

Master recherche

Spécialité

SCIENCE DES MATERIAUX POUR LA CONSTRUCTION DURABLE (SMCD)

2006-2007

**ECOLE DES PONTS
ECOLE POLYTECHNIQUE
CHAIRE d'enseignement et de recherche LAFARGE**



Le Master SMCD présente les outils les plus avancés d'analyse des matériaux semi-ordonnés (matériaux à base de ciment, polymères...), en vue de l'optimisation des propriétés d'usage et de la durabilité des matériaux de construction. Le Master SMCD offre une formation interdisciplinaire alliant les apports de la physique, de la chimie, de la mécanique et de la modélisation numérique. Il ouvre aux métiers de l'innovation et de la recherche dans un cadre international, en liaison étroite avec le centre de recherche de la Société Lafarge.

Mots clés : matériaux de construction, rhéophysique et matière molle, simulation numérique, développement durable, programme interdisciplinaire, résonance magnétique nucléaire.

« Material Science for Sustainable Construction » master program explores the properties of semi-ordered materials (cement based materials, polymers...). The target is to improve the functional properties and the sustainability of civil engineering materials in natural environments. MSSC master offers an outstanding interdisciplinary educational program combining the latest advances in physical chemistry, mechanics and numerical simulation. It trains students to hold responsibility research positions in the industry and at the university.

Key words : building materials, rheophysics and soft matters, numerical simulation, sustainable development, interdisciplinary program, Nuclear Magnetic Resonance.

1. Introduction : SMCD, pour qui ?

SMCD est une formation organisée par l'Ecole des Ponts et par l'Ecole Polytechnique, avec le soutien de la Société LAFARGE (Chaire d'Enseignement et de Recherche). La formation SMCD s'inscrit comme année de spécialisation recherche dans un cycle Master de deux ans. Elle présente l'originalité de proposer une approche interdisciplinaire des matériaux de construction.

SMCD recrute parmi les ingénieurs, français et étrangers, disposant de connaissances scientifiques solides en mathématiques et sciences physiques, attirés par les outils et méthodes de la recherche, et attirés tant par l'innovation industrielle dans le domaine de la construction durable, que par les carrières académiques.

Responsable de la spécialité :

Nom :	Olivier COUSSY
Qualité :	Directeur de Recherche au LCPC
Tél. :	01 64 15 36 22
Fax :	01 64 15 37 41
Courriel :	Olivier.Coussy@mail.enpc.fr
Discipline principale enseignée :	mécanique

2. Caractéristiques de la formation

2.1. Objectifs

2.1.1 Axes prioritaires de la formation

Ces deux dernières décennies ont vu une révolution dans le domaine des matériaux de construction sous de nombreux aspects. L'un des faits les plus marquants est sans doute l'apparition de matériaux à base cimentaire aux performances devenant comparables à celles de l'acier. Ces performances n'ont pu être obtenues que par la mise en œuvre progressive d'une approche scientifique de plus en plus exigeante, alliant physico-chimie, mécanique et outils avancés d'observation et de simulation numérique. Le principal objectif de la Spécialité « Sciences des Matériaux pour la Construction Durable » vise à donner les bases scientifiques nécessaires à l'approche interdisciplinaire, multi-échelle, multi-physique et expérimentale des matériaux de construction du Génie civil, à l'optimisation de leur mise en œuvre, de leurs propriétés d'usage et de leur durabilité en conditions environnementales. Le partenariat entre l'Ecole des Ponts et l'Ecole Polytechnique dans le cadre de la chaire d'enseignement et de recherche Lafarge offre l'opportunité de réunir des enseignants de l'ensemble des disciplines concernées et dont les recherches portent en particulier sur les matériaux de construction.

Pendant la spécialité SMCD, l'objectif prioritaire est de permettre aux étudiants d'acquérir une formation théorique et expérimentale de haut niveau en Sciences des Matériaux dans les domaines suivants :

- Physico-mécanique et physico-chimie des milieux poreux et des matériaux de construction,
- Rhéophysique des fluides complexes
- Approches multi-échelles
- Outils physiques et expérimentaux de l'analyse des milieux semi ordonnés,

en tenant compte des préoccupations actuelles des industriels, de la mutation de l'approche scientifique des matériaux de construction et des problématiques posées par les enjeux de la construction durable dans le long terme.

Compétences visées

Les compétences générales visées par la formation sont :

- l'acquisition approfondie des bases théoriques des couplages physico-mécaniques identifiés dans les matériaux de construction,
- la chimie de l'élaboration des matériaux à base cimentaire,
- l'approche multi-échelle (dynamique moléculaire et homogénéisation) des propriétés macroscopiques des matériaux,
- la maîtrise des modélisations qui en découlent permettant d'aborder les problématiques de la recherche,
- les outils théoriques et expérimentaux d'analyse des milieux semi ordonnés.

L'ensemble des matières dispensées vise ainsi à donner une formation interdisciplinaire de la Science des Matériaux de construction en tant que domaine émergent.

2.2. Flux et niveau attendus

Effectifs attendus : De l'ordre de 15 à 20 constitués principalement d'élèves ingénieurs de l'Ecole des Ponts, en particulier des " X-Ponts " et des étudiants, français ou étrangers, recrutés en M2 par l'Ecole des Ponts, avec un niveau équivalent à un diplôme d'ingénieur en génie civil.

2.3. Débouchés attendus pour les étudiants

La spécialité 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.

La spécialité débouche aussi bien sur une insertion professionnelle immédiate que sur les études Doctorales. Les domaines qui sont particulièrement concernés sont :

- l'industrie cimentière,
- les constructions et les ouvrages du Génie Civil,
- l'élaboration de matériaux innovants,
- les outils de l'investigation physique des matériaux.

2.4. Environnement Recherche

L'environnement recherche de la spécialité est principalement constitué des unités de recherche de la Fédération de Recherche du Ministère (FED 10) " Institut Navier "

2.4.1. Laboratoires labellisés (appartenant à la FED 10 Institut Navier)

- Laboratoire des Matériaux et des Structures du Génie Civil (LMSGC)(UMR 113 CNRS, LCPC, ENPC).
- Laboratoire d'Analyse des Matériaux et Identification (LAMI) (ENPC, LCPC).

2.4.2. Autres formes d'environnement recherche

Chaire d'Enseignement et de Recherche Lafarge " Ecole Polytechnique - Ecole Nationale des Ponts et Chaussées ". Division Bétons et Composites Cimentaires et Service Physico-chimie des Matériaux (LCPC)

3. Mise en œuvre de la formation

3.1. Liste des enseignants

Nota : Cette spécialité se faisant en liaison avec l'Ecole Polytechnique, la liste d'enseignants fait intervenir des enseignants et des laboratoires qui ne sont pas liés au site mais avec lesquels la spécialité permettra des collaborations.

Nom	Olivier COUSSY
Statut	DR LCPC
Equipe de recherche	Laboratoire des Matériaux et des Structures du Génie Civil (ENPC-LCPC) – UMR CNRS 113
Réf. 1/	O. Coussy, Poromechanics of freezing materials, <i>Journal of the Mechanics and Physics of Solids</i> , Vol 53/8, 1689-1718 (2005)
Réf. 2/	O. Coussy, T. Fen-Chong, Crystallization, pore relaxation and cryosuction, <i>Comptes-rendus de l'Académie des Sciences de Paris</i> , Vol 333/6 pp 507-512 (2005)
Réf. 3/	O. Coussy, <i>Poromechanics</i> , John Wiley & Sons (2004)

Nom	Philippe COUSSOT
Statut	DR LCPC - Ingénieur en Chef du CEMAGREF
Equipe de recherche	Laboratoire des Matériaux et des Structures du Génie Civil (ENPC-LCPC) – UMR CNRS 113
Réf. 1/	P. Coussot, <i>Rheometry of pastes, suspensions and granular materials</i> (Wiley, New York, 2005)
Réf. 2/	P. Coussot, J.S. Raynaud, F. Bertrand, P. Moucheront, J.P. Guilbaud, H.T. Huynh, S. Jarny, S., and D. Lesueur, Coexistence of liquid and solid phases in flowing soft-glassy materials. <i>Physical Review Letters</i> , 88, 218301 (2002)
Réf. 3/	P. Coussot, et C. Ancey, <i>Rhéophysique des pâtes et des suspensions</i> (EDP Sciences, Paris, 1999)

Nom	Denis DAMIDOT
Statut	PR Ecole des Mines de Douai
Equipe de recherche	Département de Génie Civil, Mines de Douai
Réf. 1/	D. Damidot, S.J. Barnett, D. Macphee, F.P. Glasser, Investigation of the CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -CaSO ₄ -CaCO ₃ -H ₂ O system at 25°C by thermodynamic calculation, <i>Advances in Cement Research</i> , vol 16, N°2, pp 69-76, (2004)
Réf. 2/	E. Gartner, J.F. Young, D. Damidot et I. Jawed 'Hydratation of Portland Cement' Chapitre VI du livre <i>Structure and Performance of Cements</i> , édité par P. Barnes, Deuxième édition, pp57-113 (2001)
Réf. 3/	D. Damidot, A. Nonat and P. Barret "Kinetics of tricalcium silicate hydration in diluted suspensions by microcalorimetric measurements", <i>Jour. Amer. Ceram. Soc.</i> ,73[11],3319-22,(1990)

Nom	Luc DORMIEUX
Statut	PR ENPC
Equipe de recherche	Laboratoire des Matériaux et des Structures du Génie Civil (ENPC-LCPC) – UMR CNRS 113
Réf. 1/	L. Dormieux, E. Lemarchand, D. Kondo and E. Fairbairn, Elements of poromicromechanics applied to concrete, <i>Concrete Sc. Eng. Mater. Struct.</i> 265:31-42, (2004)
Réf. 2/	J.F. Barthelemy and L. Dormieux, A micromechanical approach to the strength criterion of Drucker-Prager materials reinforced by rigid inclusions, <i>Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.</i> , 28:565-582 (2004)
Réf. 3/	L. Dormieux, A. Molinari and D. Kondo, Micromechanical approach to the behavior of poroelastic materials, <i>J. Mech. Phys. Solids</i> , 50:2203-2231, (2002)

Nom	Jean-Pierre KORB
Statut	DR Ecole Polytechnique
Equipe de recherche	Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (Ecole Polytechnique) - UMR 7643 CNRS
Réf. 1/	A. Plassais, M.P. Pomies, N. Lequeux, J.-P. Korb, D. Petit, F. Barberon, Microstructure evolution of hydrated cement pastes, <i>Phys Rev E</i> (sous presse)
Réf. 2/	P.J. McDonald, J.-P. Korb, J. Mitchell, L. Monteilhet, Surface and chemical exchange in hydrating cement pastes: a 2D NMR relaxation study, <i>Phys. Rev. E</i> 72, 011409 (2005)
Réf. 3/	F. Barberon, J.-P. Korb, D. Petit, V. Morin, E. Bermejo, Probing the surface area of a cement-based material by nuclear magnetic relaxation dispersion, <i>Phys. Rev. Letters</i> 90, 116103 (2003)

Nom	Claude LE BRIS
Statut	PR ENPC
Equipe de recherche	Centre d'Enseignement et de Recherche en Mathématiques, Informatique et Calcul Scientifique (ENPC)
Réf. 1/	C. Le Bris, <i>Systèmes multi-échelles. Modélisation et simulation</i> . Collection: Mathématiques et Applications, Vol. 47, XII, 214 p. 35 illus., Broché (2005)
Réf. 2/	C. Le Bris, Computational chemistry from the perspective of numerical analysis, <i>Acta Numerica</i> , Volume 14, pp 363-444, May (2005)
Réf. 3/	C. Le Bris (éd.), Handbook of numerical analysis. Vol. X. Special volume: computational chemistry. North-Holland, Amsterdam, (2003)

Nom	Pierre LEVITZ
Statut	DR Ecole Polytechnique
Equipe de recherche	Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (E. Polytechnique) – UMR 7643 CNRS
Réf. 1/	P Levitz (avec L Pothuaud, B. Rietbergen, L. Mosekilde, O. Beuf, C. Benhamou, S. Majumdar al.), Combination of topological parameters and bone volume fraction better predicts the mechanical properties of trabecular bone, <i>Journal of Biomechanics</i> (2003)
Réf. 2/	P. Levitz, Statistical modeling of pore network. Chap 2 in <i>Handbook of Porous Media</i> , édité par K. Sing, Wiley-VCH (2002)
Réf. 3/	P. Levitz (avec S. Rodts), Time domain analysis: an alternative way to interpret PGSE experiment. <i>Magnetic Resonance Imaging</i> , 19, 465-467 (2001)

Nom	David QUERE
Statut	DR CNRS - Chargé de Cours Ecole Polytechnique
Equipe de recherche	Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, URA 792 du CNRS, Collège de France,
Réf. 1/	P. Aussillous and D. Quéré, Liquid marbles, Nature 411, 924-927 (2001)
Réf. 2/	D. Quéré, Fluid coating on a fiber, Annual Review of Fluid Mechanics, 31, 347-384 (1999)
Réf. 3/	J. Bico, C. Marzolin and D. Quéré, Pearl drops, Europhysics Letters, 47, 220-226 (1999)

3.2. Organisation générale de la spécialité

3.2.1. Organisation des Semestres

L'année de spécialité recherche SMCD se compose de deux semestres. Ils sont appelés semestres 3 et 4 car ils font suite à la première année de Master de mécanique et génie civil de l'Université de Marne-la-Vallée et de l'Ecole des Ponts.

Le **Semestre 3** est constitué de 30 ECTS de cours.

Le **Semestre 4** est constitué d'un stage de 4 à 6 mois en laboratoire de recherche ou dans un secteur Recherche et Développement d'une entreprise, valant pour 30 ECTS, faisant l'objet d'un mémoire de stage donnant lieu à une soutenance orale devant un Jury d'examen fin Juin.

3.2.2. Condition d'admission en Semestre 3

Un étudiant ayant effectué la première année de Master, dite M1 (semestres 1 et 2) : Un étudiant ayant validé les Semestres 1 et 2 est admis de plein droit en Semestre 3 dans une des spécialités du Master, parmi lesquelles SMCD.

Les étudiants n'ayant pas effectué les semestres 1 et 2, par exemple les élèves ingénieurs de l'Ecole des Ponts, sont recrutés directement en M2 par l'Ecole des Ponts et par l'Université de Marne-la-Vallée avec une équivalence de 60 ECTS.

3.4. Contrôle des connaissances

Les modalités particulières de contrôle des connaissances qui complètent les dispositions générales de l'Université de Marne-la-Vallée sont les suivantes :

Coefficients

Pour le calcul d'une moyenne, le coefficient qui s'applique à une Unité d'Enseignement est le nombre d'ECTS de cette Unité d'Enseignement. Un stage ou un projet est considéré comme une Unité d'Enseignement et son coefficient est donc le nombre d'ECTS qui lui est attribué.

Lorsque l'évaluation d'une Unité d'Enseignement se présente sous forme d'un ou plusieurs examens partiels puis d'un examen final, les poids respectifs sont définis par l'enseignant responsable de l'Unité d'Enseignement et communiqués aux étudiants au maximum un mois après le début de l'enseignement .

Validation d'une Unité d'Enseignement

Le contrôle des connaissances d'une Unité d'Enseignement se fait par un examen écrit dans les 15 jours suivant le dernier cours de l'Unité d'Enseignement.

Une Unité d'Enseignement est validée et est définitivement acquise lorsque l'étudiant a obtenu au moins la moyenne 10/20.

Toute note inférieure à 10/20 dans une Unité d'Enseignement peut donner lieu, à la demande de l'étudiant, à un rattrapage dans le mois qui suit l'affichage du résultat et la forme du rattrapage est à discrétion du professeur de l'Unité d'Enseignement concernée.

Une Unité d'Enseignement acquise ne peut pas être repassée.

Un étudiant défaillant au contrôle de connaissance sans justificatif ne peut prétendre à passer l'examen de rattrapage.

Les UE du Master relatives à des projets ne peuvent pas faire l'objet de rattrapage.

Les UE du Master sous la responsabilité de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées peuvent faire l'objet d'un rattrapage selon les modalités de l'école.

Validation de l'année 2 (semestres 3 et 4)

Pour obtenir la validation de l'année 2 (semestres 3 et 4) un étudiant doit obtenir la moyenne de 10/20 sur l'ensemble des Unités d'Enseignement de l'année, munies des coefficients (compensation globale sur l'année 2). L'année 2 validée est définitivement acquise (semestres 3 et 4).

Obtention du diplôme

Le Master de Mécanique et Génie Civil, est obtenu dès lors que l'année 2 (semestres 3 et 4) est validée.

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

Un étudiant qui paye ses frais d'inscription à l'Université de Marne-la-Vallée voit son diplôme délivré par ladite Université. Un élève qui paye des droits d'inscription et frais de scolarité à l'Ecole des Ponts voit son diplôme délivré par ladite Ecole.

3.5. Evaluation de la formation et des enseignements

La formation et les enseignements seront évalués suivant les règles générales des évaluations des établissements concernés.

4. Liste et contenu des unités d'enseignement

Semestre 3 : 30 ECTS

UE: 0. Economie, développement durable, gestion CO2	
Nombre d'ECTS	6
Enseignant	Hélène TEULON (DR Ecole Polytechnique)
Objectif	L'objet de ce cours est de sensibiliser les étudiants aux aspects économiques, environnementaux et sociaux liés à la production et l'utilisation des matériaux du

	<p>bâtiment, en particulier du béton. Il interviendra relativement tôt dans le cursus, de façon à poser le cadre dans lequel viendront s'insérer les questions scientifiques et techniques traitées par les autres modules.</p> <p>Après un cours d'introduction sur les enjeux stratégiques du développement durable pour l'industrie du béton, une part importante du cours sera consacrée à la gestion des impacts environnementaux du béton tout au long de son cycle de vie, avec notamment un TD sur l'analyse de cycle de vie. Les autres dimensions du développement durable seront également traitées. Des interventions d'utilisateurs du béton et de responsables de la gestion environnementale chez Lafarge sont prévues, ainsi qu'une visite de site.</p>
Matière/Mots Clefs	Enjeux du développement durable - Bilan environnemental - cycle de vie
Contenu	<p>1 – Enjeux stratégiques du développement durable pour l'industrie du béton (3 h)</p> <p>2 – L'analyse de cycle de vie (ACV)</p> <p>3 – Bilan Carbone et marché du CO2</p> <p>4 – Les utilisateurs du béton : « la route écologique du futur »</p> <p>5 – Les utilisateurs du béton : les bâtiments respectueux de l'environnement</p> <p>6 – La gestion environnementale des sites de production</p> <p>7 – Autres dimensions du développement durable (reporting, référentiels sociaux, référentiels ISO)</p> <p>8 – Concurrence et développement durable</p>

UE: 1. Physico-mécanique des milieux poreux	
Nombre d'ECTS	6
Enseignant	Olivier COUSSY (DR LCPC)
Objectif	Les matériaux de construction sont des matériaux poreux qui sont soumis à des phénomènes multi-physiques variés, en particulier de transport hydrique, de sorption, de cristallisation et de réactions internes, de couplages thermo-hydro-mécaniques. Le cours « Physico-mécanique des matériaux poreux » vise à appréhender ces différents phénomènes dans un cadre unique.
Matière/Mots Clefs	Thermodynamique des milieux continus – Poromécanique – Couplages thermo-chimio-mécaniques – Transitions de phase - Cristallisation
Contenu	<p>1 – Thermodynamique. Mélanges fluides et mélanges fluide – solide</p> <p>2 – Poromécanique. Poroélastoplasticité – Poroélasticité non saturé et énergie de surface</p> <p>3 – Transitions de phase en milieu confiné déformable</p> <p>4 – Travaux expérimentaux (1 atelier au choix): Le matériaux plâtre – Croissance cristalline dans un réseau poreux - Pâte de ciment et tension capillaire)</p> <p>5 – Chimio-mécanique</p> <p>6 – Transports en milieux poreux</p> <p><i>Références :</i></p> <p>Livres :</p> <p>O. COUSSY, <i>Poromechanics</i>, Wiley & Sons (2004)</p> <p>P. PAPON & J. LEBLOND, <i>Thermodynamique des états de la matière</i>, Hermann Editeurs, 1990</p> <p>P. PAPON, J. LEBLOND, P. H.E MEIJER, <i>Physique des transitions de phases</i>, Sciences Sup, Dunod (2002)</p>

	<p>Articles</p> <p>O. COUSSY, G. SCHERER editors, Poromechanics of concrete I & II, <i>Materials and structures/Concrete and Science Engineering</i>, December (2003) and January (2004).</p> <p>F.-J. ULM, O. COUSSY, Environmental chemomechanics of concrete, in <i>Environmental Geomechanics</i>, B. Shrefler editor, International Center for Mechanical Sciences, Course and Lectures, N° 417, Springer Verlag (2001)</p> <p>F.-J. ULM, O. COUSSY, Couplings in early-age concrete : from material modeling to structural design, <i>Journal of Solids and Structures</i>, Vol. 35, Nos 31-32, pp. 4295-4311 (1998)</p>
--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

UE: 2. Physico-chimie des matériaux de construction	
Nombre d' ECTS	6
Enseignant	Denis DAMIDOT (PR Mines de Douai)
Objectif	A l'issue de ce module, les élèves seront capables de comprendre les mécanismes physico-chimiques mis en jeu lors de l'hydratation des liants hydrauliques mais aussi lors de leur interaction avec l'environnement. D'autre part, ils connaîtront les principaux leviers à disponibles pour modifier ces mécanismes.
Matière/Mots Clefs	Potentiel et équilibres chimiques. Hydratation et microstructure. Durabilité
Contenu	<p>I – Bases thermodynamiques :</p> <p>1.1 Le potentiel chimique</p> <p>1.2 L'équilibre chimique et le produit de solubilité</p> <p>1.3 Les diagrammes de phases</p> <p>1.4 Sous-saturation et dissolution</p> <p>1.5 Sursaturation et précipitation (nucléation-croissance)</p> <p>1.6 Mûrissement d'Oswald</p> <p>II – Hydratation des liants hydrauliques et création de la microstructure :</p> <p>2.1 Principaux liants hydrauliques : chaux, plâtre, ciments portland et ciments alumineux</p> <p>2.2 Mécanisme de l'hydratation à travers la dissolution-précipitation</p> <p>2.3 Méthodes d'investigations de l'hydratation</p> <p>2.4 Hydratation de phases pures</p> <p>2.5 Hydratation des ciments portland</p> <p>2.6 Hydratation des ciments alumineux</p> <p>2.7 Facteurs modificateurs de l'hydratation : température, ajouts minéraux et interaction organo-minérale</p> <p>III – Interaction des matériaux cimentaires avec leur environnement :</p> <p>3.1 Le transport-réactif</p> <p>3.2 Durabilité et principales pathologies</p> <p>3.3 Impact environnemental (lixiviation)</p> <p>3.4 Utilisation des matériaux cimentaires pour protéger l'environnement (inertage et confinement)</p> <p>Références</p>

	<p>A. B. POOLE AND I. SIMS, <i>Concrete Petrography - A handbook of investigative techniques</i>, D.A. St John, ARNOLD publishers, 1997</p> <p><i>Lea's Chemistry of Cement and Concrete</i>, Fourth Edition, Edited by Peter C. Hewlett, ARNOLD publishers, 1991</p> <p>H.F.W. TAYLOR, <i>Cement chemistry</i>, 2nd edition, Thomas Telford, 1998</p> <p><i>Concrete : from material to structure</i>, Edited by JP Bournazel and Y. Malier, Rilem Publications, 1998</p> <p><i>Hydration and Setting – Why does cement set? An interdisciplinary approach</i>, Edited by A. Nonat, Rilem Publications, 2000</p> <p><i>Calcium Aluminate Cements</i>, Edited by RJ Mangabhai, E & FN Spon, 1990</p> <p><i>Penetration and permeability of concrete</i>, Edited by HW Reinhardt, Rilem Publications, 1997</p> <p>GM ANDERSON & DA CRERAR, <i>Thermodynamics in geochemistry – The equilibrium model</i>, Oxford University Press, 1993</p> <p>P. PAPON & J. LEBLOND, <i>Thermodynamique des états de la matière</i>, Hermann Editeurs, 1990</p>
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

UE: 3. Rhéophysique et matière molle	
Nombre d'ECTS	6
Enseignants	David QUERE (DR CNRS - Chargé de Cours Ecole Polytechnique) et P. COUSSOT (DR LCPC)
Objectif	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).
Matière/Mots Clefs	Propriétés mécaniques (macroscopiques) et propriétés physico-chimiques. Physico-chimie et loi de comportement des pâtes. Hétérogénéité et interfaces.
Contenu	<p>I - Bases</p> <ul style="list-style-type: none"> • Colloïdes, tensio-actifs, grains, bulles, gouttes • Polymères • Rappels de mécanique des milieux continus, principaux comportements mécaniques <p>II. Applications</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rhéophysique des pâtes, des suspensions et des milieux granulaires • Rhéophysique des polymères et des tensio-actifs • Rhéométrie (plans parallèles, cône-plan, cylindres coaxiaux,...) • Ecoulements non-viscosimétriques (étalement, écrasement, mouvement d'un objet) – Rhéométrie « pratique » <p>III. Compléments</p> <ul style="list-style-type: none"> • Phénomènes particuliers : sédimentation, ségrégation, compaction • Séance expérimentale : Rhéométrie par IRM

	<ul style="list-style-type: none"> • Comportements aux interfaces : mouillage, imprégnation, adhésion <p>Références R. LARSON, <i>The Structure and Rheology of Complex Fluids</i>, Oxford University Press (1999) W.B. RUSSEL, D.A. SAVILLE, W.R. SCHOWALTER, <u>Colloidal Dispersions</u>, (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1989) P. COUSSOT, J.L. GROSSIORD, <i>Comprendre la Rhéologie - de la circulation du sang à la prise du béton</i>, (EDP Sciences, Les Ulis, 2002) P.G. DE GENNES, F. BROCHARD-WYART, D. QUERE, <i>Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves</i>, (Springer, New York 2004)</p>
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

UE: 4. Simulation numérique et méthodes de changement d'échelle	
Nombre d'ECTS	6
Enseignants	Claude LE BRIS (PR ENPC), Luc DORMIEUX (PR ENPC)
Objectif	Les matériaux de construction, qu'ils soient granulaires sont des matériaux multi-échelles. La compréhension et la maîtrise des effets liés aux différentes échelles sur la réponse mécanique requièrent de plus en plus le recours systématique à la simulation numérique et aux méthodes de changements d'échelle. Le cours « simulation numérique et méthodes de changement d'échelle » vise ainsi à présenter et à mettre en perspective les différentes approches pour appréhender au mieux l'aspect multi-échelles des matériaux de construction vis à vis de leurs propriétés d'usage.
Matière/Mots Clefs	Dynamique moléculaire – Homogénéisation – micromécanique
Contenu	<p>I – Méthodes de dynamique moléculaire (MD) et calculs de moyennes d'ensembles</p> <p>I.1. Introduction a la dynamique moléculaire: les équations, le calcul des potentiels</p> <p>I.2. Analyse numérique des méthodes d'intégration des équations MD, systèmes hamiltoniens, propriétés en temps long</p> <p>I.3. Echantillonnage de l'espace des phases : notion d'ensembles thermodynamiques, calcul de moyennes d'ensemble par MD,</p> <p>I.4. Méthodes avancées pour les temps très longs: kinetic Monte-Carlo, chemins de réactions, événements rares</p> <p>I.5. Méthodes alternatives a la dynamique moléculaire: équations de Langevin et autres approches stochastiques</p> <p>II – Stratégies pour le couplage d'échelles (3 heures)</p> <p>II.1. Un exemple de méthode couplant description atomistique et mécanique des milieux continus : la méthode Quasicontinuum</p> <p>II.2. Enjeux mathématiques et numériques de telles méthodes, avenir.</p> <p>III – Transport de masse fluide</p> <p>III. 1 Transport advectif (Loi de Darcy) et transport diffusif (Loi de Fick). Couplage entre modes de transport.</p> <p>III.2 Interprétation micromécanique des tenseurs de perméabilité, de tortuosité et de dispersion.</p> <p>V – Nano-indentation</p>

	<p>VI – Poroélasticité et micromécanique</p> <p>VII – Critères de résistance, endommagement et micromécanique</p> <p>Références</p> <p>Dynamique moléculaire</p> <p>M. P. ALLEN AND D. J. TILDESLEY, Computer Simulation of Liquids, OxfordScience Publications (1987)</p> <p>A. SZABO AND N. S. OSTLUND, Modern Quantum Chemistry: An Introduction to Advanced Electronic Structure Theory, MacMillan (1982)</p> <p>D. FRENKEL AND B. SMIT, Understanding Molecular Simulation, 2nd edn, Academic Press (2001)</p> <p>Homogénéisation</p> <p>J.L. AURIAULT AND J. LEWANDOWSKA, Diffusion/adsorption/advection macrotransport in soils, Eur. J. Mech. A/Solids, 15:681-704, (1996)</p> <p>Continuum micromechanics; CISM Courses and Lectures. Edited by P. SUQUET, SpringerWienNewYork (1997)</p> <p>Applied micromechanics of porous materials; CISM Courses and Lectures n. 480, Edited by L. DORMIEUX AND F.J. ULM, SpringerWienNewYork (2005)</p>
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

UE: 5. Milieux désordonnés et outils physiques	
Nombre d'ECTS	6
Enseignants	Jean-Pierre KORB (DR Ecole Polytechnique) et P. LEVITZ (DR Ecole Polytechnique)
Objectif	Ce cours présentera les résultats les plus récents dans les techniques de caractérisation de la microstructure des matériaux cimentaires. Les propriétés de transport de l'eau, des ions, des gaz et l'exploitation d'une imagerie multiéchelle de ces matériaux fortement désordonnés seront abordées. Nous montrerons comment ces connaissances ont fortement contribué au développement récent de ce que l'on pourrait appeler «les nouveaux bétons ». Nous discuterons en quoi les outils physiques d'analyse des milieux désordonnés contribuent à définir les possibilités de fonctionnalisation et de durabilité des liants hydrauliques.
Matière/Mots-clefs	Milieux poreux - Imagerie
Contenu	<p>I - Classes de poreux naturels et industriels.(2h)</p> <p>Quelques grandes classes de matériaux poreux. Notion de porosité, de surface spécifique de courbures moyenne et gaussienne. Désordre et invariance d'échelle.</p> <p>II - Les techniques physiques de caractérisation des poreux : une approche multi-échelle</p> <ul style="list-style-type: none"> - Imageries 2D et 3D <ul style="list-style-type: none"> * les microscopies MEB et TEM, les tomographies, l'IRM. - Exploiter les corrélations structurales : <ul style="list-style-type: none"> * Les méthodes de diffusion statique de rayonnement X, neutrons. * Introduction aux méthodes de diffusion des rayonnement quasi-élastiques inélastiques.

- Avantages des techniques non-invasives de RMN :
 - * Caractérisation d'espèces et de phases par spectroscopie haute résolution
 - * La relaxométrie à une et plusieurs dimensions :
 - Suivi en continue de l'évolution de la microstructure de matériaux cimentaires
 - Caractérisation de la dynamique de l'eau aux interfaces
 - Transport d'eau entre les micropores et mésopores
 - * Le gradient de champ pulsé et le suivi de la dynamique aux échelles intermédiaires (μm)
 - * L'IRM et l'imagerie au delà du μm .

III - Exploitation de l'imagerie: description morphologique et topologique des milieux poreux

Les outils de description morphologique de la texture :

Introduction à la stéréologie, à l'utilisation des opérateurs de la morphologie mathématique et au traitement d'image.

Introduction aux propriétés topologiques, le problème de la connexion, graphes et squelettes.

IV - Propriétés de transport et d'invasion : Une approche de physique statistique

Transport diffusif :

- * notion de tortuosité,
- * portrait de phase du propagateur de diffusion
- * connexion avec la structure poreuse.

Rôle du désordre sur le transport : notion de percolation, de processus non gaussiens, de diffusion anormale. Importance dans les structures poreuses naturelles.

Transport convectif : notion de perméabilité, rôle de la géométrie du réseau de pores

Mécanismes d'imbibition et de séchage : le cas de l'intrusion de mercure.

Techniques physiques de mesure des processus de transport.

V - Applications aux nouveaux bétons : fonctionnalisation et durabilité

Références (générales)

- D'ARCY THOMPSON, On growth and Form, Cambridge University Press, 1961.
 H. BALE, P. SCHMIDT, Phys.Rev.Lett, 1984, **53**, 596-599
 P.T. CALLAGHAN. "Principles of nuclear magnetic resonance microscopy". Oxford Science Publications (1993).
 F.A. DULLIEN, Porous media: fluid transport and pore structure. Academic Press, New York 1976.
 A. GUINIER, G. FOURNET., " Small angle scattering of X rays", John Wiley & son eds, 1955
 S. RYDE, S. ANDERSON, K. LARSON, Z. BLUM, T. LANDH, S. LIDIN, AND B.W. NINHAM, The language of shape: the role of curvature in condensed matter. Elsevier , 1997,1-368.
 J. SERRA, Image analysis and mathematical morphology, Academic Press, London, 1982.

Semestre 4 : Stage de 30 ECTS

UE: 1. Stage de Recherche	
Nombre d'ECTS	30
Objectif	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. Le stage donne lieu à la rédaction d'un mémoire de recherche qui est soutenu oralement devant un jury d'examen fin Juin.