

CENTRE EAU TERRE ENVIRONNEMENT DE L'INRS

MAÎTRISE PROFESSIONNELLE EN SCIENCES DE LA TERRE — TECHNOLOGIES ENVIRONNEMENTALES

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
3525	MAÎTRISE PROFESSIONNELLE EN SCIENCES DE LA TERRE — TECHNOLOGIES ENVIRONNEMENTALES	Maître ès sciences, M. Sc.	Quarante-cinq

OBJECTIFS

Le programme de maîtrise avec essai en sciences de la Terre est une maîtrise professionnelle spécialisée en technologies environnementales.

Un nombre important de disciplines sont confrontées à des problèmes de nature environnementale sur le marché du travail. En pratique, les approches de résolution des problèmes sont interdisciplinaires et requièrent des connaissances variées provenant d'un ensemble de disciplines. La maîtrise professionnelle vise les technologies environnementales utilisées dans la pratique des génies civil, chimique, géologique et agroalimentaire, ainsi que dans celle des sciences environnementales du sol dans la décontamination des sols, des eaux et de l'air, le recyclage des déchets et la prévention de la pollution.

Ce programme de maîtrise avec essai est offert de façon commune et coordonnée suite à la concertation de cinq programmes de maîtrise déjà existants : la maîtrise en génie agroalimentaire, la maîtrise en génie chimique, la maîtrise en génie civil, la maîtrise en sciences de la Terre et la maîtrise en sciences environnementales du sol. L'intégration d'étudiantes et d'étudiants de différentes formations au sein des mêmes cours leur permettra de s'ouvrir au travail interdisciplinaire en environnement, par l'acquisition de connaissances propres à d'autres disciplines ou par la réalisation de travaux d'équipe et de projets d'intégration. Le diplôme délivré porte la mention « maîtrise en sciences de la Terre (concentration en technologies environnementales) ».

CONDITIONS D'ADMISSION

Être titulaire d'un diplôme de premier cycle en géologie ou génie géologique, ou d'un diplôme jugé équivalent, ou présenter un acquis de scolarité et d'expérience pratique jugé équivalent, constitue une exigence minimale d'admission à ce programme. La personne candidate doit avoir conservé une moyenne cumulative de 3,0 sur 4,3 ou l'équivalent pour la scolarité reconnue comme base d'admission. Les titulaires d'un diplôme

de premier cycle dans une discipline connexe aux sciences de la Terre ou à la géologie sont aussi admissibles à ce programme s'ils ont conservé une moyenne de 3,0 sur 4,3 ou l'équivalent ; ils pourront toutefois se voir imposer, compte tenu de leur préparation antérieure, une scolarité complémentaire composée de cours du premier cycle.

RÉGIME D'ÉTUDES ET DURÉE DES ÉTUDES

- Temps complet : 2 ans
- Temps partiel : 4 ans

LISTE DES ACTIVITÉS

(Sauf indication contraire, les cours comportent 3 crédits.) La maîtrise professionnelle en sciences de la Terre – technologies environnementales comporte 45 crédits, dont un essai de 6 crédits, 9 crédits d'activités obligatoires et 30 crédits pour les cours optionnels.

Ce programme est axé sur les techniques environnementales. Il est structuré à partir de cours généraux communs à plusieurs spécialisations, de cours spécialisés dans le domaine des technologies environnementales à l'extérieur et dans la discipline des personnes inscrites au programme.

Le membre étudiant choisit ses cours optionnels en fonction de son domaine de spécialisation. Les cours optionnels peuvent être choisis dans les cours du programme ou dans un programme connexe. Le choix doit être approuvé par le comité de programmes.

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.

ACTIVITÉS OBLIGATOIRES (15 CR.)**ETE101 COMMUNICATION ET ÉTHIQUE SCIENTIFIQUE (3 CR.)**

Ce cours est obligatoire pour les étudiantes et étudiants des programmes de maîtrise en sciences de la Terre et en sciences de l'eau (recherche et professionnelle). Il est offert en option aux étudiantes et étudiants de doctorat en sciences de l'eau et de la Terre. Il vise à fournir des outils de base en communication et en éthique scientifiques essentiels pour poursuivre une carrière scientifique, tant dans le secteur universitaire que gouvernemental et privé. Les diverses notions abordées sont présentées pour s'intégrer les unes aux autres.

ECN6951 DÉVELOPPEMENT DURABLE, RESSOURCES ET ENVIRONNEMENT (3 CR.)

Ce cours est un survol systématique du problème du développement durable dans un monde où l'usage des ressources épuisables est nécessaire, en particulier les ressources environnementales.

L'analyse de ce problème est faite selon deux voies inséparables, l'une qualifiée de positive et l'autre de normative, en ce sens qu'elle propose des interventions de nature politico-économique.

MNG6009 SYSTÈMES DE GESTION DU DÉVELOPPEMENT DURABLE (3 CR.)

Les participantes et participants sont amenés à prendre conscience de la complexité et des enjeux de la gestion environnementale à partir d'études de cas, d'exemples vécus et de réflexions plus théoriques. Les systèmes de gestion environnementale, plus particulièrement les normes ISO 14000, servent de toile de fond à une analyse plus globale des aspects humains et stratégiques de la prise en compte du développement durable par les organisations.

Remarque : L'étudiante ou l'étudiant qui a suivi le cours MNG2110 Développement durable et gestion des organisations au 1er cycle ne peut s'inscrire à ce cours.

GEO0301 ESSAI (TECHNOLOGIES ENVIRONNEMENTALES) (6 CR.)

Activité d'intégration en technologies environnementales

ACTIVITÉS OPTIONNELLES (30 CR.)**RÈGLE 1 (3 CRÉDITS PARMIS LES ACTIVITÉS DE LA RÈGLE 1)****DRT7034 DROIT DE L'ENVIRONNEMENT ET CONTRÔLE DE LA POLLUTION (3 CR.)**

Étude des régimes juridiques de protection de l'environnement ayant pour objet le contrôle de la pollution au Canada.

Survol historique de l'évolution, des fondements et des principes du droit de l'environnement avec accent sur les principaux régimes d'autorisation relevant du droit québécois et fédéral.

Pouvoirs de contrôle et de surveillance et régimes de responsabilité administrative, civile et pénale applicables aux activités polluantes et à ceux qui les dirigent.

Interrelations existantes entre les différents régimes applicables. Interactions entre les activités polluantes,

l'administration publique et les droits du public en matière de qualité environnementale et de mise en œuvre du développement durable.

ETE407 INTRODUCTION À L'ADMINISTRATION PUBLIQUE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT (3 CR.)

Ce cours vise à montrer l'importance qu'il faut attribuer à l'étude des dimensions humaines des problèmes de l'eau et de l'environnement ainsi qu'à la compréhension des constituants institutionnels, organisationnels, sociaux et technologiques de leurs solutions. La problématique multidisciplinaire à laquelle est confrontée l'administration publique est mise en évidence et il est dès lors possible d'expliquer et de prédire les comportements humains responsables de la gouvernance parfois déficiente de l'eau et de l'environnement. En ce sens, quelles sont les connaissances de base sur les processus régissant les interactions entre la société et la nature et de quelle façon mettre en œuvre des programmes publics capables de corriger ou d'éviter les problèmes de qualité de vie pouvant être causés par son exploitation ? Quels sont les divers concepts ou théories pouvant être appliqués à la solution des problèmes que rencontre l'administrateur public et au développement de mécanismes de prise en charge par la société des problèmes rattachés à l'eau et l'environnement ? Le cours permettra ainsi à la population étudiante de se familiariser avec certains outils de l'administration publique vis-à-vis l'eau et l'environnement. Un survol des principales législations canadiennes et québécoises sera effectué afin de cerner l'importance du statut juridique de l'eau et de l'environnement et comment ce statut devient un déterminant important de la mise en œuvre des outils de gouvernance de l'eau et de l'environnement. Le cours comporte 9 chapitres regroupant les définitions et concepts, les différents problèmes rencontrés, les approches de gouvernance incluant les dimensions juridiques canadiennes et québécoises, les enjeux et les tendances en matière de gouvernance, les aspects de géopolitique de l'eau et de l'environnement ainsi que les liens entre le changement climatique et l'eau. L'évaluation du cours s'effectue par la préparation d'un exposé oral et d'un rapport sur un thème pertinent au contenu du cours.

RÈGLE 2 (9 À 12 CRÉDITS PARMIS LES ACTIVITÉS DE LA RÈGLE 2)**GGL6001 PROJETS EN HYDROGÉOLOGIE (3 CR.)**

Cours d'intégration dans lequel les étudiantes et étudiants réalisent des projets dans le domaine de l'hydrogéologie.

Le cours couvre les notions suivantes : les principes de la recherche en eau souterraine, les méthodes de forage, la conception d'un puits de captage, les méthodes d'évaluation des périmètres de protection et de vulnérabilité des aquifères, la préparation d'appels d'offres professionnels ainsi que l'encadrement légal lié à l'exploitation des eaux souterraines au Québec.

Les projets, réalisés individuellement et en équipe, font l'objet de rapports détaillés et sont réalisés en consultant les normes, les recommandations et les lois publiées par les différents organismes professionnels et réglementaires.

GLG6001 ENVELOPPES FLUIDES TERRESTRES (3 CR.)

Ce cours s'adresse à un auditoire qui s'intéresse aux propriétés physiques et géochimiques des enveloppes fluides terrestres soit : l'hydrosphère (incluant la cryosphère) et l'atmosphère.

Ces propriétés sont mises dans une perspective évolutive depuis leur formation et dans une perspective actuelle où les interactions biologiques et anthropiques sont de plus en plus discutées dans un contexte de changements climatiques globaux.

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'étudiante ou l'étudiant.

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 réglementations québécoises. Histoires de cas.

GLG7205 ÉCOULEMENT MULTIPHASE EN MILIEUX POREUX (3 CR.)

Processus de transfert en milieux poreux avec une emphase sur l'écoulement multiphase. Propriétés des fluides et des milieux poreux. Écoulement saturé. Écoulement et diffusion des gaz. Transfert de chaleur. Contaminants immiscibles et systèmes multiphases. Migration des liquides immiscibles. Hydrostatique et hydrodynamique multiphases. Volumes de liquide immiscible. Déplacement immiscible. Récupération des phases libres et résiduelles. Principes de modélisation numérique.

GLG7412 BIOSÉDIMENTOLOGIE (3 CR.)

Ce cours traite de l'influence des organismes sur la sédimentologie à l'échelle géologique.

Il regroupe des thèmes tels que la paléontologie, la systématique, la biominéralisation, la taphonomie, la diagenèse, l'organominéralisation, la matière organique naturelle (depuis les biopolymères jusqu'aux inclusions d'hydrocarbures) et les grands écosystèmes biosédimentaires.

L'observation se fait de l'échelle microscopique jusqu'à l'échelle du bassin sédimentaire. Les matériaux utilisés comprennent les coupes minces réalisées au microtome, les lames minces pétrographiques ainsi que les spécimens macroscopiques d'invertébrés marins (fossiles et récents). Les autres sujets prioritaires sont la révolution cambrienne, la biominéralisation et le climat, les événements océaniques-anoxiques et les épisodes d'acidification des océans.

Remarque : L'étudiante ou l'étudiant qui a déjà suivi le cours de premier cycle GLG-1006 ne peut s'inscrire à ce cours.

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

GLG7452 ANALYSE ET GESTION DES RISQUES NATURELS (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 réglementations québécoises. Histoires de cas.

GLG7453 QUATERNAIRE ET ANALYSE DE TERRAIN (3 CR.)

Méthodes et techniques particulières à l'étude des dépôts quaternaires, processus et environnements sédimentaires, caractérisations et propriétés des dépôts meubles, éléments stratigraphiques, analyse des terrains à l'aide de photographies aériennes et de la télédétection, la photo-interprétation appliquée aux projets en génie et en environnement.

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.

ETE403 SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE (3 CR.)

Cours d'initiation de système d'information géographique.

Il a pour objectif de permettre aux étudiantes et étudiants de maîtriser les notions de base relatives à la collecte et à la manipulation de l'information spatiale. Il vise également à offrir aux étudiantes et étudiants une expérience pratique des systèmes les plus connus pour la gestion et la diffusion des données géospatiales.

ETE412 TÉLÉDÉTECTION ENVIRONNEMENTALE (3 CR.)

Ce cours est une introduction à la télédétection tant à ses principes physiques qu'aux capteurs utilisés (satellites, aéroportés, drones) et aux principales applications en sciences de l'eau et en sciences de la Terre. De plus, ce cours permet aux étudiantes et étudiants de se familiariser aux méthodes et techniques de traitement numérique d'image de télédétection comme création des composés colorés, rehaussement, filtrage, analyse des composantes principales, théorie des indices spectraux et classification, et sur les corrections des images de télédétection (atmosphériques, radiométrique, géométriques et topographiques). La partie pratique permet d'introduire les membres étudiants aux principes de base des méthodes de traitements numériques des images et discuter des domaines d'applications et de recherches de la télédétection.

Préalable : ETE403 Systèmes d'information géographiques

ETE419 GÉOSTATISTIQUE (3 CR.)

Ce cours vise à fournir les bases en analyse spatiale statistique, avec une emphase sur les méthodes d'interpolation. On y présente les bases de l'analyse statistique de la variabilité de données spatiales. L'analyse des processus ponctuels et l'entropie sont d'abord présentées. Par la suite, la majorité des cours sont consacrés à l'apprentissage de méthodes de krigeage (simple, ordinaire, en bloc, universel, disjonctif, topologique, multivarié et simulations).

ETE421 GESTION ET TRAITEMENT DE MATIÈRES RÉSIDUELLES DANGEREUSES ET RÉHABILITATION DES SOLS CONTAMINÉS (3 CR.)

La première partie du cours vise à renseigner sur la loi sur la gestion des matières résiduelles dangereuses et son interaction avec la loi sur l'enfouissement et l'incinération des matières résiduelles. Un survol technique des modes de gestion des matières résiduelles dangereuses est aussi présenté en mettant en relief ce qui est fait dans ce secteur au Québec. La plus grande partie du cours porte sur la problématique de la réhabilitation des terrains contaminés. Au fil de leur industrialisation, les pays développés ont contaminé une partie de leur territoire, en grande partie du fait d'une gestion inadéquate de leurs matières premières, produits finis et rejets industriels. Au début des années 80, la résurgence en plein cœur de milieux habités de résidus déversés ou enfouis des décades plutôt a constitué une prise de conscience de la nécessité de changer les pratiques et modes de gestion. Il s'est également avéré nécessaire de gérer l'imposant passif environnemental que constitue ce legs, entre autres dans le cadre de la revitalisation et de la densification du milieu urbain. Pour ce faire, des lois, règlements, guides techniques, programmes ont été adoptés. Des milliers de terrains ont été caractérisés et réhabilités. Une expertise s'est créée, tant dans le domaine public que privé et une industrie de la réhabilitation a vu le jour, comprenant entre autres une trentaine de lieux de traitement et l'utilisation de plus en fréquente de technologies de décontamination in situ.

ETE424 ISOTOPIE ENVIRONNEMENTALE (3 CR.)

Ce cours vise à enseigner les principes et les applications des isotopes en tant « qu'empreintes digitales » des molécules chimiques dans l'environnement. Après avoir intégré les notions de base (isotopes stables/radioactifs, fractionnement), on y voit comment les approches isotopiques peuvent être utiles dans les études environnementales, soit pour le traçage hydrologique, hydrogéologique et biogéochimique, ou encore pour suivre le transport et la dégradation des contaminants. On aborde l'utilisation des isotopes des principaux éléments présents dans le cycle hydrologique (C, H, N, O) et de quelques autres éléments utiles pour étudier le cycle de l'eau (ex. : Sr, Cl), le cycle du carbone, la datation des eaux modernes et anciennes, les contaminants et leurs sources (forensics), en plus de quelques autres applications intéressantes en environnement ou autres. L'objectif principal est de familiariser les membres étudiants avec les notions de base nécessaires pour comprendre l'utilisation des isotopes, et à leurs faire découvrir les différentes applications possibles dans le domaine de l'environnement. Ce cours s'adresse autant aux étudiantes et étudiants qui ont un intérêt général pour le sujet sans toutefois vouloir appliquer eux-mêmes la géochimie isotopique à leurs projets, qu'à ceux et celles qui veulent faire de la géochimie isotopique l'un de leurs outils de travail. Les travaux de session seront adaptés en fonction de ces deux profils étudiants.

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, CO₂, 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.

GE01504 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.

GE09602 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.

GE09801 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.

ETE 432 GÉOSCIENCE DES DONNÉES (3 CR.)

Ce cours constitue une introduction à la programmation et à l'apprentissage automatique (machine learning). Le membre étudiant se familiarisera avec la programmation grâce à Python, un langage de programmation populaire auprès de la communauté scientifique pour sa facilité d'utilisation. Il 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. Le membre étudiant apprendra les bases de l'apprentissage automatique avec une librairie y étant dédiée, scikitlearn. Il se familiarisera avec la gamme d'algorithmes courants de l'apprentissage machine. À terme, il 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. Le membre étudiant sera alors en mesure d'appliquer l'apprentissage machine aux géosciences et, plus particulièrement, à ses travaux de recherche. Il 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 lui permettra de développer sa polyvalence et d'améliorer son efficacité en recherche.

RÈGLE 3 (6 À 12 CRÉDITS PARMIS LES ACTIVITÉS DE LA RÈGLE 3)

AME6008 GESTION ENVIRONNEMENTALE EN MILIEU RURAL (3 CR.)

Ce cours fournit les connaissances nécessaires en matière d'environnement s'appliquant aux processus d'aménagement du territoire en milieu rural. Utilisation du sol en milieu rural et qualité de l'environnement. Impacts de l'activité agricole sur l'environnement. Utilisation des sources d'eau souterraine et contraintes vis-à-vis l'approvisionnement en eau potable. Principes et problématiques de l'assainissement individuel. Élaboration des démarches d'intervention. Aspects réglementaires et rôle des différents paliers administratifs dans les processus de gestion. Nouvelles approches d'intervention au Québec. Études de cas et visite de terrain.

GAA7003 INFILTRATION ET DRAINAGE (3 CR.)

Théories des écoulements en milieux poreux saturés et non saturés. Application des équations différentielles appropriées aux problèmes de drainage et d'infiltration. Construction et analyse des modèles de bilan d'eau dans les sols.

GCH7007 BIOTECHNOLOGIE ENVIRONNEMENTALE (3 CR.)

Étude de la littérature scientifique et technique pour comprendre et pour apprécier le rôle et la contribution de la biotechnologie à la prévention et aux traitements de la pollution terrestre.

Remarque : Cours offert aux étudiantes et étudiants de l'Université Laval seulement.

GCH7014 TECHNOLOGIES DE SÉPARATION ET DE CAPTURE DE GAZ À EFFET DE SERRE (3 CR.)

L'objectif principal de ce cours est de permettre à l'étudiante ou l'étudiant la compréhension des caractéristiques des gaz à effet de serre (GES) et leur influence sur les changements climatiques, ainsi que des stratégies envisageables pour la réduction des émissions de dioxyde de carbone, le principal GES, y compris des technologies de capture, séquestration et valorisation. Contenu du cours : changement climatique et réchauffement climatique ; effet de serre ; gaz à effet de serre et leur influence sur les changements climatiques ; émissions des GES ; sources de dioxyde de carbone (CO₂), le principal GES ; stratégies envisageables pour la réduction des émissions de CO₂ ; capture du CO₂ ; séquestration du CO₂ ; valorisation du CO₂.

GCI7060 GESTION DES DÉCHETS DANGEREUX ET DES SITES CONTAMINÉS (3 CR.)

Introduction à la problématique de gestion des déchets dangereux et sites contaminés. Encadrement politique et législatif. Analyse des risques. Caractérisation des déchets dangereux. Méthodes de prévention et minimisation, traitement et élimination. Éléments de conception et dimensionnement des unités et des programmes. Réduction de l'impact sur l'environnement.

Remarque : Cours offert aux étudiantes et étudiants de l'Université Laval seulement.

GEX7001 HYDRAULIQUE FLUVIALE (3 CR.)

Régimes hydrauliques : courbes de remous ; écoulements non permanents (estuariens) ; écoulement secondaire et écoulement sous glace. Régimes sédimentologiques : début de l'entraînement, transport par charriage, saltation et suspension ; sédimentation. Morphologie fluviale et concept de régime d'équilibre. Travaux en rivières ; structures hydrauliques et respect du milieu naturel. Gestion de la glace dans les rivières et estuaires nordiques.

GEX7002 PRÉVISIONS ET PROJECTIONS HYDROLOGIQUES (3 CR.)

Modèle perçu ; schéma de surface ; diversité de modèles de simulation hydrologique ; vérification de la performance ; identification des paramètres ; assimilation des observations ; prévision hydrologique ; évaluation dynamique de l'incertitude ; approche multimodèle ; projection climatique ; mise à l'échelle ; projection hydrologique.

Remarque : Les travaux sont réalisés dans l'environnement MATLAB.

GEX7061 PRODUCTION D'EAU POTABLE (3 CR.)

Ce cours aborde les systèmes conventionnels de production d'eau potable (paramètres de qualité d'eau, objectifs de traitement, principaux procédés de traitement d'eau).

Remarques : Cours offert aux étudiantes et étudiants de l'Université Laval seulement. Ce cours ne peut être choisi si le cours de 1er cycle GEX-2003 a été suivi.

GEX7078 ANALYSE ET MODÉLISATION DE SÉRIES ENVIRONNEMENTALES (3 CR.)

Ce cours aborde de manière appliquée les objets suivants du domaine de l'analyse et de la modélisation de séries d'observations environnementales : corrélation et régression, analyse en composantes principales, analyse spectrale, analyse en ondelettes et réseaux de neurones (régression multivariée et classification).

Remarque : Les travaux de l'étudiante ou de l'étudiant sont réalisés dans l'environnement MATLAB.

GMN7009 RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES ET ENVIRONNEMENT (3 CR.)

Ce cours présente les ressources énergétiques, leur utilisation dans le monde moderne et leur effet sur l'environnement.

Il couvre la production, la transmission, la conversion et la consommation des énergies non renouvelables et renouvelables dans notre société.

Il souligne aussi l'aspect économique de leur extraction et l'impact environnemental de leur utilisation. Il présente enfin l'efficacité énergétique et la conservation de l'énergie.

SLS6016 SCIENCES ENVIRONNEMENTALES DU SOL (3 CR.)

État de l'environnement agricole et urbain. Éléments d'environnement des sols. Le sol, un système épurateur pour les composés organiques. Impacts des activités agricoles, urbaines et industrielles sur l'environnement du sol. Critères de qualité des sols et des eaux. Les contaminations diffuses et réactions des nitrates, phosphates et éléments traces dans les sols. Les contaminations localisées. Toxicité et réactions des xénobiotiques (pesticides et autres composés organiques) dans les sols et les eaux. Pollution atmosphérique et fonctionnement des sols. La gestion des résidus organiques et l'environnement. Moyens de lutte contre les pollutions organique, inorganique et bactérienne d'origine agricole. Valorisation agricole des biosolides. Processus de compostage de déchets organiques, normes et utilisation des composts. Méthodes de décontamination et de restauration de sites pollués par des composés organiques. Politiques et réglementation. Travail de synthèse portant sur la bioréhabilitation des sols ou des sites pollués.

Remarque : Pour les étudiantes et les étudiants de l'Université Laval seulement.

SLS7012 TRANSPORT DES SOLUTÉS EN MILIEU NON SATURÉ (3 CR.)

Révision des notions de physique du sol. Description du mouvement des solutés dans le sol. Modélisation déterministe et stochastique. Suivi de mouvement des solutés au champ : case lysimétrique, lysimètre à succion, réflectométrie métallique, carottage. Infiltration préférentielle. Quantification de la dispersion. Étude de cas pratiques.

SLS7032 MÉTAUX LOURDS ET ENVIRONNEMENT DU SOL (3 CR.)

Biosphère et anthroposphère. Sources potentielles de pollution. Éléments d'environnement du sol. Gestion durable des sols pour le développement et l'environnement. Critères de qualité des sols et des eaux. Classification des éléments chimiques. Écotoxicologie et biodisponibilité des métaux. Métaux lourds dans les sols, les plantes et les eaux. Relations entre la chimie des sols et l'environnement. Phénomènes d'adsorption et de désorption. Réactions d'oxydation et de réduction. Solubilité, chélation, spéciation et cinétiques des métaux dans les systèmes sol-solution. Interactions entre des substances humiques et des ions métalliques. Métaux lourds et microorganismes du sol. Critères d'évaluation et de décontamination. Valorisation et recyclage des déchets agricoles, industriels et miniers. Réhabilitation des sols pollués. Techniques de phytoremédiation. Restauration de sites dégradés. Travail de synthèse.

SLS7033 VARIABILITÉ SPATIOTEMPORELLE EN SCIENCES DU SOL (3 CR.)

Ce cours présente certaines techniques statistiques pour l'étude de la variabilité (variogramme, autocorrélation, périodogramme), leur utilisation en interpolation (krigeage), régression (cohérence, régression retard) ou analyse de variance (analyse de puissance), analyse spatiale de variance, appliquées aux différentes disciplines de la science du sol.

SLS7037 MESURES ET ACQUISITION DE DONNÉES ENVIRONNEMENTALES (3 CR.)

Ce cours porte sur les principes et instruments de mesure utilisés en biologie environnementale pour caractériser l'environnement biophysique.

Thèmes abordés : systèmes de mesure (capteurs, acqui-seurs), théorie de l'échantillonnage, caractéristiques des instruments (résolution, stabilité, temps de réponse), erreurs de mesure et précision, étalonnage, acquisition de données, installation d'une station météorologique.

SLS7040 MOUVEMENT DE GAZ DANS LES MILIEUX POREUX ET RELATIONS D'ÉCHANGES AVEC L'ENVIRONNEMENT (3 CR.)

Ce cours vise à donner les bases servant à reconnaître les sources, les puits et les réservoirs de gaz (ex. : O₂, CO₂, CH₄, N₂O) dans les milieux poreux (sols, substrats, compost, résidus miniers et autres).

L'étudiante ou l'étudiant apprend les principes de mouvement de gaz et d'échanges avec l'atmosphère et l'eau. Le cours permet à l'étudiante ou l'étudiant de comprendre les principales méthodologies de quantification, donne des bases d'utilisation et d'optimisation du mouvement de gaz, entre autres, dans les domaines de l'agriculture, la biologie, la géotechnique et le génie et d'en faire l'application à travers différentes études de cas associées à une gamme de domaines d'application.

ETE401 HYDROLOGIE (3 CR.)

Le cours vise à rendre les étudiantes et étudiants aptes à aborder des problèmes liés au cycle de l'eau et tout particulièrement à comprendre d'un point de vue physique les différents sujets de l'actualité qui concernent l'hydrologue (ex. : genèse des crues, formation de précipitations et de brouillard, évolution des climats, écoulements en rivière et en conduite afin d'approvisionner et desservir les usagers de la ressource).

ETE405 STATISTIQUES D'ÉCHANTILLONNAGE ET DE SUIVI (3 CR.)

Échantillonnage. Paramètres d'une population; type d'échantillonnage; aléatoire simple, stratifié, proportionnel, réparation optimale, information d'une variable supplémentaire; autocorrélation temporelle et spatiale. Suivi temporel. Séries de temps. Séries aléatoires, périodicités, tendances. Séries stationnaires et non stationnaires; définition de la dépendance linéaire, autocorrélation. Séries de Markov d'ordres un et deux; analyses de structures de persistance. Approche de Box et Jenkins, fonctions de transfert. Notion de contenu en information pour l'optimisation de l'échantillonnage temporel. Application à des données environnementales.

ETE408 SUIVI ENVIRONNEMENTAL DES ÉCOSYSTÈMES D'EAU DOUCE (3 CR.)

Prélèvement et préservation d'échantillons pour déterminer le statut trophique et la qualité de l'eau d'un lac et d'une rivière en zone urbaine. Exploration de diverses méthodes d'échantillonnage et d'analyses environnementales incluant la chimie de l'eau, l'identification du plancton, des diatomées et du zoobenthos. Critères pour le choix des protocoles, de la stratégie d'échantillonnage et des méthodes d'analyse. Instrumentation et équipement requis pour le suivi environnemental. Contrôle de qualité, fiabilité et validation des résultats. Programmes de suivi de la qualité de l'eau au Québec.

Règles de sécurité et accréditation des laboratoires. Introduction à la paléolimnologie comme un outil de suivi environnemental.

ETE410 ÉCOTOXICOLOGIE DANS UN MONDE EN CHANGEMENT (3 CR.)

Ce cours couvre les différentes catégories de contaminants, tant inorganiques qu'organiques avec un accent particulier sur les contaminants émergents. Ces derniers incluent notamment les terres rares, les perturbateurs endocriniens, les produits pharmaceutiques, les cyanotoxines. Les sources de ces contaminants seront abordées dont les nouveaux vecteurs tels que les produits de soins personnels et les nanoparticules. Nous passerons en revue comment les contaminants entrent en contact avec les organismes vivants et comment ils traversent les barrières biologiques. Les facteurs environnementaux et leurs rôles dans la biodisponibilité des contaminants seront examinés. Ce cours permettra également aux étudiants.es de se familiariser aux effets de ces contaminants sur la santé des organismes vivants. Ce cours explorera plus particulièrement les mécanismes d'action des produits chimiques et la complexité des réponses physiologiques chez le biote. Des avancées récentes seront présentées parmi des thèmes choisis : mutagenèse, bioaccumulation, perturbations du système endocrinien, stress oxydatif, toxicologie du développement et de la reproduction, etc. Les étudiants.es vont se familiariser avec les approches classiques de l'écotoxicologie par bioessais et par biomarqueurs, et apprendront à critiquer des articles scientifiques en lien avec l'écotoxicologie ainsi qu'à se familiariser avec les méthodes utilisées pour développer des critères de qualité de l'eau et du sol. Les méthodes existantes de traitement de ces contaminants à partir de différentes matrices environnementales seront également abordées.

ETE411 TRAITEMENT DES EAUX POUR LA PRODUCTION D'EAU POTABLE (3 CR.)

La première partie de ce cours aborde quelques procédés chimiques, physiques et physicochimiques couramment utilisés pour le traitement des eaux tout en indiquant les principes fondamentaux utilisés pour la mise au point de ces procédés. La deuxième partie expose des systèmes chimiques et physiques de désinfection des eaux tout en indiquant les mécanismes réactionnels d'oxydation des polluants susceptibles d'être présents dans l'eau. Quelques modèles mathématiques de prévision d'efficacité bactéricide sont aussi décrits. Sont présentés dans la troisième partie, des exemples typiques de filières de traitement d'eau de consommation pouvant être utilisés, et ce, en fonction des caractéristiques initiales de l'eau de brute.

ETE413 ANALYSE AVANCÉE DES IMAGES DE TÉLÉDÉTECTION (3 CR.)

Ce cours avancé sur l'analyse des images de télédétection s'adresse aux étudiantes et étudiants ayant une bonne connaissance théorique et pratique du traitement des images et des applications thématiques de la télédétection. En d'autres termes, si le cours ETE412 sur la télédétection environnementale a été réussi, ou si de solides connaissances en télédétection, en traitement d'images et en géomatique sont acquises, ce cours les aidera à améliorer leurs connaissances en matière d'analyse des données de télédétection provenant de technologies nouvelles et avancées. En particulier, les membres étudiants apprendront et travailleront avec des approches avancées d'apprentissage automatique et

d'apprentissage profond via des algorithmes à base des pixels et des objets.

Préalable : ETE412 Télédétection environnementale ou formation préalable en géomatique et en télédétection.

ETE415 BIOTECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT — MICROBIOLOGIE APPLIQUÉE AUX PROCÉDÉS INDUSTRIELS (3 CR.)

Ce cours fournira les informations concernant la microbiologie appliquée, le développement de bioprocédés et la valorisation des résidus municipaux et industriels. Ce cours sera orienté vers la production de produits à valeur ajoutée utilisant différents résidus (déchets) comme matière première. Ce cours permettra à la population étudiante d'obtenir les connaissances de base et les principes généraux de développement de bioprocédés pour la fabrication de produits à valeur ajoutée, l'utilisation des résidus en tant que matière première et le concept du zéro déchet.

Le cours sera basé sur les grandes lignes suivantes :

- Introduction aux principes fondamentaux.
- Production, traitement et élimination des boues d'épuration.
- Problème de contaminants dans les boues d'épuration.
- Prétraitement des résidus pour augmenter la biodégradabilité et le rendement du produit (biogaz, bioplastiques, etc.).
- Traitement anaérobie et efficacité énergétique.
- Concept neutre en énergie pour les procédés de traitement des eaux usées/disposition des boues d'épuration et/ou la récupération des eaux usées.
- Bioconversion de résidus en produits (biopesticides, bioplastiques, biocoagulants, hydrogène, éthanol, méthane).
- Bioconversion des matériaux lignocellulosiques et problèmes et défis rencontrés.
- Économie circulaire et réduction des émissions de gaz à effet de serre en ce qui concerne l'utilisation des déchets comme matière première pour les produits à valeur ajoutée.
- Progrès récents dans le domaine du développement de processus biotechniques (travail à domicile des membres étudiants sur le développement en cours).

ETE416 GESTION INTÉGRÉE DES RESSOURCES EN EAU (3 CR.)

Ce cours aborde les problèmes liés à la gestion de l'eau et propose des solutions selon un cadre de travail basé sur la gestion intégrée de l'eau par bassin versant. Les connaissances acquises seront : (i) la mise en place de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant; (ii) des notions de base dans les diverses disciplines en soutien à la gestion de l'eau par bassin versant, c'est-à-dire la modélisation hydrologique incluant la quantité et la qualité de l'eau de même que la construction de bases de données spatiales et attributs, la gouvernance, le développement durable, l'intégrité biologique ainsi que l'analyse économique des biens et services environnementaux.

ETE417 ASSAINISSEMENT DES EAUX USÉES (3 CR.)

Le présent cours a pour objectif de familiariser la population étudiante à l'assainissement des eaux usées municipales et industrielles. Ce document trace donc un survol des notions théoriques ainsi que des principales techniques physico-chimiques et biologiques employées pour l'épuration des eaux usées et le traitement des boues. Ce cours vise également à l'initier aux méthodes d'analyse physico-chimiques et

d'examen microbiologiques courants en assainissement des eaux. Ce cours en assainissement des eaux usées comprend un total de 25 chapitres. La première partie du cours apporte des connaissances de base en ce qui concerne les caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des eaux usées et la configuration générale des ouvrages d'assainissement des eaux usées. Les sections suivantes traitent des différents types de procédés utilisés pour le traitement des eaux usées, soient respectivement les procédés de prétraitement et traitement primaire, les procédés biologiques, les procédés physico-chimiques et les procédés électrochimiques. Par la suite sont abordés certains aspects périphériques au traitement des eaux usées, soit le contrôle de la corrosion des conduites et ouvrages d'assainissement en béton et la problématique associée à la présence de perturbateurs endocriniens. Les sections suivantes sont consacrées à la présentation des installations de traitement des eaux usées de faible capacité, soit les installations septiques communautaires et individuelles. Par la suite, un portrait de la situation en matière d'épuration des eaux usées municipales et industrielles au Québec et à l'étranger est présenté. Les chapitres suivants traitent des technologies de traitement et des modes de gestion des boues (biosolides) issues du traitement des eaux usées. L'évaluation du cours s'effectuera par trois examens à choix multiples avec accès libre aux notes de cours.

ETE 420 ÉTUDE D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX (3 CR.)

Ce cours aborde les sujets suivants : concepts de développement durable et d'impact, la législation pertinente au Québec et au Canada, les intervenantes et intervenants habituels en matière d'évaluation environnementale et leurs motivations diverses, les procédures d'évaluation locales et internationales, les étapes d'un dossier type, l'analyse de la qualité de l'étude d'impact, le rôle du public et les aspects sociaux, l'analyse de l'acceptabilité environnementale d'un projet, les règles d'éthique du personnel professionnel de l'évaluation, l'évaluation environnementale stratégique, la norme BNQ 21000, la grille d'analyse de développement durable de projets, etc.

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.

RÈGLE 4 (0 OU 3 CRÉDITS)

ETE6055 STAGE EN MILIEU PROFESSIONNEL (3 CRÉDITS)

Le stage en milieu professionnel a pour but d'appliquer les notions apprises par l'étudiant à la résolution de problèmes concrets en situation réelle. La prise de contact avec un milieu professionnel actif dans les domaines des sciences de la Terre en lien avec les technologies environnementales conduit l'étudiant vers une première expérience de transfert et

d'application des connaissances. Le stage est d'une durée minimum de 90 h, incluant la rédaction d'un rapport synthèse, et doit être réalisé à l'intérieur d'une session.