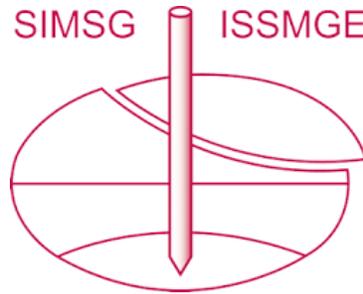


# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*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.*



# 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 ; 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-dessus 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 discrétisation 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 appliqué 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 retient 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 privilégiée 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*, Fukujo (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*.