



## Master Recherche M2

Domaine « Sciences, technologies, santé »  
Mention « Mécanique »

***Parcours « Approches multi échelles pour les matériaux et les structures » (AMMS)***  
**Ecole nationale des ponts et chaussées**

Le Master Approches Mécanique des Matériaux et des Structures (AMMS) est un Master recherche du site de Marne la Vallée co-accrédité pour la période 2015-2019 par trois établissements d'enseignements supérieurs : l'École nationale des ponts et chaussées (ENPC), l'Université Paris Est Marne-la-Vallée (UPEM), l'Université Paris Est Créteil (UPEC).

**Responsable pour l'ENPC du parcours « AMMS » : Pr Luc DORMIEUX**

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)

6-8 avenue Blaise Pascal

Champs sur Marne

77455 Marne la Vallée Cedex 2 France

e-mail : [luc.dormieux@enpc.fr](mailto:luc.dormieux@enpc.fr)

site web de l'ENPC : <http://www.enpc.fr>

## I – Objectifs

Le 1<sup>er</sup> semestre du M2 de ce parcours est constitué de 9 cours valorisés à 30 ects. Le 2<sup>ème</sup> semestre du M2 est constitué par le stage de recherche valorisé à 30 ects.

Les compétences générales visées par le M2 de ce parcours 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 associés. Une ouverture vers les méthodes expérimentales, notamment en imagerie, est également proposée

Il est à noter que la réussite au Master MMS suppose que l'étudiant possède au préalable **de solides connaissances de base en Mécanique des Milieux Continus et tout particulièrement en théorie de l'élasticité linéaire. Le parcours « Mécanique et Matériaux » met en place une semaine de mise au point sur ces notions comme préalable aux cours.**

À ces bases fondamentales est associée l'ouverture sur les problématiques de la recherche en mécanique appliquée aux technologies du Génie Civil et aux 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.

La compétence particulière visée est la modélisation micromécanique, à partir des propriétés de leurs constituants, des matériaux et des éléments structurels qui résultent 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 multicouches (fibre-résine, bois lamellé-collé, acier-élastomère), les «géocomposites» : sols renforcés, béton armé, etc.

## II - Débouchés professionnels

Le parcours 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 et Développement dans les entreprises et les sociétés de service.
- La spécialité 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)

### III – Enseignements

Avant le début des cours du master, est organisée une semaine de cours sur les « Notions de mécanique des milieux continus » afin de préparer les élèves à aborder les cours théoriques (ou de leur rappeler les bases). Tous les cours se déroulent dans les locaux de l’Ecole des Ponts à Champs sur Marne.

#### Premier semestre 36 ects : cours théoriques

UE = Unité d'enseignement

↪ **9 cours** (4 ects par cours)

UE 1 - Fissuration des matériaux et des structures - Pr Alain EHLACHER / Daniel WEISZ PATRAULT

UE 2 - Homogénéisation en calcul à la rupture : du matériau à l'ouvrage – Pr Patrick DE BUHAN

ENPC - 7 séances de cours de 3h

UE 3 - Introduction à l’homogénéisation en mécanique des milieux continus – Pr Karam SAB

ENPC - 7 séances de cours de 3h

*Cours commun avec le master recherche « Science des matériaux pour la construction durable » (SMCD)*

UE 4 - Elasticité et résistance des matériaux hétérogènes – Pr Luc DORMIEUX

7 séances de cours de 3h

UE 5 – Micro poro mécanique appliquée – Dr Eric LEMARCHAND

7 séances de cours de 3h

UE 6 - Modélisation des structures multi-couches - Prs Jean-François. CARON / Arthur LE BEE

7 séances de cours de 3h

UE 7 - Méthodes d'identification des paramètres de modèles - Prs Pierre ARGOUL

7 séances de cours de 3h

UE 8 - Approches numériques pour la mécanique non linéaire – Prs Denis DUHAMEL / Ahmad POUYA / Jean-Michel PEREIRA

7 séances de cours de 3h

UE 9 - Images et mécanique – Prs Michel BORNERT / Sébastien BRISARD

7 séances de cours de 3h

Florence Rivière Lamor est la documentaliste référente en « Génie civil et mécanique »

[forence.riviere@enpc.fr](mailto:forence.riviere@enpc.fr), bureau V101

#### Deuxième semestre 24 ects : stage

Le stage, de 4 à 6 mois, doit être réalisé dans un laboratoire de recherche ou dans un secteur Recherche et Développement d’une entreprise. Le stage donne lieu à la rédaction d’un mémoire de stage qui est soutenu oralement devant un Jury d’examen fin juin.

## IV – Descriptif des cours

### ► UE 1 - Fissuration des matériaux et des structures

**Enseignants : Alain EHRLACHER / Daniel WEISZ-PATRAULT**

**Prérequis :** Le cours s'adresse aux étudiants qui ont déjà acquis les connaissances de bases en mécanique des milieux continus. Il est préférable de maîtriser le formalisme en grandes transformations.

**Objectifs du cours :** Dans ce cours, nous nous intéressons aux structures contenant des fissures (cuve ou tuyauterie de centrale nucléaire, avion,...). Ces fissures sont susceptibles de progresser sous chargement monotone ou cyclique et de conduire à la ruine catastrophique de la structure.

Le cours poursuit trois objectifs complémentaires :

- 1/ Amener les élèves à un bon niveau de compréhension des phénomènes thermodynamiques en jeu lors d'une propagation de fissure dans une structure chargée. Cette analyse thermodynamique du processus de fissuration est menée sous les hypothèses les plus générales possibles dans le cadre de la mécanique des milieux continus de Cauchy.
- 2/ Faire prendre conscience que l'outil simple, habituellement utilisé dans le dimensionnement des structures fissurées, nommé " Mécanique linéaire de la rupture ", peut avoir un bon niveau de pertinence sous réserve que trois hypothèses simplificatrices essentielles sont acceptables.
- 3/ Donner aux élèves des éléments culturels de base sur les techniques de recherche de solutions en élasticité linéaire plane, 3D ou en élastodynamique, avec un focus sur l'analyse de structures fissurées.

#### **Programme du cours :**

La première séance propose un rappel sur le formalisme en grandes transformations dans le cadre de la mécanique des milieux continus de Cauchy et l'analyse thermodynamique d'un processus de déformation d'un solide non fissuré. Nous abordons ensuite la description du mouvement d'un solide fissuré en grandes transformations planes. Il est alors possible de procéder à l'analyse thermodynamique de la progression de fissure en grandes transformations planes et d'en déduire le concept tout à fait fondamental de " Taux local de relaxation d'énergie " à la pointe de la fissure.

La deuxième séance commence par une parenthèse utile sur les intégrales invariantes. Le concept de " Zone d'élaboration de la fissure " est ensuite introduit. Les trois hypothèses qui fondent la Mécanique Linéaire de la Rupture sont alors présentées. Il apparaît ainsi qu'un développement asymptotique des champs de contrainte à l'extrémité de la fissure dans le cadre d'un modèle en élasticité linéaire peut présenter un intérêt. Ces développements asymptotiques permettent la définition essentielle du concept de facteurs d'intensité de contrainte et de déduire les relations d'Irwin entre ces facteurs d'intensité de contrainte et le taux de relaxation d'énergie global. Revenant au critère de progression en chargement monotone nous pouvons alors introduire le concept de ténacité. La séance est complétée par un bureau d'études sur l'explication des accidents des avions COMET entre 1952 et 1954. Ces accidents ont été dus à un phénomène de propagation de fissures en fatigue.

La troisième séance présente la méthode de Kolosov-Muskhelishvili pour la résolution de problèmes d'élasticité plane et son utilisation pour la détermination de facteurs d'intensité de contrainte.

La quatrième séance présente les tenseurs de Kelvin-Somigliana. et de Kudpraze-Bashelishvili et leur utilisation pour la résolution de problèmes d'élasticité linéaire 3D. On Applique cette approche à la détermination des facteurs d'intensité de contrainte dans une structure fissurée. A titre d'illustration, on mène en fin de séance une étude de cas sur l'interaction de fluides avec une structure fissurée

La cinquième séance présente l'utilisation des variables complexes de Smirnov-Sobolev pour la résolution de problèmes d'élastodynamique. L'utilisation de cette méthode permet d'aborder la distinction entre les facteurs d'intensité d'ouverture de fissure et facteur d'intensité de contrainte qu'il est nécessaire d'introduire lorsque la fissure se propage rapidement.

***Contrôle des connaissances - Règles de validation du module :***

La dernière séance est consacrée à un devoir sur table.

***Documents pédagogiques - Bibliographie :***

Polycopié

***Domaine :***

Science des matériaux, mécanique, génie mécanique : génie mécanique

**► UE 2 - Homogénéisation en calcul à la rupture : du matériau à l'ouvrage**

**Enseignant : Patrick de BUHAN**

***Objectifs :*** L'objectif de ce cours consiste à présenter puis à mettre en œuvre la méthode d'homogénéisation des milieux périodiques en calcul à la rupture. L'accent sera mis sur la détermination dans des cas simples (modèles multicouches, composites à renforts linéaires, etc.) du critère de rupture macroscopique de tels matériaux hétérogènes, en vue de son application au dimensionnement d'ouvrages ou de structures.

***Contenu des enseignements :***

Les principaux points abordés sont les suivants.

1) Présentation générale de la théorie du calcul à la rupture : approches statique par l'intérieur et cinématique par l'extérieur.

2) Méthode d'homogénéisation en calcul à la rupture : problème initial et problème homogène associé; notion de problème auxiliaire de calcul à la rupture ; critère de résistance macroscopique et fonction d'appui correspondante ; anisotropie de résistance.

3) Formulation explicite du critère de rupture macroscopique pour des matériaux à structure simple : milieux multicouches, matériaux à renforts linéaires (composites à fibres, sols renforcés), milieux poreux, maçonnerie à joints. Prise en compte des interfaces.

4) Mise en œuvre des approches statique et cinématique du calcul à la rupture pour la résolution du problème homogène associé. Pertinence et efficacité de la méthode d'homogénéisation pour le dimensionnement d'ouvrages.

5) Formulation simplifiée du critère dans le cas de composites à renforts linéaires minces de grande résistance. Ouverture vers une modélisation multiphasique de la résistance de ces milieux composites. Notion de résistance d'interaction.

***Mots-clés :*** homogénéisation périodique ; calcul à la rupture ; critère de résistance macroscopique ; anisotropie de résistance ; composites à fibres ; sols renforcés.

***Bibliographie***

P. SUQUET (1985). Elements of homogenization for inelastic solid mechanics. *CISM Lecture Notes*, n°272, « Homogenization Techniques for Composite Media », Springer-Verlag, pp. 193-278.

P. de BUHAN (1986) *Approche fondamentale du calcul à la rupture des ouvrages en sols renforcés*. Thèse d'Etat, Université de Paris VI.

P. de BUHAN, R. MANGIAVACCHI, R. NOVA, G. PELLIGRINI, J. SALENCON (1989). Yield design of reinforced earth walls by a homogenization method. *Géotechnique*, 39, n°2; pp. 189-201.

P. de BUHAN, A. TALIERCIO (1991). A homogenization approach to the yield strength of composite materials. *Eur. J. Mech. A/Solids*, 10(2), pp129-150.

P. de BUHAN, L. DORMIEUX (1996). On the validity of the effective stress concept for assessing the strength of saturated porous materials : a homogenization approach. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 44, N°10, pp. 1649-1667.

P. de BUHAN, G. de FELICE (1997). A homogenization approach to the ultimate strength of brick masonry. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 45, N°7, pp. 1085-1104.

S. MAGHOUS, P. de BUHAN, A. BEKAERT (1998). Failure design of jointed rock structures by means of a homogenization approach. *Mech. Cohes.-Frict. Mater.*, 3, pp. 207-208.

B. JELLALI, M. BOUASSIDA, P. de BUHAN (2005). A homogenization method for estimating the bearing capacity of soils reinforced by columns. *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.*, Vol 29, pp. 1-16.

Q. THAI SON, G. HASSEN, P. de BUHAN (2009). A multiphase approach to the stability analysis of reinforced earth structures accounting for a soil-strip failure condition. *Computers and Geotechnics*, 36, pp. 454-462.

### ► UE 3 - Introduction à l'homogénéisation en mécanique des milieux continus

**Enseignant : Karam SAB**

**Objectifs** : 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.

**Contenu des enseignements** :

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. Cas du composite unidirectionnel.
4. Méthodes approchées dans le cas de faibles concentrations d'inclusions. Aperçu des méthodes autocohérentes.
5. Cas des milieux à structure périodique.

**Mots-clés** : Homogénéisation. Milieux périodiques. Méthodes approchées.

**Bibliographie** : 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., BRETHEAU T., GILORMINI P. (Eds), Homogénéisation en mécanique des matériaux, Hermes, Paris, 2001.

## ► UE 4 – Elasticité et résistance des matériaux hétérogènes

**Enseignant : Luc DORMIEUX**

**Objectifs** : Le cours s'adresse à des étudiants déjà initiés à la problématique du changement d'échelles. Après avoir établi le lien entre élasticité effective et localisation de la déformation, on introduit les problèmes d'Eshelby de l'inclusion équivalente et de l'inhomogénéité, à partir desquels on présente les schémas d'homogénéisation classiques (Mori-Tanaka, autocohérent). Revenant ensuite à la notion de polarisation dans la perspective de construire des bornes, on introduit l'approche variationnelle de Hashin-Shtrikman. On aborde l'homogénéisation non linéaire en introduisant les méthodes incrémentale et sécante qu'on illustre sur le critère de rupture de milieux poreux. On reprend cette question dans le cadre du modèle de Gurson.

**Mots-clés** : Localisation. Problèmes d'Eshelby. Schémas d'homogénéisation de type « Eshelby ». Bornes de Hashin-Shtrikman. Méthodes sécantes. Critère de Gurson.

### **Bibliographie** :

Willis J.R. Bounds and self-consistent estimates for the overall moduli of anisotropic composites. J. Mech. Phys. Solids 25, 185-202, 1977.

Ponte Castaneda P., Willis J.R. The effect of spatial distribution on the effective behavior of composite materials and cracked media. J. Mech. Phys. Solids, 43, 1919-1951, 1995.

Bornert M., Bretheau T., Gilormini P. (Eds), Homogénéisation en mécanique des matériaux, Hermes, Paris, 2001.

Dormieux L., Kondo D., Ulm F.-J. Microporomechanics, Wiley, 2006.

## ► UE 5 : Microporomécanique appliquée

**Enseignant : Eric LEMARCHAND.**

**Objectifs** : Le cours s'adresse à des étudiants déjà initiés à la problématique du changement d'échelles. Sur le plan thématique, le contenu de ce cours se présente comme une extension du cours UE 6 – Elasticité et résistance des matériaux hétérogènes à la problématique des couplages chemo-physico-poromécaniques dans les matériaux du Génie Civil. On y aborde la problématique de la prise en compte d'un ou plusieurs fluide(s) sous pression dans l'espace poreux de ces matériaux, dans la perspective d'analyser différents comportements couplés.

Les équations de la poroélasticité linéaire de Biot seront présentées sur la base d'un raisonnement micromécanique. Une large place sera également accordée à la question du changement d'échelle en lien avec la problématique de l'endommagement dans les milieux poreux.

**Contenu des enseignements :**

**Mots-clés :** Localisation. Problèmes d'Eshelby. Poroélasticité, Schémas d'homogénéisation de type « Eshelby », Milieux Fissurés, Critère de propagation.

**Bibliographie :** Dormieux L., Kondo D., Ulm F.-J. Microporomechanics, Wiley, 2006.

## ► UE 6 : Modélisation des structures multicouches

**Enseignants :** Jean-François CARON / Arthur LE BEE

**Objectifs :** 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.

**Matière :** Modélisation des structures multicouches

**Mots-clefs :** Composites. Multicouches. Modélisation.

**Contenu :**

1. Elasticité anisotrope
2. Formulation variationnelle mixte.
3. Modèle de plaque homogène de Love-Kirchhoff et Reissner Mindlin
4. Modèle de plaque multicouches, par une approche classique de type monocouche équivalente.
5. Modèles de plaque multicouches Layerwise
6. Endommagements, rupture/ Outils élément-finis spécifiques

## ► UE 7 : Méthodes d'identification des paramètres de modèles

**Enseignant :** Pierre ARGOUL

**Objectifs :** le comportement des matériaux est décrit par des modèles faisant intervenir des paramètres qui ne sont pas toujours accessibles par des mesures directes. Ainsi, il est souvent nécessaire de faire appel à des méthodes spécifiques d'identification.

**Contenu des enseignements**

1. L'identification de paramètres dans le cadre plus général des problèmes inverses. Nombreux exemples dans des domaines variés. Rappel sur les notions mathématiques utilisées dans ce cours.
2. Le problème inverse linéaire en dimension finie. Moindres carrés linéaires, décomposition en valeurs singulières et techniques de régularisation.

3. Les méthodes d'optimisation sans contraintes et les conditions d'optimalité dans le cas différentiable et dans le cas non-différentiable convexe. La fonction conjuguée de Legendre-Fenchel . Différents algorithmes (descentes, méthodes duales, ...).
4. Les méthodes d'optimisation avec contraintes et la notion du Lagrangien. Conditions d'optimalité dans le cas différentiable, lien entre optimisation et dualité. Caractérisation et identification des paramètres dans les lois de comportement des matériaux.
5. Méthodes d'optimisation avec contraintes dans le cas non-différentiable convexe ( Karush-Kuhn-Tucker). Algorithmes (méthodes de pénalisation intérieures ou extérieures, méthodes duales, etc )
6. Lois de comportement : notions de potentiels thermodynamiques, de potentiels de dissipation. Exemples en dimension 1.

**Mots-clés** : Identification. Algorithmes. Comportement des matériaux.

**Bibliographie** :

- ALLAIRE G., 2005, Analyse numérique et optimisation, Les Éditions de l'École polytechnique ou ALLAIRE G., 2007, Numerical Analysis and Optimization, Oxford University Press.
- BERGOUNIOUX M., 2001, Optimisation et contrôle optimal, Dunod.
- BUI H.D., 1993. Introduction aux problèmes inverses en mécanique des matériaux. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France. Eyrolles.
- CHABOCHE J-L., BENALLAL A., DESMORAT R., 2009, Mécanique des matériaux solides, 3ème édition, Dunod.
- CHONG E.K.P., ZAK S.H., 2001. An Introduction to Optimization. Wiley.
- CULIOLI J. C., 1994, Introduction à l'optimisation, Ellipses.
- GROETSCH C.W. ,1993. Inverse Problems in the Mathematical Sciences. Vieweg Mathematics for Scientists and Engineers.
- KIRSCH A., 1996. An Introduction to the Mathematical Theory of Inverse Problems. Springer

► **UE 8 : Approches numériques pour la mécanique non linéaire**

**Enseignants** : Denis DUHAMEL, Jean-Michel PEREIRA, Ahmad POUYA

**Objectifs** : Le cours traite du calcul numérique de problèmes mécaniques comportant différents types de non linéarités. Il repose sur un développement détaillé de la méthode des éléments finis appliquée à ces problèmes. Après un rappel des notions élémentaires, on aborde successivement les non linéarités matérielles puis géométriques en donnant des exemples des principales applications comme les polymères en grande déformation, l'endommagement ou l'élastoplasticité. Ensuite les algorithmes de résolution de problèmes statiques et dynamiques sont abordés. La finalité de ce cours est le «non linéaire géométrique avec non linéarité matérielle».

**Contenu des enseignements** :

1. Rappels sur les éléments finis, formulations variationnelles, linéarisation
2. Fonctions de forme, discrétisation
3. Résolutions implicite et explicite, TD

4. Problèmes avec non linéarités matérielles, exemples de matériaux plastiques

5. Mise en oeuvre informatique

6. Mise en oeuvre informatique

**Bibliographie** : BELYTSCHKO T., LIU W. K. and MORAN B., Non linear finite elements for continua and structures, 2000, Wiley.

DHATT G., TOUZOT G. et LEFRANCOIS E., Une présentation de la méthode des éléments finis, 2005, Hermes.

SIMO J.C. et HUGHES T.JR., Computational inelasticity, 1998, Springer

HOLZAPFEL G.A., Nonlinear solid mechanics, 2000, Wiley

ZIENKIEWICZ O. C., The finite element method, 1994, Mcgraw-Hill.

### ► UE 9 – Images et mécanique

**Enseignants : Michel BORNERT / Sébastien BRISARD**

**Objectifs** : Les techniques d'imagerie ont considérablement modifié notre quotidien au cours des années récentes. Elles ont également induit une mutation profonde de la mécanique expérimentale des matériaux et des structures. Ce cours vise à fournir quelques clés pour appréhender le comportement mécanique des matériaux avec ces nouveaux outils. On y décrit les principales techniques d'imagerie surfaciques et volumiques utilisées en mécanique expérimentale, mais aussi l'exploitation des informations contenues dans les images produites au moyen de méthodes d'analyse d'images. Celles-ci concernent d'une part la caractérisation des microstructures, i.e. de la répartition spatiale des constituants d'un matériau hétérogène, en vue d'utiliser cette information dans le cadre de méthodes analytiques ou numériques de changement d'échelle, abordées dans d'autres cours du master. D'autre part, il est possible d'extraire des images des indications qualitatives et quantitatives sur l'évolution des matériaux sous sollicitation. Les techniques associées, dites de mesure de champs, fournissent une quantité d'information infiniment plus riche que les mesures ponctuelles classiques, qu'il est possible de confronter avec des outils de simulation numérique, en vue d'identifier et valider des modèles de comportement des matériaux et des structures. Cette convergence entre mécanique expérimentale et numérique sera au cœur des méthodologies d'analyse multiéchelle des matériaux de demain.

**Mots-clés** :

**Contenu** :

C1 et C2 - Introduction à l'imagerie. Principaux outils d'acquisition d'images (macro- et microscopie optique, microscopie électronique à balayage et en transmission, techniques analytiques, microtomographie aux rayons X, techniques de diffraction,...)

C3 - Traitement d'image : codage des images, filtrage, segmentation, introduction à la morphologie mathématique, analyse statistiques

C4 - Imagerie et changement d'échelle : liens avec les modèles théoriques et le calcul des microstructures

C5 et C6 - Mesure de champs cinématiques. Principales techniques « photomécaniques ». Corrélation d'images numériques. Nanoindentation.

Dans la mesure du possible, les cours magistraux seront illustrés par des démonstrations sur des dispositifs disponibles à Navier ou dans des laboratoires proches. L'évaluation du module se fera sous la forme d'un miniprojet comportant une partie bibliographique et une mise en œuvre expérimentale ou numérique.

#### ***Bibliographie :***

G. WASTIAUX, La microscopie optique, Tec&Doc, 1994

C. COLLIEX, La microscopie électronique, Puf, 1996

F. BRISSET (Ed.), Microscopie électronique à balayage et microanalyse, EDP Sciences, 2008

J. BARUCHEL et al., X-Ray tomography in material science, Hermes, 2000

CHERMANT et COSTER, Précis d'analyse d'images, éditions du CNRS

J. SERRA, Image Analysis and Mathematical morphology, Academic press, 1982

S. TORQUATO, Random heterogeneous materials, Springer, 2001

HANDBOOK on EXPERIMENTAL MECHANICS, Kobayashi, Wiley, 1993

M. SUTTON, J.J. ORTEU and H. SCHREIER, Image correlation for shape, motion and deformation measurements, Springer 2009

M. GRÉDIAC et F. HILD, Mesures de champs et identification, Hermes Sciences, 2011.

### **IV – 3 - STAGE**

**Objectifs :** Il s'agit d'un stage d'une durée de 4 à 6 mois devant permettre à l'étudiant de mettre en application l'ensemble des connaissances acquise durant sa formation et acquérir des compétences additionnelles en matière d'initiation à la recherche dans le contexte d'un laboratoire ou dans un secteur R&D d'une entreprise.

### **V – Validation du master M2**

Le master est obtenu par la validation :

↪ des 9 cours (30 ECTS) Moyenne des neufs cours > ou égal à 10/20

↪ du stage  
l'exposé oral Note > ou égal à 10/20 Note de stage = note attribuée suite à

L'examen, pour chaque cours, peut prendre la forme d'un contrôle écrit (un seul contrôle) ou bien d'un exposé oral sur des travaux imposés.

Si l'élève n'a pas obtenu 10/20 à l'examen, il sera organisé un et un seul rattrapage par examen ; la forme du rattrapage est laissé au choix du(des) professeur(s) concerné(s). La note du **rattrapage** sera **plafonnée à 10/20** afin d'avantager les élèves qui ont validé à l'examen initial.

Sur le relevé définitif de note délivré en fin d'année scolaire, seront reportées **toutes** les notes : notes initiales et notes de rattrapage. Si la note de rattrapage est supérieure à celle du contrôle initial, ce sera la note de rattrapage qui sera intégrée dans le calcul de la moyenne générale.

La moyenne générale donnant lieu à la mention est calculée à partir de :

$[Moyenne \text{ des } 9 \text{ cours} \times 30 \text{ ECTS} + \text{Note stage} \times 30 \text{ ECTS}] / 60 \text{ ECTS} = \text{Moyenne Générale}$   
donnant lieu à la mention (Passable / Assez bien / Bien / Très bien)

## VI – Modalités de candidature à la formation

Pour accéder à cette formation, il faut remplir un **dossier de candidature** accessible en ligne <http://www.enpc.fr/master-mecanique-des-materiaux-et-des-structures-mms>.

L'inscription définitive à la scolarité de l'établissement ne peut être faite que si le candidat est admis. Les candidatures sont examinées sur dossier de mars à juin précédant la rentrée scolaire. L'admission est prononcée au vu du dossier présenté.

## VII – Condition de candidature

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

- issus de la 3A des Dpt de formation « Ingénieur de l'Ecole des Ponts » ;
- issus des établissements ParisTech ;
- ayant une maîtrise de Mécanique (année M1), de Génie Civil, de Physique ou de Mathématiques Appliquées ;
- ayant un diplôme d'ingénieurs généraliste en Mécanique, Génie Civil.

Concernant les étudiants ayant suivi leurs études à l'étranger, peuvent être admis à suivre le master, les étudiants :

- issus des écoles partenaires en double diplôme;
- ayant un diplôme d'ingénieurs généraliste en Mécanique, Génie Civil.

## VIII – Inscription administrative

Pour les étudiants admis en master AMMS à l'ENPC, l'inscription administrative s'effectue, en septembre précédant la rentrée scolaire, au Bureau de la Vie Etudiante (BVE) de l'ENPC. Le paiement des droits et frais est effectué dans l'établissement d'inscription selon les procédures de l'établissement. La convention de stage est éditée par l'établissement où l'étudiant est inscrit.

\*\*\*\*\*