensions géométriques du tunnelier, la pression d'injection du mortier de bourrage... Afin de s'affranchir des difficultés liées à la détermination du taux de déconfinement, on présente ensuite un concept de calcul par la méthode des éléments finis établi à l'aide du logiciel PLAXIS permettant de simuler les différentes phases du creusement : excavation avec confinement, passage du tunnelier, injection du mortier de bourrage, pose du revêtement, comportement à long terme avec dissipation des surpressions hydrostatiques... et donc ne faisant pas appel à une valeur explicite du taux de déconfinement.

Mots clefs : taux de déconfinement, confinement, convergence, voussoir, tunnelier, tunnel, éléments finis

90. Simulation numérique avec CESAR d'essais en centrifugeuse sur des modèles de front de taille renforcés par boulonnage

Hounyevou Klotoe Eirel Cedric¹, Bourgeois Emmanuel¹

¹ - IFSTTAR [Marne-la-Vallée]

Le renforcement par boulonnage du front de taille est très couramment utilisé sur les chantiers de tunnels creusés à faible profondeur dans les terrains meubles. Cette technique permet de préserver la stabilité de l'excavation, d'une part, et de contrôler les déformations du front de taille et les tassements en surface, d'autre part. Bien que la technique soit très répandue, il n'existe pas encore véritablement d'outils fiables pour le calcul des déplacements ni de méthodes de dimensionnement validées, et les connaissances actuelles sur la réponse au creusement du front boulonné demeurent restreintes. Dans ce contexte, les essais en centrifugeuse sur modèle réduit, constituent un moyen privilégié d'investigation du fonctionnement du renforcement, plus simple et plus économique à mettre en œuvre que l'instrumentation du front de taille pour un ouvrage réel. L'objectif de ce travail est de simuler numériquement avec CESAR-LCPC, les essais en centrifugeuse sur des modèles de front de taille renforcés par boulonnage (Al Hallak, 1999). Pour ce faire, deux modèles de calculs (discrétisé, homogénéisé) tridimensionnels sont réalisés. Dans le premier, on représente les boulons dans le front de taille par des éléments de barre (qui prennent en compte le frottement entre le sol et le boulon). Les calculs homogénéisés utilisent le modèle développé par Sudret et Buhan dans la zone renforcée par les boulons. Le résultat des calculs discrétisés (avec prise en compte du glissement relatif des boulons par rapport au massif de sol) reproduisent mieux les déplacements mesurés dans la centrifugeuse que les calculs homogénéisés (pas de prise en compte du frottement entre boulons et massif de sol), en particulier à la fin des essais

Mots clefs : stabilité, excavation, front de taille, centrifugeuse, boulonnage, tunnel

71. Analyse de la convergence à long terme des galeries dans l'argilite du Callovo-Oxfordian

Guayacán-Carrillo Lina-María^{1,2}, Sulem Jean², Noiret Aurélien¹, Seyedi Darius¹, Ghabezloo Siavash², Armand Gilles¹

1 - Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs, 2 - Laboratoire Navier

Dans le Laboratoire Souterrain de Meuse / Haute-Marne (LSM/HM) construit par L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), le suivi de la zone fracturée induite par l'excavation autour des galeries a révélé que la distribution des fractures dépend à la fois de l'orientation de la galerie et du champ de contraintes in-situ (Armand et al. 2014) et que celle-ci a une influence importante sur le mode de déformation des galeries. Ainsi, les mesures de convergence ont montré une fermeture anisotrope en fonction de la direction d'excavation (Armand et al. 2013.). L'évolution dans le temps de la convergence des parois des galeries, avec différents diamètres (0,7 m, 3,8 m et 5,2 m), est analysée à l'aide de la loi semi-empirique proposée par Sulem et al. (1987). Cette méthode permet de distinguer deux effets : l'effet de l'avancement du front de taille et la réponse différée du massif. L'analyse des convergences dans des galeries à 5m de diamètre montre qu'un jeu unique de paramètres peut être établi (indépendamment de l'orientation d'excavation) pour décrire la fermeture dans le temps des galeries (Guayacán-Carrillo et al. 2015). Pour les galeries ayant d'autres diamètres, l'analyse montre que les paramètres décrivant le comportement différé de la galerie (temps caractéristique de fluage et rapport de la convergence à long terme sur la convergence instantanée) sont indépendants de la taille de l'excavation. Les valeurs de ces paramètres peuvent être utilisées pour des prévisions fiables de l'évolution de la convergence à long terme des différents types de galeries.

Mots clefs : argilite du Callovo-Oxfordien, galeries souterraines, anisotropie, effets d'échelle, déformation des tunnels, convergences

Pouya Ahmad¹, Trivellato Edoardo^{2,1}, Seyedi Darius², Vu Minh Ngoc²

1 - Laboratoire Navier, 2 - Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs

Les zones endommagées rencontrées autour des ouvrages profonds dans les roches quasi-fragiles montrent parfois des formes et étendues qui ne peuvent pas être expliquées par des approches classiques en élastoplasticité. Nous montrons ici qu'un phénomène d'instabilité et de bifurcation du matériau élastique-fragile peut être à l'origine de ces particularités géométriques. Nous comparons les résultats obtenus pour la géométrie de la zone endommagée à l'aide de deux modèles radoucissants, dont un élastoplastique et l'autre endommageable. Nous montrons que le modèle à endommagement radoucissant, dont les paramètres sont ajustés à partir des données expérimentales sur une roche quasi-fragile, permet d'approcher dans une certaine mesure la forme et l'étendue de la zone endommagée autour des galeries profondes dans ces roches.

Mots clefs : instabilité, matériaux quasi-fragiles, radoucissement, zone endommagée, plasticité, endommagement, modélisation numérique

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue or grey ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are approximately 20 lines visible. The paper has a slight shadow on the right side, suggesting it's resting on a surface.

73. Apport de l'essai cyclique à la classification pressiométrique des sols

Baud Jean-Pierre¹

1 - Eurogé

La classification Pressiorama® des sols par les résultats pressiométriques Ménard (Baud 2005) est utilisable (Baud & Gambin 2011, 2013, Reiffsteck et al. 2013, Monnet 2015, Tarnawski 2015). Son principe est lié à la courbure de l'hyperbole pressiométrique, reflétant directement le coefficient rhéologique alpha de Ménard. L'utilisation des essais cycliques à un cycle (norme XP P94-110-2) ou à 3 cycles (mode opératoire Ménard) a rarement jusqu'ici été utilisée de façon systématique, pour des raisons diverses, manque de demande des donneurs d'ordre, peu d'intérêt des géotechniciens n'ayant pas l'usage d'un module cyclique absent des textes normatifs, mais aussi et peut-être surtout, relative difficulté de réalisation de ces essais par l'opérateur. La programmation des essais cycliques au pressiomètre automatique Géopac®Apagéo rend opérationnelle leur réalisation en reconnaissances de routine. L'accroissement du nombre de données [EM, Ec1 ou Ec3, p*LM, p0] apporte alors, dans tous types de sols une mesure directe du coefficient rhéologique selon sa définition d'origine (Ménard & Rousseau, 1961). Les analyses théoriques qui nécessitent une approche du module en phase initiale de l'essai, réputé assimilable à un module d'Young « linéaire élastique », s'en trouvent facilitées, et les concepteurs pourront tirer de tels essais « complets » les caractéristiques intrinsèques de sol (Monnet, 1997, 2013). L'essai cyclique permet une autre approche de la classification pressiométrique des sols et des roches. L'objection (Reiffsteck et al. 2013) que les deux axes EM/p*LM et p*LM font intervenir concurremment la pression limite, se trouve levée lorsqu'on reconsidère le diagramme avec deux axes EM/Ec & p*LM/p0, indépendants, adimensionnels et mesurés au cours d'un même essai cyclique normalisé. Comme avec l'hypothèse émise (Baud & Gambin 2013) sur la relation entre alpha, EM, p*LM, p0, on retrouve dans ce diagramme la gamme des sols mous aux roches, différenciée selon leurs paramètres d'état.

Mots clefs : pressuremeter state parameters, soils and rocks classification, cyclic vs first load modulus, cyclic test, PMT, Ménard pressuremeter

74. Mise en place d'un paramètre composé facilitant l'interprétation des paramètres de forage

Reboul Michaël¹, Frossard Margot¹

1 - TECHNOSOL

Lors du processus de forage destructif, les variations des paramètres de fonctionnement de la machine ou diagraphies, telles que celles de la vitesse d'avance des tiges, de la pression appliquée sur l'outil, de la pression du couple de rotation, etc. peuvent être enregistrées. L'observation de la variation de ces paramètres peut permettre de repérer les différentes transitions des couches de sols ou de roches. Cependant, l'interprétation de ces enregistrements reste tout de même complexe étant donné le nombre important de facteurs qui peuvent influencer sur leur valeur. Cet article présente la démarche de mise en place d'un nouveau paramètre composé, qui tient compte notamment du calage des paramètres initiaux de la foreuse considérée et qui combine plusieurs paramètres de fonctionnement ce qui permet de réduire l'impact de la variation de l'un de ces paramètres sur les autres. Ce paramètre a été appliqué avec succès sur différents chantiers de sondage, en facilitant l'interprétation des forages destructifs et en permettant de mieux mettre en évidence les changements lithologiques rencontrés lors du forage.

Mots clefs : paramètre composé, diagraphie, enregistrement des paramètres de forage, forage destructif, sondage

[illegible]

75. Prédiction automatique de la nature du profil géotechnique à partir d'essai de pénétration dynamique Panda2 et de la méthode des réseaux de neurones artificiels Sastre Carlos¹, Breul Pierre², Benz Miguel Angel¹, Bacconnet Claude², Gourvès Roland¹

1 - Sol Solution, 2 - Université Blaise Pascal, Laboratoire de Génie Civil

Le pénétromètre Panda, pénétromètre dynamique léger à énergie variable, fournit un pénétrogramme représentant l'évolution de la résistance de pointe du sol en fonction de la profondeur avec un pas de mesure assez fin (de l'ordre de 5 mm). Cette finesse d'acquisition permet d'obtenir un signal sensible à la nature des matériaux traversés. Néanmoins l'essai est dit aveugle puisque aucun n'échantillon n'est prélevé durant l'essai et qu'il ne permet pas de caractériser la nature des terrains traversés. Le but de ce travail est de proposer une méthodologie automatique pour la prédiction de la nature du profil géotechnique à partir de l'analyse du pénétrogramme Panda et d'une méthode par apprentissage supervisé. Pour atteindre cet objectif, il a fallu premièrement constituer une base de données d'apprentissage. Pour cela, on a construit une base de données des essais Panda2® réalisés à côté d'un forage ou d'un carottage ou en laboratoire au sein de moules de calibration sur des matériaux connus, pour nous permettre d'établir le lien entre nature des matériaux et le signal pénétrométriques. Une fois cette base de données constituée, une vingtaine de paramètres, développés notamment pour l'analyse du signal de la voix humaine ou des signaux électromyographiques, ont été analysés en vue de caractériser la signature de chaque signal pénétrométrique. Ces paramètres constituent les entrées du réseau de neurones utilisé par la suite. Une étude d'optimisation a été réalisée pour choisir la meilleure configuration et architecture du réseau. Une caractérisation complète des matériaux n'étant pas réaliste, le réseau de neurones a été éduqué pour pouvoir différencier 4 classes de sols différentes sur la base de critères granulométriques. Finalement, le réseau de neurone défini avec une topologie « Perceptron Multicouche » a permis un classement correct des classes de sols dans 98 % des cas sur un échantillon de plus de 200 pénétrogrammes.

Mots clefs : analyse du signale, Panda, réseaux de neurones artificiels

76. Corrélations à partir du pénétromètre statique

Jacquard Catherine¹, Boutet Claire¹

1 - FONDASOL

L'objectif de l'article est de passer en revue les différentes corrélations trouvées dans la littérature entre pénétromètre statique à pointe électrique, et un ensemble de paramètres :

- d'identification tels que la teneur en fines du sol, les limites d'Atterberg ;
- d'état tels que le poids volumique, la densité relative pour les sols granulaires, le degré de surconsolidation des sols fins ;
- mécaniques tels que l'angle de frottement interne d'un sol frottant, et la cohésion non drainée d'un sol cohérent, la pression limite mesurée au pressiomètre Ménard ;
- de déformabilité tels que module oedométrique, module pressiométrique Ménard ;
- la vitesse des ondes de cisaillement ;
- la perméabilité des sols ou le coefficient de consolidation.

Dans le cadre du diagnostic géotechnique réalisé sur un ouvrage d'un site industriel dans le nord de la France, qui présentait des tassements largement supérieurs aux prévisions initiales, nous avons effectué une analyse comparative des paramètres mécaniques et physiques mesurés sur les formations reconnues. Les mesures ont consisté en la réalisation de sondages carottés, avec essais d'identification et essais oedométriques, y compris essais de fluage ; des sondages pressiométriques ; des essais de pénétration statique à la pointe piézocône. Nous avons également utilisé les mesures effectuées sur le site de plusieurs projets sur lesquels on avait à la fois des mesures de cross-hole, des essais pressiométriques et des essais de pénétration statique. L'article s'attachera à commenter l'application ou non des corrélations aux cas de figures étudiés, et de proposer des limites d'utilisation de certaines corrélations.

Mots clefs : corrélations, pénétromètre statique

77. Prise en compte du fluage dans l'analyse des mesures pour la prévision de tassements résiduels

Favre Marc¹, Vermoote Eric¹

1 - GEOS

Le suivi du tassement des ouvrages construits sur des sols fins, prévu généralement pour lever les incertitudes liées à ce problème, peut se révéler également incertain, selon la méthode employée, et si l'ensemble des phénomènes n'est pas pris en compte. En intégrant l'équation propre au tassement secondaire, qui est fonction du logarithme du temps, dans les équations déjà reconnues pour retrouver le tassement primaire, notamment exponentielles (Recordon), le fluage est pris en compte et permet de mieux approcher la courbe de déplacement en fonction du temps avec les mesures. Il est fait l'hypothèse que la consolidation du sol résulte de la superposition du phénomène de consolidation primaire et du phénomène de fluage. La superposition de ces deux phénomènes conduit ainsi à distinguer deux intervalles de temps distincts : $I_1 = [0, t_0]$, correspondant à la durée durant laquelle la consolidation primaire est prédominante ; au-delà de t_0 , la consolidation secondaire se superpose à la consolidation primaire puis devient prédominante.

Mots clefs : consolidation, tassement, fluage

[illegible]

78. Renforcement des digues de Loire par la méthode du deep soil mixing : apport des techniques géophysiques pour le contrôle

Fargier Yannick¹, Ananfouet Yannick¹, Boussafir Yasmina², Palma Lopes Sérgio³, Le Kouby Alain², Durand Edouard¹, Saussaye Lucile¹

1 - CEREMA Normandie Centre, 2 - Sols, Roches et Ouvrages Géotechniques, 3 - Auscultation et Imagerie

La préservation des ouvrages de lutte contre les inondations (digues fluviales ou maritimes), ou des digues de voies navigables, est une composante forte de la politique de développement durable. Au sein de ces ouvrages anciens, des phénomènes d'écoulements internes sont à l'origine de dégradations (érosion interne) pouvant amener à la ruine des ouvrages. Les « écrans étanches » permettent à la fois de renforcer le comportement mécanique de l'ouvrage et de diminuer sa perméabilité hydraulique ainsi que son érodabilité. La méthode dite du « soil mixing » par voie sèche consiste à mélanger le sol en place sur de grandes hauteurs à l'aide d'une trancheuse en y incorporant du liant et de l'eau. En théorie l'action de la trancheuse malaxeuse (TRENCHMIX®) doit permettre le mélange et l'homogénéisation du milieu sur toute la hauteur. Cependant, le mélange est en pratique incomplet présentant des ségrégations et donc une certaine hétérogénéité du matériau. Cette hétérogénéité peut avoir des conséquences néfastes sur les performances attendues de l'ouvrage (mauvais rapport E/C, perméabilité élevée, etc.). Dans ce cadre, plusieurs techniques géophysiques ont été testées afin de qualifier leur potentiel pour la réception et le suivi de ces ouvrages. À savoir les méthodes de tomographie sismique, électrique et radar. Trois phases distinctes impliquant des travaux en laboratoire, de modélisation numérique et in-situ ont été réalisés. En laboratoire, des mesures physiques ont été effectuées (résistivité, permittivité, vitesse des ondes P et S) sur des échantillons présentant différents dosages en ciment et différents temps de cure. Les résultats issus des trois phases de recherche ont permis de différencier le potentiel de contrôle et de suivi des méthodes géophysiques testées, de préciser leurs limitations et présenter des perspectives d'optimisation.

Mots clefs : modélisation, laboratoire, géophysique, soil mixing, digue, terrain

79. Planche de compactage expérimentale - Impact de différents paramètres sur le bon compactage des sols fins

Pelizzari Benjamin¹, Mahmutovic Dino², Boutonnier Luc², Salager Simon¹, Bufalo Maurice³, Gavois Ludovic⁴

1 - Sols, Solides, Structures-Risques, 2 - EGIS GEOTECHNIQUE, 3 - Valérien, 4 - Vinci

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 sols lors du compactage ». Une planche de compactage a ainsi été réalisée dans le cadre de ce projet de recherche sur des matériaux marneux de l'autoroute A304. Les principaux résultats sont présentés dans cette communication. Plusieurs paramètres comme le type de matériel utilisé (cylindre lisse ou pied dameur), le nombre de passes de terrassement, l'état hydrique des matériaux en place (sec, moyen ou humide), ainsi que le type de mouture (intacte ou pulvimixée) sont analysés au travers de valeurs de résistance de pointe (d'essais pénétrométriques de type Panda 2), de mesures de succion ainsi que des valeurs de densité sèche.

Mots clefs : surcompactage, pathologies de terrassement, planche de compactage, succion

[illegible]

80. Essais géotechniques de terrassement et succion : quelques enseignements pratiques

Boutonnier Luc¹, Mahmutovic Dino¹, Andrianatrehina Rinah², Branque Denis³, Dubreucq Thierry⁴, Fleureau Jean Marie⁵, Fry Jean-Jacques⁶, Pelizzari Benjamin⁷, Taibi Said², Salager Simon⁷

1 - EGIS GEOTECHNIQUE, 2 - Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, 3 - École Nationale des Travaux Publics de l'État, 4 - Terrassements et Centrifugeuse, 5 - ECP, 6 - Centre d'Ingénierie Hydraulique [Savoie Technolac], 7 - Laboratoire sols, solides, structures - risques [Grenoble]

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 sols lors du compactage ». Son objectif est de déterminer l'influence de la succion sur les essais de terrassement classiques utilisés dans la profession afin de mieux appréhender le comportement à court terme et long terme des ouvrages. Ainsi les résultats d'essais Proctor, d'essais de compression simple (R_c), et d'Indice Portant Immédiat (IPI) sont analysés au travers des mesures de succion, degré de saturation, et teneur en eau. Des porosimétries mercure viennent également compléter l'éventail des essais réalisés. Quatre sols différents sont ainsi analysés : deux marnes provenant du chantier de l'autoroute A304 (Charleville Mézières), un sable limoneux provenant du barrage de livet Gavet (Isère) ainsi qu'une argile très plastique provenant du chantier LGV SEA.

Mots clefs : terrassement, essais, succion

81. Développement d'un modèle théorique permettant de reproduire le comportement des sols proches de la saturation - application à des essais de laboratoire de terrassement

Mahmutovic Dino¹, Boutonnier Luc¹, Andrianatrehina Rinah², Taibi Said², Monnet Jacques³, Dubreucq Thierry⁴

1 - EGIS GEOTECHNIQUE, 2 - Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, 3 - Gaiatech, 4 - Terrassements et Centrifugeuse

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 « développement d'un modèle théorique » dont l'objectif est de modéliser le comportement des sols proches de la saturation, avec la prise en compte dans un code de calcul numérique. Cet article est la suite de la communication consacrée à la description du modèle et à sa validation sur des essais oedométriques et triaxiaux. Ici, l'objectif est d'étendre le champ des essais de validation à des essais de terrassement comme les essais d'Indice Portant Immédiat (IPI) du côté humide de l'optimum Proctor. Le bien-fondé de l'approche théorique coté sec de l'optimum Proctor (air libre) est aussi analysé à la lumière des corrélations de Dubreucq (2015).

Mots clefs : succion, essais de terrassement, domaine quasi-saturé, loi de comportement, modélisation

82. Relations entre les paramètres hydromécaniques et la résistance à l'érosion interne des sols fins traités

Mehenni Abdelwadoud¹, Cuisinier Olivier², Masrouri Farimah², Lavallée Emmanuel¹

1 - Bouygues Travaux Publics, 2 - Laboratoire d'énergétique et de mécanique théorique et appliquée

Les sols employés pour la réalisation d'ouvrages hydrauliques doivent répondre à des performances hydriques, mécaniques et d'érodabilité. Cependant, les sols disponibles dans l'emprise des ouvrages ne répondent pas souvent aux critères requis. Le traitement des sols peut être utilisé pour faciliter la mise en œuvre des matériaux très humides et pour améliorer les performances mécaniques et/ou hydriques des sols. Cependant, l'impact du traitement sur l'érodabilité des sols reste moins maîtrisé et moins documenté. Cet article vise à quantifier l'impact de différents traitements sur le comportement hydromécanique et la résistance à l'érosion interne des sols fins, ainsi que la détermination des relations entre ces paramètres. Le sol étudié est un limon fin du Bassin Parisien traité avec différents produits (chaux, ciment, kaolinite et bentonite), avec différents dosages et temps de cure. La caractérisation du comportement hydromécanique a été basée sur des mesures de résistance à la compression simple et de conductivité hydraulique. Un dispositif d'érosion interne HET optimisé a été développé pour déterminer les paramètres d'érosion interne des sols traités. La méthode d'analyse a aussi été modifiée afin d'intégrer l'impact de l'évolution de la forme réelle du conduit d'érosion dans l'éprouvette. Les résultats de l'étude montrent que la nature du produit de traitement détermine les modifications et les améliorations des paramètres du sol. Selon chaque produit, ses améliorations se traduisent par une baisse de la conductivité hydraulique, une augmentation de la résistance mécanique, et une augmentation de la résistance à l'érosion interne. Le dosage utilisé influence l'ampleur de ces améliorations. Les résultats montrent aussi que la contrainte critique déterminée par le HET est liée à la résistance à la compression simple du sol. Ces améliorations des performances du sol ont été mesurées à court terme et des études à long terme restent nécessaires pour valider la durabilité de ces performances initiales.

Mots clefs : conductivité hydraulique, HET, bentonite, kaolinite, ciment, contrainte critique, chaux, érosion interne

83. Développement d'un nouvel essai de caractérisation de l'érodabilité des sols - Le « Wheel Erosion Test » (WET)

Ndoye Ousseynou¹, Chevalier Christophe¹, Reiffsteck Philippe¹, Fanelli Sonia¹, Minatchy Carlos¹, Pham-Van-Bang Damien²

1 - Sols, Roches et Ouvrages Géotechniques, 2 - Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant / Saint-Venant Laboratory for Hydraulics

L'étude du mécanisme érosif est un sujet très complexe, surtout quand il s'agit de faire des mesures sur site (sol immergé et non remanié). Plusieurs dispositifs comme des érodimètres à jet(s) [Hanson, Appl Eng Agric 2004; Reiffsteck et al., ICSE6 2012], l'EFA « Erosion Function Apparatus » [Briaud et al., JGGE 2001] ou l'essai d'érosion de trou (HET - « Hole Erosion Test ») [Chevalier et al., ICSE5 2010; Haghighi et al., JGGE 2013 ; Wan and Fell, JGGE 2004] ont été développés pour mesurer l'érodabilité d'un sol. Il est très difficile cependant de faire une corrélation entre les résultats des essais, bien contrôlés, en laboratoire et ceux des essais, plus simples, réalisés sur site. De plus, ces essais ne sont pas réalisables en condition immergée. Pour résoudre ces limites, un nouvel essai a été développé, le « Wheel Erosion Test ». L'essai consiste en une roue cylindrique immergée qui tourne autour de son axe horizontal au-dessus d'une couche de sédiments. La rotation de la roue génère un écoulement et par conséquent une contrainte sur la surface de sol qui, une fois atteint le seuil minimum d'érosion va créer une fosse d'érosion. L'appareillage actuellement en développement comprend un aquarium rempli d'eau et de sédiments et d'une charpente qui supporte la roue., Le dispositif permet de faire tourner la roue à différentes vitesses et positions verticales par rapport au lit de sédiment, ce qui permet de modifier les conditions d'application de la contrainte sur le sol. Les caractéristiques de la fosse d'érosion, qui permettent de connaître l'érodabilité du sol, sont déterminées grâce à des mesures acoustiques et optiques. La communication présentera les premiers essais réalisés sur du sable de Fontainebleau et sur un mélange sable-argile ainsi que l'instrumentation.

Mots clefs : étude paramétrique, développement expérimental, essai en laboratoire, affouillement, érosion

84. Influence d'un compacteur roulant de laboratoire sur le compactage des sols fins
Sediki Ouardia^{1,2,3}, Razakamanantsoa Andry³, Hattab Mahdia², Le Borgne Tangi⁴

1 - VINCI Construction Terrassement, 2 - Laboratoire d'étude des micro-structures et de mécanique des matériaux [Metz], 3 - IFSTTAR, 4 - Bouygues Travaux Publics

Le sujet traite le problème d'envol de poussières sur les routes non revêtues. Un défaut de compactage du sol peut en effet favoriser l'envol des particules fines qui constitue un danger sur le chantier à cause des nuisances sanitaire et sécuritaire. L'une des questions posées consiste à établir le lien entre l'envol des particules et le compactage des sols. La première partie de cette recherche concerne l'étude au laboratoire de l'efficacité du compactage sur un sol fin en fonction du procédé adopté. Un nouveau dispositif de compactage original appelé compacteur de plaques (CP) est proposé. Il présente l'avantage de reproduire des sollicitations proches à celles appliquées par les engins de compactage in-situ. Le présent travail tente d'appréhender l'influence du dispositif de compactage sur le comportement du sol et d'analyser la pertinence des résultats de compactage par rapport au dispositif Proctor pris comme référence. La discussion portera sur l'équivalence entre les deux dispositifs sur les questions relatives aux conditions de fabrication des éprouvettes, à la distribution des contraintes et aux paramètres hydromécaniques des matériaux en liaison avec leur potentiel d'envol. Les premières observations semblent aller dans le sens d'une cohérence des résultats issus du dispositif CP et ceux de l'essai Proctor.

Mots clefs : sols non saturés, sols fins, outil de compactage, compactage

[illegible]

85. Fondation d'un IGH en environnement contraint
Cazes Emilie¹, Bergère Anne¹, Cuira Fahd¹, Simon Bruno¹
1 - TERRASOL

Cet article présente les études de conception des fondations d'une tour de grande hauteur (la Défense) et la méthodologie de calcul adoptée. Le projet est implanté sur une dalle au-dessus de la RN192. La mise en œuvre de ses fondations se fera sans interruption du trafic. Ces contraintes ont motivé le recours à des fondations sur files de micropieux ainsi qu'une file de contreforts pour reprendre les efforts horizontaux. Les fondations sont ancrées dans les Marnes et Caillasses du Lutétien, juste au-dessus de la dalle du Calcaire Grossier et des sols argileux de l'Yprésien, dont le comportement impacte les tassements de la tour à long terme. L'étude PRO s'est appuyée sur une synthèse approfondie des données de sol : l'accent a été mis sur la détermination des modules de déformation, à partir de nombreux types d'essais et du retour d'expérience sur les tours avoisinantes du quartier. Ces modules constituent les données d'entrée de l'étude et sont évalués en cohérence avec le modèle de calcul adopté et les déformations attendues. Un modèle global de calcul 3D a ensuite été construit : les files de fondations sont modélisées par des éléments de volume équivalents calés grâce à des modèles très fins du comportement des micropieux et de leur effet de groupe. Ce modèle permet de définir la matrice d'interaction sol-structure pour le système de fondation, valable dans un domaine de chargement précis. L'utilisation d'une telle matrice permet d'optimiser les échanges avec les ingénieurs structure et d'obtenir une cuvette de tassement similaire entre le modèle de sol et le modèle de structure, dès la première itération, dont le tassement maximum calculé est de l'ordre de 3 à 4 cm à long terme.

Mots clefs : micropieux, interaction sol structure, modules de déformation, grande hauteur, matrice de souplesse

86. Conception et dimensionnement des fondations d'un Immeuble de Grande Hauteur en milieu karstique - Le futur palais de justice de Paris **Beaussier Alexandre¹, Reiffsteck Philippe²**

1 - TERRASOL, 2 - IFSTTAR

Situé dans le quartier des Batignolles dans le 17^{ème} arrondissement de Paris, le bâtiment est constitué d'une superstructure se développant sur 19, 29 et 39 niveaux disposés en gradins. Culminant à 160 m, cette superstructure vient s'enchâsser au sein d'une structure sur six niveaux s'ajustant sur la traditionnelle cote du plafond Haussmanien. D'un point de vue géologique et géotechnique, sous les remblais et alluvions anciennes de la Seine, le substratum du site est constitué des formations antéludiennes, sièges des karsts gypseux des Calcaires de Saint Ouen et des Marnes et Caillasses. La conception des fondations de ce bâtiment aura eu pour défis : le contrôle des tassements différentiels entre les trois niveaux de l'immeuble de grande hauteur (IGH) ainsi que la limitation des tassements induits par l'IGH sur les structures de 6 niveaux au sein desquelles elles s'enchâssent, le tout en contexte karstique. Issu de la dissolution du corps gypseux lutétien par lessivage lié aux circulations de la nappe lutétienne, le karst gypseux présente un caractère aléatoire à l'échelle d'un ouvrage, conduisant à une forte hétérogénéité des caractéristiques mécaniques. Sur l'exemple concret du futur palais de justice de Paris, l'article présente comment, en phase projet, l'analyse des paramètres de foration des sondages destructifs a été utilisée pour décrire la morphologie du karst, étape nécessaire à la définition des principes de fondation, puis pour définir les paramètres de dimensionnement des ouvrages dans les terrains « karstiques ».

Mots clefs : conception, sondage, forages destructifs, paramètres de foration, fondation, gypse, karst, IGH, immeuble de grande hauteur

87. Conception et dimensionnement du puits d'accès et de la station de pompage du terminal méthanier de Dunkerque

Vidil Paul¹

1 - Solétanche-Bachy France

La construction du terminal méthanier à Dunkerque a notamment nécessité la réalisation d'une station de pompage et d'un puits d'accès servant au départ du tunnelier reliant le futur terminal méthanier à la centrale nucléaire de Gravelines. Les enceintes en paroi moulée de ces 2 ouvrages circulaires, de profondeurs et de diamètres différents, s'interceptent. Le présent article se propose de décrire les principaux points singuliers rencontrés, en matière de conception, de méthode et de dimensionnement : évaluation des poussées au repos et des caractéristiques non drainées/drainées, gonflement des argiles des Flandres, interception d'ouvrages circulaires, ovalisation liée à des poussées et butées dissymétriques, grandes ouvertures par rapport au diamètre du puits, application du Séisme Majoré de Sécurité, stabilité du fond de fouille dans les argiles sous 45 m de charges d'eau

Mots clefs : renard solide, 3D, circulaire, paroi moulée, surconsolidation, gonflement, argiles des Flandres, dissymétrie

[illegible]

88. Emploi d'ajustements statistiques pour la construction d'un modèle géotechnique pour un grand pont

Savatier Vincent¹, Nogue Sanchez Cristina²

1 - EGIS GEOTECHNIQUE - Toulouse, 2 - INSA Toulouse

Les paramètres de calcul à la rupture (terme de pointe et frottement latéral) et en élasticité (réaction sol-pieux sous sollicitation horizontale) des fondations profondes sont fonction de la moyenne des caractéristiques mécaniques du sol sur une épaisseur donnée. Le volume de terrain concerné peut être caractérisé par une hauteur notée h_n . De ce fait, dans le cas d'une campagne d'essais pressiométriques, avec une fréquence d'un essai par mètre, la détermination des valeurs caractéristiques pressiométriques peut se faire en calculant l'intervalle de confiance de la moyenne du tirage de « n » valeurs au sein d'une population préalablement ajusté à une loi statistique (loi normale ou log-normale). La valeur de n correspond alors à la partie entière de la hauteur h_n . Cette méthode est appliquée au calcul des fondations profondes du pont Jean Jacques Bosc à Bordeaux pour la détermination des paramètres de calcul à la rupture et en élasticité. L'ouvrage, d'une portée de 549 mètres, est composé de 8 piles de 44 m de large. Un sondage pressiométrique a été réalisé au droit de chaque pile en phase PRO. Ces sondages constituent la base de données de l'étude décrite dans l'article. Cet article présentera une comparaison des calculs des pieux à partir des valeurs caractéristiques obtenues par la méthode décrite dans l'article avec des estimations plus classiques (à partir de l'intervalle de confiance de la population ou mesure minimale). Sera exposée également la conséquence sur la détermination des valeurs caractéristiques, pour le dimensionnement des pieux, de la réalisation d'essais pressiométriques tous les 0,80 m ou tous les 2 m.

Mots clefs : valeurs caractéristiques, essai pressiométrique, intervalle de confiance, calcul de pieux, ajustement statistique

89. Mise en œuvre et suivi de remblai de préchargement pour la réalisation de voiries et parking d'un grand centre commercial

Folliard Damien¹

1 - FUGRO Geoconsulting

Dans la plaine d'Ametzondo proche de Bayonne et bordé par l'Adour et les Autoroutes A64 et A63, la construction d'un grand centre commercial a nécessité de recourir à des fondations sur pieux de grandes profondeurs. La mise en place des voiries et des parkings dans ce contexte de sols compressibles a nécessité la mise en œuvre de remblais de préchargement. Les reconnaissances de sol in situ et en laboratoire ont permis de construire un modèle géotechnique complexe tant sur la géométrie des formations que sur les paramètres de consolidation primaire et secondaire. Les objectifs du préchargement des voiries ont été garantis par l'application d'une méthode observationnelle adaptée au cours des travaux. La méthode observationnelle appliquée dans le cadre d'une amélioration de sol par préchargement consiste premièrement à analyser les mesures de l'instrumentation puis à caler le comportement prévisionnel sur la mesure, deuxièmement à mettre en place une/des action(s) corrective(s) s'il est avéré que les objectifs ne sont pas atteints. La communication proposée est un retour d'expérience sur la stratégie payante des investigations géotechniques à réaliser dans ce contexte et de donner un aperçu du modèle géotechnique, et aussi d'exposer les étapes importantes de la méthode observationnelle.

Mots clefs : méthode observationnnelle, consolidation, amélioration de sol, préchargement

[illegible]

70. Échelles de temps et démarche de conception du projet Cigéo

Ozanam Odile¹, Armand Gilles, Hoorelbeke Jean-Michel

1 - Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs

Le projet de stockage géologique profond de déchets radioactifs en France (projet Cigéo) renvoie à des échelles de temps inhabituelles en ingénierie. Il implique la mise en œuvre d'une démarche spécifique de conception pour répondre aux enjeux de la démonstration de sa sûreté après sa fermeture sur des durées très longues, ainsi qu'à sa réversibilité sur une durée séculaire. Cette démarche spécifique de conception implique, par des itérations successives, d'intégrer, dans les études de définition des ouvrages souterrains menées par des maîtrises d'œuvre, les acquis scientifiques et techniques (notamment au sein du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne) et les résultats des évaluations de sûreté après fermeture menées sur des durées allant jusqu'à un million d'années.

Mots clefs : conception, sûreté, durabilité, déchets radioactifs, stockage géologique, ouvrages souterrains

91. Retour d'expérience de 40 ans d'instrumentation inclinométrique sur le Réseau Ferré National

Belut Florence¹, Mandour Houcine¹, Maridet Jérémie¹, Talfumière Vincent¹

1 - SNCF RÉSEAU - Direction Ingénierie & Projets

L'instrumentation des ouvrages en terre du Réseau Ferré National permet le suivi et la surveillance des sites instables, actifs ou présentant des indices de désordre. Le suivi inclinométrique s'avère indispensable pour caractériser les désordres en profondeur puis déterminer et optimiser les actions à entreprendre. Après avoir fait appel au LCPC (IFSTTAR), SNCF a instrumenté en propre, à partir de la fin des années 1970, plusieurs centaines de sites. Des enseignements nombreux peuvent être tirés de cette expérience notamment la sensibilité des mesures à de nombreux critères, depuis la réalisation du forage jusqu'au traitement des données, qui peuvent impacter les résultats et donc leur interprétation. À ces incertitudes de mesures s'ajoutent les variations de la cinématique des mouvements liées à l'ouvrage instrumenté et à son environnement 40 années de suivi inclinométrique ont été riches en exemples précis illustrant cette sensibilité. À partir de cas d'espèce, il a été possible d'élaborer un Retour d'expérience sur les influences inhérentes à la mesure inclinométrique (appareillage, pose, mesures, opérateurs etc.) et sur l'interprétation possible des mesures en fonction de la nature et de l'origine des désordres (glissement, déversement, tassement, profondeur des désordres, etc.). Ce Retour d'expérience, objet de cet article, contribue à une meilleure interprétation de l'instrumentation inclinométrique et donc de l'évolution des mouvements affectant les ouvrages en terre. Enfin, le suivi inclinométrique ne se suffit pas à lui-même et l'article s'attachera à montrer que c'est la synthèse des données du site et des suivis qui guide l'interprétation et permet d'établir un diagnostic de l'ouvrage étudié.

Mots clefs : réseau ferroviaire, ouvrages en terre, interprétation des mesures, inclinomètre, instrumentation, désordres, surveillance

92. Études géostructurales de parois rocheuses par photogrammétrie et lasergrammétrie

Roche François¹, Guyoton Fabrice¹, Barbier Quentin¹, Vignon Violaine¹

1- GEOLITHE

Les développements des techniques de lasergrammétrie et photogrammétrie permettent de réaliser des analyses structurales à grande échelle et/ou dans des endroits très difficiles d'accès ou dangereux. La précision et la fiabilité des mesures permettent de réaliser des relevés automatiques des discontinuités. Les caractéristiques géométriques et géologiques de la structure sont extraites des auscultations réalisées à partir d'un poste informatique. Nous analysons la pertinence de données structurales obtenues dans différents contextes morphologiques et géostructuraux, d'une part à partir de modèles numériques 3D issus de levés Lidar terrestre couplé à un système photographique HD calibré et, d'autre part à partir de modèles obtenus par multi-corrélation d'images géoréférencées prises par photogrammétrie terrestre et/ou aérienne par drone. Les résultats sont comparés aux levés structuraux manuels réalisés en technique alpine. Les limites et les atouts de chacune de ces trois techniques seront développés et comparés, afin d'obtenir les meilleures données d'entrée selon les différents contextes. Les résultats montrent que les données fiables et précises obtenues par les outils d'inspection 3D permettent d'assister le géologue dans son expertise des parois rocheuses. À partir d'un site d'étude, nous monterons l'optimisation du dimensionnement des confortements des compartiments rocheux instables à partir du modèle tridimensionnel.

Mots clefs : photogrammétrie., lasergrammétrie, parois rocheuses, analyse structurale

93. Étude du comportement anisotrope d'une paroi de galerie par suivi des déformations d'un front de galerie du site expérimental de Tournemire (IRSN)

Hedan Stephen¹, Valle Valéry¹, Cabrera Justo¹, Cosenza Philippe¹

1 - Institut IC2MP, 2 - Institut Pprime, 3 - French Institute of Radiological Protection and Nuclear Safety

Cette communication présente les résultats d'une étude pluriannuelle du comportement hydromécanique du front de galerie du site expérimental de Tournemire (Aveyron, France) de L'IRSN. Cette galerie a été excavée en 1996, soit 15 ans avant le début de l'étude, ainsi une zone endommagée (EDZ) entourant la galerie s'est formée. Cette étude vise donc à mesurer temporellement par une méthode optique la déformation dans le plan et l'ouverture des fissures de ce front de galerie. La spatialisation de l'information mécanique apportée par méthode optique permet d'extraire les déformations parallèles et perpendiculaires à la stratification de la roche argileuse et ainsi quantifier le rapport entre ces déformations. Les résultats présentés confirment l'intérêt des méthodes optiques, par nature non intrusive, pour le suivi sur plusieurs années des déformations et des ouvertures/fermetures de fissures observées en paroi de galerie. Des résultats de mesure des déformations moyennes dans le plan et du rapport d'anisotropie sur de grandes surfaces ($>100 \text{ cm}^2$) sont également présentés et discutés.

Mots clefs : déformation, roche argileuse, anisotropie

[illegible]

94. Reconnaissance et auscultation aérienne par LiDAR et drone : actualisation du comportement du versant au niveau de la station de ski de Formigal (Vallée de la Tena, Pyrénées, Espagne)

Thomas Amélie¹, Denis Alain¹, Fabre Richard¹, Lataste Jean-François¹

1- I2M - Université de Bordeaux

Près de la frontière franco-espagnole, en haute vallée de la Tena (Pyrénées espagnoles), la construction d'une aire de stationnement pour la station de ski de Formigal et de surcroît la déviation et l'élargissement de l'axe A136 au cours de l'année 2004 ont engendré des désordres visibles dès le commencement des travaux. L'excavation d'une importante masse de matériaux en pied du versant rive gauche a compromis la stabilité de celui-ci ; la suppression de la butée a entraîné la réactivation des mouvements de terrain anciens. Outre une instrumentation du site déjà existante et exhaustive (inclinomètres, piézomètres, extensomètres, cibles DGPS, mesures DInSAR, etc.), l'observation spatio-temporelle à l'aide de deux capteurs aériens différents a permis d'affiner la géométrie des mouvements du versant dans les colluvions. Pour ce faire, trois campagnes de reconnaissance ont été effectuées au cours de cette étude : un LiDAR en 2010 (0,5 point/m²), et deux campagnes avec un drone de type aile volante à l'automne 2014 et l'été 2015 (GSD moyen de 5 et 3 cm/pixel respectivement). Les produits générés (nuages de points, orthophotos, cartes des déplacements, etc.) permettent d'analyser qualitativement et quantitativement le comportement du versant instable qui se traduit par une confrontation de deux mouvements bien distincts qui s'opposent, l'un établi dans les moraines et l'autre dans les colluvions. Les différentiels des modèles tridimensionnels de chacune de ces campagnes permettent de mettre en relation les déplacements du versant avec les événements climatiques : la corrélation entre les désordres et les variations saisonnières des précipitations, déjà mise en évidence par certains scientifiques, a pu être précisée dans son évolution récente. Compte tenu de la recrudescence de ces événements et d'une période de revisite à la demande, les campagnes drone permettront, à l'avenir, de prévenir l'évolution de ce type de versant et le risque par rapport aux infrastructures existantes.

Mots clefs : mouvements de terrain, modèle numérique tridimensionnel, drone, photogrammétrie, LiDAR, station de ski de Formigal, lasergrammétrie, Pyrénées

95. Analyse expérimentale de l'effet du confinement sur l'arrachement des boulons de front

Thénevin Isabelle¹, Jahangir Emad¹, Hadj Hassen Faouzi¹, Schleifer Jacques¹, Rodriguez Pascal²

1 - Centre de Géosciences - Mines ParisTech, 2 - Solétanche-Bachy

Une campagne d'essais montre l'effet du confinement sur la résistance au cisaillement de l'interface scellement-sol. Au préalable, une étude de tous les éléments composant cet essai est présentée. Le sol, la surface du forage, le scellement et l'inclusion doivent être représentatifs de la réalité des chantiers. Les résultats permettent de dégager les paramètres qui influencent le comportement de l'interface.

Mots clefs : clou, boulon, résistance au cisaillement, essais d'arrachement, confinement

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins or other markings on the paper.

96. Étude des paramètres influant sur les pertes de béton projeté par voie sèche **Armengaud Julie^{1,2}, Casaux-Ginestet Géraldine^{3,2}, Alliens Sylvain³, Doche Anne³, Durantel Sophie³, Valentin Pierre³, Cyr Martin², Husson Bernard², Robit Philippe¹**

1 - GTS, 2 - Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions [Toulouse], 3 - INSA Toulouse - Département Génie Civil

Le béton projeté par voie sèche est une technique fréquemment utilisée en réalisation de travaux de génie civil de type stabilisation de parois, en réparation d'ouvrages, ou encore en construction de par la liberté des formes géométriques possibles. La principale problématique de cette technique est de conduire à des pertes en matériaux très élevées (30 % en moyenne), liées au rebond du béton projeté sur la surface de réalisation. En effet, au coût économique de ces pertes, s'ajoutent la modification de la composition du béton en place par rapport à la formulation choisie, ainsi que l'impact environnemental lié à la surconsommation de matériaux (nécessité d'une mise en décharge des pertes, surémission de CO₂ lié à la fabrication du ciment, pollution potentielle des eaux). Face à ce constat, la perspective d'améliorer les caractéristiques du béton projeté afin de diminuer la surconsommation de matériaux due au rebond s'avère un enjeu important. Ainsi, après une rapide revue bibliographique dégagant les principaux éléments influant sur le rebond du béton projeté par voie sèche, une première analyse de résultats d'essais de projection réalisés au laboratoire LMDC Toulouse est présentée. Plusieurs paramètres ont été mesurés (granulométrie, teneur en eau, pression statique, pression dynamique) dans l'objectif de dégager leur influence pour une optimisation future du procédé.

Mots clefs : teneur en eau, granulométrie, essais en laboratoire, évaluation des pertes, voie sèche, béton projeté, pressions statique et dynamique

97. Dimensionnement d'un géosynthétique de renforcement pour la rehausse d'une ISDND

Abdelouhab Abdelkader¹, Tankéré Marie², Cartaud François³

1 - Texinov, 2 – Deltaval, 3 - EGIS

Les projets d'extension des anciennes Installations de Déchets Non Dangereux (ISDND) se sont accélérés ces dernières années à cause des contraintes économiques et environnementales qui rendent difficile, voire impossible selon les cas, la création de nouvelles installations. Ces projets d'extension se font par la construction de nouveaux casiers en appui total ou partiel sur des casiers plus anciens. Ces derniers sont généralement non conformes à la réglementation actuelle et nécessitent la mise en place de dispositifs d'étanchéité complémentaires. Dans le cas d'une extension verticale, en appui essentiellement sur le sommet d'un casier existant, il faut s'assurer de l'intégrité des dispositifs d'étanchéité du nouveau casier vis-à-vis des tassements différentiels des déchets anciens. C'est dans ce cadre que des géosynthétiques de renforcement sont installés au sommet de l'ancien casier afin de reprendre les efforts apportés par les déchets du nouveau casier et de limiter ainsi les tassements différentiels. À ce jour, malgré quelques retours d'expérience de projets réalisés avec succès, il semble qu'il n'existe aucune méthode de dimensionnement permettant de calculer précisément les efforts de traction que doit reprendre le géosynthétique de renforcement afin de maîtriser les tassements différentiels. Cet article présente le projet d'aménagement de l'extension de l'ISDND de Champigny (département de l'Yonne) ainsi que la méthode de dimensionnement utilisée pour estimer les efforts de traction qui seront repris par le géosynthétique. Le calcul est basé sur la méthode RAFAEL, qui est une méthode de référence pour le dimensionnement de géosynthétiques en prévention contre les effondrements sur cavités. Le but de cet article est de contribuer à la communication des méthodes de calculs et de conception utilisées dans ce domaine. La multiplication des exemples d'installations pérennes permet le développement de ces méthodes.

Mots clefs : méthode de dimensionnement, extension ISDND, tassements différentiels, géosynthétique de renforcement

98. Interactions physico-chimiques bentonite/ciment dans le cas des ouvrages enterrés

Couradin Alain¹, Oxarango Laurent², Dias Daniel³, Pothier Catherine³

1 - MeTeD_k, 2 - LTHE - Université Joseph Fourier, 3 - 3SR - Polytech Grenoble, 4 - LGCIE - INSA Lyon

À ce jour, les géosynthétiques bentonitiques (GSB, procédé d'étanchéité hydro-gonflant) sont utilisés depuis plus de 30 ans en ouvrages souterrains et/ou enterrés. Depuis, une seule action de recherche portant sur l'effet de la préhydratation sans confinement vis-à-vis de leur performance hydraulique a fait l'objet d'un programme expérimental en laboratoire et en pilotes d'essais dans ce domaine d'application. Entre-temps, de nombreux programmes de recherche se sont focalisés à étudier l'impact de la chimie des bétons sur les matériaux argileux (panache alcalin). Toutefois, cette recherche est appliquée aux ouvrages de stockage profond en destination du confinement des déchets radioactifs et non pas aux ouvrages de génie-civil plus classiques alors que dans certaines configurations ces procédés hydro-gonflants sont confinés directement en présence d'un béton. L'objet de cet article est de présenter les premiers résultats issus d'un programme d'essais en laboratoire simulant ces interactions selon un protocole expérimental simple et appelé à évoluer. Ce programme envisage l'utilisation des différentes bentonites commercialisées sur le territoire national par ces systèmes d'étanchéité hydro-gonflants puis à les soumettre au gonflement libre vis-à-vis de différents liquides d'essais. Ces liquides sont, soit des solutions de référence (ED, NaCl à 10^{-3} M), soit des solutions synthétiques plus ou moins concentrées en électrolytes (CaCl_2) sinon alcalines à hyper-alcalines (KOH, NaOH, CaOH_2). Enfin des solutions cimentaires obtenues à partir de ciments destinés aux ouvrages enterrés dont le rapport L/S est égal à 10 ont été synthétisées. Des analyses physico-chimiques (conductivité électrique, pH, cations majeurs) en provenance de ces solutions avant et après contact avec la bentonite complètent ce protocole. L'indice de gonflement libre des bentonites est contrasté d'une solution à l'autre. Le résultat le plus remarquable provient des solutions cimentaires car à même rapport L/S, cet indice s'exprime diversement en fonction des ciments.

Mots clefs : solutions alcalines et hyper-alcalines, géosynthétiques bentonitiques, électrolytes

99. Mise en évidence de l'évolution de la perméabilité d'un GSB par sondages électriques

Sirieux Colette¹, Genelle Fanny², Riss Joëlle¹, Touze-Foltz Nathalie³, Renie Stéphane ⁴, Begassat Philippe⁵, Barral Camill³

1 - I2M – Université de Bordeaux, 2 – INNOGEO, 3 – IRSTEA, 4 – Hydro Invest, 5 - ADEME

Il est actuellement connu que le rôle de barrière étanche joué par les géosynthétiques bentonitiques (GSB) n'est pas aussi pérenne qu'espéré ; une cause en est l'échange cationique (transfert de la couverture ou du sol support vers le GSB de cations divalents prenant la place de cations monovalents). La conséquence essentielle de cet échange est la perte de perméabilité, à une rapidité variable selon le contexte dans lequel se trouve le GSB. Bien que conçus pour durer longtemps (plusieurs décennies, voire centaines d'années), on sait, aujourd'hui, que plusieurs facteurs peuvent altérer la durée de vie du GSB à courte échéance ce qui est manifestement un problème lorsque la durée d'exploitation des ISD peut devoir durer plus de trente ans. Il est donc essentiel de pouvoir évaluer les performances in situ d'un GSB afin de déterminer le moment où celui-ci ne rendra plus le service attendu. Un site expérimental a été spécialement conçu pour suivre durant trente-deux mois le comportement électrique d'une couverture contenant un GSB (Bentomat® AS3700) situé à 0,45 m de profondeur. Des analyses, par la méthode des essais particuliers, de sondages électriques extraits des tomographies ont permis d'établir des distributions statistiques de la résistivité électrique du GSB au cours du suivi ; la comparaison de ces distributions montre, de façon significative, que la résistivité décroît fortement vingt-deux mois après sa mise en place. En parallèle, des analyses sur des prélèvements d'échantillon de GSB, démontrent un changement des propriétés du matériau : les proportions de cations calciques et sodiques diffèrent de celles du GSB initial témoignant d'échanges cationiques accompagnés d'une augmentation de la perméabilité hydraulique de $5 \cdot 10^{-11}$ à $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. L'objectif de cet article est de montrer qu'un suivi in situ par méthode de résistivité électrique permet de déterminer le moment où apparaît la perte de performance d'un GSB.

Mots clefs : résistivité électrique, perméabilité, GSB, échanges cationiques

100. Échange cationique par transfert hydrique en phase vapeur et imbibition Couradin Alain¹, Pothier Catherine², Vacherie Stéphane², Queheille Eva¹

1 - MeTeD_k, 2 - LGCIE – INSA Lyon

Les géosynthétiques bentonitiques (GSB) font l'objet depuis la fin des années 1980 d'un intérêt continu pour leur fonction étanchéité en application aux ouvrages de génie-civil. Leur développement technologique, soutenu par la conduite de nombreux programmes de recherche tant au niveau national qu'international, illustre leurs avantages, inconvénients suivant les conditions spécifiques de leur destination. Le retour d'expérience issu de ces programmes est unanime au sujet du phénomène de l'échange cationique. En effet, les bentonites sont des matériaux réactifs avec leur environnement et l'échange cationique en est une manifestation. L'objet de cet article est de présenter un programme d'essais en laboratoire simulant ces échanges selon un protocole expérimental. Ce programme envisage l'utilisation de deux types de GSB. Ces deux GSB appartiennent à la famille des géotextiles bentonitiques aiguilleté. Le second GSB diffère du premier par la présence d'un revêtement en polyoléfine dont l'adhérence au géotextile tissé est assurée par enduction. Deux conditions initiales d'essais ainsi que deux configurations sont envisagées. Les conditions initiales d'essais ont pour objet de distinguer la teneur en eau initiale du GSB alors que les configurations ont pour objectif de simuler les transferts hydriques à partir d'un géomatériau dont la teneur en carbonates de calcium est élevée. Ces essais de performance ont été conduits en oedoperméamètre. La bentonite prélevée à partir des éprouvettes soumises aux différentes conditions et configurations expérimentales a été testée à l'aide de plusieurs essais de caractérisation puis comparée à celle initiale : indice de gonflement libre, capacité d'absorption d'eau (test Enslin - Neff), analyses chimiques (cations majeurs et capacité d'échange cationique). Ce programme met en évidence l'efficacité du revêtement en polyoléfine associé au GSB en tant que barrière hydrique, mais aussi face à l'échange cationique.

Mots clefs : transfert hydrique, échange cationique, géosynthétique bentonitique

101. Méthode de dimensionnement des plateformes renforcées par géosynthétique sur cavités

Villard Pascal¹, Huckert Audrey², Briançon Laurent³

1 - Laboratoire 3S-R, 2 - EGIS GEOTECHNIQUE, 3 - LGCIE - INSA Lyon

L'aménagement progressif du territoire conduit à l'exploitation de nouvelles zones, actuellement délaissées, car présentant des risques pour la sécurité des usagers. C'est notamment le cas des zones d'effondrements potentiels qui sont liées à la présence de cavités souterraines. Les techniques de reconnaissance de ces cavités ne permettent pas de détecter les cavités de manière exhaustive et les travaux de comblement sont souvent très onéreux sans pouvoir systématiquement apporter la garantie d'une solution pérenne. Depuis quelques années, le développement de la technique de renforcement par géosynthétique positionné à la base des plates-formes a permis d'apporter des solutions pour limiter temporairement les conséquences d'un effondrement localisé tout en répondant à la maîtrise des déformations nécessitées par la poursuite du trafic. En France, les premières études menées sur cette thématique dans le cadre du projet RAFAEL ont débouché sur une méthode de dimensionnement simplifiée qui a été reformulée en prenant en compte les réels mécanismes développés à la base du remblai renforcé et négligés jusqu'alors. Un projet FUI a été conduit sur ce sujet (2010-1014) et une thèse expérimentale et numérique a été menée dans ce cadre. Ce travail a permis d'améliorer la méthode de Villard et Briançon (2008) en prenant en particulier en compte le mode d'ouverture de la cavité. À la suite de ce travail, des modélisations numériques ont permis d'identifier certains éléments tels que la répartition de la charge appliquée sur le géosynthétique ou le foisonnement du sol dans le cylindre de sol situé au droit de la cavité. Ces nouveaux éléments et ceux apportés précédemment permettent de faire évoluer les méthodes de calcul existantes et proposer une procédure de dimensionnement plus réaliste qui sera intégrée dans une nouvelle norme sur le renforcement par géosynthétiques de la base des remblais.

Mots clefs : modélisation, dimensionnement, geosynthétique, renforcement

102. Le management des connaissances en géotechnique : trente années d'essais et perspectives

Faure René-Michel¹, Thimus Jean-François²

1 - École Nationale des Travaux Publics de l'État, 2 - Université Catholique de Louvain (Belgique)

Parmi les enjeux sociétaux, la transmission du savoir, tant dans l'entreprise qu'à l'université, a été bouleversée ces dernières années par l'informatique et ses réseaux. En rappelant les travaux en géotechnique et informatique depuis trois décennies, des tentatives de systèmes experts, de bases de données, et plus récemment d'ontologies, l'article propose une approche nouvelle dédiée aux bureaux d'étude.

Mots clés : transmission du savoir, réseau informatique, enseignement, management des connaissances, géotechnique

[illegible]