

Sorbonne Université et École Nationale des Ponts et Chaussées
Année Académique 2019-2020

Master de Mécanique
Mécanique des Solides : Matériaux et Structures

Présentation et catalogue des cours

24 février 2019

Responsable Sorbonne Université
Corrado MAURINI corrado.maurini@sorbonne-universite.fr

Responsable ENPC
Karam SAB karam.sab@enpc.fr

Table des matières

1	Présentation	2
1.1	Objectifs pédagogiques	2
1.2	Débouchés professionnels	3
2	Information pratiques	3
2.1	Conditions d'admission, pré-requis	3
2.2	Procédure de candidature	4
2.3	Lieux d'enseignement	4
3	Organisation et structuration de la formation	5
3.1	Thématiques	5
3.2	Organisation des enseignements	5
3.3	Tronc Commun	5
3.4	Dates clés	6
3.5	Stage	6
4	Thématique Analyse Multi-échelle des Matériaux et des Structures (AMMS)	7
4.1	Unités d'enseignements de la thématique	7
4.2	Contacts	8
5	Thématique Durabilité des Matériaux et des Structures (DMS)	9
5.1	Unités d'enseignements de la thématique	9
5.2	Contacts	10
6	Thématique Modélisation et Simulation (MS)	11
6.1	Unités d'enseignements de la thématique	11
6.2	Contacts	12
7	Catalogue des cours du Tronc Commun	13
7.1	Introduction à l'homogénéisation en mécanique des milieux continus	13
7.2	Mécanique de la rupture fragile	14
7.3	Comportements non-linéaires des solides	15
7.4	Calcul numérique des solides et structures non linéaires	16
7.5	Fatigue	17
7.6	Endommagement	18

1 Présentation

Le parcours-type **Mécanique des Solides : Matériaux et Structures** du Master de **Mécanique** est organisé en partenariat entre **Sorbonne Université** et l'**Ecole des Ponts ParisTech**. La formation est étroitement adossée à deux laboratoires de recherche et aux Ecoles Doctorales associées :

- l'**Institut Jean le Rond d'Alembert** (Unité Mixte de Recherche Sorbonne Université - CNRS 7190) rattaché à l'Ecole Doctorale Sciences Mécaniques, Acoustique, Electronique et Robotique (**SMAER**) de Sorbonne Université.
- Le **Laboratoire Navier** de l'ENPC rattachée à l'Ecole Doctorale 531 Sciences, Ingénierie et Environnement (**SIE**) de l'Université de Paris-Est.

L'équipe pédagogique est constituée d'enseignants-chercheurs et chercheurs des deux laboratoires et d'enseignants-chercheurs de renommée internationale d'autres laboratoires franciliens de Mécanique, ainsi que d'industriels spécialistes de la conception et du calcul de structures mécaniques et de partenaires internationaux.

1.1 Objectifs pédagogiques

Ce parcours a pour objectif de former des spécialistes en mécanique des solides ayant une très bonne maîtrise des concepts et des outils de modélisation et simulation des structures mécaniques et des matériaux constitutants. Les enseignements délivrent des connaissances sur le comportement non linéaire des matériaux, la modélisation micro-mécanique, l'homogénéisation, la dynamique des structures, les méthodes de calcul numériques (éléments finis) dans le contexte linéaire et non linéaire, la modélisation des phénomènes de rupture, endommagement, fatigue ou d'instabilité dans les solides. Ces sujets sont au cœur des préoccupations actuelles des industriels, des problématiques posées par la recherche et développement technologique dans le court et moyen terme et des problématiques de recherche du secteur dans le long terme.

Les enseignements proposés comprennent des unités à caractère fondamental et des unités plus spécialisées, pouvant permettre aussi bien une insertion professionnelle, qu'une poursuite en doctorat. L'objectif de la formation est donc double :

- Former des spécialistes en calcul des structures, ayant une excellente maîtrise des logiciels industriels et répondant dès leur sortie aux besoins modernes des grandes ou moyennes entreprises chargées de concevoir ou de contrôler des structures industrielles sollicitées mécaniquement.
- Permettre à l'étudiant, qui le souhaiterait, de s'intégrer aux équipes de recherche les plus performantes dans les domaines du comportement des matériaux et du calcul des structures, que ce soit dans les laboratoires universitaires ou dans l'industrie, en lui donnant une formation conceptuelle moderne et de haut niveau.

Les domaines d'application sont très variés, incluant par exemple les transports, l'aéronautique, l'aérospatiale, l'énergie, le génie civil, la biomécanique et la robotique.

Mots clés : Endommagement, Rupture, Fatigue, Grandes déformations, Élasticité linéaire, Hyperélasticité, Viscoélasticité, Poutres, Plaques, Coques, Non-linéarités, Stabilité des structures, Meta-matériaux, Matériaux, Matériaux composites, Matériaux intelligents, Éléments finis, Calcul des structures, Méthodes numériques, Programmation, Structures, Optimisation, Dynamique des structures Multi-échelle, Milieux périodiques, Formulations Variationnelles, Méthodes approchées, Méthodes asymptotiques, Méthodes Énergétiques, Génie Civil, Génie Mécanique, Aéronautique, Aérospatial, Énergies renouvelables, Nucléaire, Robotique.

1.2 Débouchés professionnels

Les principaux débouchés professionnels sont :

- Les départements *Calcul*, *Structures* ou *Mécanique* des directions R&D des grands groupes industriels des secteurs aéronautique, automobile, génie civil, espace, nucléaire, transports, énergie,... (EDF, CEA, Safran, Framatome, Renault, PSA, EADS, Dassault Aviation, Technip, IFP, SNCF, CETIM, Lafarge, ANDRA, Total, ...)
- Les moyennes entreprises ou start-ups de haute technologie nécessitant des experts en calcul et modélisation des matériaux et des structures pour la conception et l'optimisation des produits, l'élaboration de matériaux innovants, les outils de l'investigation physique des matériaux.
- L'industrie cimentière, les bureaux d'études spécialisés dans les constructions et les ouvrages du Génie Civil.
- Les sociétés de service en informatique spécialisées dans le développement de logiciels de simulation numérique et/ou dans la sous traitance auprès des grands groupes.
- La poursuite en thèse pour une carrière de recherche académique ou industrielle. Les thèses s'effectuent dans le cadre de partenariats entre des laboratoires universitaires et de grands groupes industriels sous financement CIFRE ou avec des bourses de thèse proposées par le Ministère de la Recherche, le CNRS ou des grands Centres de Recherche (IFSTTAR, CEA, ONERA, IFREMER, ...).

2 Information pratiques

2.1 Conditions d'admission, pré-requis

Le Master en Mécanique des Solides vise à créer une communauté intégrée d'étudiants de haut niveau provenant de parcours variés :

- Formation universitaire au niveau M1 en Mécanique des Solides
- Les grandes écoles d'ingénieurs françaises
- Diplômés d'autres universités françaises et internationales d'excellent niveau

Les pré-requis pour l'admission sont les suivants :

- Être titulaire d'un Master 1 en Mécanique, Physique, ou Mathématiques
- Être titulaire d'un diplôme d'ingénieur avec des connaissances validées en Mécanique, Physique, ou Mathématiques

Les candidatures relevant de parcours atypiques, qui ne rentrent pas dans les cas mentionnés ci-dessus, seront étudiées avec une attention particulière donnée à l'excellence du niveau en Mécanique, Physique ou Mathématiques.

2.2 Procédure de candidature

- Les candidatures doivent être déposées sur le sites de l'une des deux institutions partenaires :
 - Sorbonne Université : <http://master.spi.sorbonne-universite.fr>
 - ENPC : <https://www.enpc.fr/masters>

Les étudiants doivent exprimer au moment de la candidature des vœux classés pour les trois thématiques possibles (AMMS, DMS, MS).

- Les étudiants en Master 1 à Sorbonne Université doivent candidater sur le site de Sorbonne Université.
- Les étudiants en formation d'ingénieur à l'ENPC doivent candidater sur le site de l'ENPC.
- Les étudiants d'autre provenance peuvent déposer leur candidature sur le sites de l'une des deux institutions partenaires. Nous recommandons de déposer la candidature sur le site de Sorbonne Université pour une candidature avec la thématique MS en premier vœux et sur le site de l'ENPC pour une candidature avec la thématique AMMS en premier vœux.
- Le diplôme est délivré par l'établissement d'inscription.
- La sélection des dossiers est basée sur la qualité du dossier académique et du projet pédagogique et professionnel du candidat.

2.3 Lieux d'enseignement

En fonction des jours et des options, les enseignements auront lieu sur les campus des deux établissements partenaires :

- Sorbonne Université, **Campus Pierre et Marie Curie**, 4 place Jussieu, 75005 Paris. Accès : <https://www.sorbonne-universite.fr/acces-aux-campus>.
- Ecole des Ponts ParisTech, **Campus de Marne-la-Vallée**, 6 et 8 avenue Blaise Pascal, Cité Descartes, Champs-sur-Marne, 77455 Marne-la-Vallée. Accès : <http://www.enpc.fr/venir-lecole>

3 Organisation et structuration de la formation

3.1 Thématiques

La parcours-type *Mécanique des Solides : Matériaux et Structures* du *Master en Mécanique* est structuré en trois **thématiques** :

- **AMMS : Analyse Multi-échelle des Matériaux et des Structures**
Responsables : Eric Lemarchand et Karam Sab (ENPC)
Capacité : 15 étudiants environ.
- **DMS : Durabilité des Matériaux et des Structures**
Responsable : Alain Ehrlacher (ENPC)
Capacité : 15 étudiants environ.
- **MS : Modélisation et Simulation**
Responsables Corrado Maurini et Hélène Dumontet (Sorbonne Université)
Capacité : 35 étudiants environ.

3.2 Organisation des enseignements

La formation, de 60 ECTS¹, s'articule sur deux semestres :

- Le **premier semestre (30 ECTS)** de mi-septembre à fin février inclut :
 - **12 ECTS** de **Tronc Commun (TC)** avec 4 cours de 3 ECTS parmi 6 cours offerts.
 - **12 ECTS** d'enseignements de la *thématique*.
 - **6 ECTS** d'enseignements *électifs*.
- Le **second semestre (30 ECTS)** est constitué par un stage de 6 mois dans une entreprise ou un laboratoire de recherche, valorisé pour 27 ou 30 ECTS. Un cours de langue (3 ECTS) peut compléter la formation en fonction du parcours de l'étudiant.

Les étudiants peuvent, s'ils le souhaitent, suivre des cours optionnels supplémentaires, qui seront comptabilisés en plus des 60 ECTS obligatoires et reportés dans le supplément au diplôme.

3.3 Tronc Commun

Les enseignements du tronc commun sont dispensés de mi-septembre à décembre. Ils s'adressent aux étudiants des trois thématiques et ont pour ambition d'être les cours de référence pour la formation de l'étudiant en mécanique des matériaux et des structures. La compatibilité de l'emploi du temps est assurée entre les six cours de tronc commun.

1. Introduction à l'homogénéisation en mécanique des milieux continus (3 ECTS, responsable K. Sab)
2. Mécanique de la rupture fragile (3 ECTS, responsable J.B. Leblond)
3. Comportements non-linéaires des solides (3 ECTS, responsable D. Kondo)
4. Endommagement (3 ECTS, responsables J. Bleyer/H. Dumontet)

¹European Credit Transfer and Accumulation System, voir https://en.wikipedia.org/wiki/European_Credit_Transfer_and_Accumulation_System ou https://ec.europa.eu/education/resources-and-tools/european-credit-transfer-and-accumulation-system-ects_en

5. Calcul numérique des solides et structures non linéaires (3 ECTS, responsables D. Duhamel/C. Maurini)
6. Fatigue (3 ECTS, responsable M. Peigney)

Chaque thématique recommande aux étudiants de suivre quatre cours parmi les six ci-dessus.

3.4 Dates clés

- Remise à niveau : deuxième semaine de septembre.
- Première période de cours : troisième semaine de septembre - décembre.
- Deuxième période de cours : décembre - février.
- Stage : mars - septembre, avec soutenances en septembre.

3.5 Stage

Le stage de fin d'étude, d'une durée de 4 à 6 mois, doit permettre à l'étudiant de mettre en application l'ensemble des connaissances acquises durant sa formation et acquérir des compétences additionnelles spécialisées dans un domaine d'application précis ou en matière d'initiation à la recherche.

- Le stage se déroulera dans une entreprise ou dans le contexte d'un laboratoire de recherche en France ou à l'étranger. Les stages en entreprise ont généralement lieu dans des bureaux calculs ou R&D des grands groupes industriels ou organismes partenaires de la formation, mais ils peuvent aussi se dérouler dans des petites ou moyennes entreprises de haute technologie ou dans des bureaux d'études spécialisés dans les constructions ou les ouvrages du Génie Civil (voir *Débouchés professionnels*).
- Le stage est valorisé à la hauteur de 27 ou 30 ECTS, en fonction du parcours de l'étudiant. L'évaluation du stage se fait sur la base d'un rapport écrit, de l'avis de l'encadrant et d'une soutenance orale ayant lieu à la fin de l'année académique (mi-septembre).

Pour les stages industriels ou académiques, les étudiants pourront bénéficier des nombreux contacts des deux laboratoires de recherche, en France (EDF, Safran, Framatome, Dassault, Renault, PSA, EADS, CETIM, Lafarge, Andra, Total) et à l'international, incluant les meilleures universités à l'échelle mondiale (*e.g.* Caltech, Cambridge, Oxford, ETH, EPFL, KTH, La Sapienza, Politecnico di Milano, Louisiana State University, etc.)

4 Thématique Analyse Multi-échelle des Matériaux et des Structures (AMMS)

A travers les différents cours proposés dans cette thématique, on souhaite former les étudiants à la modélisation mécanique des matériaux et des structures en intégrant les propriétés de leurs différents constituants et les informations sur leur agencement à différentes échelles de l'espace. Les applications des différentes démarches d'analyse présentées dans l'ensemble des cours concernent les domaines du Génie Civil, du Génie Mécanique et plus largement de l'Industrie. On s'intéressera plus particulièrement aux matériaux cimentaires, aux géomatériaux (sols, roches) et aux structures multi-couches (fibre-résine, bois lamellé-collé, acier-élastomère). Cette formation par la recherche répond pleinement aux exigences d'une candidature à la réalisation d'un travail de doctorat en Mécanique et Structures, mais elle constitue également un complément de formation sur des thématiques de recherche d'actualité susceptible d'intéresser de futurs ingénieurs.

4.1 Unités d'enseignements de la thématique

- **12 ECTS Tronc Commun.** Les cours de TC obligatoires pour cette thématique sont :
 - Mécanique de la rupture (3 ECTS, TC)
 - Comportements non-linéaires des solides (3 ECTS, TC)
 - Calcul numérique des solides et structures non-linéaires (3 ECTS, TC)
 - Introduction à l'homogénéisation en mécanique des milieux continus (3 ECTS, TC)
- **12 ECTS de spécialisation**
 - Elasticité et résistance des matériaux hétérogènes (3 ECTS, AMMS)
 - Micro-poro-mécanique appliquée (3 ECTS, AMMS)
 - Modélisation des structures multi-couches (3 ECTS, AMMS)
 - Images et mécanique (3 ECTS, AMMS)
- **6 ECTS électifs**
 - Endommagement (3 ECTS, TC)
 - Approches multi-échelles de la plasticité des métaux/Durabilité des bétons (3 ECTS, DMS)
 - Homogénéisation en calcul à la rupture (3 ECTS, AMMS)
 - Méthodes d'identification des paramètres de modèles (3 ECTS, AMMS)

Légende : (TC) Cours du Tronc Commun ; (AMMS) Cours propres à la thématique AMMS ; (DMS) Cours propres à la thématique DMS. Voir le Catalogue des cours pour les détails.

4.2 Contacts

Responsables de la thématique MS

- Karam Sab
Directeur de Recherche
Laboratoire Navier - ENPC
6 et 8 Avenue Blaise Pascal
Cité Descartes
77455 CHAMPS SUR MARNE
Tél : 01.64.15.37.49
Mail : karam.sab@enpc.fr
- Eric Lemarchand
Chargé de Recherche
Laboratoire Navier - ENPC
6 et 8 Avenue Blaise Pascal
Cité Descartes
77455 CHAMPS SUR MARNE
Tél : 01.64.15.36.58
Mail : eric.lemarchand@enpc.fr
- Alice Tran
Adjointe administrative
ENPC
6 et 8 Avenue Blaise Pascal
Cité Descartes
77455 CHAMPS SUR MARNE
Tél : 01.64.15.36.84
Mail : alice.tran@enpc.fr

5 Thématique Durabilité des Matériaux et des Structures (DMS)

La thématique Durabilité des Matériaux et des Structures vise à former des personnels de haut niveau scientifique, susceptibles de prendre en charge les problématiques de durabilité des installations futures et d'identification de l'état des installations existantes afin de déterminer la durée de vie résiduelle et de décider d'éventuels renforcements ou d'optimiser une politique de maintenance. Les aspects prise en compte de l'aléas et analyse des conséquences éventuelles d'un accident seront particulièrement étudiés. Les applications concerneront les ouvrages d'art (Ponts, tunnels, routes, ...), les ouvrages pour la production ou le stockage d'énergie (Barrages, STEP, réacteurs nucléaires à eau pressurisée, éoliennes offshore ou on shore, ...) et les bâtiments. À l'issue de la formation les étudiants maîtriseront les principaux modèles de vieillissement des matériaux et des structures, sauront mettre en œuvre une démarche d'identification de l'état d'une structure ancienne, connaîtront les principales méthodes pour la prise en compte de l'aléas des matériaux, des chargements ou lié à l'ignorance de la connaissance précise de l'état d'une structure. Ils sauront en déduire une probabilité d'accident ou de durée de vie d'un ouvrage et poser rationnellement un problème d'optimisation d'une politique de renforcement ou de maintenance. Les débouchés de cette formation pourraient être une thèse dans un laboratoire de recherche ou un poste dans un centre de recherche ou un bureau d'études industriel ou de génie civil prenant en charge l'étude de la durée de vie résiduelle des structures, des renforcements d'ouvrages ou d'optimisation des politiques de maintenance.

5.1 Unités d'enseignements de la thématique

- **12 ECTS Tronc Commun.** Les cours de TC obligatoires pour cette thématique sont :
 - Mécanique de la rupture (3 ECTS, TC)
 - Endommagement (3 ECTS, TC)
 - Fatigue (3 ECTS, TC)
 - Introduction à l'homogénéisation en mécanique des milieux continus (3 ECTS, TC)
- **12 ECTS de spécialisation**
 - Enjeux des accidents nucléaires graves / Séminaire « Enjeux de l'électricité dans les systèmes énergétiques » (3 ECTS, DMS)
 - Physique et exploitation des REP (3 ECTS, DMSE)
 - Identification et suivi en service des structures de génie civil et des grands systèmes (3 ECTS, DMS)
 - Ingénierie des incertitudes en mécanique (3 ECTS, DMS)
- **6 ECTS électifs**
 - Approches multiéchelles de la plasticité des métaux/Durabilité des bétons (3 ECTS, DMS)
 - Modélisation et simulation des équipements des structures : application à l'analyse sismique (3 ECTS, DMS)
 - Autres cours des parcours AMMS, MS et du TC.

Légende : (TC) Cours du Tronc Commun ; (MS) Cours propres à la thématique MS ; (AMMS) Cours propres à la thématique AMMS ; (DMS) Cours propres à la thématique DMS.

5.2 Contacts

Responsables de la thématique DMS

- Alain Ehrlacher
Président du département Génie Mécanique et Matériaux
ENPC 6 et 8 Avenue Blaise Pascal
Cité Descartes
77455 CHAMPS SUR MARNE
Tél : 01.64.15.37.17
Mail : alain.ehrlacher@enpc.fr
- Alice Tran Adjointe administrative ENPC
6 et 8 Avenue Blaise Pascal Cité Descartes
77455 CHAMPS SUR MARNE
Tél : 01.64.15.36.84
Mail : alice.tran@enpc.fr

6 Thématique Modélisation et Simulation (MS)

La Thématique *Modélisation et Simulation* a pour vocation de délivrer une formation approfondie en modélisation et simulation numérique des phénomènes physiques rencontrés dans le domaine de la mécanique des solides. L'étudiant diplômé possèdera une solide maîtrise des concepts de mécanique des milieux continus, une bonne connaissance des grandes classes de matériaux, une formation aux méthodes avancées en mécanique de la rupture et de l'endommagement, des bonnes connaissances sur les méthodes de résolution numérique de problèmes linéaires et non linéaires, ainsi qu'une pratique opérationnelle de la simulation sur ordinateurs.

Parmi les cours de spécialisation, le module *Pratiques de codes de calculs des structures et applications* (obligatoire) a pour but de développer la pratique numérique des concepts et méthodes introduits dans les cours de tronc commun et de former les étudiants à l'utilisation avancée des codes de calculs de structures utilisés en contexte industriel (Abaqus) sur les problèmes de plasticité, homogénéisation, rupture, couplages multiphysiques, calculs non-linéaires. Ce module aura lieu en parallèle des cours de tronc commun. Les autres options de spécialisation sont au choix parmi des sujets spécifiques à la thématique (*composites* ou *stabilité des structures*), un *projet* encadré en groupes sur un sujet industriel ou académique, ou une ouverture vers le *couplage fluides-structures en biomécanique*, mutualisé avec le Master en Mécanique des Fluides et Computational Mechanics de Sorbonne.

6.1 Unités d'enseignements de la thématique

- **12 ECTS de Tronc Commun.**

- Mécanique de la rupture (3 ECTS, TC)
- Comportements non-linéaires des solides (3 ECTS, TC)
- Calcul numérique des solides et structures non-linéaires (3 ECTS, TC)
- Introduction à l'homogénéisation en mécanique des milieux continus (3 ECTS, TC)

- **12 ECTS de spécialisation dont**

- Pratiques de codes de calculs des structures et applications (6 ECTS, MS)
- 6 ECTS avec deux unités de 3 ECTS au choix parmi
 - * Structures composites : conception et optimisation (3 ECTS, MS)
 - * Stabilité des structures (3 ECTS, MS)
 - * Projet en calcul non-linéaire des structures (3 ECTS, MS)
 - * Interaction fluides-structures avec applications à la biomécanique et au bio-inspiration (3 ECTS, MS)

- **6 ECTS électifs**

- Elasticité et résistance des matériaux hétérogènes (AMMS - 3 ECTS)
- Approches multi-échelles de la plasticité des métaux (DMS - 3 ECTS)
- Endommagement (TC - 3 ECTS)
- Fatigue des matériaux et des structures (TC - 3 ECTS)

Légende : (TC) Cours du Tronc Commun; (MS) Cours propres à la thématique MS; (AMMS) Cours propres à la thématique AMMS; (DMS) Cours propres à la thématique DMS.

6.2 Contacts

Secrétariat pédagogique de la thématique MS

Vanessa Teixeira

E-mail : vanessa.teixeira@sorbonne-universite.fr

Responsables de la thématique MS

- Corrado Maurini
Professeur des Universités
Sorbonne Université
Institut Jean Le Rond d'Alembert (UMR 7190)
Tour 55-65, bureau 412 (4ème étage)
4 Place Jussieu, case 162 — 75242 Cedex 05 Paris
Tél : 01 44 27 87 19
Web : <http://www.lmm.jussieu.fr/~corrado>
E-mail : corrado.maurini@sorbonne-universite.fr
- Hélène Dumontet
Professeur des Universités
Sorbonne Université
Institut Jean Le Rond d'Alembert (UMR 7190)
Tour 55-65, bureau 312 (3ème étage)
4 Place Jussieu, case 162 — 75242 Cedex 05 Paris
Tél : 01.44.27.87.00
E-mail : helene.dumontet@sorbonne-universite.fr

7 Catalogue des cours du Tronc Commun

7.1 Introduction à l'homogénéisation en mécanique des milieux continus

Professeur :

Karam Sab, <https://navier.enpc.fr/SAB-Karam>, E-Mail : karam.sab@enpc.fr

Objectifs de l'Unité d'Enseignement : 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 concepts et techniques de base nécessaires pour effectuer, grâce au changement d'échelle, une homogénéisation d'un matériau hétérogène élastique linéaire.

Contenu de l'Unité d'Enseignement :

- Introduction des différentes échelles d'observation dans les solides hétérogènes. Notion de Volume Élémentaire Représentatif (VER).
- Conditions aux limites homogènes en déformation ou en contrainte. Tenseurs d'élasticité et de souplesse du VER.
- Bornes de Voigt et de Reuss. Cas du composite unidirectionnel.
- Méthodes approchées dans le cas de faibles concentrations d'inclusions. Aperçu des méthodes autocoherentes et du modèle de Mori-Tanaka.
- Cas des milieux à structure périodique.

Mots-clés : Homogénéisation. Milieux périodiques. Micromécanique.

Pré-requis : Il est nécessaire de maîtriser la modélisation élastique linéaire des solides déformables

Compétences développées dans l'unité : Pratique de la modélisation en élasticité linéaire. Homogénéisation des matériaux élastiques.

Références bibliographiques :

1. Hashin Z., Analysis of composite materials, a survey. J. Appl. Mech., 50, 481-505 (1983) ;
2. Sanchez-Hubert J., Sanchez-Palencia E., Introduction aux méthodes asymptotiques et à l'homogénéisation, Masson, Paris, 1992 ;
3. Sab K., On the homogenization and simulation of random materials. Eur. J. Mech. A/Solids, 11 (5), 585-607. 1992 ;
4. Nemat-Nasser S., Hori M., Micromechanics : Overall Properties of Heterogeneous Materials, North-Holland, 1993 ;
5. Kozlov S.M., Olenik O., Zhikov V., Homogenization of Differential Operators, Springer Verlag, 1994 ;
6. 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 ;
7. Bornert M., Bretheau T., Gilormini P. (Eds), Homogénéisation en mécanique des matériaux, Hermes, Paris, 2001.

7.2 Mécanique de la rupture fragile

Professeur : Jean-Baptiste Leblond, <http://www.dalembert.upmc.fr/home/leblond>,
E-Mail : jbl[arobas]lmm[dot]jussieu[dot]fr

Objectifs de l'Unité d'Enseignement : Exposer les bases de la théorie de la rupture fragile, telle qu'elle est couramment utilisée dans les laboratoires de recherche et l'industrie de pointe (nucléaire, aéronautique, ...) pour prédire et maîtriser la fissuration des matériaux.

Contenu de l'Unité d'Enseignement : Le cours inclut 2 chapitres sur les connaissances de base et un 3ème un peu plus spécialisé :

- Théorie d'Irwin du K_{Ic} ,
- Théorie énergétique de Griffith,
- Propagation de fissures en mode mixte.

Pré-requis :

- Mécanique des solides niveau Master 1 (niveau d'exigence 100%)
- Bonnes bases de mathématiques pratiques (algèbre et analyse élémentaires, équations différentielles, fonctions d'une variable complexe, calculs). (niveau d'exigence 50%).

Mots clés : Matériaux élastiques, fissuration, singularités de contraintes, critère de propagation, approche énergétique, mode mixte, branchement de fissures

Compétences développées dans l'unité : A l'issue de l'UE, l'étudiant(e) dispose des outils de base de la mécanique de la rupture fragile, exposés de manière exhaustive et détaillée, lui permettant soit de satisfaire aux exigences d'un bureau d'études en mécanique soit d'entreprendre une thèse dans le domaine.

7.3 Comportements non-linéaires des solides

Professeur(s) : Djimedo Kondo, <http://www.dalembert.upmc.fr/home/kondo/>.

E-Mail : djimedo.kondo@sorbonne-universite.fr.

Contenu de l'Unité d'Enseignement :

- Bref rappel des concepts de base de la mécanique des milieux continus, et des divers comportements des matériaux de structure
- Lois de bilan en thermomécanique des milieux continus : bilan de quantité de mouvement, bilan d'énergie et bilan d'entropie. Présentation de l'inégalité de Clausius-Duhem, et des dissipations (intrinsèque et thermique)
- Cadre des matériaux standards généralisés : méthode générale de formulation des lois de comportement ; rôle de l'Inégalité de Clausius-Duhem. Notions de variables d'état, de variables internes, de fonctions d'état et de potentiels thermodynamiques. Equation de la chaleur. Construction et identification des grandes classes de modèle de comportement : rappels des modèles rhéologiques fondamentaux à base de ressort, patin et amortisseur. Cas des matériaux thermoplastiques, des matériaux thermo-viscoélastiques (modèle de Kelvin-Voigt, modèle de Maxwell)
- Elastoplasticité et applications : Formulation de modèles élastoplastiques par-faits. Prise en compte de l'écrouissage (isotrope et/ou cinématique). Calculs thermo-mécaniques et résolution de problèmes simples de structures élastoplastiques.
- Quelques notions sur des lois couplant élasticité et endommagement isotrope
- Comportements Elastoviscoplastiques : Présentation de quelques modèles de comportement dépendant du temps ; effet régularisant de la viscosité.

Références bibliographiques :

1. H. Ziegler, An introduction to thermomechanics, North Holland, 1983
2. P. Germain, Q. S. Nguyen, P. Squat, Continuum Thermodynamics, J. Appl. Mech., ASME 50, 1010-1021, 1983.
3. J. Lemaître, J. L. Chaboche, Mechanics of Solids Materials, Cambridge University Press, 1990
4. G. Maugin, The thermomechanics of plasticity and fracture, Cambridge University Press 1992
5. Q. S. Nguyen, Stability and Nonlinear Solids Mechanics, Wiley, 2000
6. M. Fremond, Non Smooth Thermomechanics, Springer Verlag, 2002,
7. J. Lubliner, Plasticity Theory. Dover Publications Inc., Mineola, New York, 2008.
8. H. Maitournam, Matériaux et Structures inélastiques, Editions de l'Ecole Polytechnique, 2016

7.4 Calcul numérique des solides et structures non linéaires

Professeur(s) :

- Denis Duhamel, <https://www.enpc.fr/denis-duhamel>
- Corrado Maurini, : <http://www.lmm.jussieu.fr/~corrado>

Objectifs de l'Unité d'Enseignement : L'enseignement a pour but de résoudre des problèmes de mécanique des solides non linéaires sur ordinateur en implémentant la méthode des éléments finis et les algorithmes de résolution. Les étudiants seront initiés à l'utilisation des outils modernes de calcul scientifique à haute performance (FEniCS, PETSc) des outils de visualisation (paraview) et de gestion de projet (git).

Contenu de l'Unité d'Enseignement :

- Elasticité linéaire, formulation variationnelle, discrétisation : Rappel sur la résolution d'un problème de mécanique par éléments finis. Prise en main de python et FEniCS, Résolution d'un problème d'élasticité par FEniCS
- Elasticité non linéaire : Elasticité non-linéaire, linéarisation, flambement, stabilité. Résolution d'un problème d'élasticité non linéaire, flambement et post-flambement
- Dynamique non linéaire : Méthodes implicite et explicite. Résolution d'un problème de dynamique non linéaire
- Projet : travail sur un projet en binôme

Pré-requis :

- Mécanique des milieux continus
- Connaissance d'un langage de programmation (idéalement python),
- Cours de base d'éléments finis et méthodes numériques

Compétences développées dans l'unité

- Capacité de développer un code numérique basé sur la méthode des éléments finis pour résoudre un problème d'élasticité linéaire et non-linéaire en statique ou dynamique en utilisant le langage python et la librairie FEniCS
- Elasticité nonlinéaire, méthodes explicites et implicites pour la dynamique des structures, étude numérique de bifurcation et stabilité dans le cadre quasi-statique.
- Introduction aux systèmes de gestion de révision (git), Introduction aux outils de visualisation et maillage, Utilisation des solveurs de systèmes d'équations linéaires et non-linéaires à grande dimension

Références bibliographique :

1. Belytschko T., Liu W. K. and Moran B., Non linear finite elements for continua and structures, 2000, Wiley.
2. Dhatt G., Touzot G. et Lefrancois E., Une présentation de la méthode des éléments finis, 2005, Hermes.
3. Holzapfel G.A., Nonlinear solid mechanics, 2000, Wiley.
4. Scott R., Introduction to Automated Modeling with Fenics, 2018, Computational Modeling Initiative LLC.
5. Langtange, P. and Logg A., Solving PDEs in Python, 2017, Springer.
6. Davide Bigoni Nonlinear Solid Mechanics Bifurcation Theory and Material Instability, 2012, Cambridge University Press.
7. Wriggers, P., Nonlinear finite element method, 2008, Springer.
8. Bonnet M., Frangi A., Rey C., The finite element method in solid mechanics, 2014, McGraw Hill.

7.5 Fatigue

Professeur : Michael PEIGNEY, <https://navier.enpc.fr/PEIGNEY-Michael>,
E-mail : michael.peigney@enpc.fr

Objectifs de l'Unité d'Enseignement : La maîtrise par l'ingénieur des problèmes de conception de structures mécaniques exige de connaître et comprendre tous les modes possibles de défaillance. Ce cours cible les modes de défaillance par fatigue, susceptibles d'intervenir pour les structures soumises à des sollicitations variables en temps. A l'issue de l'Unité d'Enseignement, les étudiants : (i) connaîtront les concepts de base de la fatigue et de l'accumulation de l'endommagement dans les matériaux et les structures sous chargement cycliques et éventuellement aléatoires ; (ii) connaîtront les principaux critères utilisés dans le milieu industriel ; (iii) seront capables d'en déduire la durée de vie d'une structure sous chargement cyclique (iv) sauront expliquer les causes des défaillances constatées en service.

Contenu de l'Unité d'Enseignement :

- *Phénomènes physiques.* Introduction de la problématique à partir d'un cas pratique : essieu-roue-rail. Mise en évidence du phénomène de fatigue. Courbes de Wöhler. Distinction entre fatigue à faible et à grand nombre de cycles. Mécanismes physiques de la fatigue (plasticité, fissuration, distinction entre amorçage et propagation).
- *Chargements cycliques et théorèmes d'adaptation.* Classification des comportements cycliques en élastoplasticité (adaptation, accommodation, rochet). Théorèmes de convergence aux temps longs. Théorèmes d'adaptation (statique et cinématique). Extensions hors de la plasticité parfaite.
- *Critère de fatigue.* Endurance illimitée Critère de fatigue à grand nombre de cycles, en chargement uniaxial (parabole de Gerber, droite de Goodman) et multiaxial (notamment critères de Sine, Crossland, Dang Van).
- *Critère de fatigue.* Endurance limitée. Chargements aléatoires Lois d'endurance limitée. Durée de vie en fatigue à faible nombre de cycles (loi de Manson-Coffin, critère énergétique). Règles de cumul de Miner. Méthode Contrainte-Résistance. Comptage de type rainflow.

Pré-requis : Mécanique de milieux continus. Des notions de plasticité sont souhaitables.

Compétences développées dans l'unité : Compréhension du comportement de structures élasto-plastiques sous chargement cycliques et des modes de défaillance associés, Dimensionnement de structures à la fatigue.

Références bibliographiques :

1. Constantinescu, A., K. Dang Van, and M. H. Maitournam. "A unified approach for high and low cycle fatigue based on shakedown concepts." *Fatigue & fracture of engineering materials & structures* 26.6 (2003) : 561-568.
2. Bertolino, G., et al. "A multiscale approach of fatigue and shakedown for notched structures." *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 48.2 (2007) : 140-151.
3. Peigney, Michael. "Shakedown theorems and asymptotic behaviour of solids in non-smooth mechanics." *European Journal of Mechanics-A/Solids* 29.5 (2010) : 784-793.
4. Peigney, Michael. "Shakedown of elastic-perfectly plastic materials with temperature-dependent elastic moduli." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 71 (2014) : 112-131.
5. Papadopoulos, Ioannis V., et al. "A comparative study of multiaxial high-cycle fatigue criteria for metals." *International Journal of Fatigue* 19.3 (1997) : 219-235.
6. Papadopoulos, Ioannis V. (editor) *Multiaxial fatigue limit criterion of metals*. Springer Vienna, 1999.

7.6 Endommagement

Professeurs :

- Hélène Dumontet, <http://www.dalembert.upmc.fr/home/dumontet>,
E-mail : helene.dumontet@sorbonne-universite.fr
- Jérémy Bleyer, <https://navier.enpc.fr/BLEYER-Jeremy>,
E-mail : jeremy.bleyer@enpc.fr

Objectifs de l'Unité d'Enseignement

Les objectifs de cet enseignement sont :

- de fournir les bases théoriques de la mécanique de l'endommagement des matériaux quasi-fragiles, en particulier concernant la formulation de lois de comportements macroscopiques couplant élasticité et endommagement.
- d'étudier la problématique de l'initiation et de l'évolution de l'endommagement dans un cadre numérique afin d'aborder le caractère mal-posé des modèles d'endommagement locaux puis de proposer une ouverture vers plusieurs techniques de régularisation et les liens vers les modèles de rupture fragile.

Contenu de l'Unité d'Enseignement

Après une brève introduction sur l'origine microscopique de l'endommagement comme processus faisant évoluer les propriétés macroscopiques des matériaux, les séances de ce cours seront dédiées à :

- la formulation de la loi de comportement élastique-endommageable dans le cadre des processus thermodynamiques irréversibles (matériaux standards généralisés)
- l'introduction de la notion de critère d'endommagement (surface seuil), de force thermodynamique associée (taux de restitution d'énergie) et de loi d'évolution de l'endommagement
- l'implémentation simple d'un modèle d'endommagement isotrope dans un code de calcul aux éléments finis (FEniCS)
- l'étude du caractère mal-posé des modèles d'endommagement locaux (dépendance au maillage) et une présentation de différentes techniques de régularisation (modèles non-locaux)
- une mise en oeuvre numérique de modèles à gradient d'endommagement (phase-field) pour la simulation de propagation de fissure dans les matériaux fragiles

Pré-requis : Mécanique des milieux continus (comportement élastique), thermodynamique, calcul numérique (méthode des éléments finis)

Compétences développées dans l'unité Modélisation de l'endommagement, calcul de structures endommagées, propagation de fissure.

Références bibliographiques :

1. Lemaitre, J., Chaboche, J. L., Benallal, A., & Desmorat, R. (2009). Mécanique des matériaux solides-3eme édition. Dunod.
2. Pijaudier-Cabot G., Mazars J. (2001). Damage models for concrete. in Handbook of Materials Behavior. Vol. II, Lemaitre J. (ed.), Academic Press
3. Marigo, J. J., Maurini, C., & Pham, K. (2016). An overview of the modelling of fracture by gradient damage models. *Meccanica*, 51(12), 3107-3128.