

DOMAINE SCIENCES, TECHNOLOGIES, SANTE  
PROGRAMME PEDAGOGIQUE MASTER 2

## **MASTER GENIE CIVIL**

Parcours Géo-matériaux et structures en génie civil

### **Objectifs de la formation**

Le master « spécialité génie civil », vise à donner aux étudiants une formation scientifique et technique de haut niveau dans les domaines de la mécanique des géo-matériaux (roches, sols, bétons), de la modélisation des ouvrages de génie civil et de la géotechnique environnementale.

Cette formation a deux objectifs : initier les étudiants à la recherche en vue de préparer une thèse de doctorat sur les thèmes porteurs du génie civil au sens large, donner aux étudiants de réelles compétences en vue d'insertion professionnelle dans des services R&D et techniques des grandes entreprises, des organismes de recherche, des centres d'étude et des collectivités.

### **Débouchés de la formation**

Le master « spécialité génie civil », ayant un caractère recherche, a pour vocation essentielle la formation de jeunes chercheurs, soit par la poursuite d'une thèse de doctorat soit en s'intégrant directement dans un organisme ou un centre de recherche public ou privé. Une majorité des étudiants poursuivront la formation par la recherche en préparant une thèse de doctorat. Certains rentrent directement dans la vie professionnelle.

Les jeunes diplômés doivent pouvoir occuper les fonctions d'enseignant et/ou de chercheur, d'ingénieurs de conception, de recherche-développement ou de chercheur dans les secteurs du bâtiment, des travaux publics, de l'environnement, du génie pétrolier ou des énergies renouvelables.

## Organisation de la formation

Au premier semestre, un tronc commun obligatoire constitué de 2 modules de 50h chacun (25h de cours et 25h de TP) :

- Méthodes numériques avancées en géo-mécanique ;
- Lois de comportement des géo-matériaux.

Puis 4 modules optionnels de 50h chacun (25h cours et 25h de TP), à choisir en concertation avec le responsable de stage parmi une liste de 6 modules :

- Interaction sol - structure ;
- Mécanique des milieux poreux ;
- Matériaux de construction et leur évolution ;
- Diagnostique des structures ;
- Endommagement et rupture fragile ;
- Dynamique moléculaire en géo-mécanique.

Au second semestre, un stage de recherche d'une durée de 3 à 4 mois, est effectué dans un laboratoire universitaire, du CNRS ou dans un organisme de recherche ou une entreprise ayant un partenariat avec ces équipes. Voici une liste des principaux laboratoires d'accueil :

- Laboratoire de mécanique multiphysique, multiéchelle (LaMCube)
- Laboratoire de Génie Civil et géo Environnement (LGCgE)
- IEMN - Equipe opto-acoustique
- IMT Lille-Douai, HEI
- IFP, LCPC, LRPC, TOTAL, EDF, ANDRA

## Programme détaillé

Titre UE	Volume horaire	ECTS	Mode évaluation
<b>Lois de comportement des géomatériaux</b>	50	5	Ecrit
<b>Méthodes numériques avancées en géomécanique</b>	50	5	Ecrit
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>10</b>	

Titre UE	Volume horaire	ECTS	Mode évaluation
<b>Interaction sol - structure</b>	50	5	Ecrit
<b>Mécanique des milieux poreux</b>	50	5	Ecrit
<b>Matériaux de construction et leur évolution</b>	50	5	Ecrit
<b>Diagnostique des structures</b>	50	5	Ecrit
<b>Dynamique moléculaire</b>	50	5	Ecrit
<b>Endommagement et rupture fragile</b>	50	5	Ecrit
<b>TOTAL</b>	<b>300</b>	<b>30</b>	

Lois de comportement des géo-matériaux	
<b>Volume horaire :</b> 50h	
<b>Nombre d'ECTS :</b> 5	
<b>Objectifs :</b> Ce cours a pour but de présenter aux étudiants une base théorique et des outils de modélisation pour la description des comportements mécaniques des géo-matériaux (sols, roches et béton), en vue d'application au calcul de structures en génie civil (au sens large).	
<b>Organisation du cours :</b> 25h de cours et 25h de travail personnel.	
<b>Plan et contenu du cours :</b> <u>Chapitre 1 : synthèse des comportements mécaniques des géo-matériaux</u> La microstructure et le comportement macroscopique – mécanismes de déformations et de la rupture – déformation plastique et endommagement fragile – anisotropie initiale et induite- caractérisation expérimentale. <u>Chapitre 2 : thermodynamique des processus irréversibles</u> Approches macroscopiques des lois de comportement – variables internes – fonctions d'état – potentiels de dissipations – principes de la thermodynamique des processus irréversibles - matériaux standards – matériaux non standards. <u>Chapitre 3 : modèles plastiques et viscoplastiques</u> Formulation des modèles élastoplastiques indépendant du temps – critères de rupture - études de quelques modèles de base pour géo-matériaux – extension aux modèles viscoplastiques – exemples d'applications. <u>Chapitre 4 : modèles d'endommagement macroscopique</u> Mécanisme physique de l'endommagement par microfissuration – représentation de l'endommagement par variables internes – potentiels thermodynamiques – propriétés élastiques effectives – lois d'évolution – études de quelques modèles d'endommagement isotrope et anisotrope – couplage avec la plasticité	
<b>Evaluation :</b> écrite.	
<b>Pré-requis :</b> Mécanique des Milieux Continus	
<b>Caractère :</b> Obligatoire pour le Master RGC	

## Méthodes numériques pour la Géo-mécanique

**Volume horaire** : 50h

**Nombre d'ECTS** : 5

**Objectifs** : Ce module a pour but de former les étudiants aux techniques numériques utilisées pour la résolution des problèmes aux limites linéaires et non linéaires rencontrés en géomécanique. L'accent sera mis sur les problèmes non linéaires et couplés. Le plan du cours comprend problèmes d'évolution linéaire et non linéaire, couplages thermomécanique et hydromécanique, et problèmes non linéaires.

**Organisation du cours** : 25h de cours et 25h de travail personnel.

**Plan et contenu du cours** :

1. Présentation générale

- Les équations aux dérivées partielles - classification
- Les méthodes de résolution (différences finies, éléments finis, méthodes aux frontières)

2. Résolution des problèmes linéaires – application à l'élasticité

- Formulation (théorème des travaux virtuels, énergie potentielle, énergie complémentaire)
- Discrétisation des problèmes plans – notion d'erreur et de convergence
- Discrétisation des problèmes tridimensionnels

3. Problèmes d'évolution - application diffusion de la chaleur

- Formulation variationnelle
- Discrétisation
- Schémas d'intégration et stabilité (explicite et implicite)

4. Problèmes couplés : Couplage thermo-mécanique et consolidation

- Formulation variationnelle
- Discrétisation
- Schémas d'intégration

5. Problèmes non linéaires : Application à la plasticité

- Formulation variationnelle
- Discrétisation
- Méthodes de résolution des systèmes non linéaires.

**Evaluation** : écrite.

**Pré-requis** : Méthodes numériques, Rhéologie, vibrations

**Caractère** : Obligatoire pour le Master RGC

Interaction sol/structure	
<b>Volume horaire :</b> 50h	
<b>Nombre d'ECTS :</b> 5	
<b>Objectifs :</b> Ce cours a pour but de présenter aux étudiants les techniques de modélisation des problèmes d'interaction sol/structure sous chargements monotone et sismique.	
<b>Organisation du cours :</b> 25h de cours et 25h de travail personnel.	
<b>Plan et contenu du cours :</b>	
1. <u>Chargement statique</u>	
1.1. <u>Eléments de contacts et d'interface</u>	
- Eléments de contact ponctuel type ressort ou Katona	
- Elément de Goodman	
- Eléments surfaciques à comportement élastoplastique	
- Eléments type couche mince	
1.2. <u>Application</u>	
- Radiers sur sol élastique	
- Ecrans de soutènement	
- Fondations superficielles sous chargement latéral et excentré	
- Pieux sous chargement vertical - courbe (t-z)	
- Pieux sous chargement latéral - courbe (p-y)	
- Tunnels peu profonds	
2. <u>Chargement dynamique</u>	
2.1. <u>Notions de sismologie</u>	
- Chargement sismique et propagation d'ondes	
- Réponse du sol en champs libre	
2.2. <u>Comportement du sol</u>	
- Prise en compte du comportement non linéaire du sol	
- Rôle de l'eau - Phénomène de liquéfaction	
2.3. <u>Etude de l'interaction sol-fondation-structure</u>	
- Notions d'interaction cinématique et inertielle	
- Notion d'impédance (Fondations superficielles et profondes)	
- Méthode de sous-structures	
- Approche globale	
<b>Evaluation :</b> écrite.	
<b>Pré-requis :</b> Méthodes numériques, Rhéologie, vibrations	
<b>Caractère :</b> Optionnel	

## Mécanique des milieux poreux

**Volume horaire** : 50h

**Nombre d'ECTS** : 5

**Objectifs** : Ce cours a pour but de présenter aux étudiants une base théorique et des méthodes numériques pour la modélisation des phénomènes de couplage thermo-hydro-mécanique. Les domaines d'application sont vastes tels que le génie civil, la géotechnique, le génie pétrolier et la problématique du stockage des déchets radioactifs.

**Organisation du cours** : 25h de cours et 25h de travail personnel.

**Plan et contenu du cours** :

*Chapitre 1 : Cinématique des milieux poreux et tenseurs de déformation*

Milieux poreux en tant que superposition de deux milieux continus et concepts de base - descriptions lagrangienne et eulérienne, tenseurs de déformation - hypothèse de petites perturbations et tenseur de déformation linéarisé - formules de transport - dérivées particulière et matérielle

*Chapitre 2 : Conservation de la quantité de mouvement et tenseur de contrainte*

Conservation de la quantité de mouvement - Tenseur de Cauchy - Equations de mouvement - Contraintes totales et partielles - Loi de Darcy

*Chapitre 3 : Thermodynamique des milieux poreux saturés*

Rappel de la thermodynamique, les deux principes et l'inégalité de Clausius-Duhem - Comportement thermomécanique des fluides parfaits, équations d'état - Application des deux principes aux milieux poreux saturés, variables d'état et équations d'état - Etude des dissipations - Equations de diffusions hydraulique et thermique - Aspects expérimentaux : notion de perméabilité et exemples typiques pour roches, influence de la température, phénomènes parasites.

*Chapitre 4 : Loi de comportement thermo-poro-élastique linéaire*

Equations d'état d'un comportement thermo-poro-élastique - Coefficient de Biot et Module de Biot - Concept des contraintes effectives - significations physiques des paramètres de couplage - étude des réponses élémentaires - méthodes d'identification des paramètres à partir d'essais en laboratoire  
Applications expérimentales pratiques : la conception des essais poro-mécaniques et la signification physique des propriétés mesurées. L'importance des essais de compressibilité et leur interprétation. Etudes de cas concrets sur matériau calcaire.

*Chapitre 5 : Problèmes d'évolution quasi-statiques*

Formulation des équations de champ (équilibre mécanique, diffusion hydraulique et thermique généralisée) - méthodes de résolution générales (méthode directe et méthode inverse) - formulation faible - résolution numérique par la méthode des éléments finis - étude des cas types de couplage THM - Equations de diffusivité hydraulique et étude de cas expérimental : la mesure de perméabilité par pulse test - importance relative de la prise en compte du couplage fluide squelette pour un liquide ou un gaz.

**Evaluation** : écrite.

**Pré-requis** : mécanique des milieux continus

**Caractère** : Optionnel

## Matériaux de construction et leur évolution

**Volume horaire :** 50h

**Nombre d'ECTS :** 5

**Objectifs :** Ce module a pour but de former les étudiants à la caractérisation structurale et des comportements physiques et mécaniques des matériaux de construction. Le plan du cours comprend : formation et physico-chimie du béton, méthodes expérimentales de caractérisation, comportement différé, dégradation et durabilité, nouveaux matériaux, comportements des matériaux rocheux et métalliques.

**Organisation du cours :** 25h de cours et 25h de travail personnel.

### Plan et contenu du cours :

#### Le béton :

- Principaux constituants  
Le ciment portland, les granulats, les ajouts
- Les réactions d'hydratation, la prise et le rôle de l'eau
- Micro structure du béton durci (et de la pâte de ciment)  
Analyse minéralogique, Lames minces et M.E.B.
- Principaux essais de laboratoire et propriétés mécaniques et hydrauliques
  1. mécaniques
  2. poromécanique et perméabilité
  3. diffusivité
- Comportement différé (fluage et retrait)
- Dégradation et durabilité
  1. phénomènes prépondérants en jeu
  2. impacts sur les propriétés
  3. étude de cas particulier, approche par méthode acoustique
- Bétons spéciaux et nouveaux bétons.

#### Le matériau rocheux :

- Principales classes de roches
- Caractéristiques et constituants essentiels

#### L'acier :

- Elaboration et acier de construction
- Principales caractéristiques physiques et mécaniques
- Aciers à haute et très haute limite d'élasticité
- La corrosion

**Evaluation :** écrite.

**Pré-requis :** Notions de physique et de mécanique

**Caractère :** Optionnel

## Diagnostic des structures en génie civil

**Volume horaire :** 50h

**Nombre d'ECTS :** 5

**Objectifs :** Ce cours a pour but de former les étudiants à des techniques de diagnostic des structures de génie civil. Le plan du cours comprend : Pathologies des structures, Analyse approfondie du mécanisme de corrosion, Inspection des ouvrages, Auscultation des ouvrages, Etude approfondie des méthodes d'auscultation ultrasonores, Elaboration d'un diagnostic, Notion de système de gestion des ouvrages.

**Organisation du cours :** 25h de cours et 25h de travail personnel.

**Plan et contenu du cours :**

Pathologies des structures :

- Mécanismes de dégradation
- Indicateurs
- Modélisation

Analyse approfondie du mécanisme de corrosion :

- Carbonatation
- Chlorures
- Effets de la corrosion

Inspection des ouvrages

Auscultation des ouvrages

- Méthodes non destructives
- Méthodes semi-destructives

Etude approfondie des méthodes d'auscultation ultrasonores

Elaboration d'un diagnostic

- Méthodes simplifiés
- Recalcul
- Méthodes probabilistes

Notion de système de gestion des ouvrages

**Evaluation :** écrite.

**Pré-requis :** connaissances de base en matériaux de construction, en RDM, en physique et en chimie

**Caractère :** Optionnel



## Endommagement et rupture fragile des géo-matériaux

**Volume horaire :** 50h

**Nombre d'ECTS :** 5

**Objectifs :** Le comportement des géo-matériaux cohérents (bétons, roches etc.), largement déterminé par les phénomènes de fissuration à diverses échelles, peut être abordé dans le cadre de la mécanique de l'endommagement et/ou de la mécanique de la rupture fragile. *L'enseignement d'option proposé a un double objectif: présenter les méthodes de caractérisation ainsi que les outils de modélisation de l'endommagement par microfissuration; introduire les concepts de base de la mécanique de la rupture fragile.* Les approches présentées sont soit phénoménologiques, soit basées sur les méthodes d'homogénéisation (approches micro-macro).

**Organisation du cours :** 25h de cours et 25h de travail personnel.

**Plan et contenu du cours :**

- Introduction aux mécanismes d'endommagement et de fissuration des géomatériaux
- Modélisations phénoménologiques de l'endommagement par microfissuration
- Approche micromécanique de l'endommagement fragile.
- Concepts de base de la mécanique linéaire de la rupture fragile : modes de rupture, champs de contraintes singuliers, facteurs d'intensité de contraintes.
- Théorie énergétique de Griffith : taux de restitution de l'énergie
- Résolution de quelques problèmes élémentaires de structures fissurées

**Evaluation :** écrite.

**Pré-requis :** Mécanique des milieux continus

**Caractère :** Optionnel

## Dynamique moléculaire

**Volume horaire** : 50h

**Nombre d'ECTS** : 5

**Objectifs** : Ce cours a pour but de présenter aux étudiants les techniques de calcul de type ab initio et dynamique moléculaire pour traiter les propriétés physico-chimiques et mécaniques des différents constituants du sol sous des effets de la pression, de la température, en présence d'eau et/ou des polluants.

**Organisation du cours** : 25h de cours et 25h de travail personnel.

**Plan et contenu du cours** :

I- Rappel et mise a niveau

- I.1. Rappels des notions de cristallographie
- I.2. Rappels des principes de liaisons atomiques dans les constituants des sols: roches, argiles,..
- I.3- propriétés dynamiques dans les minéraux
- I.4-Rappels des principes fondamentaux de la thermodynamique

II- Méthodes quantiques (ab initio ou premier principe)

- II.1-Approximation adiabatique
- II.2- Résolution de l'équation de Shrodinger
- II.3- Théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT)
- II.4- Résolution des équations de Kohn-Sham
- II.5- Méthode de pseudopotentiel
- II.6- Méthode Des liaisons fortes
- II.7- Méthode des ondes planes augmentées linéarisées (Fplapw)
- II.8- Introduction aux codes de calcul relatifs à la DFT
- II.9- Exemples d'étude des roches et des argiles via la dft

III- Méthodes atomistiques

- III.1- La dynamique moléculaire
- III.2- La Monte carlo
- III.3- Les algorithmes
- III.4- Les ensembles
- III.5- Potentiels classiques
  - Potentiel a deux corps (Lennard-jones, buckingham,...)
  - Potentiel à trois corps (tersoff, stillinger-weber,...)
  - Méthode de l'atome encastré (eam, meam,...)
  - Potentiel appropriés aux argiles (exemple: MCY, TI4P)
- III.6- Applications aux roches
- III.7- Applications aux argiles
- III.8- Surfaces et interfaces
- III.9- Défauts
- III.10- Propriétés mécaniques : cas de la nanoindentation

IV- Méthode ab initio couplée à la dynamique moléculaire

**Evaluation** : écrite.

**Pré-requis** : cristallographie et minéralogie, mécanique classique, mécanique quantique, programmation.

**Caractère** : Optionnel