

## CENTRE EAU TERRE ENVIRONNEMENT DE L'INRS

# DOCTORAT EN SCIENCES DE LA TERRE

Ce programme est offert conjointement par l'INRS (Centre Eau Terre Environnement) et l'Université Laval (Département de géologie et de génie géologique).

Code	Titre	Grade	Crédits
3527	DOCTORAT EN SCIENCES DE LA TERRE	Philosophiae doctor, Ph. D.	Quatre-vingt-dix
	Concentration « géodynamique et ressources »		
	Concentration « géoingénierie et environnement »		

## OBJECTIFS

Ce programme est largement axé sur des activités de recherche et permet une spécialisation avancée dans divers domaines de la géologie fondamentale ou appliquée ou du génie géologique. Il vise à rendre l'étudiant apte à élaborer et à mettre sur pied des projets de recherche originaux ; à le rendre autonome dans la conduite de ces projets ; et à lui permettre d'exceller dans des activités professionnelles de recherche et/ou d'enseignement universitaire.

## CONDITIONS D'ADMISSION

Le candidat doit être titulaire d'une maîtrise ès sciences ou d'un diplôme jugé équivalent ou posséder les connaissances requises et une formation appropriée. Il doit posséder un dossier académique au-dessus de la moyenne et avoir montré des aptitudes à conduire une recherche originale. Le candidat doit avoir obtenu de bonnes recommandations de la part des répondants.

De plus, il doit avoir été accepté par un directeur de recherche et s'être entendu avec celui-ci sur un projet de recherche et sur la disponibilité des ressources humaines et matérielles nécessaires à sa réalisation.

Le comité de programmes doit avoir l'assurance d'une capacité adéquate d'accueil et d'encadrement dans l'une ou l'autre des deux institutions, compte tenu des programmes de collaboration avec d'autres départements ou institutions.

Il doit, de plus, soumettre un avant-projet de thèse indiquant la problématique du projet, les objectifs, les hypothèses de recherche et la méthodologie appropriée.

## RÉGIME D'ÉTUDES ET DURÉE DES ÉTUDES

- Temps complet : 4 ans
- Temps partiel : 6 ans

## LISTE DES ACTIVITÉS

(Sauf indication contraire, les cours comportent 3 crédits.) Le doctorat en sciences de la Terre comporte 90 crédits, dont 81 pour la thèse, 6 pour les cours et 3 pour l'examen doctoral. Selon la sanction de l'examen doctoral, l'étudiant pourrait se voir imposer un cours sur la méthodologie de la recherche.

Le comité de programme tient à jour la planification des cours offerts sur une période d'au moins une année, afin de permettre à l'étudiant de planifier sa scolarité dès la première inscription.

Les activités identifiées GEO ou ETE sont offertes sous la responsabilité de l'INRS alors que celles identifiées ADM, DRT, ECN, GCI, GGL, GLG, GMT, GRR, GSO, MCB, SAC, SCG et SLS sont offertes sous la responsabilité de l'Université Laval.

## ACTIVITÉ OBLIGATOIRE

### PROJET DE RECHERCHE ET EXAMEN DOCTORAL OBLIGATOIRE (3 CR.)

#### GEO 9990 EXAMEN DOCTORAL (3 CR.)

Avant la fin du troisième trimestre, l'étudiant doit soumettre au comité de programmes une proposition écrite d'une vingtaine de pages définissant son projet de recherche. Il aura à défendre cette proposition lors d'un examen doctoral. L'examen doctoral a lieu au plus tard avant la fin du troisième trimestre.

**ACTIVITÉS AU CHOIX (6 CR.)****CONCENTRATION 1 « GÉODYNAMIQUE ET RESSOURCES »****GEO1301 VOLCANOLOGIE ET EXPLORATION MINÉRALE (3 CR.)**

Propriétés physiques et chimiques des magmas ; coulées de lave et dômes ; mécanismes et types d'éruptions explosives ; édifices volcaniques ; volcanisme sous-marin et sous-glaciaire ; hydrothermalisme ; effet de la diagenèse, du métamorphisme et de l'altération hydrothermale sur les roches volcaniques ; applications pour exploration minérale incluant les sulfures massifs volcanogènes, les sulfures de nickel (komatiites), les diatrèmes et les kimberlites.

**GEO1302 MODÉLISATION ET INVERSION EN GÉOPHYSIQUE (3 CR.)**

Le cours d'hydrogéophysique fait un survol des différentes techniques de caractérisation de la proche surface par des méthodes géophysiques. Les relations entre les propriétés hydrauliques et physiques des aquifères sont d'abord étudiées.

Ensuite, la théorie des techniques d'imagerie électromagnétiques, électriques et sismiques sont présentées.

Les méthodes en forages (diagraphie et tomographie) sont aussi présentées. Les techniques d'inversion et de traitement de chaque méthode sont présentées avec des logiciels commerciaux utilisés dans l'industrie.

Pour finir, le cours présente aussi les concepts de base de l'intégration multivariée.

**GEO1303 MÉTHODES SISMIQUES (3 CR.)**

Principes fondamentaux de la propagation des ondes sismiques. Principes de base de traitement du signal sismique : analyse spectrale, filtrage, déconvolution. Sismique réflexion : acquisition des données, corrections statiques, analyse de vitesse, NMO, DMO, migration, interprétation quantitative et AVO. Principes de base en interprétation. Méthodes en forage.

**GEO1502 MÉTHODES DE CARACTÉRISATION DE LA SOUS-SURFACE (3 CR.)**

Ce cours porte sur l'intégration des données géoscientifiques (géophysiques, géochimiques, géologiques, géotechniques et hydrogéologiques) en vue de développer pour une région d'étude un modèle géoscientifique utile aux différents domaines des sciences de la Terre.

Les concepts d'analyse géostatistique de variables régionalisées, d'interpolation et de maillage de ces variables, de réduction par filtrage des champs de potentiel à l'aide de la transformée de Fourier, de représentation cartographique et de superposition des couches d'information géoscientifique sont développés et appliqués à des études de cas réels.

Plusieurs systèmes d'information géographique sont développés pour intégrer les données géoscientifiques disponibles dans une région d'étude et calculer des indices de favorabilité minérale ou de vulnérabilité à un risque naturel donné ou à la contamination des eaux souterraines de cette région.

Remarque : Cours réservé exclusivement aux étudiantes et étudiants qui n'ont pas suivi le cours GGL4602 Intégration des données géoscientifiques.

**GEO9403 ANALYSE DE BASSINS : PRINCIPES ET MÉTHODES (3 CR.)**

Principe de stratigraphie. Analyse séquentielle et modèles de faciès. Zonation biostratigraphique et paléocéologique. Chronostratigraphie et géochronologie. Séismostratigraphie. Magnétostratigraphie. Cycles stratigraphiques régionaux et globaux à travers le temps. Paléogéographie. Travaux pratiques : traitement informatique des données stratigraphiques, gestion de projet.

**GEO9601 GÉOCHIMIE DE HAUTE TEMPÉRATURE (3 CR.)**

Propriétés des éléments chimiques et leur distribution dans les roches. Éléments compatibles et incompatibles au cours des processus magmatiques de fusion et de cristallisation. Utilisation des diagrammes de variation, analyse statistique des données, calculs et modèles pétrogénétiques de séquences volcaniques. Applications à l'ordinateur. Rapport final et examen oral.

**GEO9604 GÉOLOGIE STRUCTURALE AVANCÉE (3 CR.)**

Étude des roches déformées. Analyse de la déformation enregistrée par les tectonites et des mécanismes géologiques qui engendrent cette déformation. Reconnaître les éléments de la déformation finie dans une tectonite. Approfondir les concepts de la déformation progressive et de la déformation finie. Comprendre les mécanismes de déformation des grandes structures tectoniques. Faire la synthèse sur un aspect de la déformation des roches.

**GEO9911 EXCURSION GÉOLOGIQUE (3 CR.)**

Ce cours, offert occasionnellement, comprend une excursion géologique d'une dizaine de jours, au Québec ou ailleurs dans le monde, dont les concepts ciblés sont examinés préalablement puis affinés et synthétisés par les étudiantes et étudiants sous supervision des professeures et professeurs impliqués. Le cours comporte donc trois volets :

- 1) des lectures préparatoires avec ou sans ateliers,
- 2) l'excursion, avec un rapport de terrain ;
- 3) un travail de session ou des ateliers subséquents préparés par les étudiants.

Une participation financière de la part des étudiants est exigée pour les coûts d'excursion.

**GEO9930 GÉODYNAMIQUE CONTINENTALE (3 CR.)**

Évolution tectonostratigraphique et structurale de différents types d'orogènes. Revue détaillée des principales caractéristiques lithologiques, structurales et métamorphiques de différents types de chaînes orogéniques récentes et anciennes. Visites de terrains, principalement des Appalaches du Québec, avec accent sur la caractérisation structurale d'unités rocheuses déformées et métamorphisées, et sur les implications tectoniques découlant des structures observées.

Remarque : Les frais de terrain sont à la charge des étudiantes et étudiants.

**GGL7451 PÉTROPHYSIQUE (3 CR.)**

La caractérisation géophysique des roches profondes et des fluides associés est effectuée en utilisant des instruments de mesure qui sont introduits dans des forages (diagraphies). Pour chaque instrument, le cours expose la physique fondamentale et le fonctionnement et porte aussi sur l'interprétation des données.

**GLG6000 GÎTES MINÉRAUX (3 CR.)**

Ce cours permet à l'étudiant de développer son esprit de synthèse et son jugement critique vis-à-vis des principaux modèles de pétrogenèse des roches magmatiques et métamorphiques.

La connaissance et l'application de ces modèles permettent de reproduire et d'expliquer les variations minérales, géochimiques et les conditions thermobarométriques de formation des suites de roches plutoniques, volcaniques et métamorphiques. Présentations orales, discussions en classe, comptes rendus de lectures et rapport synthèse de recherche par écrit.

**GLG7121 ANALYSES DES GÉOMATÉRIAUX (3 CR.)**

Éléments de minéralogie des argiles (phyllosilicates). Analyses minéralogiques par diffractométrie des rayons X (DRX), analyse thermogravimétrique (ATG) et analyse thermique différentielle (ATD). Microanalyse par microsonde électronique et microscopie électronique à balayage (MEB) couplée à des facilités d'analyse chimique (EDXA) et d'analyse automatique d'images. Analyses granulométriques et microporosimétriques. Propriétés physicochimiques (surface spécifique, capacité d'échange ionique, limites d'Atterberg, S). Influence des caractéristiques des sols fins sur leur comportement géotechnique et application aux sols fins du Québec et d'ailleurs. Familiarisation avec les techniques précédentes à l'aide de démonstrations et de travaux pratiques sur deux échantillons, dont un sol fin imposé et un autre matériau plus pertinent au domaine de recherche de l'étudiant(e).

**GLG7401 PÉTROLOGIE IGNÉE ET MÉTAMORPHIQUE AVANCÉE (3 CR.)**

Ce cours permet à l'étudiant de développer son esprit de synthèse et son jugement critique vis-à-vis des principaux modèles de pétrogenèse des roches magmatiques et métamorphiques.

La connaissance et l'application de ces modèles permettent de reproduire et d'expliquer les variations minérales, géochimiques et les conditions thermobarométriques de formation des suites de roches plutoniques, volcaniques et métamorphiques. Présentations orales, discussions en classe, comptes rendus de lectures et rapport synthèse de recherche par écrit.

**GLG7412 BIOSÉDIMENTOLOGIE (3 CR.)**

Ce cours traite de la sédimentologie sous l'influence des organismes. Il regroupe des thèmes comme la production de matériaux et de biomatériaux, la biominéralisation, la biodiagenèse, l'organominéralisation, la matière organique naturelle (des biopolymères aux inclusions d'hydrocarbures), les grands systèmes biosédimentaires, l'authigenèse, la diagenèse tardive. L'observation se fait de l'échelle microscopique à l'échelle du bassin sédimentaire. Méthodes : coupes minces de microtomes et lames minces

pétrographiques ; éléments mineurs et en traces (Ca, Mg, Fe, Sr) ; isotopes stables (principalement C, O) ; éléments de terres rares ; cathodolumoscopie, fluoroscopie (eaux naturelles, sédiments, roches carbonatées). Le cours inclut la préparation d'un séminaire.

**GLG7422 GÉOCHIMIE ISOTOPIQUE**

Ce cours porte sur les bases fondamentales des isotopes radiogéniques et stables et leur application aux roches et minéraux pour mieux contraindre le moment et la nature de leur formation. Il aborde toutes les étapes de la géochimie isotopique des roches : choix d'un système isotopique, méthodes de préparation d'échantillons, analyses et contrôle de qualité, réduction des données, interprétation des données.

Remarque : Cours réservé exclusivement aux étudiantes et étudiants diplômés d'un baccalauréat en géologie ou génie géologique.

**GLG7441 MÉTALLOGÉNIE (3 CR.)**

Acquérir des notions avancées sur les processus de formation des gîtes minéraux ; connaître les caractéristiques et comprendre les processus spécifiques aux gîtes d'or, de Pb-Zn-Cu dans les bassins sédimentaires et de sulfures massifs à Cu-Zn-Au volcanogènes ; développer les capacités d'analyse critique des textes scientifiques.

**GLG7452 ANALYSE ET GESTION DES RISQUES NATURELS (3 CR.)**

Fournir les éléments de base nécessaires à l'analyse qualitative et quantitative du risque et de sa gestion ; illustrer les principaux types de risques naturels ; comprendre les causes des mouvements de masse (terrestres et marins) et des mécanismes de rupture à partir d'histoires de cas présentés lors de diverses conférences ou ateliers ; assimiler les principaux critères de rupture (sols et roches) et les lois rhéologiques ; maîtriser, par des travaux personnels, les outils d'analyse de la rupture et de la postrupture dans les talus ; appliquer l'analyse et la gestion du risque et déterminer les méthodes de mitigation appropriées à un cas particulier de cartographie du risque d'un secteur donné.

**GLG7454 INTÉGRATION DES DONNÉES GÉOSCIENTIFIQUES (3 CR.)**

Ce cours porte sur l'intégration des données géoscientifiques (géophysiques, géochimiques, géologiques, géotechniques et hydrogéologiques) en vue de développer pour une région d'étude un modèle géoscientifique utile aux différents domaines des sciences de la Terre.

Les concepts d'analyse géostatistique de variables régionalisées, d'interpolation et de maillage de ces variables, de réduction par filtrage des champs de potentiel à l'aide de la transformée de Fourier, de représentation cartographique et de superposition des couches d'information géoscientifique sont développés et appliqués à des études de cas réels.

Plusieurs systèmes d'information géographique sont développés pour intégrer les données géoscientifiques disponibles dans une région d'étude et calculer des indices de favorabilité minérale ou de vulnérabilité à un risque naturel donné ou à la contamination des eaux souterraines de cette région.

Remarque : Cours réservé exclusivement aux étudiantes et étudiants qui n'ont pas suivi le cours GGL4602 Intégration des données géoscientifiques.

## **CONCENTRATION 2 « GÉOINGÉNIERIE ET ENVIRONNEMENT »**

### **GCI3100 — CONCEPTION ET GESTION DES CHAUSSÉES (3 CR.)**

Rôle et caractéristiques des chaussées. Étapes de développement. Reconnaissance des sols et caractérisation des granulats. Principes généraux de conception des chaussées. Calcul structural des pavages : méthodes de calcul des pavages rigides, flexibles et semi-flexibles. Technique de fabrication et de pose des pavages, entretien et réhabilitation. Construction des routes : matériaux, méthodes de construction, processus de gel, le drainage et ses effets. Gestion des chaussées.

### **GCI7000 MÉCANIQUE DES SOLS AVANCÉE (3 CR.)**

Contraintes effectives dans les sols. Cas particulier des sols partiellement saturés. Cheminement de contraintes. Concepts d'état limite et d'état critique. Application aux sols cohérents et pulvérulents, saturés et non saturés. Effets de la structuration et de la destructuration ; effets de la vitesse et de la température ; comportement à petites déformations, perméabilité et consolidation ; relations entre les caractéristiques physiques et mécaniques.

### **GCI7022 ESSAIS IN SITU EN GÉO-INGÉNIERIE (3 CR.)**

Retour sur le comportement des sols et objectifs de la caractérisation des sols en géo-ingénierie. Présentation des différents appareils utilisés : échantillonneur, SPT, piézocône, scissomètre, pressiomètre, appareils pour essais géophysiques et appareils pour déterminer les caractéristiques hydrauliques. Finalement, synthèse sur les différentes méthodes permettant la détermination des paramètres requis pour la conception d'ouvrages.

### **GCI7076 GÉOTECHNIQUE DES RÉGIONS FROIDES (3 CR.)**

Description des régions froides. Propriétés physiques et mécaniques des sols gelés. Régime thermique dans le sol. Mécanique du gel dans les milieux poreux. Consolidation lors du dégel. Fondations pour les régions froides. Stabilité des pentes et investigations géotechniques.

### **GCI7082 DURABILITÉ DU BÉTON (3 CR.)**

Fabrication et composition des ciments et des ajouts minéraux, hydratation, microstructure des matrices cimentaires, mécanismes de transport, retraits et fissuration, propriétés et durabilité des granulats, durabilité au gel, agressions chimiques, corrosion des armatures.

### **GEO1501 MÉCANIQUE DES VAGUES (3 CR.)**

Nous commencerons par exposer la mécanique classique des fluides non visqueux qui formera la base pour l'étude des processus côtiers et des interactions avec les structures. Les équations de base décrivant les écoulements à surface libre seront tout d'abord présentées, puis la transformation des vagues et leur propagation en eau peu profonde seront introduites.

Les étudiantes et étudiants apprendront à choisir les théories de vague appropriées, depuis les théories en eau profonde à celles en eau peu profonde, c'est-à-dire, l'océan, les rivières et les lacs/réservoirs/ports (ondes stationnaires/balottement).

### **GEO1502 MÉTHODES DE CARACTÉRISATION DE LA SOUS-SURFACE (3 CR.)**

La protection des aquifères superficiels et l'évaluation du potentiel énergétique des réservoirs profonds demandent de bien connaître les caractéristiques de la sous-surface. Ces dernières sont évaluées à l'aide de méthodes de terrain en géologie, géophysique et hydrogéologie.

L'objectif de ce cours est de permettre aux participantes et participants de se familiariser avec les méthodes de caractérisation appliquées aux ressources en eau souterraine et réservoirs profonds (pétrole, gaz, CO<sub>2</sub>, géothermie).

À travers différents ateliers de terrain effectués dans la région de Québec, les étudiantes et étudiants réaliseront des levés de géologie structurale, des sondages avec méthodes électriques et profilage radar, l'échantillonnage des sols et de l'eau souterraine ainsi que des essais de perméabilité et de conductivité thermique.

### **GEO1504 TRANSFERT DE CHALEUR APPLIQUÉ AUX SCIENCES DE LA TERRE (3 CR.)**

Transfert de chaleur en conduction, convection et radiation, changement de phase. Méthodes analytiques et numériques. Problématiques appliquées aux sciences de la terre : géodynamique, géothermie, traçage thermique en hydrogéologie, pergélisol.

### **GEO9602 RÉHABILITATION IN SITU DES CONTAMINANTS ORGANIQUES (3 CR.)**

Principes et application des notions reliées à la contamination des sols et aquifères et à leur réhabilitation, avec une emphase sur les contaminants organiques immiscibles.

- 1) Modèles conceptuels de la migration des liquides immiscibles et caractérisation des sites contaminés.
- 2) Propriétés des contaminants immiscibles et partition dans les systèmes multiphasés.
- 3) Contrôle actif et passif des panaches de contaminants dissous.
- 4) Écoulement et diffusion des gaz en milieux poreux.
- 5) Les méthodes de réhabilitation par circulation d'air.
- 6) Transfert de chaleur dans les milieux poreux.
- 7) Les méthodes thermiques de réhabilitation.
- 8) Principes hydrostatiques et hydrodynamiques multiphasés.
- 9) Volumes et transmissivité des liquides immiscibles dans les sols.
- 10) Récupération des phases libres de liquides immiscibles dans les sols.
- 11) Déplacement immiscible et stabilité des fronts de déplacement.
- 12) Principes des solutions tensioactives et de polymères.
- 13) Réhabilitation des zones sources de liquides immiscibles.

### **ETE430 FORMES ET PROCESSUS EN MILIEU FLUVIAL (3 CR.)**

Cours axé sur le processus et les formes associés à la dynamique des cours d'eau. Hydrologie et érosion des versants : ruissellement, infiltration, hydrogramme, mouvement

de masse, érosion. Hydraulique : classification des écoulements, profils de vitesses, coefficient de frottement. Transport de sédiment : début d'entraînement, charge de fond, en suspension et dissoute. Morphologie : formes du lit, géométrie hydraulique, cours d'eau rectiligne, à méandres, à chenaux tressés. Problèmes environnementaux : sédiments contaminés, protection des rives, habitats. Travaux pratiques et excursions sur le terrain.

#### **GEO9801 TRAITEMENT DES MATÉRIAUX CONTAMINÉS (3 CR.)**

Ce cours a pour objectif de familiariser les participantes et participants avec les méthodes physiques de restauration des sols, des sédiments et des boues. Ces méthodes comprennent principalement les techniques de concentration gravimétriques et les techniques de flottation. Les procédés de caractérisation nécessaires à leur application seront aussi étudiés.

#### **GLG7101 EXCURSION EN GÉO-INGÉNIERIE (3 CR.)**

Ce cours vise à permettre aux participants d'acquérir des connaissances pratiques dans le domaine de recherche visé par l'excursion en géo-ingénierie, laquelle peut porter sur les disciplines du génie géologique, du génie civil et de la géologie appliquée. Les excursions peuvent toucher les risques naturels (ex. : glissements de terrain), l'hydrogéologie, les matériaux et les routes.

Le travail réalisé pour le cours comprend trois volets : la préparation et l'identification des problématiques de recherche ; l'excursion proprement dite impliquant au moins 5 journées complètes de terrain, incluant la prise de données de l'observation, et finalement la production d'un rapport en versions écrite et audio-visuelle. Travail en équipe ou individuel.

#### **GLG7121 ANALYSE DES GÉOMATÉRIAUX (3 CR.)**

Éléments de minéralogie des argiles (phyllosilicates). Analyses minéralogiques par diffractométrie des rayons X (DRX), analyse thermogravimétrique (ATG) et analyse thermique différentielle (ATD). Microanalyse par microsonde électronique et microscopie électronique à balayage (MEB) couplée à des facilités d'analyse chimique (EDXA) et d'analyse automatique d'images. Analyses granulométriques et microporosimétriques. Propriétés physicochimiques (surface spécifique, capacité d'échange ionique, limites d'Atterberg, S). Influence des caractéristiques des sols fins sur leur comportement géotechnique et application aux sols fins du Québec et d'ailleurs. Familiarisation avec les techniques précédentes à l'aide de démonstrations et de travaux pratiques sur deux échantillons, dont un sol fin imposé et un autre matériau plus pertinent au domaine de recherche de l'étudiant(e).

#### **GLG7201 EAU SOUTERRAINE (3 CR.)**

Revue des principes de base décrivant l'écoulement des fluides dans les milieux géologiques (charge hydraulique, loi de Darcy, propriétés des matériaux). Présentation de l'hydrogéologie de milieux hétérogènes et complexes. Caractérisation des aquifères. Projet d'analyse hydrogéologique d'une région pour caractériser la ressource en eau souterraine.

Remarque : L'étudiant(e) qui a réussi le cours de premier cycle GGL-2600 Hydrogéologie n'a pas à suivre ce cours.

#### **GLG7202 MODÉLISATION EN HYDROGÉOLOGIE (3 CR.)**

Équations d'écoulement et transport. Méthodes de discrétisation. Modèles conceptuels. Conditions aux limites. Écoulement permanent et transitoire. Calibration. Étude de cas et utilisation de logiciels commerciaux pour simuler l'écoulement et le transport de masse en milieu poreux.

#### **GLG7203 HYDROGÉOLOGIE DES CONTAMINANTS (3 CR.)**

Caractérisation des sources de contaminants. Mécanismes de transport et processus physicochimiques d'atténuation des contaminants dans les nappes. Modèles d'écoulement et de transport. Vulnérabilité des terrains naturels à la contamination. Méthodes de laboratoire et de terrain pour l'évaluation des paramètres de transport.

#### **GLG7204 GESTION ET RESTAURATION DES NAPPES (3 CR.)**

Gestion des eaux souterraines : principes et applications. Prévention de la contamination. Détection de la contamination. Établissement de critères de décontamination. Biorestauration. Récupération et traitement des eaux. Traitement des sols. Politiques et réglementation québécoises. Histoires de cas.

#### **GLG7452 ANALYSE ET GESTION DES RISQUES NATURELS (3 CR.)**

Fournir les éléments de base nécessaires à l'analyse qualitative et quantitative du risque et de sa gestion ; illustrer les principaux types de risques naturels ; comprendre les causes des mouvements de masse (terrestres et marins) et des mécanismes de rupture à partir d'histoires de cas présentés lors de diverses conférences ou ateliers ; assimiler les principaux critères de rupture (sols et roches) et les lois rhéologiques ; maîtriser, par des travaux personnels, les outils d'analyse de la rupture et de la postrupture dans les talus ; appliquer l'analyse et la gestion du risque et déterminer les méthodes de mitigation appropriées à un cas particulier de cartographie du risque d'un secteur donné.

#### **GLG7454 INTÉGRATION DES DONNÉES GÉOSCIENTIFIQUES (3 CR.)**

Ce cours porte sur l'intégration des données géoscientifiques (géophysiques, géochimiques, géologiques, géotechniques et hydrogéologiques) en vue de développer pour une région d'étude un modèle géoscientifique utile aux différents domaines des sciences de la Terre.

Les concepts d'analyse géostatistique de variables régionalisées, d'interpolation et de maillage de ces variables, de réduction par filtrage des champs de potentiel à l'aide de la transformée de Fourier, de représentation cartographique et de superposition des couches d'information géoscientifique sont développés et appliqués à des études de cas réels.

Plusieurs systèmes d'information géographique sont développés pour intégrer les données géoscientifiques disponibles dans une région d'étude et calculer des indices de favorabilité minérale ou de vulnérabilité à un risque naturel donné ou à la contamination des eaux souterraines de cette région.

Remarque : Cours réservé exclusivement aux étudiant(e)s qui n'ont pas suivi le cours GGL-4602 Intégration des données géoscientifiques.

**COURS COMMUNS AUX DEUX CONCENTRATIONS**

Des cours spéciaux peuvent être offerts par le programme de manière à refléter des besoins ponctuels de formation spécifique.

**GEO9610 SUJET SPÉCIAUX (GÉOLOGIE) (3 CR.)**

**GEO9611 SUJET SPÉCIAUX (GÉOLOGIE) (2 CR.)**

**GEO9612 SUJETS SPÉCIAUX (GÉOLOGIE) (3 CR.)**

**GEO9613 SUJETS SPÉCIAUX (GÉOLOGIE) (3 CR.)**

**GEO9614 SUJETS SPÉCIAUX (GÉOLOGIE) (3 CR.)**

**ETE513 COURS SPÉCIAUX (1 CR.)**

**ETE514 COURS SPÉCIAUX (1 CR.)**

**ETE515 COURS SPÉCIAUX (1 CR.)**

**ETE523 COURS SPÉCIAUX (2 CR.)**

**ETE524 COURS SPÉCIAUX (2 CR.)**

**ETE525 COURS SPÉCIAUX (2 CR.)**

**ETE533 COURS SPÉCIAUX (3 CR.)**

**ETE534 COURS SPÉCIAUX (3 CR.)**

**ETE535 COURS SPÉCIAUX (3 CR.)**

**ETE543 COURS SPÉCIAUX (4 CR.)**

**ETE544 COURS SPÉCIAUX (4 CR.)**

**ETE545 COURS SPÉCIAUX (4 CR.)**

**GSO6082 GESTION DE PROJETS (TÉLÉ-UNIVERSITÉ) (3 CR.)  
OU GLG7601 STAGE DE RECHERCHE (UNIVERSITÉ LAVAL)**

**ETE 432 GÉOSCIENCE DES DONNÉES (3 CR.)**

Ce cours constitue une introduction à la programmation et à l'apprentissage automatique (machine learning). L'étudiant se familiarisera avec la programmation grâce à Python, un langage de programmation populaire auprès de la communauté scientifique pour sa facilité d'utilisation. L'étudiant sera initié à tous les outils courants de la programmation scientifique, c'est-à-dire les bibliothèques de calcul haute performance, d'entreposage de données et de visualisation de données. L'étudiant apprendra les bases de l'apprentissage automatique avec une bibliothèque y étant dédiée, scikitlearn. L'étudiant se familiarisera avec la gamme d'algorithmes courants de l'apprentissage machine. À terme, l'étudiant sera en mesure de construire sa propre banque de données, de la nettoyer, de superviser l'entraînement d'un modèle d'apprentissage machine, ainsi que de quantifier et de qualifier sa performance. L'étudiant sera alors en mesure d'appliquer l'apprentissage machine aux géosciences et, plus particulièrement, à ses travaux de recherche. L'étudiant sera amené à acquérir un savoir-faire en science des données grâce à la réalisation d'exercices dirigés et de travaux pratiques tout au long de ce cours. En somme, ce cours permettra à l'étudiant de développer sa polyvalence et d'améliorer son efficacité en recherche.

**THÈSE (81 CRÉDITS)****THÈSE (78 CR.)**

Chaque étudiant est tenu de rédiger une thèse qui démontre l'aptitude de l'auteur à mener à bien une recherche originale. Cependant, avec l'autorisation du comité de programmes, la thèse peut être constituée en grande partie de publications, et ce, conformément au règlement et aux modalités et règles de présentation des mémoires et thèses à l'INRS.