



**HAL**  
open science

# Place des méthodes numériques dans l'enseignement de la géotechnique

Philippe Mestat, Yvon Riou

## ► To cite this version:

Philippe Mestat, Yvon Riou. Place des méthodes numériques dans l'enseignement de la géotechnique. Geotechnical Engineering Education and Training, CRC Press, pp.349-360, 2020, Geotechnical Engineering Education and Training, 9781003078623. <10.1201/9781003078623-62>. <hal-05151714>

**HAL Id: hal-05151714**

**<https://hal.science/hal-05151714v1>**

Submitted on 9 Jul 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC 4.0 - Attribution - Non-commercial use - International License

# Place des méthodes numériques dans l'enseignement de la géotechnique

Ph. Mestat

*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France*

Y. Riou

*Ecole Centrale de Nantes, France*

**RÉSUMÉ.** Cet article présente un panorama de l'enseignement en France des méthodes numériques en génie civil et de leurs applications à la géotechnique (Écoles d'ingénieur et Universités). Une enquête sur 114 cours a permis de distinguer des cours de formation de base et des cours spécialisés dans divers domaines de la géotechnique (rhéologie des sols, statique, dynamique, sismique, écoulements, hydro-mécanique, hydro-thermo-mécanique). Les programmes et les méthodes pédagogiques employées ont été analysés et comparés.

**ABSTRACT.** This paper presents a review of the french teaching of numerical methods in the field of civil engineering and their applications on geotechnics (Engineer's School and University). A survey on 114 courses has shown two types of course: basic courses and specialized courses (rheology, statics, dynamics, seismic, seepage, hydro-thermo-mechanics). Programs and teaching methods are discussed and compared.

## 1 INTRODUCTION

La modélisation numérique est devenue un outil incontournable dans la plupart des domaines industriels. La pratique du métier d'ingénieur a changé et celui-ci est aujourd'hui amené à simuler des processus de construction et de fabrication pour les dimensionner, les améliorer ou les optimiser. La modélisation numérique permet cette simulation et fournit une évaluation des déplacements, des contraintes, des efforts et des moments dans les structures complexes, induits par les sollicitations qu'elles subissent. Elle conduit aussi à la visualisation de leur fonctionnement. L'exercice de la modélisation numérique demande une bonne connaissance des lois physiques, des techniques de calcul et une compréhension du comportement des matériaux. En géotechnique, comme dans les autres domaines des sciences de l'ingénieur, quiconque ne sera pas familiarisé avec les techniques numériques aura très probablement un handicap sévère dans le monde de l'ingénierie de demain, car il ne fait pas de doute que la place de la simulation ira grandissante.

En France, l'enseignement de la modélisation numérique et de ses méthodes, notamment de la méthode des éléments finis, est ainsi présent dans le programme de formation des Écoles d'ingénieurs et des Universités. Traditionnellement, une formation à la modélisation numérique comporte trois types de cours, plus ou moins développés selon les filières (généraliste ou spécialisée) :

- un cours de base sur les méthodes numériques de résolution des équations de la physique. Il peut s'agir d'un cours général sur les méthodes ou d'une introduction à une méthode particulière (comme par exemple, la méthode des éléments finis qui constitue la technique la plus populaire et la plus enseignée) ;

- un ou plusieurs cours de spécialisation sur les aspects algorithmiques de la résolution numérique de différents problèmes des sciences de l'ingénieur (comportement non linéaire des matériaux, non linéarité géométrique, dynamique, interactions sol-structures, hydraulique, thermo-hydro-mécanique, etc.) et sur l'élaboration de logiciels industriels (programmation, architecture des logiciels, pré- et postprocesseurs, vérification, validation) ;

- un ou plusieurs cours de modélisation numérique spécialisés, fondés sur l'utilisation de logiciels du commerce pour simuler le fonctionnement des ouvrages, qui complètent la formation de base en approfondissant certaines applications.

Afin de préciser le rôle, le contenu de cet enseignement et les liaisons existant avec l'enseignement de la géotechnique, les auteurs de cet article ont réalisé une enquête basée sur leurs expériences personnelles, sur des contacts directs et sur la consultation des sites Internet des Écoles d'ingénieurs et des Universités délivrant une formation en génie civil.

Cette enquête a concerné les établissements de l'enseignement supérieur en France, appartenant

d'une manière générale au secteur des Sciences Pour l'Ingénieur, sous tutelle des Ministères de l'Éducation Nationale, de l'Équipement ou de l'Industrie, et proposant un cycle de formation post baccalauréat long. Elle a permis de recenser cent-quatorze cours dans lesquels sont présentées les méthodes d'éléments finis (formation de base) ou dans lesquels la connaissance de ces méthodes est indispensable pour traiter des problèmes spécifiques (il s'agit par exemple d'une spécialisation en modélisation des structures, dynamique, géotechnique, couplage hydro-mécanique, non linéarités, etc.). Puis, recentrée sur les établissements affichant une vocation ou une option « génie civil », cette enquête a identifié vingt et un cours de modélisation numérique associés à un enseignement de géotechnique ou éventuellement de génie minier ou de génie de l'environnement (cavités souterraines, barrières anti-contaminantes...). Les problèmes spécifiques à la géologie ne seront pas évoqués.

Ce panorama n'est évidemment pas exhaustif. Certains établissements n'ont pas été contactés ou n'ont pas répondu à la demande de renseignements. L'analyse de toutes les informations recueillies est encore embryonnaire, mais elle permet de faire un premier bilan de cet enseignement et d'entamer une réflexion sur son contenu et la place qu'il convient de lui donner dans la formation de géotechnique.

## 2 LES CURSUS

### 2.1 Généralités

Compte tenu de la diversité du dispositif de la formation supérieure technologique et professionnalisée en France, et afin de situer l'enseignement de la géotechnique en France, nous donnons, ci-dessous, quelques points de repères cités dans les états généraux de l'Université en 1996. L'enseignement supérieur technologique et professionnalisé comprend, dans ses deux premiers cycles, deux types de filières :

1. les filières courtes conduisant à des diplômes sanctionnant deux années d'études après le baccalauréat, et comprenant :

les Sections de Techniciens Supérieurs implantées dans les lycées (STS) (70 %) ;

les Instituts Universitaires de Technologie (IUT) (30 %), composantes des Universités ;

2. les filières longues conduisant à des diplômes sanctionnant :

quatre années d'études après le baccalauréat : Instituts Universitaires Professionnalisés (IUP), Maîtrises de Sciences et techniques (MST), Maîtrises des Sciences de Gestion (MSG), Maîtrises de Technologie Industrielle (MTI) (30%)<sup>1</sup> ;

<sup>1</sup> Il conviendrait de rajouter à ces maîtrises les maîtrises 'classiques' de mécanique

cinq années d'études après le baccalauréat : Écoles d'Ingénieurs (50 %). DESS (Diplômes d'Études Supérieures Spécialisés) (20 %).

Ce recensement ne tient pas compte des nouveaux diplômes tels que les Diplômes de Recherche Technologique (DRT) et les Diplômes Nationaux de Techniciens Spécialisés (DNST)<sup>2</sup>. À cet enseignement de premier et second cycle, il faut rajouter un enseignement de troisième cycle dispensé sur un an et sanctionné par un Diplôme d'Études Approfondies (DEA), accessible aux titulaires d'une maîtrise ou d'un diplôme d'ingénieur et donnant accès à la préparation des thèses de doctorat.

### 2.2 Enseignement de géotechnique et de modélisation numérique

Le nombre d'enseignements des méthodes numériques associés à un cours de géotechnique est loin d'atteindre celui en vigueur actuellement dans le domaine des structures. La première partie de l'enquête menée en France auprès des établissements d'enseignement (Mestat et Riou, 2000) a mis en évidence les proportions suivantes : 73% des cours sont essentiellement consacrés au calcul des structures et seulement 14% dédiés aux ouvrages de géotechnique (y compris les aspects sismiques). Dans ce dernier pourcentage, on a également compté certains cours de spécialité ne recouvrant qu'en partie des aspects de géotechnique, comme des cours de structures et d'interaction sol-structures. Les frontières ne sont pas toujours très bien définies entre géotechnique et structures pour les cours de modélisation numérique des ouvrages.

L'analyse des résultats de notre enquête montre que les cours de base s'adressent plutôt aux élèves ingénieurs de quatrième ou de cinquième année et à ce titre devraient apparaître comme un cours de rappel pour les étudiants de DEA. En revanche, l'enseignement spécialisé de méthodes numériques en géotechnique est principalement destiné aux élèves ingénieurs de cinquième année, aux élèves de DEA (voire de DESS), ainsi qu'aux personnes issues de la formation continue familiarisées avec les méthodes traditionnelles de dimensionnement des ouvrages de géotechnique. Cet enseignement est alors considéré comme une spécialisation et, compte tenu de son aspect très spécifique, va généralement de pair avec un projet de fin d'études et une activité de recherche dans l'établissement concerné. Par ailleurs, s'il existe de nombreux thèmes de spécialisation dans le domaine des structures (calcul non linéaire rhéologique ou géométrique,

<sup>2</sup> Il est à noter que ce système est très complexe dans la mesure où il fait cohabiter :

au niveau bac+2 des DUT (IUT), des BTS (STS), des DEUST (Université) ;

au niveau bac+4 différents types de maîtrises professionnalisées et le diplôme des IUP.

dynamique, procédés de résolution des grands systèmes, approches probabilistes, méthodes d'optimisation, homogénéisation...), ceux concernant la géotechnique sont moins variés et se rapportent essentiellement aux non-linéarités et aux problèmes d'interaction sol-structures.

La seconde partie de l'enquête a porté sur un ensemble d'établissements dispensant un cours de géotechnique et un cours de modélisation numérique s'y rapportant (voir liste en annexe) :

- quatorze écoles d'ingénieurs sur les deux cent cinquante écoles d'ingénieurs en France ;
- trois DEA sur les quatorze DEA de génie civil ;
- un IUP sur les neuf IUP relevant du génie civil ;
- deux sur les huit maîtrises de génie civil ;
- aucun IUT sur les dix-huit IUT comportant un département de génie civil ;
- un DESS.

### 3 FORMATION DE BASE AUX MÉTHODES D'ÉLÉMENTS FINIS

#### 3.1 Objectifs de la formation de base

Une présentation idéale de la méthode des éléments finis devrait respecter un équilibre entre l'analyse mathématique de la méthode et sa mise en oeuvre dans des applications pratiques. Toutefois, le volume, le contenu et les méthodes pédagogiques des cours d'initiation aux méthodes d'éléments finis diffèrent dans chaque cas, et dépendent des orientations fixées par les Écoles ou Universités. Il existe néanmoins une série d'objectifs souhaitables qui sont notamment de :

- comprendre les fondements théoriques des méthodes d'éléments finis et, en particulier, du principe variationnel appliqué à la mécanique. Montrer comment passer d'un système d'équations différentielles, ou aux dérivées partielles, à un système matriciel d'équations algébriques ;
- maîtriser les techniques numériques de discrétisation, connaître les types d'éléments les plus courants et leur mise en oeuvre ;
- étudier quelques problèmes-modèles bien posés en élasticité linéaire (barres, poutres, plaques, éléments solides). Éventuellement, comparer avec une solution théorique connue ;
- préciser les limitations des méthodes numériques et les possibilités actuelles des logiciels d'éléments finis dans le domaine de la mécanique ;
- illustrer la démarche de modélisation et de réalisation d'un calcul par éléments finis. Apprendre à se servir à bon escient d'un logiciel d'éléments finis ;
- analyser le déroulement d'un calcul et savoir évaluer les résultats en liaison avec le cours de mécanique des structures ou de mécanique des sols. Développer le sens critique du futur ingénieur vis-à-vis des nombreux résultats fournis par un logiciel.

#### 3.2 Prérequis

Avant de participer à un cours de base sur les méthodes des éléments finis, il est indispensable que le futur ingénieur ait suivi des cours dans les matières suivantes :

- mécanique des milieux continus (statique, dynamique) ;
- résistance des matériaux et calcul de structures (élasticité linéaire, plasticité) ;
- mathématiques générales, analyse numérique, équations aux dérivées partielles, algèbre linéaire ;
- (éventuellement) informatique, programmation sur ordinateur, rhéologie des matériaux, etc.

Les trois premières matières constituent des prérequis classiques et font partie de tous les programmes dans les Écoles et les Universités. En revanche, les autres matières font souvent partie d'une option qu'il convient d'associer au cours de méthodes numériques. Concernant les applications étudiées dans un tel cours de base, il est fortement recommandé que chacune ait été traitée ou introduite d'un point de vue théorique dans le cours correspondant (par exemple des cours sur les structures, la dynamique, la mécanique des milieux continus ou autres) ; la nature de ces problèmes et les méthodes de calcul traditionnelles devraient également y être présentées.

#### 3.3 Programme des cours de base sur la méthode des éléments finis (type déplacements)

Il n'est pas facile de décrire un programme universel pour une formation de base en éléments finis. Cela dépend trop des filières et du découpage des matières en cours ; chaque établissement possède ses traditions, ses critères de temps (durée maximale des cours), son projet éducatif et ses méthodes pédagogiques pour répondre aux besoins du monde du travail. Par ailleurs, on peut concevoir une initiation aux méthodes d'éléments finis introduite à la fin du cours de calcul des structures, ou une formation de base en méthodes numériques « généraliste », indépendante de tout enseignement « métier ». Dans la plupart des cas, le programme des cours est réduit à quelques heures d'enseignement et de travaux pratiques. Si l'on met de côté les formations à forte dominante mathématique, l'examen du contenu des cours montre une grande ressemblance dans l'organisation et les sujets abordés. Le tableau 1 résume ces principaux sujets. La durée moyenne de ces cours (y compris les travaux pratiques et les travaux dirigés) est de 40 heures, avec des extrêmes de 8 et 120 heures.

Compte tenu des contraintes de temps des programmes, la place du comportement non linéaire est souvent reléguée dans les formations spécialisées. Le comportement élastique et isotrope

Tableau 1. Principaux sujets traités dans un cours d'éléments finis de type déplacements

1. Rappel de mécanique des milieux continus et d'élasticité linéaire.
2. Théorèmes énergétiques. Principe des travaux virtuels. Formulations variationnelles de problèmes aux limites.
3. Approximations et fonctions d'interpolation. Présentation d'éléments finis classiques (éléments de massif 2D, axisymétrique et 3D, barres, poutres, plaques). Hypothèses cinématiques, limitations et caractéristiques des éléments finis. Matrice de rigidité élémentaire.
4. Techniques numériques de discrétisation spatiale (transformation géométrique, algorithme d'assemblage, conditions aux limites, intégration numérique, système d'équations algébriques, résolution).
5. Conseils pour l'élaboration des maillages.
6. Problèmes d'élasticité linéaire (2D, axisymétrique, 3D). Erreur de discrétisation.
7. Introduction aux problèmes d'évolution et aux problèmes non linéaires.
8. Déroulement d'une étude par éléments finis. Introduction à la modélisation numérique en génie civil.
9. Panorama des applications en génie civil (statique, dynamique, sismique, diffusion en régime permanent ou transitoire, thermo-mécanique, hydro-mécanique, etc.).
10. Notion de validation des logiciels et des modèles d'éléments finis.

sert alors de référence à l'étude de comportements plus complexes abordés ultérieurement.

#### 4 FORMATIONS SPÉCIALISÉES EN ÉLÉMENTS FINIS POUR LA GÉOTECHNIQUE

##### 4.1 Objectifs des formations spécialisées en éléments finis

L'ingénieur de bureau d'études est amené à utiliser des logiciels de calcul par éléments finis de plus en plus complexes, dans des domaines d'applications classiques (comportement élastique linéaire), mais également dans des domaines où se croisent différents types de non-linéarités (élastoplasticité, contacts, couplage hydro-mécanique, etc.). La modélisation de ces phénomènes complexes (mais qui correspondent à la réalité observée) nécessite des formations spécialisées. Selon les établissements et le type de formation délivrée, l'accent est plutôt mis sur tel ou tel phénomène.

D'une manière générale, un cours de modélisation numérique spécialisé pour la géotechnique est considéré comme un cours d'approfondissement, nécessitant au préalable une bonne connaissance de la mécanique des milieux continus, de la résistance des matériaux, de la rhéologie des sols et de l'analyse numérique. Si, dans l'ensemble, il n'apparaît pas de différences notables dans les objectifs d'un tel enseignement selon les établissements, il importe de dissocier les formations de type ingénieur et les formations doctorales.

Dans le premier cas, les objectifs des formations spécialisées en éléments finis peuvent être de :

- compléter le cours de base de la méthode des éléments finis ;
- approfondir les cours de mécanique des milieux continus et de rhéologie des sols dans des domaines spécifiques en liaison avec la modélisation numérique des ouvrages (élastoplasticité, contacts,

calculs en statique et en dynamique, sismique, géotechnique, thermo-hydro-mécanique, etc.) ;

- présenter des stratégies de modélisation et les particularités du calcul des ouvrages de géotechnique (conditions aux limites, état initial du sol, phasage, sollicitations particulières (excavations)...)

- familiariser les étudiants avec le maniement d'un logiciel du commerce ou universitaire (pré- et post-processeurs, noyaux de calcul, lien avec les modeleurs géométriques, évaluation automatique des erreurs de discrétisation, maillages adaptatifs, organisation des bases de données, bibliothèques d'éléments, liens entre fichiers et traitements) ;

- appliquer les méthodes numériques au dimensionnement d'ouvrages pour divers problèmes d'interactions sol-structure (fondations, ouvrages souterrains, soutènements, renforcement des sols, barrages). Faire la liaison entre la modélisation numérique et la CAO (conception assistée par ordinateur). Réaliser un projet. Découvrir certains aspects de la vie professionnelle.

Dans les formations doctorales, l'enseignement des aspects fondamentaux est privilégié : lois de comportement, méthodes de résolution en non linéaire, modèles conceptuels dont les couplages thermo-mécanique, hydro-mécanique, thermo-hydro-mécanique, etc. Les objectifs habituels peuvent être décrits comme suit :

- donner aux étudiants une formation plus fondamentale dans le domaine de la résolution des équations aux dérivées partielles (EDP), décrivant les phénomènes physiques rencontrés par l'ingénieur ;

- fournir aux élèves les outils mathématiques et numériques nécessaires à la conception et au développement de logiciels destinés au calcul des ouvrages de géotechnique. Mettre en oeuvre les techniques numériques, pratiquer la programmation d'algorithmes et connaître les problèmes numériques associés. Intégrer des lois de comportement dans un code d'éléments finis (élastoplasticité, viscoplasticité, écrouissage, comportement cyclique, etc.). Connaître les schémas d'intégration des

Tableau 2. Enseignements spécialisés de modélisation numérique utiles pour le calcul d'ouvrages de géotechnique (enquête portant sur 114 enseignements).

Thème	Nombre de cours	Durée* (heures)	
		mini	maxi
Sous-thèmes abordés dans les cours			
Modèles conceptuels (rhéologie, applications)			
Propagation d'ondes	2	20	35
Comportement dynamique des ouvrages	3	25	34
Couplages (HM, TM, THM)	5	15	44
Interaction sol-structures, interfaces	6	15	42
Rhéologie et identification de paramètres	10	10	120
Analyse numérique - Théorie			
Cours généraux de modélisation numérique	7	12	60
Résolution de grands systèmes, erreur, stabilité	6	30	45
Résolution des systèmes non linéaires	7	18	42
Dynamique (analyse modale, propagation des ondes)	11	15	90
Éléments particuliers – contacts et interfaces	3	15	42
Résolution de problèmes instationnaires	1	21	
Modélisation géotechnique	10	10	40

\* La durée correspond au nombre d'heures cumulé de cours, de travaux pratiques et de travaux dirigés.

équations différentielles définissant ces lois. Critères de convergence des calculs ;

- comprendre et approfondir la démarche de modélisation en géotechnique. Savoir choisir les éléments à utiliser. Construire un maillage en fonction de la précision espérée. Estimer l'influence du maillage. Utiliser les notions d'indicateur et d'estimateur d'erreur (maillages adaptatifs, éléments hiérarchiques, h-version, p-version). Savoir exploiter et contrôler les résultats, justifier les approximations réalisées et valider le modèle élaboré. Effectuer le lien entre les résultats numériques et la pratique. Faire prendre conscience des problèmes numériques qui peuvent se poser au cours des calculs.

Trois catégories de cours apparaissent ainsi, dont le contenu peut varier selon l'importance accordée aux procédés de résolution numérique, au logiciel ou à l'aspect géotechnique (applications), et dont l'ambition dépendra également du cursus suivi (généraliste ou spécialisé). Le tableau 2 résume des informations sur le contenu et le volume horaire des enseignements spécialisés, dont la connaissance

s'avère très utile pour réaliser des calculs d'ouvrage de géotechnique. Ces informations ne sont pas exhaustives et comportent vraisemblablement des inexactitudes et des oublis provenant du caractère synthétique des fiches à notre disposition. Toutefois, on peut estimer qu'elles sont, d'une certaine manière, le reflet de la situation actuelle de l'enseignement des méthodes numériques en liaison avec un cours de géotechnique en France.

#### 4.2 Programme des cours approfondis d'éléments finis en géotechnique

Comme pour un cours de base, il est difficile d'établir un programme idéal pour une spécialisation en modélisation numérique appliquée à la géotechnique. Néanmoins, si l'objectif est de former un ingénieur-géotechnicien à la maîtrise de la modélisation numérique, il convient de mettre l'accent sur les modèles d'ouvrages et d'aborder plusieurs cas (tunnels, barrages, fondations, soutènements). En revanche, s'il s'agit de former des

Tableau 3. Principaux sujets traités dans un cours spécialisé en géotechnique

1. Rappels et compléments. Milieux continus et massifs de sol.
2. Rappel des bases de la méthode des éléments finis en élasticité linéaire.
3. Rhéologie des sols et algorithmes de résolution en comportement non linéaire. Critères de convergence. Schéma d'intégration des lois de comportement.
4. Interactions sol-structures. État de contraintes initiales. Éléments finis de contact. Algorithmes de résolution. Prise en compte des discontinuités dans les terrains.
5. Applications aux ouvrages souterrains et aux murs de soutènements.
6. Modélisation du fonctionnement des sols renforcés.
7. Traitement des problèmes d'évolution (fluage, consolidation). Algorithmes de couplage hydro-mécanique.
8. Applications à la consolidation des massifs de sol.
9. Validation des modèles d'éléments finis en géotechnique.
10. Introduction aux problèmes dynamiques et au calcul sismique.

chercheurs aptes à faire des développements en matière de logiciel ou de modèles, il faut approfondir les techniques de résolution, les algorithmes, les lois de comportement et leur mise en œuvre dans les logiciels. L'ouvrage n'est plus au centre de l'enseignement comme précédemment. La durée de la plupart des cours (y compris travaux pratiques et travaux dirigés) se situe entre 20 et 40 heures. Le tableau 3 propose un programme classique que l'on retrouve fréquemment dans les cours de modélisation numérique pour la géotechnique, à destination des ingénieurs (cinquième année) ou comme une introduction à la modélisation pour les étudiants en DEA.

## 5 TRAVAUX PRATIQUES ET EXEMPLES D'ÉTUDES DE CAS

Les travaux pratiques, menés à la fin des cours de base ou en parallèle pour les cours spécialisés, sont le complément naturel des cours magistraux. Ils doivent illustrer et mettre en œuvre les principes enseignés. Leurs objectifs peuvent être les suivants.

Pour les cours de base :

- insister sur l'aspect multidisciplinaire de la modélisation entre le calcul algébrique, l'analyse numérique, la mécanique, la rhéologie des matériaux et la mise en œuvre informatique ;
- utiliser un logiciel du commerce pour illustrer les bases théoriques de la méthode des éléments finis

Tableau 4. Exemples de publications décrivant des modèles d'ouvrages-types reproductibles.

---

Fondations superficielles	
de Borst R., Vermeer P. (1984)	Possibilities and limitations of finite elements for limit analysis. <i>Géotechnique</i> , vol. 34, n° 2, pp. 199-210.
Mestat Ph. (1994)	<i>Validation du progiciel CESAR-LCPC en comportement mécanique non linéaire. Vol. 1 : Fondations superficielles et tunnels.</i> Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, ERLPC, série géotechnique, GT 58, 170 pages.
Schweiger H.F. (1991a)	Benchmark problem n° 1 : Results. <i>Computers and Geotechnics</i> , vol. 11, pp. 331-341.
Schweiger H.F. (1991b)	Some results from benchmark tests for geotechnical engineering. <i>Numerical Models in Geomechanics - NUMOG V</i> , Pande et Pietruszczak (eds), Balkema, pp. 675-680.
Sloan S.W., Randolph M.F. (1982)	Numerical prediction of collapse loads using finite element methods. <i>Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.</i> , n° 6, pp. 47-76.
Zienkiewicz O.C., Humpheson C., Lewis R.W. (1975)	Associated and non-associated viscoplasticity and plasticity in soils mechanics, <i>Géotechnique</i> , vol. 25, n° 4, pp. 671-689.
Zienkiewicz O.C., Valliappan S., King I.P. (1969)	Elasto-plastic solution of engineering problems. Initial stress, finite element approach. <i>Int. J. Num. Meth. Eng.</i> , vol. 1, pp. 75-100.
Fondations profondes	
Griffiths D.V. (1982)	Elasto-plastic analyses of deep foundations in cohesive soil. <i>International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics</i> , vol. 6, pp. 211-218.
Ouvrages Souterrains	
Mestat Ph. (1994)	<i>Validation du progiciel CESAR-LCPC en comportement mécanique non linéaire. Vol. 1 : Fondations superficielles et tunnels.</i> Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, ERLPC, série géotechnique, GT 58, 170 pages.
Schweiger H. (1998)	Results from two geotechnical benchmark problems. <i>Applications of numerical methods to geotechnical problems, NUMGE98</i> , Cividini (ed), Springer, pp. 645-654.
Ouvrages de soutènement	
Bakker K.J., Vermeer P.A. (1986)	Finite element analysis of sheetpile walls. <i>Proc. 2nd Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics, NUMOG II</i> , Ghent, pp. 409-416.
Christian J.T., Hagmann A.J., Marr W.A. (1977)	Incremental plasticity analysis of frictional soils. <i>Int. J. for Num. and Anal. Meth. in Geomech.</i> , vol. 1, n° 4, pp. 343-375.
Schweiger H.F. (1991)	Some results from benchmark tests for geotechnical engineering. <i>Numerical Models in Geomechanics - NUMOG V</i> , Pande et Pietruszczak (eds), Balkema, pp. 675-680.
Ouvrages en terre	
Lépidas I, Magnan J.-P. (1990)	<i>Fluage et consolidation des sols argileux : modélisation numérique.</i> Rapport de recherche LPC, n° 157, LCPC, Paris, 170 pages.
Interaction entre ouvrages	
Baus R.L., Wang M.C. (1983)	Bearing capacity of strip footing above void. <i>J. Geotech. Eng.</i> , ASCE, vol. 109, n° 1, pp. 1-14.
Wang M.C., Badie A. (1985)	Effect of underground void on foundation stability. <i>J. Geotech. Eng.</i> , ASCE, vol. 111, pp. 1008-1019.

---

par des applications pratiques. Mettre en garde les débutants contre les erreurs types et certains pièges ;

- montrer l'influence du raffinement des maillages (autour des chargements et des zones à forts gradients de contrainte : trous, angles rentrants, congés, fissures). Illustrer la recherche du meilleur compromis précision/coût numérique pour la modélisation.

Pour les cours spécialisés :

- mettre l'accent sur l'utilisation à bon escient du calcul par éléments finis en tant que moyen d'étude et de simulation du comportement des ouvrages ;

- résoudre un problème lié au sujet de recherche propre à chaque étudiant. Familiariser les futurs ingénieurs au maniement des grands logiciels du commerce ;

- illustrer les différentes phases de la modélisation et de la résolution d'un problème de géotechnique, à travers un projet ou quelques exemples concrets. Mettre en évidence les possibilités actuelles et les limites de la méthode des éléments finis pour certains problèmes types. Placer le futur ingénieur dans des conditions similaires à celles qu'il pourrait rencontrer dans l'exercice de sa profession ;

- familiariser les étudiants avec la programmation des méthodes numériques. Un petit « laboratoire numérique » peut servir de base à cet apprentissage ;

- confronter les résultats d'un modèle d'éléments finis au comportement observé d'un ouvrage (modèle physique réduit ou ouvrage en vraie grandeur). Montrer l'apport de la modélisation à la compréhension du fonctionnement global et local des structures et des ouvrages ;

- mettre en évidence les différences entre calculs linéaires et non linéaires pour différents phénomènes physiques. Faire prendre conscience de l'importance de la représentation des interactions sol-structures ;

- comparer les résultats d'une modélisation numérique avec ceux obtenus à l'aide d'une méthode de calcul traditionnelle.

Certains des principes des méthodes des éléments finis et de la modélisation des ouvrages peuvent être enseignés efficacement au moyen d'études de cas dans le cadre de projets ou de travaux dirigés. Ces

exemples peuvent être repris de publications (thèses, articles, communications, livres). On en distinguera deux types :

- les publications décrivant un modèle pour ouvrage-type. L'intérêt est de pouvoir facilement reproduire ces exemples dans l'enseignement (avec un maillage à l'identique ou d'une densité au moins du même ordre). Pour cela, les auteurs doivent être suffisamment précis et fournir toutes les données. Le tableau 4 regroupe quelques exemples de cas de modélisation d'ouvrages-types bien commentés ;

- les documents présentant des cas réels avec, si possible, une comparaison entre les résultats de calculs et des mesures. L'intérêt est cette fois concentré sur la démarche de modélisation et les moyens mis en oeuvre pour élaborer le modèle. Il s'agit surtout, d'une part, de discuter les partis pris par les auteurs et, d'autre part, de commenter les confrontations calculs-mesures. Selon le degré de complexité de l'ouvrage réel, une modélisation à l'identique ou simplifiée à bon escient peut être envisagée en projet ou en travaux dirigés. Le tableau 5 cite quelques exemples de cas réels qui peuvent illustrer la démarche de modélisation des ouvrages en géotechnique.

Ces références, qui peuvent être utiles pour compléter les cours magistraux, sont données à titre indicatif. Il y en a certainement d'autres dans la littérature. Dans ces applications, il convient également d'éviter que les élèves deviennent dépendants d'un logiciel de calcul. Il faut veiller à enseigner des principes et des méthodes, et non des réponses machinales devant un écran. L'étudiant ne doit pas s'habituer à un certain environnement et au confort de quelques contrôles. Son attention et sa réflexion doivent être en éveil à chaque instant devant un pré- ou un post-processeur. Si l'enseignement ne va pas dans ce sens, le futur ingénieur risque d'être déstabilisé s'il prend en main un autre logiciel dans un autre environnement. Pour éviter cet écueil, certains cours offrent des applications sur plusieurs logiciels. Le tableau 6 cite les logiciels de calcul par éléments finis employés lors des travaux pratiques ou des projets. À ceux-ci,

Tableau 5. Exemples de publications décrivant avec soin une démarche de modélisation

Ouvrage modélisé	Références décrivant la modélisation d'un ouvrage réel
Fondation d'une centrale nucléaire	Humbert P., Mestat Ph. (1995) Modélisation 3D de la fondation d'une centrale nucléaire. <i>XIth ECSMFE</i> , Copenhague, mai 1995, vol. 6, pp. 63-68.
Rideau de palplanches	Mestat Ph., Arafati N. (1998) Modélisation par éléments finis du comportement du rideau de palplanches expérimental de Hochstetten, <i>Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées</i> , n° 216, juillet-août, pp. 19-39.
Mur-poids	Clough G.W., Duncan J.M. (1971) Finite element analysis of retaining wall behaviour. <i>Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division</i> , ASCE, vol. 97, SM12, pp. 1657-1673.
Ouvrages souterrains	Clough G.W., Shirasuna T., Finno R.J. (1985) Finite element analysis of advanced shield tunneling in soils. <i>Fifth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics</i> , Nagoya, Balkema, pp. 1167-1174.

Tableau 6. Exemples d'applications dans le cadre de TD, TP ou de projets

Etablissement	Forme	Durée (h)	Logiciel	Applications
CNAM	TP		VIPLEF	Ouvrages souterrains. Interactions sol-structures.
EC Nantes	projet	20	CESAR-LCPC	Ecran de soutènement et fondations. Comparaison avec des solutions de référence (Schweiger, 1991).
	projet	20	CESAR-LCPC	Simulation d'essais sur modèles réduits centrifugés et confrontation aux résultats expérimentaux (tunnels).
	projet	20	CESAR-LCPC	Rideau de palplanches expérimental de Hochstetten. Simulation et confrontation aux mesures.
	projet	20	Différences finies	Méthode des caractéristiques : pente, talus. Calcul par différences finies : écoulements dans les sols.
EC Paris	TP	20-30	Z-Soil	Simulation d'essais de laboratoire et comparaison avec les courbes mesurées.
ENSM Nancy	TD		CESAR-LCPC, Udec	Comparaison avec des solutions analytiques et des solutions de référence pour les tunnels, les fondations et les soutènements (sols et roches).
ESIP	TP		CESAR-LCPC	Calculs divers de géotechnique.
EUDIL	TD	10	CESAR-LCPC	Interaction sol-structures.
			Gefdyn, Pecplas	
ISTG (Grenoble)	projet	24	Gaiaef	Fondations sur sol élastique.
	TD	16	PLAXIS	Barrage, mur, fondations profondes et superficielles.
	TD	16	Udec	Ouvrages au rocher.
	TP	≅ 10	PLAXIS	Fondations, fouilles, remblais, tunnels, renforcements.
Univ. Grenoble	Stage	6 mois	PLAXIS	Stage de DESS en entreprise.

il convient d'ajouter les logiciels développés dans les établissements à des fins pédagogiques ou de recherche.

L'enseignement des méthodes numériques spécifique à la géotechnique se distingue de celui appliqué aux calculs des structures par le fait qu'il n'y a pas de recours à la non-linéarité matérielle (au minimum grandes déformations), à l'optimisation et aux maillages adaptatifs. En revanche, il nécessite un approfondissement dans les deux matières suivantes : élasto-plasticité (pour la rhéologie des sols) et éléments de contacts (pour les interactions sol-structures).

Les méthodes numériques traditionnelles (méthode des caractéristiques, méthode des tranches, méthode d'équilibre, etc.) sont naturellement toujours enseignées. Par ailleurs, la méthode des éléments distincts ne semble pas retenir, pour l'instant, l'attention des enseignants : à notre connaissance seuls deux cours de modélisation numérique sont consacrés aux milieux rocheux. Les informations recueillies sur les applications font également ressortir une très forte utilisation de logiciels du commerce par rapport aux logiciels développés localement, à vocation de recherche ou pédagogique. Cette observation reflète vraisemblablement l'effort important fait par les développeurs dans le domaine de la convivialité et de la fonctionnalité de leurs produits.

## 6 MÉTHODES PÉDAGOGIQUES

L'enseignement de la modélisation numérique par éléments finis recèle quelques difficultés dont :

- la complexité théorique de la discipline et son caractère de méthode de calcul approchée ;
- la complexité de certaines applications (types d'ouvrages, couplages entre phénomènes) ;
- l'étendue du champ couvert par cette méthode de calcul ;
- le caractère multidisciplinaire de la modélisation numérique ;
- un nombre total d'heures assez faible consacré à cette matière ;
- le découpage entre un cours de base et un cours spécialisé, avec des interventions souvent bien distinctes de la part des départements d'enseignement et un intervalle de temps plus ou moins important entre les deux cours. La complémentarité et la continuité de ceux-ci doivent être exemplaires pour que les élèves en profitent pleinement.

D'une manière générale, les méthodes pédagogiques employées restent relativement classiques avec des cours ex cathedra, des exercices (théoriques et pratiques sur ordinateur), des travaux dirigés, des travaux pratiques, la rédaction de mémoire et de projets pour les élèves en fin de cours (dont celui de réaliser un petit programme de calcul). Toutefois, on constate aujourd'hui, de la part des enseignants, une tendance à utiliser les nouvelles possibilités de présentation en amphithéâtre (moyens

audiovisuels, vidéo et vidéoprojection avec un ordinateur) : des exemples sont traités en direct à l'aide d'un logiciel du commerce ou des montages permettent d'illustrer concrètement certains points du cours. Le recours à l'Internet ou à l'enseignement à distance est encore très embryonnaire. En revanche, dans les cours spécialisés, on a pu noter des tentatives originales comme

- demander aux élèves de préparer des exposés scientifiques sur des thèmes en relation avec le cours ;

- confier une ou deux séances à des personnalités de l'industrie, spécialistes reconnus dans leur domaine ;

- faire participer les élèves à un séminaire scientifique au cours duquel des professionnels discutent en détail de cas concrets d'utilisation des techniques numériques.

Selon que les cours sont orientés plutôt vers la théorie (rhéologie, interactions, programmation) ou les applications pratiques, le contrôle des connaissances des élèves revêt des formes différentes qui sont en général des combinaisons de divers types de contrôles :

- examen écrit sans documents (cas général pour les cours à dominante mathématique et analyse numérique, durée comprise entre deux et trois heures) ;

- examen oral ;

- examen écrit avec documents autorisés (durée comprise entre deux et trois heures) ;

- contrôle continu ;

- projet avec soutenance orale et rapport écrit (utilisation d'un logiciel mis à la disposition des élèves ou conception d'un petit programme de calcul) ;

- présentation orale sur un sujet libre en rapport avec le cours (liste de thèmes proposée aux élèves) ;

- comptes-rendus de travaux dirigés.

On a noté aussi que, plus un cours est orienté vers l'approfondissement des mathématiques ou l'analyse numérique, plus l'évaluation a tendance à être fondée sur un examen écrit sans document. À l'opposé, pour un cours plus pratique, l'évaluation est fondée sur les comptes-rendus de projet ou d'exercices avec documents. Le principe du contrôle continu est également largement répandu.

## 7 LIVRES DE RÉFÉRENCE

Les livres de référence pour les formations de base et spécialisées peuvent être choisis parmi les publications suivantes. Certains de ces livres sont recommandés par les responsables des enseignements consultés.

### *Ouvrages de base*

Bathe K.J. (1981) *Finite element procedures in engineering analysis*. Prentice Hall Inc.

Dhath G., Touzot G. (1984) *Une présentation de la méthode des éléments finis*. Éditions Maloine.

Gay D., Gambelin J. (1999) *Dimensionnement des structures : une introduction*. Éditions Hermès. 680 pages.

Hughes T.J.R. (1987) *The finite element method, linear static and finite element dynamic analysis*. Prentice Hall.

Kardestuncer H., Norrie D.H. (1984) *Finite element handbook*. McGrawHill, 1424 pages.

Lucquin B., Pironneau O. (1996) *Introduction au calcul scientifique*. Éditions Masson, 352 pages.

Owen D.R.J., Hinton E. (1980) *Finite elements in plasticity. Theory and practice*. Pineridge Press Limited, Swansea, U.K.

Prat M., Bisch Ph., Mestat Ph., Millard A., Pijaudier-Cabot G. (1995) *La modélisation des ouvrages*. Éditions Hermès, 770 pages.

Zienkiewicz O.C. (1989) *The finite element method (volume 1 : Basic formulations and linear problems)*. McGraw-Hill, London.

Zienkiewicz O.C., Taylor R. (1991) *The finite element method (volume 2 : Plates, shells, fluids and non-linear problems)*. McGraw-Hill. London. *Géotechnique*

Desai C.S., Christian J.T. (1977) *Numerical methods in geotechnical engineering*. McGrawHill. 784 pages.

Gudehus G. (1977) *Finite elements in Geomechanics*. John Wiley and Sons, 574 pages.

Lewis R.W., Schrefler B.A. (1998) *The finite element method in the static and dynamic deformation and consolidation of porous media*. John Wiley and Sons, 492 pages.

Mestat Ph., Prat M., Bisch Ph., Millard A., Pijaudier-Cabot G. (1999) *Ouvrages en interactions*. Éditions Hermès, 938 pages.

## 8 CONCLUSIONS

La place consacrée à la simulation, la modélisation numérique et aux méthodes de calcul associées dans les programmes d'enseignement des Écoles et des Universités témoigne de l'importance de cette discipline dans l'ingénierie du génie civil. La formation de praticiens de la modélisation numérique (ingénieurs, chercheurs, concepteurs) s'appuie sur trois composantes: la mécanique, la rhéologie des matériaux et l'analyse numérique (y compris les algorithmes et leur programmation). La modélisation est le fruit de ces trois cultures : sa maîtrise et le bon usage d'un logiciel industriel nécessitent donc une approche pluridisciplinaire sérieuse. À ces cultures, peuvent s'ajouter les techniques informatiques (langages de programmation et systèmes) pour les ingénieurs destinés à réaliser des développements dans les logiciels.

L'enseignement d'une méthode numérique, comme la méthode des éléments finis, devrait donc mêler harmonieusement des cours de base et des cours spécialisés dans chacune de ces cultures. Par ailleurs, ce type d'enseignement pour la géotechnique ne devrait jamais être dissocié de l'apprentissage des connaissances de base et des méthodes de calcul traditionnelles des différents domaines d'applications considérés (connaissance pratique du fonctionnement des ouvrages simulés).

Fondée sur une enquête consacrée au contenu des cours de méthodes numériques et de méthodes des éléments finis, cette étude a montré le souci des enseignants de répondre à plusieurs attentes des entreprises et de prodiguer une formation proche des techniques de calcul les plus récentes. Les méthodes pédagogiques employées restent pour une très large part traditionnelles : cours magistraux, travaux pratiques et dirigés. Le recours à l'Internet est pratiquement inexistant en France. À cause des perspectives offertes par les nouvelles technologies, il est assez difficile de prévoir la forme que pourrait prendre un cours d'éléments finis dans les années à venir. L'enseignement pourrait-il être profondément différent de ce qu'il est aujourd'hui ? Sans doute non, pour les aspects purement mathématiques et numériques. En revanche, les cours d'applications et de spécialités pourraient évoluer vers plus d'interactivité « étudiant-modèle-logiciel », d'échanges à distance entre logiciels et finalement d'apprentissage en conditions de projets virtuels. Il y a là aussi un défi intéressant pour les enseignants, les diffuseurs de logiciels et les employeurs.

À l'exception des centres de recherche, force est de constater que les employeurs ne demandent pas directement de spécialistes en modélisation numérique. En revanche, ils ont besoin d'*ingénieurs-praticiens généralistes et compétents*, rompus aux méthodes et techniques de calcul récentes, capables de travailler en équipe, de suivre un projet, d'appliquer des méthodes traditionnelles et, si la complexité du problème l'exige, de le modéliser avec des outils numériques appropriés (logiciels industriels), de maîtriser le coût des modèles, de développer éventuellement des outils complémentaires, de contrôler des résultats et de les exploiter en fonction de la réglementation et des règles de l'art. Cela peut sembler beaucoup mais, quand on examine de près le contenu des cours recensés, on s'aperçoit avec bonheur que ces objectifs transparaissent dans la plupart : à charge aux enseignants d'établir les bons liens entre les cours de différents niveaux et aux étudiants d'assimiler et de fondre diverses disciplines (diverses cultures) pour ensuite réaliser des projets professionnels. Enfin, il y a un point que nous n'avons pu traiter faute d'informations satisfaisantes, c'est le nombre d'élèves formés chaque année, d'une

part, à la modélisation numérique d'une manière générale et, d'autre part, plus spécifiquement aux applications géotechniques. On ignore également si ce nombre est en rapport avec les besoins de la profession. C'est un des points que nous allons approfondir en lançant une seconde enquête pour obtenir ces informations d'un maximum d'établissements intervenant dans le champ du génie civil et de la géotechnique.

## 9 REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article remercient les établissements qui ont contribué à l'élaboration de cette synthèse en fournissant leur programme de formation et des observations sur le contenu des cours cités.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Leroueil S. (1997) Panel discussion : session on education in geotechnical engineering. *XIVth Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hambourg, Balkema, pp. 2579-2580.
- Mestat Ph., Riou Y. (2000) *Panorama de l'enseignement des méthodes d'éléments finis dans les écoles d'ingénieurs et universités françaises*. Rapport pour le Pôle d'expertise sur l'Emploi des éléments finis de l'AFGC, 18 pages.

**Annexe 1. Exemples d'enseignements spécialisés utiles pour un calcul d'ouvrage géotechnique**

Etablissement	Cours	TD	TP	Méthodes	Principaux aspects traités
<b>Cours généraux de modélisation numérique</b>					
EC Lyon	12			MEF, MEI	Solide, fluide
EC Paris				MEF, MEI	Solide, calage de modèles, interaction sol/struct.
ENTPE	60			MEF, MDF	solide, onde, thermo-mécanique
ENSM Paris	30			MEF, MDF, MG	Dynamique, calcul parallèle
ENSM Nancy	20			MEF, MDF, MEI, MED	Couplages, écoulement, milieux fracturés
Univ. Grenoble	320 + stage 6 mois				Solides, fluides, transferts (DESS)
ENPC				MEF, MDF	Méthode de résolution
<b>Résolution des grands systèmes, erreur, stabilité</b>					
EC Lyon	22		8	MEF	Programmation, développement de logiciels
EC Lyon	9	12	12	MEF	Mathématiques, analyse numérique
CNAM	45			MEF	Transferts, propagation des ondes
EC Nantes	20		20	MDF	Géotechnique, écoulements
ENPC				MEF	Solide, fluide, convergence, erreurs
Insa Rennes	15	15		MEF, MDF	Mathématiques, non-linéarités
<b>Résolution problèmes non linéaires</b>					
EC Nantes	15			MEF	Géotechnique, dynamique (DEA)
ENPC				MEF	Exemples, calcul d'erreur
ENTPE	36			MEF, MDF	Transferts
Insa Rennes	15	15		MEF, MDF	Mathématiques, résolution de grands systèmes
Insa Toulouse	18			MEF, MDF	Optimisation
Univ. Clermont	20			MEF	Géométric. rhéologie
ISTGrenoble	9	9	24	MEF	Géotechnique, plasticité
<b>Dynamique : analyse modale, évolution, propagation des ondes</b>					
EC Nantes	15			MEF	Géotechnique, dynamique (DEA)
ENPC	9	4	4	MEF	Evolution, transfert, dynamique
ENTPE	30			MEF	Dynamique, sismique
ENTPE	30				Solides, propagation des ondes
ENSM Paris	30			QRR, MEF	Analyse modale, séisme
Univ. Nantes	90			MEF	Structures, analyse modale
IUP St. Nazaire	12	12	24	MEF	Structures, analyse modale
CNAM	45			MEF	Transferts, propagation des ondes
ENSM Nancy				MEF	Transferts, solides
EUDIL	15	10			Fondation, liquéfaction, propagation des ondes
EUDIL	18	12	14	MEF	Transferts, analyse transitoire
<b>Eléments particuliers : contacts</b>					
EC Nantes	15			MEF	Géotechnique, dynamique (DEA)
ISTGrenoble	9	9	24	MEF	Structure, géotechnique
EUDIL	15	10		MEF	Structure, géotechnique
<b>Résolution de problèmes instationnaires</b>					
EC Lyon	9	12			Mathématiques, analyse numérique

Annexe 2. Exemples d'enseignements spécialisés utiles pour un calcul d'ouvrage géotechnique.

Etablissement	Cours	TD	TP	Méthodes	Principaux aspects traités
<b>Modèles conceptuels et applications</b>					
Propagation des ondes					
EC Lyon			20	MEF	Propagation des ondes
EUDIL	15	10			Fondations, liquéfaction, propagation des ondes
Comportement dynamique des ouvrages					
EC Lyon	22		12	MEF	Séisme, géotechnique
ENSM Paris	30			QRR, MEF	Séisme
EUDIL	15	10			Calcul dynamique, fondations
Couplages HM, TM, THM					
EC Nantes	15			MEF	Géotechnique, transferts (DEA)
ENTPE	30			MEF	Thermo-mécanique
ENSM Nancy	15			MEF, MDF	Thermo-hydro-mécanique
ISTGrenoble	16 (stage)			MEF	Consolidation des sols
EUDIL	18	12	14	MEF	Thermo-mécanique
Interaction sol/structure, interfaces					
EC Paris				MEF	Interactions sol-structures
ENSM Nancy	15			MEF, MDF	Interfaces
EUDIL	15	10			Éléments de contact, fondations
ISTGrenoble	9	9	24	MEF	Éléments de contact
ISTGrenoble	16 (stage)			MEF	Consolidation des sols
EC Nantes	20		20	MEF	Éléments de contact, fondations
<b>Modèles de comportement</b>					
Élastoplasticité, viscoélasticité, viscoplasticité, identification					
CNAM	120			MEF	Principes, solides
EC Lyon	22		12		Principes, solides
EC Nantes	20		20	MEF	Principes, géotechnique
EC Paris			10		Principes, matériaux granulaires
ENSM Paris	20			MEF	Principes, solides, tunnels
ENSM Nancy				MEF, MDF	Principes, barrages duc d'Albe
ESIP	12			MEF	Principes, géotechnique
ENSM Nancy	15			MEF, MDF	Identification, calage
ISTGrenoble	16 (stage)			MEF	Élastoplasticité des sols
ISTGrenoble	9	9	24	MEF	Principes
<b>Modélisation spécifique en géotechnique</b>					
ENSM Nancy	15			MEF, MDF	Fondation, soutènement, renforcement
ENSM Nancy				MT, MC, AL	Barrage poids, ducs d'Albe
EC Nantes	20		20	MEF	Fondations, soutènements, tunnels
ISTGrenoble	1 (stage)			MEF	Fondation, remblais, soutènements, tunnels
ISTGrenoble	6	16		MEF	Barrage, soutènements, fondations
ISTGrenoble	6	16		MED	Ouvrage au rocher
EC Nantes	20		20	MC, MDF	Stabilité des talus, écoulements, barrages
ESIP	12			MEF	Géotechnique
ESIP				MDF	Hydrogéologie
EUDIL	15	10		MEF	Pieux, fondations, murs de soutènement, parois

\* MDF = méthode des différences finies ; MED = méthode des éléments distincts ; MEF = méthode des éléments finis ; MG = méthodes multi-grilles ; QRR = quotient de Rayleigh-Ritz ; MEI = méthodes des équations intégrales ; MC = méthode des caractéristiques ; MT = méthodes des tranches ; AL = analyse limite.