

## Sols renforcés par inclusions rigides : modélisation physique en centrifugeuse de remblais et de dallage

Gaëlle BAUDOUIN

Thèse soutenue le 27 octobre 2010  
sous la direction de Abdul-Hamid Soubra (université de Nantes)  
Richard Kastner (INSA Lyon)  
Luc Thorel (LCPC)

Recherche effectuée au sein du groupe Modèles physiques en géotechnique  
du département Géotechnique, Eau et Risques du LCPC

Le renforcement de sol compressible par inclusions rigides verticales consiste à ancrer dans la couche résistante de sol, en deçà du massif compressible, un ensemble d'inclusions selon une maille carrée. Un matelas granulaire de transfert de charge est ensuite déposé sur le sol. Enfin, la surcharge due à l'ouvrage est simplement appliquée. Il n'y a pas de connexion mécanique entre les inclusions et la structure. Le projet national ASIRI vise à améliorer les connaissances de cette technique du point de vue du comportement et de la conception. L'étude paramétrique réalisée a pour but d'y contribuer. Pour cela, un modèle réduit centrifugé 3D a été mis au point pour étudier l'influence de la hauteur du matelas (constitué d'un mélange de sable d'Hostun), de l'espacement des inclusions et du type de chargement réparti appliqué (remblai ou dallage). Les résultats obtenus portent sur l'interaction entre les différents paramètres sur le comportement du renforcement en termes de réduction des tasse-

ments (totaux et différentiels) et de report des charges du sol vers les inclusions.

*The reinforcement of soft soil by vertical rigid piles consists on anchoring a group of piles in a square mesh, in the bedrock below the soft soil. A granular load transfer mattress is laid on the soil. Finally, the load due to the structure is directly applied. There is no mechanical connection between the structure and the piles. The aim of National Project ASIRI is to improve the knowledge of this technique from the point of views of the behaviour and the design. The parametric study aims at contributing to it. For that, a 3D reduced scale centrifuge model was developed to study the influence of the height of the mattress (a mix of Hostun sands), the pile spacing and the type of the load (embankment or slab). The results concern the interaction between the parameters on the behaviour of the reinforcement in terms of reduction of the settlements (total and differential) and the transfer of the load from the soil to the piles.*

## Effet de la corrosion des armatures sur le comportement des murs en remblai renforcé par des éléments métalliques

Truong-Linh CHAU

Thèse soutenue le 27 septembre 2010  
sous la direction de Alain Corfdir (Laboratoire Navier)  
et Emmanuel Bourgeois (LCPC)

Recherche effectuée au Laboratoire Navier (École des Ponts ParisTech)  
et au LCPC

Ce mémoire étudie, par la voie de la modélisation numérique, le comportement des murs en terre armée sous l'effet de la corrosion des armatures. L'analyse de données recueillies sur des ouvrages réels, âgés de plusieurs dizaines d'années, a montré la différence de comportement selon les types d'armatures, mais aussi la forte dispersion de l'ensemble des données. Elle a permis de proposer des relations entre la perte de masse et la diminution de la résistance et de l'allongement à la rupture des armatures. La présence des armatures très minces par rapport aux dimensions de l'ouvrage rend intéressante l'utilisation de méthodes d'homogénéisation. On a retenu une modélisation multiphasique, qui permet une modélisation satisfaisante de la traction dans les armatures. Quatre scénarios de corrosion ont été étudiés pour prendre en compte diverses situations susceptibles de conduire à des taux de corrosion élevés. La répartition spatiale de la corrosion peut avoir une influence importante sur le comportement du mur, sur le mécanisme de ruine et provoquer des phénomènes complexes de report des efforts d'une armature sur une autre. Nous avons réalisé une étude paramétrique de l'effet

de surcharges appliquées à l'ouvrage, et de certains détails de modélisation comme la jonction entre écailles, et la jonction entre armatures et écailles. Les résultats obtenus sont comparés à des mesures sur des ouvrages réels ou des modèles réduits, et à d'autres résultats de calcul. Les résultats conduisent à formuler des propositions concernant le suivi des déformations des ouvrages (nature et précision des mesures à effectuer, intervalles de temps entre inspections successives).

*This thesis presents numerical simulations of the behavior of reinforced earth walls induced by the corrosion of the reinforcement strips. The preliminary analysis of a database, gathering results of laboratory tests, performed on soil and steel samples extracted from wall built several decades ago, has shown the difference in behavior between different types of reinforcement strips, and the large scattering of data. It served as a basis to derive relationships between weight loss, ultimate strength and ultimate strain of reinforcement strips. The presence of very thin strips compared to the size of the reinforced earth wall makes it interesting to use homogenization methods. We adopted a multiphase model, that makes it possible to get*

a satisfactory modelling of the tensile forces in reinforcement strips. We studied four corrosion scenarios to take into account various situations in which corrosion rates can become significant. The spatial distribution of corrosion can have a clear influence on the behavior of the wall, the failure mechanism, and create complex redistributions of tensile forces between adjacent strips. Parametric studies were carried out to investigate the effects of sur-

charges, and of some details of modeling, such as the junction between panels, or the junction between the reinforcement strips and the facing panels. Results have been compared with measures obtained on full scale reinforced earth walls or on physical models, and with results of other numerical simulations. Results provide elements for the definition of a strategy for the monitoring and the surveillance of reinforced earth walls.

## Modélisation du comportement cyclique des ouvrages en terre intégrant des techniques de régularisation

Alexandre FOUCAULT

Thèse soutenue le 21 juin 2010

sous la direction de Arezou Modaressi (ECP)

Recherche effectuée au laboratoire de Mécanique des Sols,

Structures et Matériaux (École Centrale de Paris, CNRS UMR 8579),

au laboratoire de Mécanique des Structures industrielles durables (UMR EDF/CNRS 2832)

et au département Analyses mécaniques et acoustique (EDF R&D)

L'objectif technique majeur de cette thèse se rapporte au développement d'un outil de simulation numérique fiable et robuste adapté à la maîtrise et la connaissance du fonctionnement mécanique des ouvrages géotechniques. Cet outil de simulation doit notamment permettre une maîtrise des scénarii les plus pénalisants pour leur tenue, notamment sous l'aléa sismique. La qualité des résultats d'un tel outil dans le cadre de la méthode des éléments finis est fonction du modèle de comportement utilisé, la qualité de l'intégration du modèle et sa résolution numérique. Dans le cadre de ce travail, le modèle élastoplastique de comportement cyclique des sols de l'ECP (dit de Hujeux) a été introduit dans Code\_Aster selon un schéma d'intégration implicite, permettant ainsi une représentation fine et précise des phénomènes mis en jeu durant l'aléa sismique. Ce modèle possède également l'avantage d'être adapté au comportement de différents types de sols dans le cadre des milieux poreux sous l'hypothèse des petites déformations. Après validation sur des chemins de chargement variés, le modèle est à présent utilisé pour la simulation de la construction par couches, de la mise en eau et de la tenue sismique de barrages en terre. Le caractère non standard et adoucissant de ce modèle conduit à mettre en œuvre des techniques de régularisation pour résoudre le problème de dépendance pathologique des résultats aux maillages lors de l'apparition de modes de ruine localisée. Le modèle de second gradient de dilatation est utilisé en complément au modèle de comportement de Hujeux pour contrôler la largeur des bandes de localisation apparaissant sur les structures étudiées. La prise en compte d'une cinématique enrichie permet de rendre objectives aux maillages les réponses des structures durant leur phase d'adoucissement mais n'instaure pas l'unicité des solutions aux problèmes posés suite aux instabilités. Dans le cadre d'essais biaxiaux drainés sur des matériaux dilatants exprimés au sein des milieux du second gradient de dilatation, il est apparu une dépendance de la largeur des bandes de cisaillement à l'état de contraintes initial en plus des propriétés matériaux. A partir d'un exemple analytique d'une bande de matériau cisailée, cette dépendance a pu être exprimée, comparée et maîtrisée en fonction des paramètres de régularisation par rapport aux résultats des simulations numériques. L'extension de cette approche à un cas de stabilité de pente sous chargement d'une fondation superficielle a ensuite été entreprise. La dépendance des largeurs de bandes à l'état de

contraintes initial est apparue comme un élément-clé de la maîtrise du couplage entre le modèle de second gradient de dilatation et les modèles du type Cam-Clay.

The main technical objective of this PhD thesis deals with the development of a soil behavior numerical tool. It should be robust, efficient and adapted to model the mechanical behavior of geotechnical structures (e.g. embankment dam) under the worst loading scenarii such earthquakes. In the finite element method, the quality results is directly linked to the soil constitutive model, the integration scheme and the numerical resolution. In this PhD Thesis, the soil elastoplastic ECP model is introduced in Code\_Aster through an implicit scheme. An implicit scheme ensures to respect the theoretical formulation of the model. The ECP constitutive model is one of the best models available in the literature to represent the behaviour of different kinds of soils under cyclic loadings and it is used since the 80's by hydraulic engineers at EDF. It is expressed in terms of effective stresses and infinitesimal strains. The developments are validated for laboratory tests in a large scale of loading paths. On the other hand, the study of a sand embankment was performed and compared to the results obtained with the finite element software GEFDyn developed at ECP. The ECP model is based on a non-associated flow rule and it is able to reproduce a softening behavior. When shear bands occur in the structure, these properties lead to a pathological sensitivity of the results depending on the mesh size. Therefore, a regularization technique has to be used to circumvent this problem and to obtain objective results with respect to the mesh. The second gradient of dilation model is thus chosen to be coupled to the ECP model and in this way, to ensure a spatiotemporal independence of results. However, this mesh independence still evolves in a potential domain of solutions, when instability occurs. The simulations of drained biaxial tests on laboratory samples show a dependence of shear bands thickness in regard to the initial stress state and material properties. An analytical problem of a dilatant shear band is used to extract the key factors. These theoretical solutions are compared and validated to numerical responses, which are in good accordance. A bearing capacity problem was also solved to demonstrate the potential of the method. The conclusion of this work establishes the main role of initial stress state over the shear band thickness in the context of the second gradient of dilation model and the models based on Cam-Clay approach.

# Interaction dynamique sol-structure : influence des non-linéarités de comportement du sol

**Ali GANDOMZADEH**

Thèse soutenue le 8 février 2011

Recherche effectuée au Laboratoire central des ponts et chaussées  
et à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)

L'interaction dynamique sol-structure a été largement explorée en supposant le comportement linéaire du sol. Néanmoins, pour des séismes d'intensité modérée à forte, la contrainte de cisaillement maximale peut facilement atteindre la limite élastique du sol. Du point de vue de l'interaction sol-structure, les effets non linéaires peuvent modifier la rigidité du sol à la base de la structure ainsi que la quantité d'énergie dissipée dans le sol. En conséquence, ignorer les caractéristiques non linéaires du sol dans l'interaction dynamique sol-structure (IDSS) peut conduire à des prédictions erronées de la réponse de la structure. Le but de ce travail est d'implémenter dans un code numérique une loi de comportement non linéaire pour le sol afin d'examiner l'effet de la non-linéarité du sol sur l'interaction dynamique sol-structure. De plus, différents aspects sont pris en compte tels que l'effet de la contrainte de confinement sur le module de cisaillement du sol, les conditions statiques initiales, les conditions d'interface entre le sol et la structure, etc. Durant ce travail, une méthode simple de couche absorbante basée sur une formulation de Rayleigh/Caughey pour l'amortissement, qui est généralement disponible dans les logiciels existants d'éléments finis, a également été développée. Les conditions de stabilité des problèmes de propagation d'onde sont étudiées et on montre que les comportements linéaire et non linéaire sont très différents en ce qui concerne la dispersion numérique. La règle habituelle de 10 points par longueur d'onde, recommandée dans la littérature pour les milieux élastiques, n'apparaît pas suffisante dans le cas non linéaire. Le modèle implémenté est d'abord vérifié numériquement en comparant les résultats avec ceux d'autres codes numériques connus. Après cela, une étude paramétrique est

menée pour différents types de structures et des profils de sol variés afin de caractériser les effets non linéaires. Différentes caractéristiques de l'IDSS sont comparées à celles du cas linéaire : modification de l'amplitude et du contenu fréquentiel des ondes se propageant dans le sol, fréquence fondamentale, dissipation de l'énergie dans le sol et réponse du système sol-structure. A travers ces études paramétriques nous montrons qu'en fonction des propriétés du sol, le contenu fréquentiel de la réponse du sol peut changer significativement à cause des non-linéarités de comportement. Les pics de la fonction de transfert entre le champ libre et le rocher affleurant se décalent vers les basses fréquences et l'amplification se produit dans cette gamme de fréquences. Une réduction de l'amplification pour les hautes fréquences et même une dé-amplification peuvent se produire pour un fort niveau des mouvements d'entrée. Ces changements influencent la réponse de la structure. Ce travail montre également que la proximité des fréquences fondamentales de la structure et du sol influence fortement l'interaction sol-structure. Enfin, l'effet du poids de la structure et du balancement de la superstructure peut être significatif. Finalement, le bassin de Nice est utilisé comme un exemple de propagation d'onde dans un milieu non linéaire hétérogène et d'interaction dynamique sol-structure. La réponse du bassin dépend fortement de la combinaison de la non-linéarité du sol, des effets topographiques et du contraste d'impédance entre les couches de sol. Pour les structures et les profils de sol sélectionnés dans ce travail, les simulations numériques réalisées montrent que le décalage de la fréquence fondamentale n'est pas un bon indicateur pour distinguer le comportement linéaire du sol du comportement non linéaire.

# Influence de la prise en compte des modules en petites déformations des sols sur la modélisation numérique d'ouvrages géotechniques

**Yousef HEJAZI**

Thèse soutenue le 16 septembre 2010

sous la direction de Richard Kastner (INSA Lyon) et Daniel Dias (INSA Lyon)

Recherche effectuée au LGCIÉ-Géotechnique de l'Institut national des sciences appliquées de Lyon

Compte tenu de leur capacité d'intégrer la complexité de la géométrie, le comportement du sol environnant ou encore les processus du creusement lors de l'évaluation des mouvements engendrés par l'exécution d'un ouvrage souterrain, les méthodes numériques deviennent de plus en plus indispensables en phase de dimensionnement. La pratique des travaux souterrains a d'ailleurs démontré que la plupart des ouvrages sont dans le domaine des petites déformations où le comportement du sol est mal représenté par l'élasticité linéaire isotrope. Une estimation fiable des mouvements de sol nécessite alors l'incorporation de modèles capables de représenter le comportement du sol sous petites déformations. Ce travail de thèse constitue une contribution à l'étude numérique de l'influence de la prise en compte des modules en petites déformations et de l'anisotropie des sols lors du creusement d'un ouvrage souterrain. Pour cela, une série de modèles permettant de simuler la raideur du sol croissante en fonction de la profondeur, la raideur plus élevée sous faibles déformations, la non-linéarité du comportement en petites déformations, l'histoire des sollicitations et le radoucissement en grandes déformations a été retenue et implémentée dans le code de calcul en différences finies FLAC3D. Ces modèles ont été ensuite validés sur différents chemins de sollicitations avant qu'ils soient appliqués à la simulation d'ouvrages souterrains peu profonds dans de l'argile surconsolidée de Londres. Une des conclusions de ce travail de recherche réside dans le fait que l'introduction de la non-linéarité du sol sous faibles déformations conduit à une prédiction bien meilleure des mouvements du sol autour d'un

ouvrage souterrain creusé dans des argiles anisotropes et fortement surconsolidées. Un autre des phénomènes-clés à prendre en compte est l'état caractéristique des sols.

*Regarding their ability to simulate the complexity of geometry, the behaviour of surrounding soils, the excavation process and to evaluate the movements generated by an underground construction, numerical methods are becoming more and more widespread for design. Moreover, practice has demonstrated that most of underground constructions deformed under small-strains where soil behaviour is poorly represented by the linear isotropic elasticity. Therefore, a reliable prediction of soil movements requires the use of a constitutive model able to represent the small-strain soil behaviour. This PhD thesis is a contribution to numerical studies for taking into account the small strain stiffness and the anisotropy of a soil during excavation of an underground structure. For this, a series of constitutive soil models was selected and implemented in the finite difference code FLAC3D in order to simulate the increase of soil stiffness with depth, the non-linear small-strain behaviour, the stress history and the strain softening under large strain. These models were then validated on different stress paths and then applied to simulate a shallow tunnel in London Clay. From this research, it is concluded that the introduction of soil non-linearity under small strains leads to better prediction of ground movements around a tunnel excavated within anisotropic and heavily overconsolidated Clays than that observed by the linear elastic model frequently used. Another phenomena necessary to be taken into account is the characteristic state of the soil.*

## Modélisation physique de la suffusion dans les ouvrages hydrauliques en terre

Van Duong LE

Thèse soutenue le 1<sup>er</sup> juillet 2011

sous la direction de Alain Alexis (Université de Nantes) et Jacques Garnier (IFSTTAR)

Recherche effectuée au département Géotechnique, Eau et Risques de l'IFSTTAR

La suffusion est un mécanisme d'érosion interne qui correspond au détachement et au transport de particules fines au travers du squelette granulaire sous l'action d'un écoulement. Différents chercheurs ont observé que la valeur du gradient hydraulique critique nécessaire à l'initiation de la suffusion décroît avec la longueur de l'échantillon testé. Un dispositif d'essais en centrifugeuse est spécialement développé afin de caractériser la suffusion et d'étudier cet effet d'échelle sous contrainte effective contrôlée. Des échantillons sablo-argileux sont centrifugés et sont soumis à un écoulement vertical descendant sous charge hydraulique constante. L'étude met en évidence l'influence de la longueur de l'échantillon sur le gradient hydraulique critique et sur le taux d'érosion. Une nouvelle approche énergétique est proposée et permet de relier le taux d'érosion avec la puissance dissipée par le fluide ainsi que la masse érodée avec l'énergie dissipée. Cette approche permet de s'affranchir de l'effet d'échelle.

*Suffusion is an internal erosion mechanism, which means detachment and transport of fine particles within the soil skeleton due to hydraulic seepage flows. Different researchers observed that value of critical hydraulic gradient required to initiate suffusion decreases with length of the specimen tested. A specific centrifuge bench was designed to study the suffusion process and to study this scale effect under a controlled effective stress. Clayey sand specimens were subjected to centrifuge acceleration and to a downward flow under a constant hydraulic head. The study underlines the influence of specimen length on critical hydraulic gradient and also on the rate of erosion. A new energy analysis of tests is developed, linking the erosion rate to the power expended by fluid flow, and the eroded clay mass to the energy dissipation. This method permits the effect of specimen length to be avoided.*

## Solutions fondamentales en géo-poro-mécanique multiphasique pour l'analyse des effets de site sismiques

Pooneh MAGHOUL

Thèse soutenue le 12 novembre 2010

sous la direction de Behrouz Gatmiri (Laboratoire Navier)

et Denis Duhamel (Laboratoire Navier)

Recherche effectuée au laboratoire Navier (École des Ponts ParisTech, Université Paris-Est)

Ce travail de recherche se situe dans le cadre du développement de la méthode des éléments de frontière (BEM) pour les milieux poreux multiphasiques. A l'heure actuelle, l'application de la BEM aux problèmes des milieux poreux non saturés est encore limitée, car l'expression analytique exacte de la solution fondamentale n'a pas été obtenue, ni dans le domaine transformé ni dans le domaine réel. Ceci provient de la complexité du système d'équations régissant le comportement des milieux poreux non saturés. Les développements de la BEM pour les sols non saturés effectués au cours de cette thèse sont basés sur les modèles thermo-hydro-mécanique (THHM) et hydro-mécanique (HHM) présentés dans la première partie de ce mémoire. Ces modèles phénoménologiques basés sur la théorie de la poromécanique et les acquis expérimentaux sont obtenus dans le cadre du modèle mathématique présenté par Gatmiri (1997) et Gatmiri *et al.* (1998). Après avoir présenté les modèles THHM et HHM, on établit pour la première fois les équations intégrales de frontière et les solutions fondamentales associées pour un milieu poreux non saturé sous chargement quasi statique pour les deux cas isotherme (2D dans le domaine de Laplace) et non isotherme (2D et 3D dans les domaines de Laplace et temporel). Aussi, les équations intégrales de frontière ainsi que les solutions fondamentales 2D et 3D (dans le domaine de Laplace) pour le modèle dynamique couplé des sols non saturés sont obtenues. Ensuite, les formulations d'éléments de frontière (BEM) basées sur la méthode quadrature de convolution (MQC) concernant les milieux poreux saturé et non saturé sous chargement quasi statique isotherme et dynamique sont implémentées dans le code de calcul « HYBRID ». Ayant intégré les formulations de BEM pour les problèmes de propagation d'ondes ainsi que pour les problèmes de consolidation dans les milieux poreux saturés et non saturés, il semble que nous ayons fourni à l'heure actuelle le premier code de calcul aux éléments de frontière (BEM) qui modélise les différents problèmes dans les sols secs, saturés et non saturés. Une fois le code vérifié et validé, des études paramétriques portant sur des effets de site sismiques sont effectuées. Le but recherché est d'aboutir à un critère simple, directement exploitable par les ingénieurs, combinant les caractéristiques géométriques et les caractéristiques du sol, permettant de prédire l'amplification du spectre de réponse en accélération dans des vallées sédimentaires aussi bien que vides.

*The purpose of this dissertation is to develop a boundary element method (BEM) for multiphase porous media. Nowadays, the application of the BEM for solving problems of unsaturated porous media is still limited, because no fundamental solution exists in the published literature, neither in the frequency nor time domain. This fact rises from the complexity of the coupled partial differential equations governing the behaviour of such media. The developments of the BEM for the unsaturated soils carried out during this thesis are based on the thermo-hydro-mechanical (THHM) and hydro-mechanical (HHM) models presented in the first part of this dissertation. These phenomenological models are presented based on the experimental observations and with respect to the poromechanics theory within the framework of the suction-based mathematical model presented by Gatmiri (1997) and Gatmiri *et al.* (1998). After having presented the THHM and HHM models, for the first time, one establishes the boundary integral equations (BIE) and the associated fundamental solutions for the unsaturated porous media subjected to quasi-static loading for both isothermal (2D in the Laplace transform domain) and non-isothermal (2D and 3D in Laplace transform and time domains) cases. Also, the boundary integral equations as well as the fundamental solutions (2D and 3D in the Laplace transform domain) are obtained for the fully coupled dynamic model of unsaturated soils. In the next step, the boundary element formulations (BEM) based on the convolution quadrature method (CQM) regarding the saturated and unsaturated porous media subjected to isothermal quasi-static and dynamic loadings are implemented via the computer code « HYBRID ». Having integrated the BEM formulations for the wave propagation, as well as the consolidation problems in the saturated and unsaturated porous media, it seems that now the first boundary element code is obtained that can model the various problems in dry, saturated and unsaturated soils. Once the code is verified and validated, parametric studies on seismic site effects are carried out. The aim is to achieve a simple criterion directly usable by engineers, combining the topographical and geological characteristics of the soil, to predict the amplification of acceleration response spectra in sedimentary as well as hollow valleys.*

## **Approche multi-échelle du traitement des sols à la chaux. Étude des interactions avec les argiles**

**Nicolas MAUBEC**

Thèse soutenue le 6 octobre 2010

sous la direction de G. Ouvrard (Université de Nantes) et Denezle (LCPC)  
Recherche effectuée au département Géotechnique, Eau et Risques du LCPC

Afin de valoriser les matériaux, présents sur les sites de projets d'infrastructures, le traitement à la chaux est une technique souvent utilisée, puisqu'il permet d'améliorer les performances mécaniques et la maniabilité des sols. Toutefois, cette technique possède des limites avec les sols argileux où les améliorations escomptées ne sont pas obtenues. Afin d'optimiser cette technique et de valoriser les sols argileux, une étude physico-chimique des interactions entre la chaux et les minéraux argileux et un lien avec l'aspect mécanique est donc essentiel pour comprendre l'effet de la chaux sur ces minéraux. L'étude du traitement à la chaux sur deux argiles (kaolinite et bentonite calcique) a donc été étudiée. Les résultats montrent que l'ajout de chaux améliore les performances méca-

niques des argiles, quelles que soient les conditions hydriques. Ces améliorations sont plus rapides dans le cas de la bentonite. Le couplage entre l'aspect macroscopique et physico-chimique montre que les améliorations sont en lien avec la formation de composés secondaires de type silicates, aluminates et carboaluminates de calcium hydratés qui augmentent la cohésion au sein des matériaux. Les améliorations des comportements mécaniques sont d'autant plus importantes qu'il y a de composés secondaires formés. Les caractérisations physico-chimiques montrent également que tous les minéraux rencontrés dans cette étude (kaolinite, muscovite, montmorillonite, feldspaths, quartz, cristobalite) réagissent lors du traitement à la chaux.

## **Modélisation numérique du comportement des sols sous très grands nombres de cycles. Homogénéisation temporelle et identification des paramètres**

**Aurélié PAPON**

Thèse soutenue le 27 septembre 2010

sous la direction de Pierre-Yves Hicher (École centrale de Nantes)  
et Yvon Riou (École centrale de Nantes)

Recherche effectuée à l'Institut de recherche en génie civil et mécanique  
(École Centrale de Nantes, Université de Nantes)

La prise en compte du comportement des sols soumis à de très grands nombres de cycles nécessite l'utilisation de modèles de comportement spécifiques, souvent complexes. Par ailleurs, la simulation de ce comportement sur l'ensemble du chargement implique des temps de calcul longs et fastidieux. En réponse à ces constats, cette étude développe deux outils d'aide à la modélisation numérique. Le premier outil vise une réduction substantielle du temps de calcul en appliquant la méthode d'homogénéisation temporelle asymptotique. L'efficacité de cette méthode est mesurée par la comparaison des simulations avec et sans homogénéisation dans le cas d'essais triaxiaux non drainés répétés. Deux modèles de comportement sont utilisés : l'un est basé sur le principe de la plasticité de la *bounding surface*, l'autre est un modèle à deux surfaces de charge à écrouissage isotrope et cinématique (modèle « bulle »). Un module d'homogénéisation est implanté dans le logiciel aux éléments finis CESAR-LCPC. Le second outil s'inscrit dans le cadre plus général de l'identification de paramètres constitutifs par analyse inverse. Il propose une identification multi-objectif des paramètres par algorithmes génétiques. Cette méthode est testée sur des essais pressiométriques monotones afin de prévoir le tassement d'une fondation superficielle. Finalement les deux outils numériques sont appliqués à des résultats expérimentaux obtenus lors d'essais triaxiaux non drainés répétés sur une argile normalement consolidée.

*To take into account the behavior of soils subjected to very large numbers of cycles requires the use of specific models, often complex. Furthermore, the simulation of this behavior throughout the entire loading history is time-consuming. In order to overcome these difficulties, we developed two numerical techniques. The first technique aims at reducing substantially the computational time by applying the asymptotic time homogenization method. The effectiveness of this method is measured by comparing simulations with and without homogenization in the case of undrained triaxial tests under one-way cyclic loading. Two models are used: one is based on the principle of the bounding surface plasticity; the other is a two-surface model with isotropic and kinematic hardening (bubble model). The time-homogenization method is implemented in the finite element code CESAR-LCPC. The second technique is part of the broader framework of constitutive parameter identification by inverse analysis. It consists of a multi-objective identification of parameters by genetic algorithms. This method is tested on monotonic pressuremeter tests in order to predict the settlement of a shallow foundation. Finally, the two numerical techniques are applied to experimental results obtained from undrained triaxial tests under one-way cyclic loading on a normally consolidated clay.*

# Comportement des tunnels dans les milieux rocheux de faibles caractéristiques mécaniques

Fabrice ROJAT

Thèse soutenue le 24 novembre 2010

sous la direction de Philippe Mestat (LCPC) et Vincent Labiouse (EPFL)

Recherche effectuée au Laboratoire régional des ponts et chaussées de Toulouse et au Laboratoire de mécanique des roches de l'École polytechnique fédérale de Lausanne

Les projets de tunnels dans des milieux rocheux de faibles caractéristiques mécaniques, usuellement regroupés sous l'appellation sols indurés roches tendres (SIRT), se heurtent à de multiples difficultés. Ces matériaux présentent des spécificités de comportement qui les rendent atypiques dans les contextes usuels de la mécanique des sols comme de la mécanique des roches, compliquant les dimensionnements et pouvant engendrer des surcoûts importants pour les maîtres d'ouvrage. En se limitant aux SIRT modélisables par une approche continue, la non-linéarité du critère de rupture, les couplages hydromécaniques et la dépendance de la déformabilité à l'état de contrainte apparaissent comme des traits de comportements susceptibles d'influencer significativement la phase de creusement (équilibre à court terme). Bien que ces propriétés puissent être prises en compte de manière adéquate dans des modèles numériques, la pratique des calculs de tunnel a montré de longue date l'intérêt des méthodes simplifiées comme l'approche convergence-confinement. Elles permettent un prédimensionnement raisonnablement représentatif au moyen de formulations peu complexes et favorisent la réalisation d'études de sensibilité grâce à leur mise en œuvre simple et rapide. A partir d'une approche de type « milieux poreux », prenant en compte la compressibilité des différents constituants du matériau, et d'une représentation adimensionnelle du critère de rupture de Hoek-Brown (incluant les régimes d'arête), de nouvelles formulations permettant le calcul des courbes caractéristiques du terrain sont donc présentées. Après s'être intéressé dans un premier temps à la seule non-linéarité du critère de rupture, avec un milieu monophasique, une complexification progressive du problème est mise en œuvre pour prendre en compte des situations biphasiques drainées ou non drainées. A chaque fois une résolution complète est proposée, aboutissant à des formulations explicites ou à des équations intégrables aisément par une méthode numérique à un pas. Un outil sous forme de tableur, directement utilisable et démontrant la simplicité de mise en œuvre des solutions établies, est systématiquement fourni. Le cas non drainé est ensuite complété par un schéma de calcul intégrant une élasticité non linéaire de Fahey-Carter, avec la méthode des matrices de transfert. La partie finale du travail permet d'aborder l'applicabilité de ces développements analytiques à un cas réel, le tunnel d'Arbus. Elle souligne quelques difficultés de détermination de paramètres à partir de campagnes d'essais « standard » et insiste sur la variabilité naturelle des matériaux dans une géologie molassique du piémont pyrénéen. Ce contexte met en relief les avantages des méthodes développées : outre une représentation plus satisfaisante du comportement du milieu, elles permettent à peu de frais d'identifier les paramètres les plus influents sur l'équilibre massif – soutènement et d'aborder la problématique des incertitudes dans le dimensionnement. Les calculs font également ressortir l'intérêt des modèles à élasticité non linéaire, avec une prise en compte plus appropriée de la déformabilité du matériau mais aussi une réduction de la sensibilité du modèle à la variabilité des paramètres élastiques. Les approches présentées conservent néanmoins certaines limites, comme la nécessaire distinction des équilibres court terme et long terme, l'hypothèse de contrainte initiale hydrostatique qui se révèle au final assez forte et le problème de la représentation du soutènement qui mériterait d'être davantage

approfondi même si des méthodes acceptables sont d'ores et déjà disponibles dans la littérature.

*Tunnel projects within rock masses of low mechanical properties, usually described as « hard soils soft rocks » (HSSR), regularly encounter numerous difficulties. These materials show specific behaviours that make them atypical in the points of view of both rock and soil mechanics, leading to more complex designs and generating significant extra costs for the contracting authority. Considering the limited case of HSSR that can be modelled with a continuous approach, nonlinearity of the failure criterion, hydro-mechanical coupling, and stress-dependency of the material deformability appear as distinctive behaviour features that may have a serious influence on the excavation stage (short term equilibrium). Although these properties can be adequately taken into account in some numerical models, the practical experience of tunnel calculations has long shown the interest of simplified methods such as the convergence-confinement approach. These methods allow reasonably representative designs through not very complex formulations and contribute to make sensitivity studies easier thanks to their quick and simple implementation. Thus, based on a classical « porous media » description taking into account both mineral and fluid compressibilities, and on a non-dimensional expression of the Hoek-Brown failure criterion (including edge effects), new formulations for the calculation of ground characteristic curves are presented. After a first approach considering only the non-linearity of the failure criterion, in a monophasic medium, more complex cases are studied so as to take into account biphasic drained or undrained situations. Each time, a complete solution is described, leading to explicit formulations or to differential equations that can be simply solved with a one-step numerical method. A « turnkey » design tool, in a spreadsheet form, that demonstrates the easy implementation of the developed solutions, is systematically provided. The undrained case is then completed with a calculation procedure that integrates the Fahey-Carter non-linear elasticity model, using the transfer matrices method. The last part of this work tackles the applicability of these analytical solutions on a case study, the Arbus tunnel (France). It emphasizes a few difficulties in the determination of some parameters of the mechanical model when « standard » test protocols are used, and insists on the natural variability of the ground properties in this molassic geology of the Pyrenean piedmont. This context stresses the advantages of the developed methods: besides a better description of the rock mass behaviour, they allow to identify at low cost the more influential parameters on the ground – lining equilibrium and to introduce the analysis of uncertainties in design practice. The calculations also underline the interest of non-linear elasticity models, promoting a better assessment of material deformability and also reducing the model sensitivity to elastic parameters scattering. The here-presented approaches keep some limits however, such as the necessary distinction between short term and long term equilibriums, the hypothesis of hydrostatic far-field stresses that is shown to be quite strong in the end, and the problem of lining representation (confinement line) that would deserve a deeper analysis even if a few acceptable methods are already available in the literature.*

# Influence du changement climatique et des conditions extrêmes sur les massifs fracturés : rôle des fluides dans leur processus d'altération

Alice SAAD

Thèse soutenue en septembre 2011  
sous la direction de Sylvine Guédon (IFSTTAR)

Recherche effectuée au département Géotechnique, Eau et Risques de l'IFSTTAR

L'objectif de ce travail est de comprendre le processus d'altération des calcaires oolithiques et d'estimer leur cinétique d'altération en fonction des conditions climatiques présentes en France. Pour y répondre, des cycles de vieillissement accéléré, basés sur les paramètres issus de l'étude bibliographique et sur les données de température et de précipitations réelles, ont été définis. Ensuite, des lots d'échantillons de deux calcaires oolithiques ont subi ces vieillissements. Les mesures réalisées pour déterminer l'endommagement ont été choisies en fonction de leurs caractéristiques métrologiques et de leur pertinence. Les résultats obtenus ont été comparés avec les mêmes mesures réalisées sur des calcaires altérés de façon naturelle prélevés sur site. Ainsi, les liens entre le processus d'altération des calcaires et leurs caractéristiques mécaniques, physiques et surtout microstructurales ont été établis. Cette analyse a également abouti à des cinétiques d'altération. Les résultats ont été validés par l'étude d'un autre calcaire oolithique sous d'autres conditions climatiques. Enfin, l'influence de changements climatiques éventuels sur les cinétiques d'altération peut être évaluée à l'aide d'un outil statistique.

The objective of this work is to understand the weathering process of oolitic limestone and estimate their weathering kinetics under French climatic conditions. Accelerated ageing cycles, based on parameters deduced from a literature review and on temperature and precipitation data, have been defined. Then samples of two oolitic limestones have undergone these ageing. The measurements used to determine damage were chosen based on their metrological characteristics and their relevance. The results were compared with the same measurements performed on naturally weathered limestone. Thus, the relationships between the weathering process of oolitic limestone and their mechanical, physical and microstructural characteristics have been established. This analysis also led to weathering kinetics. The results were validated by the study of another oolitic limestone under different climatic conditions. Finally, the influence of a potential climate change on the weathering kinetics was determined using a statistical tool.

## Évaluation des propriétés mécaniques du matériau Soil-Mixing

Fabien SZYMKIEWICZ

Thèse soutenue en septembre 2011  
sous la direction de Philippe Reiffsteck (IFSTTAR)

Recherche effectuée au département Géotechnique, Eau et Risques (IFSTTAR)  
en partenariat avec la société Solétanche-Bachy

Le *Soil-Mixing* consiste à traiter le sol avec un liant hydraulique en le mélangeant mécaniquement en place pour améliorer ses propriétés mécaniques. Son côté économique ainsi que son faible impact environnemental ont fait de cette méthode jusque-là cantonnée à l'amélioration de sols compressibles ou à forte teneur en matière organique une alternative attrayante aux méthodes traditionnelles de renforcements des sols, de soutènements (temporaires voire définitifs), de fondations et de travaux d'étanchéités. Mais avec cette augmentation de la demande, les exigences nouvelles concernant la méthode et le matériau sont apparues. De nombreuses études permettent d'apporter des éléments de réponses. Cependant, il n'existe pas d'étude paramétrique globale étudiant à la fois l'impact du type de sol et de la quantité d'eau sur la caractérisation du matériau *Soil-Mixing* et qui permettrait d'améliorer les méthodes de dosage ainsi que les méthodes de dimensionnement des ouvrages en *Soil-Mixing*. Un mélange sol-ciment est composé majoritairement de sol. Le ciment ne représentera au maximum que 30 % du mélange. L'approche adoptée est donc plutôt celle du domaine de la géotechnique que des bétons hydrauliques. Nous avons pris le parti de baser notre travail sur une étude de laboratoire, en réalisant des mélanges dits « de référence ». Trois sables et cinq sols fins ont été traités en faisant varier à chaque fois les quantités de ciment et d'eau, afin d'observer l'influence de la granulométrie, de l'argilosité et de la quantité d'eau présente dans le mélange sur la résistance, la rigidité et la déformation à la rupture du matériau. Par ailleurs, des sols reconstitués à base de sable et de sol fin ont été traités afin d'étudier l'impact des fines et de leur nature sur la résistance du matériau. En parallèle, le suivi de différents chantiers nous a permis d'étudier la mise en œuvre de la méthode, l'homogénéité du matériau réalisé *in situ*, et de comparer les résultats obtenus avec ceux de l'étude paramétrique. Les retombées de ce travail sont la création d'abaques reliant la résistance au dosage en ciment et au rapport C/E, ainsi qu'un tableau de synthèse de données expérimentales des différentes propriétés mécaniques du matériau *Soil-Mixing* (en fonction de la nature du sol rencontré), et des formules permettant pour les sols grenus de

prédire la résistance à 7 et 28 jours en fonction du pourcentage de fines dans le sol et du dosage en ciment.

The *Soil-Mixing* consists in mixing a hydraulic binder into the soil mechanically in order to improve its mechanical properties. Because of its economical as well as its sustainable advantages, this method so far confined to the improvement of compressible or high organic content soils has become an attractive alternative to traditional methods for soil reinforcement, retaining walls (temporary or final), foundations and cutoff walls. But these new applications imply new requirements on the method as well as on the material. Many studies on the subject provide some answers. However, there is no comprehensive parametric study examining both the impact of soil type and the amount of water on the characterization of the *Soil-Mixing* material and would improve the testing methods and methods for design of structures in *Soil-Mixing*. Soil-cement mixtures are predominantly composed of soil. The cement will represent at most 30% of the mixture. That is why we have chosen to follow a geotechnical approach rather than the concrete approach for this project. We followed an experimental program based on a laboratory study, realizing mixes called « reference » mixes. Three sand soil and five fine soils were treated by varying each time the quantities of cement and water to observe the influence of particle size, clay content and the amount of water present in the mixes on the resistance of the material, stiffness and failure strain. In addition, soils made from sand and fine soils were reconstituted and treated to study the impact of fines and their nature on the strength of the material. In parallel, monitoring of various projects has enabled us to study the implementation of the method, the homogeneity of the material produced *in situ*, and to compare the results with those of the parametric study. The results of this work are the creation of abaci connecting the resistance to the cement content and C/E ratio, and a summary table of experimental data of different mechanical properties of the *Soil-Mixing* material (depending on the nature of the soil), and formulas for granular soils predicting the strength after 7 and 28 days of curing depending on the percentage of fines in the soil and on cement content.

# Développement d'indicateurs de qualité dans la modélisation des ouvrages géotechniques par la méthode des éléments finis : application aux soutènements

**Cristina VULPE**

Thèse soutenue le 7 septembre 2011  
sous la direction de Philippe Mestat (IFSTTAR)  
et Nicolai Droniuc (IFSTTAR)

Recherche effectuée au département Géotechnique, Eau et Risques de l'IFSTTAR

La recherche consistait à étudier la précision des calculs par la méthode des éléments finis (MEF) au moyen « d'indicateurs de qualité ». Les indicateurs de qualité représentent des formules simples qui permettent d'évaluer la qualité des calculs par éléments finis. La qualité de l'analyse numérique est évaluée par rapport à la discrétisation. Le modèle mathématique est considéré correct et les erreurs résultant du choix des propriétés des matériaux ne sont pas être pris en compte. Nous avons défini les formulations mathématiques de ces indicateurs de qualité, ainsi que leurs limites inférieures et supérieures. Grâce au choix de formulations simples, il est facile de les introduire dans un logiciel de calcul par éléments finis. Ils ont été implémentés dans le code de calcul CESAR-LCPC, module Mécanique en Comportement Non Linéaire. Afin de démontrer qu'ils ont été correctement définis et de tester leur fiabilité, ces indicateurs de qualité sont testés sur un certain nombre de problèmes simples en 2D et en 3D. Après avoir prouvé leur capacité à caractériser la qualité de la discrétisation des modèles d'éléments finis, nous les avons testés sur le cas d'une excavation de palplanches butonnées (site expérimental de Hochstetten, près de Karlsruhe). La précision des résultats en termes de propriétés mécaniques choisies pour le sol et les structures n'a pas été étudiée. Nous avons également démontré que les résultats sont indépendants des propriétés mécaniques choisies pour le sol ou la structure.

*The thesis proposes to study the accuracy of the finite element method (FEM) analyses by means of « quality indicators ». The quality indicators represent simple mathematical formulas that are designed to evaluate the reliability of the numerical analyses. The accuracy of the discretization modeling of these analyses is determined; the mathematical model is considered correct and the errors resulting from the choice of the mechanical properties of the soil are not taken into account. We proposed the mathematical formulations of the quality indicators and also established their lower and upper bounds. Due to their simple mathematical formulation, the quality indicators are easily implemented in any finite element computer code. We have introduced them in the CESAR-LCPC finite element computer code, namely in the nonlinear mechanical execution module. The proposed quality indicators are used on a number of simple 2D and 3D problems elastic and elastoplastic problems in order to assess the jump in stress values in the nodes of the generated mesh. After testing the accuracy of the discretization modeling of these numerical analyses, we evaluated the discretization modeling quality of a braced sheetpile excavation (Hochstetten experimental site, near Karlsruhe). The accuracy of the results based on the mechanical properties of the soil and the structure has not been studied. Also, we proved that the quality indicator results are independent of the chosen mechanical properties for the soil or structure.*