



## **Ecole Doctorale Sciences et de Technologie Université Libanaise**

### **Master 2 Recherche**

**Domaine : Sciences de l'Ingénieur**

**Parcours: Génie Civil**

**Spécialité: Géotechnique**

#### **1- Objectifs de la formation:**

L'objectif général de la formation en master recherche vise à fournir aux étudiants une formation scientifique de haut niveau et à les initier à la recherche. Le thème choisi est promoteur sur le plan scientifique et il répond à une demande accrue des professionnels et des collectivités. La formation envisagée a un caractère pluridisciplinaire.

L'option géotechnique a pour objectif de former des futurs chercheurs aux concepts et techniques utilisés dans la modélisation et la résolution des problèmes posés par la construction des ouvrages complexes tels que les tunnels, les forages pétroliers, les fondations des ouvrages en mer, les ouvrages en sol renforcé... L'accent est mis sur les fondements théoriques des principaux modèles utilisés en géomécanique, l'identification de leur paramètres à partir des essais en laboratoire et in situ, leur intégration numérique, et enfin leurs applications au calcul d'ouvrages.

Sur le plan pédagogique, l'enseignement de la formation proposée est prévu en deux parties. La première partie consiste en un tronc commun qui a pour but d'initier les étudiants aux bases de la rhéologie des matériaux et aux techniques numériques et expérimentales utilisés dans les différents domaines du Génie Civil. La deuxième partie consiste en un enseignement optionnel où les modules choisis permettent aux étudiants d'avoir les connaissances essentielles dans les principales thématiques de recherche.

Certains stages peuvent se faire avec les équipes de recherche de l'Université Libanaise (IUT, Faculté de Génie...). Par ailleurs, il est possible d'en faire quelques uns dans les laboratoires où les centres de recherche en France (Laboratoire de Mécanique de Lille, Laboratoire Central des

Ponts et Chaussées, Centre d'Etudes et de Recherche en Mécanique des Sols (CERMES...). Des stages peuvent se faire dans l'industrie libanaise (Cimenteries libanaises...) pour traiter des problèmes concrets posés par les industriels. Ainsi les avantages sont multiples :

- facilité d'insertion des étudiants dans le milieu professionnel
- renforcement de la collaboration avec le milieu professionnel
- réalisation de la recherche appliquée et a vocation pratique

#### Objectifs à court terme

Le master 2 recherche ainsi en géotechnique est une nouvelle formation prévue à l'Ecole Doctorale Sciences et Technologies à l'Université Libanaise. Ainsi, il paraît nécessaire, à court terme, de développer et de bien consolider les deux aspects suivants :

- le premier concerne la définition et l'adoption d'un programme pédagogique le plus approprié à la formation. Ce programme doit fournir aux étudiants les connaissances de base pour démarrer les travaux de recherche dans les meilleures conditions.

Le programme proposé a été fait en partenariat et en concertation avec les partenaires français. L'enseignement est assuré par des missionnaires français (environ 40%) et par des enseignants-chercheurs libanais

- Le deuxième est la définition des sujets de stage en adéquation avec la formation et l'identification des laboratoires d'accueil dans les différents établissements. Une contribution des enseignants chercheurs français est aussi prévue par l'accueil et l'encadrement des étudiants en stage dans les laboratoires français. Des stages de recherche peuvent se faire aussi en collaboration avec le CNRSL et avec les Universités privées avec lesquelles l'UL entreprend des actions de coopération. Des stages pourront se faire dans les laboratoires et les équipes de recherche associés a la Faculté de Génie de l'Université Libanaise.

#### Objectifs à moyen terme

La formation envisagée peut permettre le développement du partenariat à l'échelle nationale à plusieurs niveaux. Elle conduit à une coopération entre

- les différentes entités de l'Université Libanaise (Faculté de Génie, Institut Universitaire de Technologie, Faculté des Sciences...) aussi bien de l'enseignement, de l'encadrement des stagiaires et des doctorants.
- l'Université Libanaise d'une part et les centre de recherche tel que le CNRSL et les universités privées d'autre part
- L'Université Libanaise et le milieu professionnel et industriel, ce qui permet d'une part une insertion des diplômés dans ces secteurs.
- L'Université Libanaise et les Universités régionales (Syrie, Jordanie...)

Par ailleurs, la collaboration avec les partenaires français s'aligne avec l'action entamée par l'Ecole Doctorale Sciences et Technologies et qui se rapporte à la formation des formateurs qui garantit la continuité de la formation en Master Géotechnique à l'Université Libanaise en matière

d'enseignement et de recherche, ce qui assure un taux d'encadrement important que ce soit au niveau des stage ou bien des thèses. Ainsi, on souhaite après un certain temps d'appui que les enseignants libanais peuvent gérer complètement l'enseignement des différents Unités d'Enseignement en ce master. Cependant, il convient de maintenir le contact avec les partenaires français pour garantir un transfert de technologie et des connaissances afin de garantir un enseignement de et de recherche de hauts niveaux. Le but souhaité donc est de minimiser le nombre de missionnaires d'enseignants-chercheurs français et de d'accroître le nombre de stage des étudiants de master et de doctorants dans les différents laboratoires d'accueil en France.

### Objectifs à long terme

L'objectif du Master proposé en Géotechnique est de former des cadres supérieurs en Géotechnique capables de traiter des problèmes complexes et d'intérêts pratiques. Ces problèmes sont souvent générés par l'exécution des travaux réels (en milieu urbain par exemple) et dans lesquels il faut apporter des solutions. Les débouchés naturels de la formation se situent pour l'essentiel dans le domaine de la recherche publique et privée. Les cadres ainsi formés que ce soit en master ou bien en doctorat participeront au développement du pôle d'excellence scientifique soutenu par l'Ecole Doctorale dans le domaine de Génie Civil (en Géotechnique) aux bénéfices de la société civile.

2-

**Programme récapitulatif :**

Nom de l'unité d'enseignement	Nombre de crédits	Obligatoire (Ob) Optionnel (Op)	Nombre d'heures	Nom de l'enseignant	Université d'origine
Rhéologie des géométriaux (sols, béton, roches)	5	Ob	20	I. Shahrour	Université Lille I
			10	F. Hage Chehade	Université Libanaise (IUT)
Méthodes numériques avancées	5	Ob	15	F. Hage Chehade	Université Libanaise (IUT)
			15	K. Tawil	Université Libanaise – Faculté de Génie
Initiation aux techniques expérimentales	5	Ob	15	F. Fardoun	Université Libanaise – IUT
			15	A. Fawaz	
Amélioration des sols	5	Op	30	D. Abdel Massih	CNRS L
Dynamique des sols et des structures	5	Op	15	M. SADEK	Université Lille I
			15	M. El Khoury	Université Libanaise – Faculté de Génie
Interaction sol-structure	5	Op	15	H. Mroueh	Université Lille I
			15	E. Youssef	Université Libanaise – Faculté de Génie

3-

**Nombre total de missionnaires français participant aux enseignements.**

La formation prévoit la participation des enseignants français suivants :

- 1- I. Shahrour (Université Lille I) – Tronc commun UE : Rhéologie des géométriaux (sols, béton, roches)
- 2- M. Sadek (Université Lille I) – UE optionnelle : Dynamique des sols et des structures
- 3- H. Mroueh (Université Lille I) – UE optionnelle : Interaction sol-structure

## **Contribution des Partenaires français aux différentes actions :**

La contribution des partenaires français s'effectuera par les actions suivantes :

- a- Participation aux Sessions de formation à l'Ecole Doctorale au Liban
- b- participation aux séminaires
- c- co- encadrement et accueil de stages Master dans les laboratoires français
- d- co-encadrement des thèses de doctorat des étudiants dans les laboratoires français.

## **b- Syllabus détaillé des matières enseignées.**

### **5.1 UE : Rhéologie des géométriaux (sols, béton, roches) (Tronc commun)**

Ce cours a pour objectif de présenter aux étudiants les éléments de rhéologie nécessaire pour la modélisation du comportement des géomatériaux. L'accent est mis sur les observations en laboratoire, la formulation des modèles de comportement, l'identification des paramètres rhéologiques dans l'optique de leur utilisation dans un code de calcul, et enfin les méthodes d'intégration numérique. Il comporte les points suivants :

#### **1. CHEMINS DE SOLlicitATIONS ET DE REPONSE**

#### **2. PRINCIPES THERMODYNAMIQUES DES LOIS DE COMPORTEMENT**

#### **3. COMPORTEMENT VISCOELASTIQUE**

- Observation en laboratoire
- Principaux modèles
- Identification des paramètres rhéologiques
- Intégration numérique

#### **4. MODELES ELASTIQUE – PARFAITEMENT PLASTIQUE**

- Observation en laboratoire
- Notions de surface de charge et de règle d'écoulement
- Principaux critères de plasticité
- Règle d'écoulement, modèles non associés
- Intégration numérique

#### **5. MODELES ELASTOPLASTIQUE AVEC ECROUISSAGE**

- Modèles à écrouissage isotrope – exemple Camy-Clay
- Modèles à écrouissage cinématique - exemple Modsol

#### **6. COMPORTEMENT VISCOPLASTIQUE**

- Observation en laboratoire
- Principaux modèles
- Intégration numérique

## 7. MODELE D'ENDOMMAGEMENT

- Introduction aux mécanismes d'endommagement des géomatériaux
- Modélisations phénoménologiques de l'endommagement fragile
- Méthodes de changement d'échelle et application à la modélisation micromécanique de l'endommagement fragile.

## **5.2 UE : Méthodes numériques avancées (géotechnique et structure) (Tronc commun)**

Ce module a pour but de former les étudiants aux techniques numériques utilisées pour la résolution des problèmes aux limites linéaires et non linéaires en génie civil. L'accent sera mis sur la méthode des éléments finis et les méthodes aux frontières. Dans ce module, il sera présenté aux étudiants les formulations théoriques qui sont implémentés dans les grands logiciels de modélisation numérique (ceux utilisés dans les centres de recherche). Ce cours est indispensable pour bien comprendre aux étudiants la démarche de modélisation numérique qui est très utile aussi bien en milieu professionnel qu'en milieu de recherche. Il comporte les aspects suivants :

### 1. Présentation générale

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

### 2. Méthode des éléments finis

#### 2.1 Problème d'élasticité

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

#### 2.2 Problèmes d'évolution : diffusion de la chaleur

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

#### 2.3 Problèmes couplés : Couplage thermo-mécanique

- Formulation variationnelle
- Discrétisation
- Schémas d'intégration

## 2.4 Problèmes non linéaires : Calcul en grandes déformations

- Formulation variationnelle
- Discrétisation
- Méthodes de résolution

## 3. Méthodes aux frontières : application à l'élasticité

- Formulation intégrale
- discrétisation
- résolution numérique

## 4. Introduction aux problèmes de validation, à la qualité et aux contrôles des résultats

### **5.3 UE : Initiation aux techniques expérimentales (Tronc commun)**

Ce module a pour objectif de former les étudiants aux techniques expérimentales utilisées en génie civil. L'accent sera mis sur les appareillages de laboratoire, l'instrumentation, les modes opératoires et analyse et interprétation des mesures. Les notions suivantes sont abordées :

#### 1. Introduction

- Intérêt des études en laboratoire,
- Difficultés, confection, notion d'échelles
- Plan d'expériences

#### 2. Les techniques de mesure (déformations, déplacement, force, pression, ..)

- Principes
- Précision
- Etalonnage
- Acquisition numérique

#### 3. Les appareillages utilisés en laboratoire (odomètre, triaxial, triaxial vrai, mesure de perméabilité, accéléromètre, traitement de signal, acquisition ...)

- Principe de fonctionnement
- Modes opératoires
- Interprétation des mesures
- Reproductibilité
- Exemples

## **5.4 UE optionnelle: Amélioration des sols**

Ce cours a pour but de présenter aux étudiants les différentes techniques d'amélioration de sols. L'accent est mis sur leur conception et leur modélisation (par éléments finis). Les points suivants sont abordés :

1. Introduction : contexte et techniques d'amélioration
2. Techniques d'amélioration par inclusions
  - Terre armée : conception, modélisation
  - Micro pieux : conception et modélisation, effet de groupe, réseaux
  - Clouage : conception, modélisation, analyse de stabilité
3. Colonnes ballastées vibrées ou battues
  - Conception
  - Calcul par méthodes simplifiées
  - Modélisation numérique
4. Injection
  - Injection au coulis de ciment ou chimique
  - Injection par jet à très haute pression (Jet grouting)
  - Injection solide (Compaction grouting)
  - Injection de compensation

## **5.5 UE optionnelle: Dynamique des sols et des structures**

Ce cours a pour but de donner les éléments de base au dimensionnement dynamique des structures dans le domaine des basses fréquences. Il aborde les aspects suivants :

1. Interaction sol structure en dynamique avec un rappel élastodynamique (notions sur les ondes)
2. Réponses temporelle et fréquentielle d'un oscillateur amorti : filtrage, résonance, amortissement (1 DDL et n DDL)
3. Modes propres de vibration de la structure conservative associée : Modes propres élastiques pour une structure fixe, Modes de corps rigide et modes propres élastiques pour une structure libre.
4. Méthode d'analyse modale pour la prévision des réponses de la structure amortie : Réponse forcée déterministe et filtre linéaire, Réponse déterministe du problème d'évolution et dynamique transitoire.
5. Simulation numérique par la méthode des éléments finis et méthodes de calcul des réponses : Discrétisation de la formulation variationnelle par la méthode des éléments finis, Calcul des modes propres de vibration, Réponse forcée de la structure amortie, Matrice de raideur dynamique, Fonction de réponse en fréquence, Réponse déterministe et réponse aléatoire



stationnaire, Dynamique transitoire de la structure amortie, Méthode temporelle directe, Méthode avec analyse modale pour le cas déterministe et le cas aléatoire non stationnaire.

## 6. Chargement dynamique

### 6.1. Notions de sismologie

Chargement sismique et propagation d'ondes

Réponse du sol en champs libre

### 6.2. Comportement du sol

Prise en compte du comportement non linéaire du sol

Rôle de l'eau - Phénomène de liquéfaction

### 6.3. Etude de l'interaction sol-fondation-structure

Notions d'interaction cinématique et inertielle

Notion d'impédance (Fondations superficielles et profondes)

Méthode de sous-structures

Approche globale

## 5.6 UE optionnelle: Interaction sols-structures

Ce cours a pour but de présenter aux étudiants les techniques de modélisation des problèmes d'interaction sol/structure sous chargements monotone et sismique et leurs applications à la résolution des problèmes des fondations superficielles et profondes. Les notions suivantes sont traitées :

### 1. Eléments de contacts et d'interface

- Eléments de contact ponctuel type ressort ou Katona
- Elément de Goodman
- Eléments surfaciques à comportement élastoplastique
- Eléments type couche mince

### 2- Etude de l'interaction sol-fondation-structure

- Notions d'interaction
- Approche découplée – Approche globale

### 3. Application

- 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