

DEA

No 20026016

MSMS

Mécanique des Solides, des Matériaux et des Structures

Inscrit dans l'Ecole Doctorale Matériaux, Ouvrages, Durabilité, Environnement, Structures (MODES)

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)

Université de Marne la Vallée (UMLV)

Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Electronique et Electrotechnique (ESIEE)

Responsable du DEA : Christian SOIZE

Responsable de l'option « Mécanique et Matériaux » Karam SAB (ENPC)

Responsable de l'option « Mécanique et Structures » Christian SOIZE (UMLV)

1. Présentation de la formation et correspondants du DEA
2. Modalités d'accès à la formation
3. Dossier d'admission et d'inscription
4. Débouchés
5. Objectifs de la formation
6. Organisation du DEA
7. Programme du DEA

1. Présentation de la formation et correspondants du DEA

Le DEA Mécanique des Solides, des Matériaux et des Structures (MSMS) est un DEA du site de Marne la Vallée, dans l'Ecole Doctorale MODES (ED 430) et est cohabilité pour les trois établissements d'enseignements supérieurs : ENPC, ESIEE et UMLV (l'établissement principal étant l'UMLV).

Le DEA MSMS est constitué d'un **tronc commun** et deux options :

- « **Mécanique et Matériaux** » coordonnée par l'**Ecole Nationale des Ponts et Chaussées** (ENPC)
- « **Mécanique et Structures** » coordonnée par l'**Université de Marne la Vallée** (UMLV);

Le **correspondant du DEA MSMS, option « Mécanique et Matériaux » à l'ENPC** est :

M. Karam Sab

LAMI

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)

6-8 avenue Blaise Pascal

Champs sur Marne

77455 Marne la Vallée Cedex 2

France

e-mail : karam.sab@lami.enpc.fr

Pour l'option « **Mécanique et Structures** », se connecter sur le site web de l'Université de Marne-la-Vallée : <http://www.univ-mlv.fr>

2. Modalités d'accès à la formation

Pour accéder à cette formation, il faut remplir un **dossier d'admission et d'inscription**. L'inscription définitive à la scolarité de l'établissement ne peut être faite que si le candidat est admis. Les étudiants sont sélectionnés sur dossier en juin et septembre. L'admission se fait sur dossier avec un entretien (l'entretien ne sera effectif que pour les étudiants qui résident en France à l'époque de l'entretien).

2.1. Conditions d'admission

Concernant les étudiants ayant suivi leurs études en France, peuvent être admis à suivre le DEA, les étudiants

- ayant une Maîtrise de Mécanique, de Génie Civil, de Physique ou de Mathématiques Appliquées ;
- admis en troisième année d'Ecole d'Ingénieurs des établissements co-habilités et de leurs partenaires ;
- ayant un diplôme d'ingénieurs (généraliste, Mécanique, Génie Civil).

Concernant les étudiants n'ayant pas suivi leurs études en France, peuvent être admis à suivre le DEA, les étudiants

- ayant un diplôme équivalent à la Maîtrise de Mécanique, de Génie Civil, de Physique ou de Mathématiques Appliquées ;
- ayant un diplôme d'ingénieurs (généraliste, Mécanique, Génie Civil).

Les étudiants sont sélectionnés sur dossier en juin et septembre. L'admission se fait sur dossier avec un entretien (l'entretien ne sera effectif que pour les étudiants qui résident en France à l'époque de l'entretien)

2.2. Inscription administrative

Pour les étudiants admis en DEA MSMS, option « Mécanique et Matériaux », l'inscription administrative se fait en juillet ou en septembre à la cellule de gestion des DEA de l'ENPC (direction de la recherche). Le paiement des droits et frais est effectué dans l'établissement d'inscription selon les procédures de l'établissement. La convention éventuelle de stage est signée par l'établissement où l'étudiant est inscrit.

3. Dossier d'admission et d'inscription

3.1. Dossier d'admission et d'inscription au DEA avec l'option « Mécanique et Matériaux ».

L'admission est gérée par l'ENPC et un candidat admis devra s'inscrire à l'ENPC. Le dossier d'admission et d'inscription, peut être obtenu :

- 1) à partir de : http://www.enpc.fr/fr/formations/dea_masters (à utiliser en priorité)
- 2) ou en s'adressant au correspondant de l'ENPC (adresse donnée au paragraphe 1)

3.2. Dossier d'admission et d'inscription au DEA avec l'option « Mécanique et Structures ».

L'admission est gérée par l'UMLV et un candidat admis devra s'inscrire à l'UMLV. Le dossier d'admission et d'inscription, peut être obtenu en se connectant sur le site web de l'UMLV : <http://www.univ-mlv.fr>

4. Débouchés

Le DEA prépare

- aux métiers de la Recherche dans les grands organismes de recherche, dans les centres de recherche, dans les laboratoires des Universités ;
- aux métiers de la Recherche & Développement dans les entreprises et les sociétés de service.

Le DEA débouche aussi bien sur une insertion professionnelle immédiate que sur les études Doctorales.

Les domaines technologiques qui sont particulièrement concernés sont :

- l'industrie mécanique en général,
- les constructions et les ouvrages du Génie Civil,
- les moyens de transports (automobile, aéronautique, spatial, naval, ferroviaire),
- l'élaboration des produits industriels par transformation de matière (métal, composite, plastique, etc),
- la production et transformation de l'énergie (pétrochimie, gaz, électricité : hydraulique, thermique, solaire, éolienne, nucléaire)

5. Objectifs de la formation

Sur le plan scientifique, l'objectif de ce DEA est de permettre aux étudiants d'acquérir une formation théorique et pratique de haut niveau, en matière de **modélisation** et de **simulation numérique** dans les domaines suivants de la mécanique :

- mécanique des solides et la mécanique des structures et des ouvrages,
- mécanique et la physique des matériaux hétérogènes qui résultent d'un assemblage de plusieurs constituants à des échelles différentes,
- mécanique des sols et des roches,

en tenant compte des préoccupations actuelles des industriels, des problématiques posées par la recherche technologique dans le court terme et moyen terme et des problématiques de recherche du secteur dans le long terme.

Sur le plan pédagogique, les axes prioritaires du DEA sont

- l'acquisition approfondie des bases théoriques de la mécanique ;
- la maîtrise des modélisations mécaniques qui en découlent permettant d'aborder les problématiques de la recherche,
- l'acquisition des méthodes numériques en Mécanique et la pratique des outils informatiques qui sont associés ;
- l'ouverture sur les problématiques de la Recherche en Mécanique aux technologies du Génie Civil et des technologies de la Mécanique des Structures pour les industries mécaniques, les industries liées aux transports terrestres, maritimes, aériens, spatiaux, les industries de production d'énergie, etc.

Tronc commun

Les objectifs du tronc commun sont d'une part d'uniformiser le niveau des connaissances des étudiants en matière d'outils mathématiques et de méthodes numériques et d'autre part, de présenter les méthodes avancées de modélisation et de simulation numérique en mécanique

Option Mécanique et Matériaux

Les matériaux et les éléments structures résultent souvent d'un assemblage de plusieurs constituants, dont la taille est petite devant l'échelle macroscopique. Il en est ainsi des matériaux et des ouvrages du Génie Civil, des matériaux et des éléments structuraux des structures mécaniques de l'industrie, du génie mécanique, etc. Citons par exemple, les matériaux cimentaires, les sols saturés d'eau, les structures

composites multi-couches, (fibre-résine, bois lamellé-collé, acier-élastomère) . L'objectif de cette option est de former les étudiants à la modélisation mécanique de ces systèmes mécaniques à partir des propriétés de leurs constituants.

Option Mécanique et Structures

L'objectif de cette option est de former les étudiants à l'utilisation de méthodes modernes d'analyse et de simulation numériques pour les procédés de mise en forme des pièces mécaniques et pour l'étude des performances et de la fiabilité des systèmes mécaniques constitués de structures simples et complexes dont les dimensions vont de quelques micromètres (microsystèmes) aux mètres (structures de l'industrie mécanique, des transports, du génie civil, etc.), en appréhendant les effets non linéaires des interfaces sur le comportement mécanique des systèmes mécaniques et structures considérées.

6. Organisation du DEA

6.1. Organisation de la formation

La formation est organisée autour de la recherche et l'année du DEA est décomposée en deux périodes :

1^{er} semestre (entre octobre et février) : Enseignements théoriques et activités d'ouverture

- Enseignements de Tronc Commun et d'Option pour un volume total de cours de 152 heures
- Activités d'ouverture préparant à l'insertion professionnelle pour un volume d'environ 30 heures .

2^{ème} semestre : Stage d'initiation à la recherche

- *Stage de Recherche* au second semestre, à partir de mars, pour une durée de 4 mois à 6 mois.

A. Enseignements

Le DEA est composé d'un tronc commun de 80 heures et de deux options, chacune de 72 heures :

- l'option « Mécanique et Structures » sous la responsabilité UMLV
- l'option « Mécanique et Matériaux » sous la responsabilité ENPC

Le tronc commun est constitué de 5 cours de 20 heures (10 blocs de 2 heures), l'option «Mécanique et Structures» de 4 cours de 18 heures (6 blocs de 3 heures) et l'option « Mécanique et Matériaux » de 5 cours de 18 heures (6 blocs de 3 heures), un des 5 cours de cette option étant un cours commun à l'option « Matériaux » du DEA MAISE (Matériaux, intégrité des Structures dans leur Environnement).

Les étudiants devront choisir :

- 4 cours parmi les 5 cours du tronc commun (c'est-à-dire 80 heures de cours)
- et une option :
 - pour l'option « Mécanique et Structures», tous les cours sont obligatoires (c'est-à-dire 72 heures de cours).
 - pour l'option « Mécanique et Matériaux», les étudiants devront choisir 4 cours parmi les 5 cours de l'option (c'est-à-dire 72 heures de cours).

Enseignements du tronc commun

- 1.Physique mathématique et méthodes numériques (G. Bonnet et B. Miara)
- 2.Mécanique de la rupture fragile et mécanique de l'endommagement (A. Ehrlacher, Q.-C. He, G. Foret)
- 3.Mécanique des matériaux et des structures en plasticité finie (P. de Buhan, L. Dormieux, S. Maghous)
- 4.Approches multi-échelles en mécanique des milieux continus solides (K. Sab, F. Pradel)
- 5.Modélisation probabiliste des incertitudes en mécanique (C. Soize)

Enseignements de l'option « Mécanique et Matériaux »

- M1. Méthodes de résolution numérique pour le comportement inélastique des matériaux (X. Chateau, S. Maghous et B. Nedjar)
- M2. Introduction à la mécanique des matériaux poreux (P. Dangla, T. Lassabatère)
- M3. Modélisation des structures multicouches (J.-F. Caron, G. Foret)
- M4. Comportement mécanique et modélisation des sols (J.-P. Magnan, P. Mestat, J. Canou)
- M5. Durabilité des matériaux cimentaires dans leur environnement (J.-M. Torrenti, F. Meftah, B. Capra et A. Sellier) (cours commun à l'option « Matériaux » du DEA MAISE)

Enseignements de l'option « Mécanique et Structures »

- S1. Mécanique de la mise en forme (L. Chevalier)
- S2. Mécanique des interfaces (Q.-C. He)
- S3. Mécanique des microsystèmes (O. Français)
- S4. Fiabilité des systèmes mécaniques (A. Mébarki)

Les objectifs et le programme de chaque cours sont donnés au paragraphe 7.

B. Activités d'ouverture préparant à l'insertion professionnelle

Les activités d'ouverture préparant à l'insertion professionnelle seront principalement constituées :

- d'une initiation à l'utilisation de logiciels de simulation numérique en mécanique ;
- des techniques de communications écrites et orales (réalisation de transparents, préparation d'un exposé, etc) ;
- des techniques de recherche bibliographique ;
- de séminaires de laboratoire, conférences, etc.

C. Stage de Recherche

Le stage de Recherche doit permettre à l'étudiant d'établir déjà des résultats nouveaux ou de mettre en évidence des problématiques de recherche significatives. Le stage de Recherche peut faire suite au projet d'initiation à la Recherche . Il peut déboucher sur un sujet de Thèse.

Le stage de Recherche peut se faire dans les laboratoires de recherche des établissements co-habilités et équipes de recherche associées ou dans les secteurs « Recherche & Développements » des entreprises.

D. Laboratoires de recherche des établissements co-habilités et équipes de recherche associées.

- Laboratoire des Matériaux & Structures du Génie Civil (LMSGC, UMR113, LCPC-ENPC-CNRS)
- Laboratoire de Mécanique de l'Université de Marne-la-Vallée (LaM, EA 2545)
- Laboratoire d'Analyse des Matériaux et Identification (LAMI, ENPC-LCPC)
- Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols (CERMES, ENPC-LCPC)
- Les divisions du Laboratoire Central des Ponts & Chaussées (LCPC) :
 - Bétons et Composites Cimentaires (BCC)
 - Fonctionnement et Durabilité des Ouvrages d'Art (FDOA)
 - Mécanique des Sols et des Roches et Géologie de l'Ingénieur (MSRGI)
- Laboratoire d'Electronique et de Microélectronique (ELMI, ESIEE)
- Laboratoire Modélisation et Simulation Numérique (MOSIM, ESIEE)
- Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)
- Laboratoire de recherche des monuments historiques

6.2. Composition de l'équipe enseignante

Liste alphabétique des enseignants du DEA :

Bonnet G., Professeur des Universités, Université de Marne la Vallée.

de Buhan P. Professeur ENPC, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Canou J., Maître de Conférences ENPC, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

Caron J.-F., Maître de Conférences ENPC , Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

Château X., Maître de Conférences ENPC, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

Chevalier L., Maître de Conférences, Université de Marne la Vallée.
Dangla P., Maître de Conférences ENPC, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
Dormieux L., Professeur ENPC, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
Ehrlacher A., Professeur ENPC, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
Foret G., Maître de Conférences ENPC, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
Français O., Maître de Conférences ESIEE, Ecole Supérieure d'Ingénieur en Electronique et Electrotech.
He Q.-C., Professeur des Universités, Université de Marne la Vallée.
Lassabatère T., Maître de Conférences ENPC, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
Magnan J.-P., Professeur ENPC, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
Maghous S., Maître de Conférences ENPC, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
Mébarki A., Professeur des Universités, Université de Marne la Vallée.
Meftah F., Maître de Conférences, Université de Marne la Vallée.
Mestat Ph., Maître de Conférences ENPC, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
Miara B., Professeur ESIEE, Ecole Supérieure d'Ingénieur en Electronique et Electrotechnique
Nedjar B., Maître de Conférences ENPC, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
Pradel F., Maître de Conférences ENPC, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
Sab K., Professeur ENPC, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
Soize C., Professeur des Universités, Université de Marne la Vallée.
Thevenin-Foray G., Maître de Conférences, Université de Marne la Vallée.
Torrenti J.-M., Professeur ENPC, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

6.3. Contrôle des connaissances et obtention du diplôme

Pour obtenir le diplôme, un étudiant doit obtenir au moins 10/20 au Tronc Commun, à l'Option et au Stage de Recherche.

- Le contrôle des connaissances des matières du Tronc Commun et de l'Option se fait par un examen écrit dans chaque matière, dans les 15 jours suivant le dernier cours de la matière.
- Le Stage de recherche fait l'objet d'une soutenance orale devant l'équipe enseignante du DEA, étendue à des membres de jury extérieurs des laboratoires d'accueil, en juin.

Toute note inférieure à 08/20 dans une matière du Tronc Commun ou de l'Option donne lieu à un rattrapage dans le mois qui suit l'affichage des résultats et sa forme est à discrétion du professeur de la matière concernée.

Les coefficients pour l'obtention des mentions sont :

- Tronc Commun : 1
- Option : 1
- Stage de Recherche : 1

Le diplôme est édité par l'établissement d'inscription.

7. Programme du DEA

Cours de Tronc Commun

1. Physique mathématique et méthodes numériques (20h) G. Bonnet, B. Miara

Le cours présente les méthodes de résolution analytiques et numériques des équations de la mécanique. Le cas de l'élasticité linéaire, statique et dynamique (recherche des valeurs propres) sera plus spécialement étudié en prenant en compte les aspects non linéaires et la résolution des problèmes d'évolution. Le cours comporte deux parties :

La *partie 1* porte sur les *méthodes analytiques et semi-analytiques* de résolution des équations de la mécanique. Les différents chapitres sont : 1) Fonctions de la variable complexe. 2) Transformées de Fourier et de Laplace (transformées, transformées inverses : définition et méthodes approchées de calcul). 3) Résolution des équations aux dérivées partielles (principes généraux, méthode spectrale, Méthode des équations intégrales).

La *partie 2* constitue une *introduction à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis* qui permet de traiter des problèmes posés sur des géométries arbitraires et associées à des conditions aux limites très générales. Cette partie comprend : 1) Formulation faible et forte des problèmes aux

limites. 2) Méthode de Galerkin-Ritz et définition des triangulations de Lagrange et d'Hermitte. 3) Problèmes du deuxième ordre et du quatrième ordre, pour les structures minces, plaques, membranes et coques. 4) Intégration numérique de Gauss-Legendre. 5) Estimation d'erreur et théorèmes de convergence. Calcul avec des éléments conformes ou non conformes.

Références :

CIARLET P.G., The Finite Element Methods for Elliptic Problems, North Holland, 1978
RAVIART P.A., THOMAS J.M., Introduction à l'analyse numérique des équations aux dérivées partielles, Masson, 1983.
BERNADOU M., Méthodes d'éléments finis pour les problèmes de coques minces, Masson, 1998.
MORSE P.M., FESHBACH H. Methods of Theoretical Physics, Mc Graw Hill, 1983.

2. Mécanique de la rupture fragile et mécanique de l'endommagement (20h) A. Ehlacher, Q.-C. He, G. Foret

L'objectif de ce cours est d'approfondir les notions enseignées en maîtrise dans le cours de mécanique de la rupture fragile. Il comprend deux parties. La première partie présentera les bases physiques et la modélisation de la rupture ductile. La seconde partie présente les aspects phénoménologiques et la modélisation de l'endommagement et de la plasticité couplée à l'endommagement. Le programme du cours est le suivant : 1) Rappels de mécanique de la rupture fragile. Limites de cette approche. 2) Mécanismes physiques de la rupture fragile et de la rupture ductile. 3) Modélisation de la croissance et de la coalescence de cavités en élastoplasticité. 4) Modélisation simplifiée et outils pour la prévision de la progression de fissures dans le cas de ruptures ductiles. 5) Séance expérimentale démontrant l'influence de la température sur le passage d'un mode de rupture ductile à un mode de rupture fragile. Observation de faciès de rupture. 6) Aspects phénoménologiques de l'endommagement. Variables d'endommagement. Contraintes effectives. Mesure d'endommagement. Lois élémentaires d'endommagement. Critère d'endommagement. 7) Formulation thermodynamique. Représentation tridimensionnelle de l'endommagement. Théorie de l'endommagement isotrope. Théorie de l'endommagement anisotrope. 8) Modèles particuliers. Endommagement plastique ductile. Endommagement de fluage. Endommagement de fatigue. Effets d'interaction des endommagements. 9) Couplage déformation endommagement. Elasticité couplée à l'endommagement. Plasticité couplée à l'endommagement. 10) Application à la modélisation du comportement du béton. Comportement en traction. Comportement en compression. Relation endommagement-déformations anélastiques. Traitement du problème de la localisation des déformations.

Références

Concernant la mécanique de la rupture fragile :

BUI H.D., Mécanique de la rupture fragile, Masson, 1978.
LABBENS R., Introduction à la mécanique de la rupture, éditions pluralis, 1980.
KNOTT J.F., Fundamentals of Fracture Mechanics, Butterworths, 1973.
Mécanique de la rupture, Conseil International de la langue française, Collège international des sciences de la construction, 1982
WILSHIRE B., OWEN D.R.J., Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures, Pineridge Press, 1981.

Concernant la mécanique de l'endommagement

LEMAITRE J., CHABOCHE J.L., Mécanique des matériaux solides, 2^{ème} édition, Dunod, 1992.
KACHANOV L.M., Introduction to Continuum Damage Mechanics, Martinus Nijhoff, 1986.
BAZANT Z.P., Advanced Topic in Inelasticity and Failure of Concrete, Cement Och. Betoninstitutet, Stockolm, 1979.
PIJAUDIER-CABOT G, DE BORST R, MAZARS J, Continuous Damage Models for Fracture of Concrete. Fracture Mechanics of Concrete structure, De Borst et al, Swets & Zeitlinger, 2001.

3. Mécanique des matériaux et des structures en plasticité finie (20h).P. de Buhan, L. Dormieux, S. Maghous.

L'objectif de ce cours est de présenter les concepts et les outils de modélisation nécessaires à l'analyse des problèmes de mécanique dans lesquels les matériaux constitutifs subissent de grandes déformations élastoplastiques (procédés de mise en forme dans l'industrie ; simulation de processus géologiques en ingénierie pétrolière, etc). Les principaux thèmes abordés sont les suivants. Déformations et contraintes d'un milieu continu en transformation finie. Décomposition de Lee-Mandel d'une transformation élastoplastique ; notion de configuration relâchée. Cas de l'isotropie et de l'élasticité faible; formulation en vitesse de la loi de comportement. Résolution analytique de problèmes aux limites simples ; comparaison avec les solutions en transformation infinitésimale. Principe de l'approche numérique (changement de géométrie, algorithme de plasticité); mise en œuvre dans un code de calcul élastoplastique en transformation finie.

Références

LEE E.H. Elastic-plastic deformation at finite strains, J. Appl. Mech.,36, pp.1-6 (1969).

MANDEL J., Plasticité classique et viscoplasticité, Cours au CISM n°97, Springer-Verlag, 1971.

BOURGEOIS E., DE BUHAN P., DORMIEUX L., Formulation d'une loi élastoplastique pour un milieu poreux saturé en transformation finie, C.R.Ac.Sc., T 321, série lib, pp. 175-182 (1995).

DORMIEUX L., MAGHOUS S., Poroelasticity and poroplasticity at large strains. Rev. IFP, 54(6), pp. 773-784 (1999).

4. Approches multi-échelles en mécanique des milieux continus solides. (20h.) K. Sab, F. Pradel

Le comportement des matériaux peut être modélisé de deux manières complémentaires: la démarche phénoménologique et le changement d'échelle. L'approche phénoménologique consiste à identifier expérimentalement des lois de comportement à l'échelle d'un élément de volume représentatif du matériau, alors que les techniques de changement d'échelle se proposent de calculer des estimations du comportement du matériau à partir du comportement de ses constituants et de leurs fractions volumiques. L'objet de ce cours est d'introduire les élèves aux techniques de changement d'échelle. Le contenu du cours est le suivant : 1) Introduction des différentes échelles d'observation dans les solides hétérogènes. Notion de Volume Élémentaire Représentatif (VER). 2) Conditions aux limites homogènes en déformation ou en contrainte. Tenseurs d'élasticité et de souplesse du VER. 3) Bornes de Voigt et de Reuss. Bornes de Hashin-Shtrikman. Cas du composite unidirectionnel. 4) Méthodes approchées dans le cas de faibles concentrations d'inclusions. Aperçu des méthodes auto-cohérentes. 5) Cas des milieux à structure périodique.

Références :

HASHIN Z., Analysis of composite materials, a survey. J. Appl. Mech., 50, 481-505 (1983).

SANCHEZ-HUBERT J., SANCHEZ-PALENCIA E., Introduction aux méthodes asymptotiques et à l'homogénéisation, Masson, Paris, 1992.

SAB K., On the homogenization and simulation of random materials. Eur. J. Mech. A/Solids, 11, n°5, 585-607 (1992).

Nemat-Nasser S., Hori M., Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials, North-Holland, 1993.

KOZLOV S.M., OLENIK O., ZHIKOV V., Homogenization of Differential Operators, Springer Verlag, 1994.

SAB K., Propriétés homogénéisées des matériaux hétérogènes élastiques : définition et bornes. Actes des journées « changement d'échelle ». 7 et 8 juin 2000. Nantes. LCPC (2000).

BORNERT M., BRETHER T., GILORMINI P. (Eds), Homogénéisation en mécanique des matériaux, Hermes, Paris, 2001.

5. Modélisation probabiliste des incertitudes en mécanique (20h) C. Soize

Le cours traite de la modélisation des incertitudes aléatoires dans les problèmes de mécanique et concerne aussi bien aussi bien l'échelle macroscopique que les échelles microscopiques. L'objectif du cours est de donner les principales approches pour modéliser et représenter les grandeurs aléatoires qui apparaissent dans les modèles et de présenter les principales méthodes de résolution 1) Introduction de la problématique. 2) Modélisations probabilistes : Modélisation par des variables aléatoires (rappels de la théorie des probabilités, description effective des lois, développement sur les polynômes orthogonaux). Construction des lois de probabilités (statistiques mathématiques, théorie de l'information et principe du maximum d'entropie). Modélisation par des champs stochastiques (théorie des processus et champs stochastiques du second ordre, réduction par projection, éléments finis stochastiques). 3) Méthodes de résolution des équations avec paramètres aléatoires : Transformations des variables aléatoires. Perturbation et développement en série de Neumann. Projection sur les polynômes orthogonaux. Méthode numérique de Monte Carlo 4) Modélisation probabilistes non paramétriques des incertitudes en dynamique.

Références :

RUBINSTEIN R.Y., Simulation and the Monte Carlo Method, Wiley, 1981.

KREE P., SOIZE C., Mathematics of Random Phenomena, Reidel, Dordrecht, 1983.

SAPORTA G., Probabilités, analyse des données et statistique, éditions Technip, Paris, 1990.

KAPUR J.N., KESAVAN H.K., Entropy Optimization Principles with Applications, Academic Press, 1992.

SOIZE C., Méthodes mathématiques en analyse du signal, Masson, Paris, 1993.

SOIZE C., The Fokker-Planck Equation for Stochastic Dynamical System, World Scientific, Singapor, 1994.

SOIZE C., A nonparametric model of random uncertainties on reduced matrix model in structural dynamics. Probabilistic Engineering Mechanics, 15(3), 277-294 (2000).

SOIZE C., Maximum entropy approach for modeling random uncertainties in transient elastodynamics. J. Acoust. Soc. Am., 109(5), 1979-1996 (2001).

Enseignements de l'option « Mécanique et Matériaux »

M1 Méthodes de résolution numérique pour le comportement inélastique des matériaux. (18h) X. Château,

S. Maghous, B. Nedjar.

Différents algorithmes permettant la résolution par la méthode des éléments finis en déplacements de problèmes d'évolution pour divers comportements de matériaux inélastiques sont présentés puis mis en oeuvre en utilisant des codes industriels. On présente à cette occasion aux étudiants une application des méthodes d'homogénéisation pour des comportements non réversibles. Enfin, l'exposé sur le calcul à la rupture permet de présenter des méthodes de résolution approchée n'utilisant pas une interpolation pour les déplacements. Le contenu du cours est le suivant :

1) Calculs Elastoplastiques (Rappel sur les modèles élastoplastiques. Algorithmes locaux d'intégration pour la plasticité ; notion de "prédiction/correction" Calcul du module tangent ; application à des modèles classiques). 2) Homogénéisation périodique d'un milieu plastique parfait standard (Rappels pour le mode de chargement sur la cellule de base. Problème de localisation. Identification de la loi de comportement homogène équivalente - notion d'écroutissage). 3) Calculs en Mécanique de l'endommagement (Présentation de la modélisation classique ; équations d'évolution. Analogie avec l'élastoplasticité ; un algorithme d'intégration. Discussion sur les modélisations combinant plasticité et endommagement). 4) Homogénéisation en calcul à la rupture (Introduction du concept de chargement supportable au sens du calcul à la rupture à partir de l'analyse limite. Approche statique de l'homogénéisation périodique en calcul à la rupture. Approche cinématique). 5) Homogénéisation en calcul à la rupture. Méthodes de résolution numérique (Méthodes numériques basées sur l'approche statique. Méthodes numériques basées sur l'approche cinématique). 6) Travaux pratiques de calculs par éléments finis (résolution de problèmes illustrant les concepts vus dans le cours en utilisant des codes de calculs par éléments finis).

M2. Introduction à la mécanique des milieux poreux (18h) P. Dangla, T. Lassabatère

De nombreux matériaux qu'ils soient naturels ou artificiels, sont des matériaux poreux dont l'espace poreux interstitiel est saturé par un ou plusieurs fluides. De nombreuses disciplines ont pour objet l'étude de tels matériaux: la Mécanique des sols et la Mécanique des Roches, l'Hydrogéologie, la Géophysique pour n'en citer que quelques unes. L'objectif de ce cours qui s'adresse aux élèves de l'école doctorale MODES et aux élèves-ingénieurs de l'ENPC, est d'apporter aux élèves les connaissances de base de la Mécanique des Milieux Poreux par une généralisation des concepts et méthodes de la Mécanique des Milieux Continus Classique. Ces connaissances de base concernent le transport des fluides et l'étude des contraintes et des déformations dans de tels milieux. On y apprend une démarche de modélisation se situant dans la lignée de l'école de mécanique des solides française. La plus grande partie du cours aborde la modélisation des milieux poreux saturés (15H) mais les 3 dernières heures sont consacrées aux milieux poreux non saturés avec les délicats problèmes qu'ils soulèvent (séchage, imbibition et couplages mécaniques). Le contenu du cours est le suivant : 1) Représentation du milieu poreux saturé. Déformations du squelette. Conservation de la masse fluide. Loi de Darcy. (Equation de diffusion dans un poreux indéformable. Exercices d'écoulement. Interprétation de la loi de Darcy). 2) Représentation des efforts intérieurs. Tenseur des contraintes, contraintes partielles. Thermodynamique des fluides et du VER : premier et second principes. Potentiels, lois d'état. (Force exercée par un drain sur une conduite. Discontinuités à l'interface d'un milieu poreux et d'un fluide). 3) Comportement poroélastique. Hypothèse de Terzaghi et contraintes effectives. (Etablissement des relations entre caractéristiques des constituants et caractéristiques macroscopiques poroélastiques). 4) Problèmes d'évolution poroélastiques linéaires. Méthodes de résolution directes. (Action de la houle sur un milieu poreux indéformable et sur un milieu poroélastique. Creusement d'un puits ou problème de la consolidation). 5) Introduction aux milieux poreux non saturés : Courbes capillaires. Lois de comportement. Lois de conduction. (Problèmes poroélastiques non saturés sur des systèmes homogènes. Dessiccation, imbibition. Loi du changement de phase) .

Références

BIOT M. A., General theory of three dimensional consolidation. J. Appl. Phys.,12, 155-164 (1941).
COUSSY O., Mechanics of Porous Continua, J. Wiley & Sons, 1995.
DETOURNAY E., CHENG H.D., Comprehensive Rock Engineering, Ch. 5 Fundamentals of Poroelasticity, Eds. Pergamon Press, 1994.
FREDLUND D. G., RAHARDJO H., Soil Mechanics for Unsaturated Soils, J. Wiley & Sons, 1993.
GERMAIN P., Mécanique, Tome 1 et 2, Ellipses, 1986.
BEREST P., WEBER PH., La thermomécanique des roches, Manuels et Méthodes, vol.16, BRGM,1988.
DULLIEN F.A.L., Porous Media - Fluid Transport and Pore Structure, Academic Press, 1992.

M3. Modélisation des structures multicouches (18h) J.-F. Caron, G. Foret.

Fibre-résine, bois lamellé-collé, acier-élastomère, les combinaisons sont infinies et les structures multicouches désormais incontournables pour l'ingénieur qui doit proposer de nouvelles solutions matériaux pour de nouveaux défis. Ce cours présente une méthode générale de modélisation de ce type de structures hétérogènes et anisotropes, basée sur une formulation variationnelle mixte. Des lois de comportement seront ainsi identifiées, notamment au niveau des interfaces, permettant ainsi d'aborder les aspects de collage ainsi que l'étude des

phénomènes de délaminages. L'utilisation d'un code de calcul (ABAQUS) ainsi qu'une approche expérimentale (tests, observations au Microscope Electronique à Balayage) permettront à l'étudiant de se familiariser avec les spécificités de ces structures et de se convaincre de la validité des modèles proposés. Enfin, des critères de rupture déterministes ou probabilistes des interfaces seront introduits et utilisés dans l'optimisation d'une structure multicouche.

Références

CARON, R. P. CARREIRA, DIAZ A., Critère d'initiation de délaminage dans les stratifiés. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 327 (13) 1291-1296 (1999).

NACIRI, A. EHRLACHER, A. CHABOT, Interlaminar stress analysis with a new multiparticle modelization of multilayered materials (M4). Composites Science and Technology, 58 337 (1998).

EHRLACHER A., Modèles de multicouches, Cours de l'ENPC.

M4. Comportement mécanique et modélisation des sols (18h) J.-P. Magnan, Ph. Mestat, J. Canou

Ce cours présente le comportement mécanique des sables et des argiles soumis à des charges monotones ou cycliques à partir des essais réalisés en laboratoire à l'appareil triaxial et à l'oedomètre. Il introduit les modèles couramment utilisés pour représenter ce comportement, leurs relations avec les essais et leur utilisation dans les calculs en éléments finis. Les séances successives du cours portent sur :

- la description et la caractérisation physique des sols (avec un rappel des principaux concepts de la mécanique des sols classique) ;
- le comportement et la modélisation des argiles et des sables sous chargements monotones et cycliques ;
- les modèles élastoplastiques pour les sols ;
- l'identification expérimentale des paramètres et la validation des modèles ;
- l'application des modèles pour la modélisation en éléments finis des ouvrages géotechniques.

Références.

MAGNAN J.-P., Cours de mécanique des sols et des roches, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (2 volumes), 2001.

MAGNAN J.-P., GUILLOUX A., MESTAT PH, La pratique des calculs tridimensionnels en géotechnique, Presses de l'ENPC, Paris, 1998.

MESTAT PH., PRAT M., BISCH PH., MILLARD A., PIJAUDIER-CABOT G., Ouvrages en interactions, Editions Hermès Sciences, Paris, 1999.

M5. Durabilité des matériaux cimentaires dans leur environnement (18h) J.-M. Torrenti, F. Meftah, G. Thevenin

Ce cours, commun avec le DEA MAISE, est axé sur l'analyse et la modélisation relative au vieillissement, notamment des matériaux cimentaires, et aux phénomènes d'évolution dans un contexte chémo-physico-mécanique donné. Son principal objectif est de donner les relations entre les propriétés du matériau et le comportement des structures en béton. Le programme du cours est le suivant : 1) Les déformations différées du béton : du court terme au long terme (Les phénomènes physiques. Modélisation du comportement au jeune âge, couplage comportement mécanique et hydratation. Modélisation de la dessiccation et de ses effets mécaniques. Impact du retrait sur les structures, influence des paramètres de composition et des méthodes constructives Modélisation du fluage. Prise en compte du fluage dans le calcul de structure). 2) Corrosion (Stabilité des aciers dans les bétons. Les différentes formes de corrosion et d'oxydes. Modélisation des cinétiques de corrosion. Mécanismes d'expansion des oxydes et critères de fissuration. Propagation et modélisation de la corrosion et effets sur le comportement mécanique local. Evolution structurelle des BA corrodés. Prédire et anticiper la ruine : synthèse des outils actuels et des besoins futurs). 3) RAG - Action des sulfates (RAG ; Constatations expérimentales ; différents niveaux d'observations. Approche microscopique de la RAG ; modélisation des phénomènes chimiques. Approche mésoscopique de la RAG : modélisation de la fissuration anisotrope sur un VER. Approche macroscopique de la RAG ; modélisation des gonflements et de l'endommagement d'un ouvrage. Approche microscopique de la réaction sulfatique ; modélisation des phénomènes chimiques. Approche mésoscopique de la réaction sulfatique ; modélisation de la fissuration induite. Approche macroscopique de la réaction sulfatique ; modélisation de l'endommagement d'un ouvrage). 4) Comportement des structures en béton en eaux agressives (Evolution et modélisation des propriétés physiques des bétons altérés. Evolution et modélisation des propriétés mécaniques locales des bétons altérés. Comportement et modélisation à long terme des structures : aspects mécaniques et transferts. Problématiques numériques et spécificités des calculs couplés. Prédire et anticiper : limites et besoins nouveaux). 5) Action des températures élevées (Evolution des propriétés physiques et mécaniques du béton sous hautes températures. Modélisation multi-physique et couplages : thermique – hydrique – chimique – mécanique. Elaboration de relations constitutives. Techniques de résolution du problème discret. Simulations du comportement de spécimens et de structures.).

Enseignements de l'option « Mécanique et Structures »

S1. Mécanique de la mise en forme (18h) L. Chevalier.

L'objectif de ce cours est de mettre en place les outils standards de modélisation des procédés de mise en forme pour les pièces forgées ou moulées. L'aspect thermique apparaît incontournable, le couplage thermo-mécanique les modifications de propriétés durant la mise en forme seront les points forts de cet enseignement. Le cours est découpé en 1 séance de 2 heures suivie de 4 séances de 4 heures durant lesquelles on consacra 2 heures à la présentation du cours et 2 heures à l'étude d'une application que les étudiants devront terminer. Le contenu du cours est le suivant : 1) Cadre de travail ; thermomécanique des milieux déformables en grandes transformations. 2) Comportement visqueux, visco-élastique pour la simulation des procédés de thermo-formage des pièces plastiques. 3) Couplage entre le comportement thermomécanique et le changement de morphologie (cristallisation, orientation des chaînes macromoléculaires). 4) Comportement plastique, visco-plastique pour la simulation des procédés de forgeage à chaud des pièces métalliques. 5) Couplage entre le comportement thermomécanique et les changements de morphologie (fibrage, texture, changement de phase).

Références

AGASSANT J-F, AVENAS P., SERGENT J-PH., La mise en forme des matières plastiques, de. TecDoc (1986).
MOUSSY F., FRANCIOSI P. (ed.), Physique et mécanique de la mise en forme des métaux, Presses du CNRS, 1990.
SELL C.G , HAUDIN, J-M. (ed.), Introduction à la mécanique des polymères, publié par l'INPL, Mecamat, GFP, Appolor, et Firtech, 1995.
GILORMINI P., PREDELEANU M. (ed.), Advanced Methods in Materials Processing Defects, Elsevier, 1997.

S2. Mécanique des interfaces (18h) Q.-C. He.

L'objectif de ce cours est double. Il vise d'abord à former les étudiants à une connaissance approfondie des lois qui régissent les phénomènes mécaniques d'interface. Il vise ensuite à conduire les étudiants à la maîtrise de méthodes modernes permettant de modéliser et simuler les effets non linéaires des interfaces sur le comportement mécanique des matériaux et des structures en question. Le programme du cours est le suivant. 1) Lois fondamentales des interfaces (cinématique et dynamique des interfaces, lois de conservation et principes thermodynamiques des interfaces, classification des interfaces). 2) Lois constitutives des interfaces (contact unilatéral et loi de Signorini, frottement et loi de Coulomb, usure et loi d'Achard, analyse convexe). 3) Contacts Hertzien et non Hertzien entre deux solides élastiques (contacts conforme et non conforme, théorie de Hertz, contact avec frottement et théorie de Mindlin, poinçon). 4) Formulation variationnelle des problèmes de contact (contact unilatéral sans frottement et inéquations variationnelles, puis avec frottement, Lagrangien augmenté). 5) Traitement numérique des problèmes de contact (méthode de pénalisation et Lagrangien augmenté, méthode de Newton généralisée, construction des éléments de contact). 6) Contact entre deux solides en grands déplacements : une introduction (distance de contact orientée et sa variation, principe de l'action et de la réaction généralisé, contact sans frottement entre deux solides élastiques en grandes déformations).

Références

HE, Q.-C., TELEGA, J.J., CURNIER, A., Unilateral contact of two solides subject to large deformations : formulation and existence results. Proc. R. Soc. Lond. A 452, 2691-2717 (1996).
JOHNSON, K.L. , Contact Mechanics. Cambridge University Press : Cambridge, New York, 1985.
PANATIOTOPULOS, P.D., Inequality Problems in Mechanics – Convex and Nonconvex Energy Functions. Birkhäuser-Verlag : Basel, 1985.
ROBINOWICZ, E., Friction and Wear of Materials. John Wiley ans Son, New York, 1965.
VAN TIEL, J., Convex Analysis – An Introduction Text. John Wiley and Sons, Chichester, 1984.
WRIGGERS, P, AND PANATIOTOPULOS, P.D. (ed.), New Developments in Contact Mechanics (CISM cours 384). Springer-Verlag, : Berlin, New York, 1999.

S3. Mécanique des microsystemes (18h) O. Français

Ces dernières années ont vu un développement considérable autour de Microstructures mécaniques obtenues à partir des technologies de la Micro-électronique. Appelés conventionnellement MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), elles permettent l'essor d'une nouvelle technologie qui ouvre les portes à de multiples applications dans

des domaines aussi vastes que la biologie, l'automobile ou encore les télécommunications. Elles sont l'une des technologies clefs du 21^{ème} siècle et font l'objet de nombreux travaux de recherche. C'est dans ce cadre que se place ce cours avec comme objectifs de montrer l'intérêt des Microsystèmes Electromécaniques ainsi que leur particularité vis à vis des dimensions micrométriques qui sont mises en jeu. Les étudiants auront ainsi la possibilité de découvrir les technologies spécifiques qui leur sont associées et les problèmes physiques inhérents à leur conception. Ce module s'appuie sur la découverte de l'environnement salle blanche via les moyens dans le domaine des microtechnologies du Groupe ESIEE. Le programme du cours est le suivant. 1) Introduction : microstructures, microsystèmes. 2) Lois d'échelle. 3) Les microtechnologies. 4) Élaboration de microstructures mécaniques (Problèmes statiques et vibratoires. Fiabilité). 5) Illustration en salle blanche.

Références

FUKUDA T., MENZ W., Micro Mechanical Systems: Principles and Technology, Handbook of Sensors and Actuators, Volume 6, Elsevier, 1998.
ELWENSPOEK M., JANSEN H., Silicon Micromachining, Cambridge University Press, 1998.
LANDAU L. AND LIFSHITZ E., Theory of Elasticity, Mir, Moscow, 1967.
TIMOSHENKO S., WOJNOWSKI-KRIEGER S., Theory of plates and Shells, McGraw-Hill, New York, 2nd edn, 1959.

S4. Fiabilité des systèmes mécaniques (18h) A. Mébarki

Le contexte réel de toute structure ou système est aléatoire : géométrie, matériaux et actions. L'intégrité doit alors être décrite en termes fiabilistes (ou probabilités de survie). Le principal objectif de cet enseignement est d'analyser les diverses techniques avancées d'analyse de la fiabilité de systèmes ou de composants en vue d'aboutir à leur optimisation. Le contenu des enseignements est le suivant: 1) Rappels de probabilités. 2) Expression théorique de la fiabilité et analyse de cas simples. 3) Méthodes de niveau 2 et index de fiabilité. 4) Méthodes de niveau 3 et simulations avancées. 5) Fiabilité composants et fiabilité systèmes.

Références

LEPORATI E., The Assessment of Structural Safety, Research Studies Press, Letchworth, 1979.
ANG A.H.S., TANG W.H., Probabilistic Concepts in Engineering Planning and Design, John Wiley & sons, 1984.
MELCHERS R.E., Structural Reliability - Analysis and Prediction, Ellis Horwood lim, 1987.
MADSEN H.O., KRENK S., LIND N.C., Methods of Structural Safety, Prentice-Hall, 1986.