

PROCEEDINGS COMPTES RENDUS

REPRINT

THIRTEENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING

NEW DELHI/5-10 JANUARY, 1994



TREIZIEME CONGRES INTERNATIONAL DE MECANIQUE DES SOLS ET DES TRAVAUX DE FONDATIONS

NEW DELHI/5-10 JANVIER, 1994



OXFORD & IBH PUBLISHING CO. PVT. LTD.
New Delhi **Bombay** Calcutta



PRATIQUE DE LA MODELISATION EN GEOTECHNIQUE

THE PRACTICE OF MODELING IN GEOTECHNICS

Jean Salençon

Professor, Laboratoire de Mécanique des Solides
École Polytechnique
Palaiseau, France

RESUME

La conception et le dimensionnement d'un ouvrage en géotechnique s'appuie sur une succession de modélisations qui comprend la modélisation géométrique de l'ouvrage, la modélisation mécanique des efforts et du comportement, la modélisation mathématique, la modélisation numérique, en liaison avec la modélisation des actions et la "modélisation" de la sécurité. Le recours de plus en plus fréquent à des logiciels de calcul dans ce domaine conduit le géotechnicien désireux d'en acquérir une maîtrise suffisante à une prise de conscience accrue du rôle joué par ces modélisations et des divers choix qu'elles impliquent à tous les niveaux, afin d'en évaluer la pertinence pour le problème étudié, du point de vue des résultats recherchés, compte tenu des données réellement disponibles.

PROBLÉMATIQUE

Comme dans divers autres domaines des sciences physiques, chimiques, biologiques, médicales, économiques,... le terme de "modélisation" semble s'être progressivement substitué à celui de "théorie" en géotechnique. Plus que d'une simple mode verbale il s'agit, pour le géotechnicien, de l'élargissement d'un concept qui englobe désormais non seulement la modélisation physique puis mathématique des phénomènes élémentaires aboutissant par exemple à la loi de comportement des matériaux constitutifs de l'ouvrage étudié, mais aussi celle du problème pratique considéré dans tous ses aspects (géométrie, nature et histoire des sollicitations,...) de façon à en dégager les traits dominants et à aboutir à un problème mathématique bien posé pour être résolu. Cette résolution elle-même fait maintenant très souvent l'objet de traitements numériques et l'on n'hésite pas à parler, à son propos, de la modélisation numérique du problème mathématique.

Ainsi, dans une terminologie qui n'est sans doute pas encore totalement établie, la modélisation du problème géotechnique peut-elle couvrir tout le champ qui va du problème concret posé sur le terrain aux résultats obtenus à travers un logiciel de dimensionnement.

Le concept ainsi défini de "modélisation" ne peut être dissocié de celui de "validation". Il s'agit, pour un type d'applications donné, de contrôler la validité d'une modélisation en dégageant notamment son domaine de pertinence tant du point de vue de ses conditions d'application que de celui des résultats à en retenir.

L'approche de la sécurité elle-même suppose évidemment une modélisation sous-jacente, comme l'illustre actuellement le calcul aux états limites ultimes (Ovesen, 1989 ; de Buhan, Dormieux et Salençon, 1993 ; Salençon, 1993). Ceci explique les difficultés rencontrées pour mettre en cohérence des approches différentes, ou bien pour mettre en oeuvre une approche nouvelle lorsque l'on n'est pas suffisamment familier avec la modélisation correspondante.

Enfin, on peut penser (sinon craindre) que le recours de plus en plus fréquent à des logiciels de calcul ne soit progressivement intégré dans les règlements, éventuellement sous la forme de logiciels certifiés ou agréés dont les domaines de pertinence devront être parfaitement reconnus et vis-à-vis desquels l'innovation ne demeurera possible qu'au prix d'une maîtrise totale de la modélisation.

L'objet de la présente contribution est de dégager quels aspects de la démarche de modélisation sont essentiels pour le géotechnicien. La structuration donnée ci-dessous de la modélisation du problème de géotechnique présente l'avantage de distinguer diverses étapes que l'on examinera successivement.

MODÉLISATIONS PHYSIQUE ET MATHÉMATIQUE.

L'étape essentielle dans le processus de modélisation est la modélisation physique et mathématique qui couvre tout le champ qui s'étend du problème

concret au problème mathématique. On y trouve en interaction, intimement mêlées et indissociables, la modélisation géométrique, la modélisation mécanique des efforts, la modélisation du comportement mécanique des matériaux, la modélisation des actions et la "modélisation de la sécurité".

Quoique préalable, cette étape n'est pas indépendante de la modélisation numérique examinée ultérieurement, dans la mesure où, selon les techniques numériques disponibles, elle pourra être orientée vers l'obtention de problèmes mathématiques différents à partir du même problème concret initial, et donc sur des modélisations géométriques, mécaniques, etc. différentes. On peut illustrer cette idée de façon simple : un tirant peut être traité comme un milieu curviligne (théorie des poutres) ou comme un milieu continu bidimensionnel ou tridimensionnel dans un logiciel d'éléments finis.

C'est évidemment dans cette étape qu'intervient "l'art" de l'ingénieur géotechnicien qui s'affirme, à partir de la formation initiale, par l'expérience.

Modélisation géométrique et modélisation mécanique.

La présentation adoptée dans certains cours de Mécanique des Milieux Continus (Germain, 1986 ; Salençon, 1988) pour écoles d'ingénieurs, fondée sur la méthode des puissances virtuelles, met en valeur la priorité de la modélisation géométrique (description géométrique du système et de ses mouvements) et fournit la méthode générale pour la construction, sur une telle description géométrique, de modélisations des efforts mécaniquement cohérentes. L'expérience montre que cette présentation, que ceux qui la connaissent mal et ne la pratiquent pas qualifient parfois d'axiomatique, est bien reçue par les étudiants qui perçoivent qu'elle repose fondamentalement sur l'intuition mécanique des phénomènes, c'est-à-dire sur l'expérience et les expériences. Elle se révèle particulièrement adaptée en génie civil, et notamment en géotechnique, par sa polyvalence qui permet d'aboutir à des modèles variés en mettant en évidence leur structure fondamentale commune. On passe aussi, sans discontinuité dans la pensée, du modèle classique du milieu continu aux milieux continus généralisés (câbles, poutres,...), et aussi aux milieux multiphasiques (Dormieux, Coussy et de Buhan, 1991). En outre, elle met en valeur le concept de dualité, qui se révèle fondamental dans la formulation mathématique de nombreux problèmes mécaniques pour le traitement numérique.

Il n'est évidemment pas question de suggérer un quelconque caractère universel pour ce mode d'exposé. On veut seulement insister sur le fait que, quelle que soit la méthode d'exposé spécifique choisie, cohérente avec l'esprit général de sa formation, il est essentiel que, pour le géotechnicien, l'idée de choix et par conséquent de critères correspondants soit indissociablement liée, dès ce stade, à celle de modélisation. Cette attitude, qui n'est évidemment pas réservée à la géotechnique, devra notamment être présente à l'esprit face à tout logiciel de calcul et de dimensionnement en géotechnique pour comprendre que des logiciels peuvent relever de modélisations géométriques et mécaniques différentes sans qu'un classement de valeur sur une échelle à un paramètre puisse nécessairement être établi entre eux.

Modélisation du comportement.

Dans le cadre d'une modélisation géométrique et mécanique donnée le comportement de chaque matériau constitutif de l'ouvrage étudié est exprimé par une loi de comportement dont la nature, puis les paramètres caractéristiques, sont identifiés à partir d'expériences de laboratoire et/ou in situ.

Le géotechnicien doit choisir les modèles de comportement les mieux adaptés ; Élasticité, viscoélasticité, poroélasticité, élastoplasticité.... "à la rupture". Ce choix, orienté par les résultats expérimentaux, est conditionné par le problème étudié, le type de résultats auxquels on s'intéresse, et l'approche de la sécurité que l'on adopte ou qui est imposée. Ici encore il ne s'agit pas d'un aspect caractéristique de la géotechnique qui la distinguerait des autres disciplines du génie civil et de la construction. Toutefois force est de constater que, pour le géotechnicien, la variété des modélisations disponibles et utilisées pour le comportement des sols est particulièrement grande. Ceci induit une plus grande diversité des méthodes d'analyse c'est-à-dire, finalement, des modélisations mathématiques du problème initial.

Modélisation mathématique.

Il apparaît que le géotechnicien est assez souvent mal informé des fondements théoriques des modélisations mathématiques auxquelles il aboutit ainsi et qui lui sont familières. Cette situation doit maintenant être corrigée en raison du développement des logiciels de calcul et de dimensionnement que le géotechnicien se refuse à considérer comme des boîtes noires. Par ailleurs, l'apparition de techniques nouvelles (comme dans le domaine du renforcement des sols) implique le développement simultané des méthodes de dimensionnement et de vérification adaptées. On s'aperçoit aussi que le lien étroit entre la modélisation du problème et l'approche de la sécurité à laquelle elle correspond est d'autant mieux perçu que l'on est capable de remonter aux racines mêmes de la modélisation et d'en évaluer l'adéquation à la réalité physique. A titre d'exemple, l'analyse à la rupture couramment pratiquée en géotechnique, fondement des méthodes de calcul aux états limites ultimes, est construite sur le simple concept de résistance appliqué aux matériaux constitutifs du système dont on doit assurer l'équilibre, mais sa pertinence physique est liée à la ductilité des matériaux dans les conditions concernées de façon à permettre la compatibilité des déformations nécessaires à la mobilisation simultanée des diverses résistances (Jewell, 1988). Enfin, il apparaît également, à l'occasion notamment des travaux actuels sur les règlements de calcul et de sécurité, qu'une harmonisation s'imposera entre les diverses disciplines du génie civil et de la construction (géotechnique, constructions métalliques, structures en béton,...). Celle-ci sera d'autant facilitée que les interlocuteurs auront reconnu les limites d'applicabilité de leurs méthodes communes dans leurs disciplines respectives.

MODÉLISATION NUMÉRIQUE.

La modélisation numérique s'adresse au problème mathématique résultant des modélisations précédentes et en organise le traitement numérique. Il n'entre pas dans la vocation du géotechnicien d'y être un expert. Il est bon toutefois qu'il ait connaissance des techniques usuelles afin d'être en mesure d'en évaluer la pertinence, la stabilité, la sensibilité à la discréétion et la précision, du point de vue des besoins pratiques du problème concret concerné : il aura ainsi la vision critique nécessaire à un responsable de projet et évitera qu'un "outil" numérique ne soit confondu avec un modèle mécanique. L'évaluation de l'ensemble des caractéristiques ci-dessus est regroupé dans la "validation" du modèle numérique appliquée à un problème mathématique donné.

RÉFLEXIONS GÉNÉRALES.

Cette analyse méthodique des diverses étapes d'une modélisation a mis en évidence l'importance des choix que le géotechnicien est amené à y faire. Il est essentiel que ces choix soient effectués consciemment avec la connaissance physique de leurs implications.

De ce point de vue on doit se garder de l'idée simpliste qu'une modélisation serait d'autant plus pertinente qu'elle serait plus fine, qu'il s'agisse de la géométrie, des efforts ou du comportement. Les exemples sont nombreux qui rappellent que la finesse d'une modélisation accroît la complexité du problème mathématique qui en résulte, ne serait-ce que par la quantité de données nécessaires pour la définir : paramètres caractéristiques dans la loi de comportement, données initiales, trajet ou histoire de charge, etc. Outre le cas où ces données sont indisponibles, on s'intéressera à la sensibilité des résultats du modèle vis-à-vis de leur connaissance approximative qui est susceptible de réduire gravement la pertinence de la modélisation. Ainsi une modélisation d'apparence plus "grossière" peut se révéler préférable. C'est ce qui explique notamment l'intérêt maintenu en géotechnique pour les analyses à la rupture dont les résultats sont indépendants des contraintes initiales et de l'histoire de chargement.

CONCLUSIONS.

Loin de réduire la part des essais de laboratoire, *in situ*, et sur ouvrages réels, la nouvelle dimension prise par la modélisation en géotechnique appelle une intervention vigilante de l'art de l'ingénieur. Elle retentit évidemment sur la formation du géotechnicien.

En formation initiale, l'expérience du terrain ne peut s'acquérir ni par les livres ni par les cours et reste, à l'évidence, limitée. C'est en revanche une occasion privilégié d'expérimenter, sans risques, différents logiciels sur des "cas", d'en acquérir la pratique et d'en mesurer les limites voire d'en identifier les dangers.

La formation continue peut tendre au partage des expériences acquises, de toutes natures, et aussi à l'actualisation des connaissances en matière de modélisation et de logiciels. Ce dernier point implique que les ingénieurs chercheurs qui sont à l'origine des progrès dans ces domaines aient le souci d'une réelle communication avec les praticiens.

RÉFÉRENCES

- de Buhan, P., Dormieux, L. et Salençon, J. (1993). A theoretical approach to the ultimate limit state design. *Int. Symp. on Limit State Design in Geotechnical Engineering*, Copenhagen, Denmark.
- Dormieux, L., Coussy, O. et de Buhan, P. (1991). Modélisation mécanique d'un milieu polyphasique par la méthode des puissances virtuelles. *C.R.Ac.Sc. Paris*, t.313, II, pp. 863-868.
- Germain, P. (1986). *Mécanique*. Ellipses, Paris.
- Jewell, R.A. (1988). Compatibility, serviceability and design factors for reinforced soil walls. *Proc. Int. Geotech. Symp. on Theory and Practice of Earth Reinforcement*, Fukuoka (Japan), Balkema publ., pp. 611-616.
- Ovesen, N.K. (1985). General report, session 30 : Codes and Standards. *Proc. XII Int. Conf. Soil Mechanics & Foundations Engineering*, vol.4, pp. 2751-2764.
- Salençon, J. (1988). *Mécanique des Milieux Continus*. Ellipses, Paris.
- Salençon, J. (1993). Approche théorique du calcul aux états limites ultimes. A paraître.



THE PRACTICE OF MODELING IN GEOTECHNICS

PRATIQUE DE LA MODÉLISATION EN GÉOTECHNIQUE

Jean SALENÇON

Professor, Laboratoire de Mécanique des Solides, École Polytechnique,
F 91128 Palaiseau, France

The design of geotechnical structures is based upon a sequence of modelings which include the geometrical modeling of the structure itself, the mechanical modeling of the forces and of the behaviour of the constituent materials, mathematical modeling, numerical modeling, together with the modeling of the applied loads and the "modeling" of safety. Computer codes being increasingly used for this purpose require the geotechnical engineer to get a better knowledge of the choices involved at these various stages of modeling in order to be able to assess their relevance for the problem under consideration, as regards the results which are looked for, taking into account the data actually available.

SURVEY

In Geotechnics, as in many other scientific domains such as Physics, Chemistry, Biology, Economy... the word *modeling* seems to have progressively substituted itself for *theory*. As regards the geotechnical engineer this proves to be more than a fashionable verbal change : the corresponding concepts being enlarged will now cover, besides the physical and mathematical modeling of the elementary phenomena involved which lead for instance to the expression of the constitutive law of the constituent materials for the considered structure, the modeling of the practical problem itself in all its aspects (geometry, loading history,...) in order to bring out its dominant patterns leading to a properly set mathematical problem to be solved. Furthermore, solving this problem most often requires numerical methods to be used, this being called the numerical modeling of the mathematical problem.

Even if such a terminology is not quite settled yet, the modeling of a geotechnical problem may cover the whole range from the practical problem to the design results obtained through a computer code.

Together with the very concept of modeling, validation must also be introduced which means that the validity of a model shall be controlled for the considered class of applications in order to determine its relevance regarding both the conditions to be satisfied and the results to be looked for.

Any approach to safety in a design code also implied modeling beforehand as it may be seen for instance when considering Ultimate Limit State Design (Ovesen, 1989 ; de Buhan, Dormieux & Salençon, 1993 ; Salençon, 1993). This explains the difficulties encountered when trying to make different such approaches match each other, or when one is not sufficiently aware of the modeling corresponding to the approach he is dealing with.

Finally it might be anticipated that the use of some certified computer codes could become part of the official design codes ; this would imply that the domains of relevance of such computer codes should be completely recognized, and it would result in making innovation possible only through a perfect domination of modeling in order to be able to produce the necessary justifications.

The purpose of this contribution is to determine what aspects of the modeling process can be considered essential for geotechnical engineers. Following the description given above the different stages of the process will be successively studied.

PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING

Physical and mathematical modeling, covering the whole range from the practical problem to the mathematical one, is undoubtedly the essential stage. It involves geometrical modeling, mechanical modeling for forces and efforts in general, mechanical constitutive modeling, modeling of the applied loads, and modeling of safety, which are all intricately linked to each other and cannot but schematically be dissociated.

Although it is prior to numerical modeling one must also recall that this stage is not independent of the numerical modeling stage which will be dealt with further on since, depending on the numerical techniques available, it might be oriented so as to obtain different mathematical problems for the same initial practical one, and therefore pass through different geometrical and/or mechanical modelings. As an illustrative example one may think of a tie-back which can be modeled either as a one-dimensional continuum and treated through beam analysis or as a two-or three-dimensional continuum and treated by means of finite elements.

Obviously this stage of the modeling process is where the art of the geotechnical engineer is most important, which is developed from his initial education through experience.

Geometrical and mechanical modelings

Some continuum mechanics text books which are used in (our) engineering schools (Germain, 1986 ; Salençon, 1988) are based upon the "method of virtual work" which highlights the priority of the geometrical modeling - geometrical description of the system and definition of the considered movements- and also gives the general method for the construction of mechanically consistent modelings for forces and efforts on such a geometrical modeling. Despite its being considered axiomatic by those who are not sufficiently aware of it and are not usually practising it, this presentation is well received by the students who perceive that it is basically relying on the mechanical intuition of the phenomena under consideration i.e. on experience and experiments. It has proved to be especially adequate for civil engineering and more precisely geotechnics, due to its versatility which results in the construction of various mechanical models together with bringing out their common architecture : classical continuum mechanics, generalized continua media (cables, beams,...) up to multiphasic media (Dormieux, Coussy & de Buhan, 1991). Furthermore it enhances the concept of duality which is of great importance for the mathematical formulation of many mechanical problems and their numerical treatment.

Obviously such a presentation will not be suggested as panacea. It is only underlined that, whatever the presentation, which should be consistent with his education as a whole, the geotechnical engineer must bear in mind that modeling implies choices to be made even at that very first stage. Not specific to geotechnics, this attitude being applied to computer codes will help understanding that different design codes may proceed from different geometrical and mechanical modelings which means that no self-evident order will necessarily exist between them as regards their relevance.

Modeling the behaviour of the materials

Within the frame of a given geometrical and mechanical modeling, the behaviour of each constituent material of the system under consideration is expressed by means of a constitutive law which is identified from lab or in

situ tests together with its characteristic parameters.

The geotechnical engineer will choose the mechanical constitutive models which are the most adequate among the impressive available list : elasticity, viscoelasticity, poroelasticity, elastoplasticity, ... yield. This choice relies on experimental results and is governed by the very problem under consideration, the results he is looking for, and the approach to safety that he has in mind or that is compulsory. Again this is nothing specific to geotechnics but it may be observed that the variety of mechanical constitutive models which are commonly used for soils is specially great, which may result in a greater variety of analysis and eventually of mathematical modelings for one initial practical problem, compared with what is commonly encountered in other branches of civil engineering.

Mathematical modeling

It seems that most often the geotechnical engineer is rather unaware of the fundamental bases of the mathematical modelings he commonly uses. This situation is going to change due to the development of computer codes which require a better understanding in order not to be taken as "black boxes". Moreover new techniques are now being used in practice (e.g. in soil reinforcement) which call for adequate design methods. It appears also that the connection between the model of a problem and the corresponding approach to safety is far more evident when it is possible to go down to the very roots of the model and there to check its adequacy to physical realities. As an example, the yield design approach which is currently implemented in geotechnics is the theoretical basis of the Ultimate Limit State Design methods ; it is mathematically derived from the only concept of strength applied to any constituent material of the system whose equilibrium is to be checked ; but its relevance depends on the ductility of those materials in the conditions of the problem, so that the deformations necessary to mobilize the required resistances in the materials be physically compatible (Jewell, 1988). Finally it appears, for instance when looking at the work being done about design codes, that the approaches to safety adopted in the various branches of civil engineering should be harmonized : this harmonization will be made easier by pointing out the common bases of the corresponding models and assessing their relevance in each case.

Numerical modeling

Numerical modeling addresses the mathematical problem derived from the preceding stages in order to implement a numerical treatment. Although there is no need for the geotechnical engineer to be an expert in that field, it is advisable that he be aware of the common numerical techniques in order to be able to assess their relevance, stability, consistency, dependence on the mesh, as regards the results required for the problem under consideration from the practical point of view. Thus he will get the critical vision needed when in charge of a project and also he will not accept that the numerical "tool" be taken for a mechanical model. The assessment of all the above listed characteristics is nothing but the validation of the numerical model applied to a given mathematical problem.

GENERAL REMARKS

It follows from this methodical analysis of the different stages of modeling that the choices the geotechnical engineer has to make are very important and should be made with a clear vision of their physical meaning and of their practical implications. From this point of view the oversimplifying idea that a model is the more relevant as it is more refined regarding the geometry, the efforts or the behaviour, should be evacuated. Numerous examples recall that refining a model increases the complexity of the resulting mathematical problem, at least due to the data necessary for its definition : characteristic parameters in the constitutive law, initial values, loading path or loading history, etc. Besides the case when these data are not available, the variability of the results in the case of approximate values is to be examined for it may reduce the relevance of the model drastically. This may explain that yield design methods are still popular in geotechnics for the results so obtained are independent of the initial stresses and of the loading history.

CONCLUSIONS

Contrary to what might be expected at a superficial glance, it has been shown that the present development of modeling in geotechnics does not reduce the importance of lab and in situ tests and still makes the art of the geotechnical engineer a crucial factor in the treatment of geotechnical problems. Geotechnical engineering education must be organized consequently.

As regards initial education it is clear that in situ practice cannot be acquired through the reading of text books or the attendance of lectures even delivered by prestigious engineers. But it is the one opportunity to experiment various models and computer codes on practical cases, under the guidance of qualified teachers, in order to get accustomed to them, to assess their relevance and to get aware of misleading conclusions which may result from their improper use.

Continuous education would aim at sharing the various aspects of the experience acquired through the treatment of real cases and also at updating the state of the art regarding modeling and computer codes. The latter point implies that the leading engineers and researchers in these areas should actually take care to communicate with those involved in practice.

REFERENCES

- de Buhan, P., Dormieux, L. & Salençon, J. (1993). A theoretical approach to the ultimate limit state design. *Int. Symp. on Limit State Design in Geotechnical Engineering*, Copenhagen, Denmark.
- Dormieux, L., Coussy, O. & de Buhan, P. (1991). Modélisation mécanique d'un milieu polyphasique par la méthode des puissances virtuelles. *C.R.A.C.Sc. Paris*, t.313, II, pp. 863-868.
- Germain, P. (1986). *Mécanique*. Ellipses Publ., Paris.
- Jewell, R.A. (1988). Compatibility, serviceability and design factors for reinforced soil walls. *Proc. Int. Geotech. Symp. on Theory and Practice of Earth Reinforcement*, Fukuoka (Japan), Balkema publ., pp. 611-616.
- Ovesen, N.K. (1985). General report, session 30 : Codes and Standards. *Proc. XII Int. Conf. Soil Mechanics & Foundations Engineering*, vol.4, pp. 2751-2764.
- Salençon, J. (1988). *Mécanique des Milieux Continus*. Ellipses Publ., Paris.
- Salençon, J. (1993). Approche théorique du calcul aux états limites ultimes. *To appear*, Masson publ. Paris.