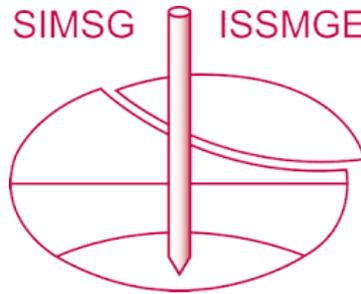


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Exposé sur le thème: Réciprocité des modèles physiques et des modèles numériques appliqués en ingénierie géotechnique

Theme lecture: Interplay between physical and numerical models as applied in geotechnical engineering

J.-F.Corté – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France*

RESUME : Cette communication correspondant à l'intervention du modérateur pour la séance de discussion 1.3. L'exposé s'attache à la diversité des modèles qui sont nécessaires au géotechnicien au-delà du seul modèle de comportement des sols. Les éléments les plus novateurs en relation avec le thème de cette discussion issus des communications au congrès sont dégagés.

ABSTRACT : This paper is related to the oral presentation made by the discussion leader during discussion session 1.3. The presentation is focussing on the variety of models that are necessary to the geotechnical engineer beyond constitutive models of soils. The most innovative elements, in relation to the topic of this discussion session, found in the papers to the conference are highlighted.

1 INTRODUCTION

Le sujet de cette séance de discussion est rattaché au thème sur lequel le Professeur Tatsuoka a présenté une analyse très détaillée de l'état de développement des modèles descriptifs du comportement non-linéaire des sols.

Ces modèles sont assurément une pièce essentielle pour la compréhension des phénomènes géotechniques et pour la définition d'un dimensionnement correct des ouvrages. Cependant, ce serait une **erreur fondamentale** que de réduire la réflexion sur les questions de modèles, qu'ils soient d'ailleurs physiques ou numériques, au seul aspect du comportement mécanique des sols.

Face à un problème pratique donné, le géotechnicien se trouve, de fait, confronté à l'introduction d'**une nécessaire multiplicité de modèles**. Il aura ainsi en général besoin :

- d'un *modèle descripteur du site*,
- d'une *modélisation des actions extérieures*,
- d'un *modèle pour interpréter les informations* très souvent indirectes qu'il tire *des essais en place*,
- une fois même donné un *modèle descripteur du comportement mécanique du sol*, il lui faut encore aussi décrire le *comportement à l'interface* entre le sol et la structure étudiée,
- enfin, tous ces éléments doivent être intégrés pour composer un *modèle d'ensemble* sur lequel sera cherchée la solution au problème posé.

C'est donc à cette **multiplicité de modèles** qu'est consacré cet exposé en cherchant à tirer des 31 communications (au contenu très varié) qui ont été rattachées à cette session des éléments novateurs en relation avec le thème de cette séance.

2 LES DIFFERENTS MODELES

2.1 Modèles globaux

Pour prendre d'entrée le contre-pied des études en laboratoire, il est des situations pour lesquelles le géotechnicien disposera essentiellement de données d'observation et de la mesure de quelques paramètres physiques à partir desquelles il devra prendre des décisions. C'est le cas assez fréquent du suivi de sites naturels complexes en évolution instable pour lesquels on cherchera la construction de modèles globaux.

A côté des approches empiriques traditionnelles, dont un exemple (Park et al. 1997) est la recherche d'un indicateur d'alerte de l'instabilité de remblais construits sur sols compressibles de la forme des courbes d'évolution de divers paramètres, les méthodes statistiques fournissent des outils précieux lorsque l'on dispose de séries de données suffisantes.

Une application intéressante est celle de réseaux de neurones pour la prévision des mouvements d'une pente instable (Mayoraz et al. 1997). Une fois analysée l'interdépendance des données recueillies, un modèle prévisionnel est construit à partir de deux réseaux neuronaux en cascade, le premier exprimant les pressions interstitielles en fonction du bilan hydrique, le second déterminant la vitesse de glissement de la pente à partir des pressions interstitielles.

2.2 Modèle descripteur du site

Les conditions géotechniques sur un site étant souvent hétérogènes, l'ingénieur a besoin de pouvoir établir une description objective de l'ensemble de l'espace, en tirant le meilleur parti de l'information limitée dont il dispose généralement sur quelques profils. C'est bien un modèle géotechnique du site qu'il doit construire. Alors que les méthodes statistiques sont largement utilisées à cet effet dans certains domaines comme celui de la prospection pétrolière, les applications en ingénierie géotechnique sont encore bien rares. La communication de Hagaz montre comment des méthodes statistiques peuvent être appliquées à une identification objective des limites de formations et au rapprochement des données entre profils.

2.3 Modèle d'interprétation des essais en place

Si le rapport général présenté par le Professeur Tatsuoka a surtout mis l'accent sur les essais de laboratoire, une part considérable des études géotechniques, si ce n'est la grande majorité, s'appuie sur des informations fournies par les essais en place. Ceci justifie l'importance des recherches attachées à l'interprétation de ces essais où se trouvent confrontés modèles théoriques et données expérimentales.

Sur le problème classique de l'interprétation des essais de pénétration au cône, les résultats actuels (Thooft et al. 1997) montrent que, pour les sables, l'on pourrait disposer maintenant d'un bon modèle explicatif en combinant le mécanisme d'expansion de cavité, les propositions de Yu et Houlsby pour calculer la pression limite et celles formulées par Bolton pour la variation des angles de frottement et de dilatance. Cette communication indique en effet un écart inférieur à 10 % sur l'évaluation de la charge limite de pointe entre modèle théorique et expérience.

2.4 Modèle descripteur de l'interaction sol-structure

Une fois donnés les modèles de comportement du sol et des éléments de structure, encore faut-il décrire convenable le comportement au contact. Pour les modèles physiques, il s'agit

d'une question fondamentale, toujours actuelle, qui est reliée aux interrogations sur les limites possibles à la réduction de la taille des modèles compte tenu de la dimension des grains de sol.

Vis à vis du problème de la portance des fondations superficielles sur sol granulaire, la situation s'est largement clarifiée depuis une dizaine d'années déjà (Corté, 1989). Un effet d'échelle, c'est à dire un biais par rapport à une similitude mécanique correcte, ne se manifeste que lorsque le rapport du diamètre de la semelle au diamètre moyen des grains est inférieur à 30 environ.

Des résultats récents et concordants sont présentés à ce congrès, dans des travaux du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Garnier 1997) et de Delft Geotechnics (Allard et al. 1997), cette fois sur le problème du frottement latéral sur les pieux. La question est ici celle de l'incidence de l'épaisseur de la bande de cisaillement autour du pieu, bande qui est de l'ordre d'une dizaine de fois le diamètre moyen des grains (si la rugosité de surface est inférieure à cette valeur).

La communication de Garnier qui regroupe des résultats d'essais en chambre de calibration et en centrifugeuse montre que, vis à vis de la valeur maximale du frottement latéral, un effet d'échelle ne se manifeste que si le diamètre du pieu est inférieur à environ 100 fois le diamètre moyen des grains. En revanche, la valeur du déplacement nécessaire pour mobiliser le frottement maximum, reste attachée à la taille des grains (et à la rugosité de surface). Ceci pourra conduire dans certains cas à devoir réduire à la fois la taille du modèle physique de la fondation sur pieux et celle des grains du sable du modèle.

2.5 Développement des modèles de loi de comportement

La conférence prononcée par le Professeur Tatsuoka a montré le degré de complexification et les progrès dans la capacité prédictive des modèles de loi de comportement des sols. La communication présentée par Christensen et Nelson, qui traite d'un modèle associant un élément descripteur de l'élasticité non-linéaire, d'un élément rendant compte des déformations plastiques volumiques et d'une série de mécanismes de frottement-glissement pour décrire les effets de cisaillement réversibles et permanents, en est un bon exemple. Les résultats présentés reproduisent avec une fidélité remarquable le comportement de sables lors d'essais triaxiaux et de torsion-cisaillement comportant des phases de grands déchargements et de larges rotations des contraintes principales.

Cependant, outre le fait que l'application de nombre de ces modèles complexes à des problèmes aux limites concrets est encore souvent la source de difficultés numériques rédhibitoires, il est légitime de s'interroger sur les justifications de la complexité des modèles proposés. Ne convient-il pas de consacrer autant de réflexion à l'identification des paramètres significatifs pour bien établir la valeur de modèles simplifiés approchés ? Ce propos peut être illustré par deux exemples de travaux déjà anciens du LCPC.

Pour l'analyse des déplacements induits par la consolidation d'un sol compressible sous un remblai (Lepidas et Magnan 1990) il a été montré par une analyse paramétrique détaillée que le seul paramètre descripteur de l'anisotropie ayant un effet sensible était le rapport G_H/E'_V .

Dans le problème du chargement axial d'un pieu (Tadjbakhsh et Frank 1985), vis-à-vis de l'appréciation du frottement latéral, le résultat apparaît presque totalement gouverné par le comportement à l'interface, car les déformations plastiques sont contenues dans une zone d'extension très faible. Il est dès lors inutile d'avoir ici une description complexe du comportement du massif de sol.

2.6 Validation des modèles de loi de comportement

La qualité des résultats obtenus sur essais de laboratoire en champ homogène n'assure pas seule la possibilité de leur application et de leur intégration pour des applications concrètes. Ceci tient en particulier :

- à la complexité des mécanismes de développement des déformations permanentes quand plusieurs sont en jeu

simultanément,

- à l'apparition souvent très précoce de déformations permanentes localisées dans les problèmes d'interaction sol/structure.

Ceci rend dès lors indispensable, pour une réelle évaluation et validation, la confrontation de l'application de ces modèles de loi de comportement à des problèmes concrets pour l'ingénieur.

Ainsi, le professeur Nussbaumer a souligné lors de sa conférence l'insuffisance, dans le domaine des ouvrages de soutènements, de références expérimentales pour améliorer la médiocrité actuelle des prévisions des déplacements horizontaux qui sont maintenant la préoccupation majeure des travaux d'excavation en milieu urbain. Un exemple pour illustrer ce besoin de données expérimentales est fourni par la communication de Mestat qui compare différents modèles de comportement appliqués à un problème d'excavation sans soutènement. Selon le modèle de loi de comportement en déchargement, les cinématiques des déplacements sont fondamentalement différentes, mais en l'absence de toute donnée expérimentale il n'est pas possible de trancher entre modèles.

Les modèles réduits physiques se présentent comme un outil particulièrement intéressant pour des exercices de validation en raison de la maîtrise des conditions expérimentales qu'ils permettent. A cet égard, il faut souligner les progrès importants et constants effectués par les techniques de saisie et de traitement d'images. Ces techniques ont été employées avec des modèles en centrifugeuse depuis plusieurs années notamment à l'Université de Delft (Allersma 1991) et au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Garnier et al. 1991). Grant et al en donnent un exemple récent, montrant le type de cartographie qu'il est possible actuellement d'établir des champs de déplacement et de déformation sur des modèles physiques bi-dimensionnels sollicités en déformation plane.

2.7 Modèle d'ensemble

La vérification de la conception des ouvrages nécessite que le géotechnicien dispose d'un ou de plusieurs modèles d'ensemble du problème posé pour s'assurer du comportement vis à vis des états-limites ultimes et de service. Ceci impliquera en général que soient appréciés convenablement d'une part les modes de rupture, d'autre part le comportement en déplacement.

Pour l'appréciation des modes de rupture, les modèles physiques gardent toujours un intérêt, tant vis à vis des méthodes de calcul aux éléments finis que des méthodes de calcul à la rupture. Deux exemples sont cités ici pour illustrer l'apport possible des modèles physiques et l'importance d'une simulation correcte des forces de masse.

Le LCPC avait eu à étudier, il y a une dizaine d'années, le dimensionnement d'un remblai de protection, sur le versant d'une vallée des Alpes, pour résister à la chute de blocs pouvant atteindre 50 m³ et une vitesse de 100 km/h (Lepert et Corté 1988). Avec une approche classique quasi-statique ou des essais effectués à 1 g, ceci conduit à envisager des mécanismes de rupture d'ensemble du remblai. Ces mécanismes s'avèrent totalement contredits lorsque l'on mène l'expérience en similitude mécanique. Ceci tient à l'effet de confinement qui est reproduit en centrifugeuse par la simulation convenable des contraintes géostatiques. L'approche expérimentale a permis de quantifier à par ailleurs permis de mettre en évidence (par des mesures accélérométriques) qu'une part importante de l'énergie cinétique incidente est transmise au sol pendant l'impact sous forme d'ondes élastiques.

Le second exemple, tiré de la communication de Garnier, se rapporte à l'étude d'ancrages par caisson à effet de succion pour des ouvrages offshore. Lorsque l'essai est pratiqué sur modèle réduit en pesanteur normale, la rupture se produit à la base du caisson alors qu'avec une simulation correcte des forces de masse, on observe en fait un mécanisme de rupture généralisée très analogue à celui du poinçonnement d'une fondation superficielle.

3 CONCLUSION

Pour conclure cette intervention, nous formulerons les appréciations suivantes pour susciter des réflexions :

- l'ingénieur a besoin d'un ensemble de modèles au-delà des seuls modèles descripteurs de la rhéologie des sols ; ce dernier aspect, s'il est essentiel, ne devrait pas masquer les autres,
- le coût des études de laboratoire, du temps d'études numériques avec les modèles les plus élaborés et la maîtrise que suppose leur complexité militent toujours pour le développement d'approches plus simples et/ou plus globales.

Ceci n'est-il pas un peu perdu de vue ? Ne faut-il pas trouver un autre équilibre dans la répartition actuelle des efforts de recherche et dans l'attention qui est accordée aux divers aspects ?

Sur un autre plan, les approches suivies restent encore très (trop peut-être ?) majoritairement de nature déterministe. Le développement de modèles statistiques et des méthodologies d'étude associées, correctement formulées pour des applications pratiques, demeure embryonnaire.

Le progrès constant dans le domaine de l'instrumentation et des techniques d'observation consolide l'intérêt que présentent les modèles physiques tant pour les études de nature phénoménologique que pour la validation de modèles théoriques.

Vis à vis de cette préoccupation d'une valorisation croisée des approches par modèles théoriques et physiques, il faut regretter que très peu de communications s'attachent à qualifier la confiance dans les résultats présentés. Ne faudrait-il pas encourager plus d'effort dans la quantification : des incertitudes attachées aux résultats des modèles physiques, ainsi qu'à la sensibilité des modèles théoriques aux valeurs de leurs paramètres constitutifs et des méthodes numériques de résolution.

REFERENCES

- Allard, M. A. G. et al (1997) "Tension piles and tension pile groups in sand-physical and numerical modelling aspects". Comptes rendus XIV ICSMFE, Vol.1.,session 1.3
- Allersma, H.G.B. (1991) "Using image processing in centrifuge research". Centrifuge 91, Boulder, A.A. Balkema, pp. 551-558
- Christensen, C. T., Nelson, R. B. (1997) "Constitutive model for large load reversals and stress rotation in soils". Comptes rendus XIV ICSMFE, Vol.1.,session 1.3
- Corté, J.-F. (1989) "Essais sur modèles réduits en géotechnique". Rapport général. Session 11. Essais sur modèles. Comptes rendus, XII ICSMFE, Vol. 4.
- Garnier, J., et al (1991) "Computer image processing for displacements measurement". Centrifuge 91, Boulder, A.A. Balkema, pp. 543-550
- Garnier, J. (1997) "Validation des modèles physiques et numériques : problèmes d'effets d'échelle". Comptes rendus XIV ICSMFE, Vol.1.,session 1.3
- Grant, R.J. et al (1997) "Prediction of pre-failure ground movements in geotechnical engineering : physical and numerical techniques". Comptes rendus XIV ICSMFE, Vol.1.,session 1.3
- Hegazy, Y. A. et al (1997) "3-D geostatistical evaluation of seismic piezocone data". Comptes rendus XIV ICSMFE, Vol.1.,session 1.3
- Lepert, P., Corté, J.-F. (1988) "Etude en centrifugeuse de l'impact de gros blocs rocheux sur un remblai de protection". Congrès Intern. sur la modélisation géotechnique en centrifugeuse, Centrifuge 88, Paris, 25/27 avril 1988, A.A. Balkema, pp. 457-465.
- Lepidas, I., Magnan, J.-P. (1990) "Fluage et consolidation des sols argileux : modélisation numérique". Rapport de recherche LPC n° 157, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

- Mayoraz, F. et al (1997) "Neural networks : a tool for the prediction of slope movements". Comptes rendus XIV ICSMFE, Vol.1.,session 1.3
- Mestat, P., Arafati, N. (1997) "Modélisation simplifiée du comportement des sols au déchargement". Comptes rendus XIV ICSMFE, Vol.1.,session 1.3
- Park, S. Z. et al (1997) "Evaluation of the stability of embankment on soft ground through field monitoring system". Comptes rendus XIV ICSMFE, Vol.1.,session 1.3
- Tadjbakhsh, S., Frank, R. (1985) "Etude par la méthode des éléments finis du comportement élastoplastique des sols dilatants. Application aux pieux sous charge axiale" Rapport de recherche LPC n° 135, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Thooft, K. et al (1997) "Cavity expansion theory applied to CPT and model pile test simulations". Comptes rendus XIV ICSMFE, Vol.1.,session 1.3