

M2 Science des Matériaux pour le Développement Durable

Cours dispensés au premier semestre

Rhéophysique et matière molle

- P. COUSSOT (Professeur École des Ponts ParisTech)

- Obligatoire, 18 heures de cours : 12 CM + 6 TD, validation sur examen final.

Dans leur jeune âge, les matériaux à base de ciment ou de plâtre se présentent sous la forme de pâtes visqueuses aux propriétés complexes. La facilitation de leur mise en place en toutes conditions, mais aussi la diminution des nuisances environnementales et la qualité de la structure finale, exigent la maîtrise la plus avancée de leur comportement d'un point de vue physique et mécanique. Les connaissances et les méthodes proposées dans le cadre de ce cours trouvent de nombreuses applications dans la formulation, la mise en forme ou l'utilisation d'un grand nombre de matériaux des industries du génie civil, de l'agro-alimentaire, des cosmétiques, ou encore dans la modélisation des écoulements naturels (avalanches, coulées de boue, laves).

- Introduction aux lois de comportement des matériaux (approche macroscopique)
 - Rappels de mécanique des milieux continus
 - Origine des lois de comportement et principes de formulation
 - Bases de rhéométrie
 - Composantes essentielles du comportement
 - Principaux types de comportement
 - Problèmes expérimentaux : glissement, localisation
- Etats de la matière, physico-chimie, et rhéophysique des principaux types de matériaux
 - Solide cristallin
 - Liquide simple
 - Suspensions
 - Polymères
 - Colloïdes
 - Emulsions-mousses

Philippe Coussot : IGPEF IFSTTAR, Professeur École des Ponts ParisTech, HDR, Responsable de l'équipe « Physique des matériaux Poreux » du laboratoire Navier.

Fluides complexes

- X. CHATEAU (Directeur de Recherche CNRS)

- Obligatoire, 18 heures de cours : 12 CM + 6 TD, validation sur examen final.

Dans ce cours, on s'attache à construire le lien entre les propriétés des constituants d'une pâte et sa loi de comportement rhéologique. On s'intéresse également à la caractérisation expérimentale et à la modélisation du comportement des fluides complexes.

- Origine microscopique de la loi de comportement de suspensions

- Solution de Jeffery-Eshelby, estimations d'Einstein et de Farris
- Application aux suspensions de particules, bulles et gouttes
- Ecoulements de suspensions
 - Rhéométrie de Couette : fluides newtoniens et fluides à seuil
 - Ecoulements de suspensions concentrées : caractérisation expérimentale, migration, localisation.
- Thixotropie
 - Description phénoménologique, caractérisation expérimentale et modélisation macroscopique

Xavier Chateau : DR CNRS, Professeur École des Ponts ParisTech, HDR, Responsable de l'équipe « Rhéophysique » du laboratoire Navier.

Physico-chimie des matériaux de construction

- S. GAUFFINET (Professeur Université de Bourgogne)

- A. NONAT (Directeur de Recherche CNRS)

- **Obligatoire, 18 heures de cours : 12 CM + 6 TD, validation sur examen final.**

Le cours vise à donner les éléments nécessaires à la compréhension des mécanismes physicochimiques gouvernant la formation de la microstructure et la durabilité des matériaux cimentaires

- Chimie des matériaux de construction et environnement
 - Elaboration et impact environnemental
- Physico chimie de l'hydratation
 - Thermodynamique de dissolution et précipitation
 - Cinétique de dissolution et précipitation
 - Hydratation des phases constituant les liants de construction
 - Hydratation des ciments
 - Méthodes d'investigations de l'hydratation
 - Facteurs physico chimiques influençant l'hydratation : température, ajouts minéraux, adjuvant
- Caractéristiques physico chimiques des hydrates
 - Propriétés physiques, structure, morphologie, propriétés de surface
- Physico chimie de la prise
 - Interactions particulières
 - Coagulation et chemins de percolation
 - Remplissage de l'espace inter granulaire
- Physico chimie de la durabilité
 - Les dégradations d'origine interne
 - Les dégradations d'origine externe

Sandrine Gauffinet ; Professeur Université de Bourgogne

Poromécanique

- P. DANGLA (Maître de conférence École des Ponts ParisTech)

- Obligatoire, 18 heures de cours : 12 CM + 6 TD, validation sur examen final.

Une large gamme de matériaux pertinents pour les problématiques de la Géomécanique et du Génie Civil (roches, sols, bois, matériaux cimentaires,...) sont poreux: leur comportement mécanique est significativement affecté par la présence d'un ou plusieurs fluides dans leurs pores. De tels matériaux sont le siège de phénomènes couplés (thermo-, hydro-, ou chemo-mécaniques) et d'origine multi-physique: par exemple le séchage, la cristallisation en milieu confiné,... Les cours « Poromécanique » et « Physique des Solides Poreux » se complètent et proposent une approche unifiée des milieux poreux et des phénomènes se déroulant dans ces milieux.

L'objet de ce cours est de présenter et d'illustrer les concepts de base de la poromécanique et de la poroélasticité des matériaux saturés.

- Déformations, porosité, lois de conservation, loi de Darcy
- Contraintes, thermodynamique, lois d'état
- Poroélasticité linéaire et non-linéaire
- Poroplasticité
- Applications, exemples.

Patrick Dangla : IDTPE IFSTTAR, MdC École des Ponts ParisTech, HdR, chercheur équipe « Physique des matériaux Poreux » du laboratoire Navier.

Physique des solides poreux

- M. VANDAMME (Chercheur École des Ponts ParisTech)

- Obligatoire, 18 heures de cours : 9 CM + 9 TD, validation sur examen final et analyse d'articles.

Une large gamme de matériaux pertinents pour les problématiques de la Géomécanique et du Génie Civil (roches, sols, bois, matériaux cimentaires,...) sont poreux: leur comportement mécanique est significativement affecté par la présence d'un ou plusieurs fluides dans leurs pores. De tels matériaux sont le siège de phénomènes couplés (thermo-, hydro-, ou chemo-mécaniques) et d'origine multi-physique: par exemple le séchage, la cristallisation en milieu confiné,... Les cours « Poromécanique » et « Physique des Solides Poreux » se complètent et proposent une approche unifiée des milieux poreux et des phénomènes se déroulant dans ces milieux.

L'objet de ce cours est de présenter et d'illustrer les concepts de base de la physique des milieux poreux.

- Thermodynamique des mélanges
- Capillarité et énergie de surface
- Poroélasticité non-saturée
- Transitions de phases
- Transitions de phases dans les solides poreux (cristallisation en milieu confiné, séchage).

Matthieu Vandamme : ICFEF École des Ponts ParisTech, chercheur équipe « Modélisation et expérimentation multi-échelle pour les solides hétérogènes » du laboratoire Navier.

Simulation moléculaire

- A. LEMAITRE (Maître de Conférence École des Ponts ParisTech)

- Obligatoire, 18 heures de cours : 12 CM + 6 TD, validation sur examen final.

L'objectif de ce cours est d'aborder les modèles, les méthodes, et les algorithmes les plus utilisés en simulation de dynamique moléculaire. Pour commencer, nous couvrirons en détails les méthodes de physique statistique et les outils mathématiques les plus fréquemment rencontrés dans ces simulations. Puis nous étudierons pas à pas comment une démarche de changement d'échelle est mise en œuvre: c'est à dire comment partant d'un modèle numérique (basé sur ce que l'on suppose être les interactions pertinentes entre constituants élémentaires) on traite des données de simulation, pour inférer des comportements macroscopiques aussi bien à l'équilibre (équation d'état, coefficients thermodynamiques) que hors équilibre (coefficients de transport, réponse mécanique).

Mots clés : physique statistique, modélisation, méthodes numériques, rhéologie

- Thermodynamique et physique statistique: micro- et macro-états; systèmes à l'équilibre et hors-équilibre; ensembles; réponse linéaire; théorème de fluctuation-réponse.
- Méthodes numériques: méthode de Monte-Carlo; algorithmes d'intégration (Verlet, velocity Verlet, leap-frog, Runge-Kutta,...); méthodes d'optimisation.
- Outils d'analyse à l'échelle microscopique: fonction de corrélation de paire; facteur structure statique et dynamique.
- Méthodes de changement d'échelle: identification des échelles de temps et d'espace pertinentes; analyse ergodique; analyse d'erreur et études de taille finie.
- Illustration: réponse mécanique des systèmes discrets.

Anaël Lemâitre : ICPEF École des Ponts ParisTech, MDC École des Ponts ParisTech, HDR, chercheur de l'équipe « Rhéophysique » du laboratoire Navier.

Introduction à l'homogénéisation en mécanique des milieux continus

- K. SAB (Professeur École des Ponts ParisTech)

- Obligatoire, 18 heures de cours : 12 CM + 6 TD, validation sur examen final.

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 ou des encadrements rigoureux du comportement du matériau à partir du comportement de ses constituants, de leurs fractions volumiques et d'une description de leur morphologie microstructurale. L'objet de ce cours est d'introduire les étudiants aux techniques de changement d'échelle.

Méthodes de changement d'échelle et techniques d'homogénéisation.

- 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. Bornes de Hashin-Shtrikman. Cas du composite unidirectionnel
- Méthodes approchées dans le cas de faibles concentrations d'inclusions. Aperçu des méthodes auto-cohérentes
- Cas des milieux à structure périodique.

Karam Sab : DR IFSTTAR, Professeur École des Ponts ParisTech, HDR, Directeur du laboratoire Navier.

Construction durable

- Mathieu RIVALLAIN (IPEF CSTB)

- Obligatoire, 27 heures de cours : 21 CM + 6 TD, validation sur examen final.

Le secteur de la construction représente, dans le monde, environ 40% des émissions de gaz à effet de serre, 40% de la consommation d'énergie finale, 40% de l'épuisement des ressources naturelles et près de 40% des volumes de déchets générés. Face à l'urgence des réponses à apporter, face à une prise de conscience et aux demandes croissantes de l'opinion publique et du milieu professionnel, face aux évolutions prévisibles des normes et réglementations, les ingénieurs et chercheurs d'aujourd'hui et de demain doivent être formés à la prise en compte du développement durable dans leurs travaux de recherche, et plus généralement dans leurs projets professionnels.

Ce cours se donne pour objectifs :

- d'éclairer les problématiques environnementales, économiques et sociétales liées au secteur de la construction et à la production des matériaux, en particulier ;
- de donner les moyens d'évaluer le bilan environnemental de projets, sur leur cycle de vie, que ce soit à l'échelle des matériaux, systèmes, technologies de construction ou du bâtiment en entier ;
- de présenter quelques voies d'amélioration et les certifications existantes à l'échelle du bâtiment, du quartier ou de la ville.

Après une introduction aux enjeux du développement durable, une part significative du cours sera dédiée à l'acquisition de la méthodologie d'analyse de cycle de vie, pour l'évaluation du bilan environnemental des produits, systèmes ou services sur leur cycle de vie. L'architecture bioclimatique et les principes de l'urbanisme durable seront présentés pour éclairer les voies de progrès.

- Introduction et enjeux du développement durable ;
- Analyse de cycle de vie (méthodologie et pratique) ;
- Bâtiment durable et architecture bioclimatique ;
- Vers un urbanisme durable ;
- Enjeux du développement durable pour le secteur des matériaux de construction (exemple du béton)
- Visites et interventions de professionnels du secteur.

Matthieu Rivallain : IPEF CSTB,

Fluides et matériaux granulaires : mélange et rhéologie

- F. CHEVOIR (Professeur École des Ponts ParisTech)

- P. JOP (Chargé de Recherche CNRS)

- **Obligatoire, 18 heures de cours : 12 CM + 6 TD, validation sur examen écrit et présentation d'un article**

L'objectif de ce cours est d'introduire les concepts et les mécanismes physiques permettant de décrire l'évolution de matériaux modèles (fluides et granulaires) lors des phases de préparation et d'étudier l'effet du mélange sur les propriétés finales du matériau (homogénéité, microstructure, ségrégation...).

- ≡ Applications industrielles et géophysiques du mélange
- ≡ Mécanismes de base du mélange : cisaillement et étirement, diffusion et ségrégation
- ≡ Mélange dans les fluides : mélange chaotique et turbulent. Mesures de la qualité du mélange. Vitesse d'homogénéisation. Réacteurs fermés et systèmes ouverts. Rhéologie et mélange
- ≡ Rhéologie des matériaux granulaires secs : Influence du dispositif d'écoulement (surface libre, confinement, parois). Polydispersité et ségrégation
- ≡ Mélanges grains/fluides : Imprégnation. Evolution de la rhéologie

François Chevoir : IGPEF IFSTTAR, Professeur École des Ponts ParisTech, HDR, Directeur adjoint du Laboratoire Navier.

Pierre Jop : CR CNRS, chercheur laboratoire SVI CNRS/Saint-Gobain Recherche..

Résonance magnétique nucléaire pour la science des matériaux

- S. RODTS (Maître de Conférence École des Ponts ParisTech)

- **Obligatoire, 18 heures de cours : 12 CM + 6 TD, validation sur examen final.**

Très connue pour ses applications en chimie analytique et en imagerie médicale (IRM), la Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) se décline en différentes techniques qui permettent d'observer la structure et la dynamique de systèmes physiques à toutes échelles de longueur. Elle fait partie des méthodes d'analyse non-destructives aujourd'hui de plus en plus utilisées en science des matériaux, tant en laboratoire que sur le terrain grâce aux dernières avancées en matière de RMN portable.

Ce cours introduit les notions physiques essentielles de RMN, les diverses architectures matérielles existantes, ainsi que les grandes familles d'analyse pouvant être menées, en exposant leurs cadres d'interprétation et leurs limites. Il met en avant les applications aux domaines du génie des procédés et des matériaux de construction.

- Principes physiques de Résonance magnétique nucléaire – séquençage
- Architecture matérielle – RMN de laboratoire, dispositifs portables
- Les grandes familles de mesure : Spectroscopie, Relaxométrie, Diffusométrie/Vélocimétrie, Imagerie, combinaisons de techniques et RMN multi-dimensionnelle
- RMN sous sollicitations extérieures (mécaniques, hydriques, thermiques)
- Applications : Analyse physico-chimique, prise des liants hydrauliques, caractérisation des milieux poreux et micro-structurés, transport et migration de fluides et d'espèces chimiques dans les matériaux, écoulements fluides et granulaires, ...

Stéphane Rodts : ICPEF IFSTTAR, chercheur de l'équipe « physique des matériaux poreux » du laboratoire Navier

Imagerie des milieux désordonnés

- M. BORNERT (ICPEF École des Ponts ParisTech)

- S. BRISARD (ICPEF IFSTTAR)

- **Obligatoire, 18 heures de cours : 12 CM + 6 TD, validation sur examen final.**

La modélisation (par exemple dans une perspective d'homogénéisation) des matériaux hétérogènes nécessite d'avoir une bonne connaissance de leur microstructure, tant du point de vue qualitatif (le matériau est-il de type polycristallin, composite à matrice ? ...) que quantitatif (quelles sont les fractions volumiques des divers constituants, les longueurs de corrélations ? ...).

L'objet de ce cours est de montrer que les techniques modernes d'imagerie permettent d'apporter des éléments de réponses à toutes ces questions. Après une introduction générale sur la modélisation des milieux désordonnés et quelques principes généraux d'imagerie, nous présenterons de façon plus détaillée diverses techniques d'imagerie : microscopie optique, microscopie électronique (à balayage, en transmission), tomographie. Nous aborderons également les techniques de diffusion et diffraction de rayonnement X, qui peuvent être vues comme de l'imagerie « dans l'espace réciproque ».

En outre, considérant qu'une image constitue une véritable mesure, de laquelle il est possible d'extraire une information quantitative, nous aborderons les techniques d'analyse d'images. Le logiciel libre ImageJ, couramment employé dans la communauté scientifique, est utilisé pour mettre en œuvre les notions introduites sur des images illustrant des situations concrètes.

Le cours est constitué essentiellement d'exposés théoriques. Une visite de la plate forme de tomographie de la Fédération Francilienne de Mécanique est prévue. Un TD d'analyse d'images aura lieu sur machines. Le cours est sanctionné par un mini-projet d'analyse d'images et un examen final.

Michel Bornert : ICPEF de l'École des Ponts ParisTech, Professeur École Polytechnique, Responsable de l'équipe « Modélisation et expérimentation multi-échelle pour les solides hétérogènes » du Laboratoire Navier.

Sébastien Brisard : ICPEF IFSTTAR, chercheur de l'équipe « Modélisation et expérimentation multi-échelle pour les solides hétérogènes » du laboratoire Navier.

Séminaire et visites

- X. CHATEAU (Professeur École des Ponts ParisTech).

- Doctorants laboratoire Navier

- **Obligatoire, 6 heures de conférences + 2 demi journées de visite.**

Les étudiants en thèse au laboratoire Navier dans les thématiques proches de celles du parcours SMCD présentent l'avancement de leurs travaux de recherche au cours d'un séminaire regroupant les chercheurs et doctorants du laboratoire ainsi que les étudiants de SMCD.

Par ailleurs des visites de laboratoires industriels et académiques sont organisées.

Introduction à la bibliographie

- F. RIVIERE (Documentaliste École des Ponts ParisTech).
 - Obligatoire, 2 heures de TP.
-