

DOCTORAT EN SCIENCES DE L'EAU

Code	Titre	Grade	Crédits
3461	DOCTORAT EN SCIENCES DE L'EAU	Philosophiae doctor, Ph. D.	Quatre-vingt-dix

OBJECTIFS

La compréhension des problèmes des ressources en eau et des milieux aquatiques nécessite l'apport de plusieurs disciplines scientifiques et leur résolution demande une approche multidisciplinaire réelle et intégrale. Le programme de doctorat en sciences de l'eau vise à former des chercheurs spécialisés capables de cerner et résoudre ces problèmes, et de répondre ainsi aux besoins sociaux qui se manifestent dans ce secteur. Il permet à l'étudiant d'élargir et d'approfondir ses connaissances dans le domaine de l'eau tout en lui permettant de se spécialiser dans un des champs d'études qui y sont reliés.

CONDITIONS D'ADMISSION

Être titulaire d'une maîtrise, ou l'équivalent, en sciences de l'eau ou dans tout autre discipline ou domaine pertinents des sciences pures ou appliquées. De plus, il doit y avoir adéquation entre la formation antérieure du candidat et celle requise pour entreprendre des études dans le programme d'enseignement visé.

Le candidat doit démontrer que ses orientations de recherche sont conformes aux objectifs des programmes de recherche qui supportent le programme d'enseignement visé.

Le candidat doit posséder un dossier académique de haute qualité, dont de très bons résultats scolaires d'au moins 3,2 (sur 4,3) ou l'équivalent.

Le candidat doit démontrer sa capacité à réaliser des recherches de qualité.

Le candidat doit avoir choisi un directeur de recherche et obtenu l'acceptation motivée de celui-ci.

Tout candidat doit avoir une connaissance suffisante de la langue française parlée et écrite.

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 l'eau comporte 90 crédits, dont 78 pour la thèse, 6 pour les cours et 6 pour l'examen doctoral.

La liste des activités disponibles pour l'année est publiée en juin. Un minimum d'inscriptions est exigé pour qu'une activité soit offerte.

Les cours des programmes en sciences de la Terre dont les sigles commencent par GEO et GLG sont considérés comme faisant partie du programme de doctorat en sciences de l'eau.

ACTIVITÉS AU CHOIX (6 CR.)

ETE401 HYDROLOGIE (3 CR.)

Introduction à l'hydrologie et à la météorologie. Précipitations, évaporation, évapotranspiration et fonte de neige. Hydrogramme unitaire. Influence des caractéristiques physiques du bassin versant sur l'écoulement. Écoulement de surface, hypodermique et de la nappe. Caractéristiques et propriétés des modèles statistiques et déterministes. Gestion des réservoirs. Utilisation d'un modèle hydrologique sur un bassin versant.

ETE402 LIMNOLOGIE : EAUX LACUSTRES ET EAUX COURANTES (3 CR.)

Introduction à la limnologie; limnologie physique; limnologie chimique et biologique: contenu dissous et particulaire, cycles de transformation, communautés biotiques et productivité biologique. Étude des lacs, aspects opérationnels. Régulation de la chimie des eaux courantes, paramètres usuels de la qualité de l'eau. Transport fluvial. Productivité biologique des eaux courantes. Influences du bassin versant et des aménagements physiques sur la qualité de l'eau.

ETE403 SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE (3 CR.)

Cours d'initiation de système d'information géographique. Il a pour objectif de permettre aux 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 étudiants une

expérience pratique des systèmes les plus connus pour la gestion et la diffusion des données géospatiales.

ETE404 GESTION DE L'EAU EN MILIEU URBAIN (3 CR.)

Ce cours offre un aperçu global de tous les aspects touchant à la gestion de l'eau en milieu urbain. Les différents thèmes abordés sont : le cycle de l'eau en milieu urbain ; le captage, le traitement et la distribution de l'eau potable ; la collecte, le transport et le traitement des eaux usées et pluviales ; la gestion des eaux pluviales et des réseaux de collecte en temps de pluie ; les critères de dimensionnement des ouvrages ; le diagnostic, l'entretien, la réhabilitation et le renouvellement des réseaux de conduites ; l'impact des changements climatiques sur l'eau et les infrastructures ainsi que l'adaptation à ces changements ; les défis liés à la gestion de l'eau en milieu urbain tels que la protection des cours d'eau, les aspects administratifs et l'intégration dans une perspective de développement durable.

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.

ETE406 MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES ET MODÉLISATION NUMÉRIQUE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT (3 CR.)

Ce cours vise à fournir les bases en mathématiques nécessaires pour le développement de modèles à base physique en sciences de l'eau et de la Terre. On y présente d'abord des notions de calcul différentiel et intégral et d'algèbre linéaire, avec un accent particulier sur les équations aux dérivées ordinaires et partielles. On aborde ensuite les méthodes numériques de résolution des équations algébriques, intégrales et différentielles. Du temps est également alloué pour la résolution d'exercices pratiques de modélisation.

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 des sédiments lacustres, du zoobenthos et des diatomées en rivière. 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. Représentation graphique, analyse statistique et interprétation des résultats. Règles de sécurité et accréditation des laboratoires. La participation aux sorties terrain, aux présentations orales et aux cours sera évaluée, ainsi qu'une présentation orale des résultats terrain, un examen de mi-parcours et un rapport sur l'ensemble des données effectué en équipe.

ETE409 CHIMIE PHYSIQUE DES EAUX DOUCES (3 CR.)

Ce cours a pour objectif général de faire découvrir aux étudiants les principes thermodynamiques de base qui permettent de décrire la complexité chimique des eaux naturelles et de faire des prédictions sur leur composition à l'aide de méthodes numériques et graphiques simples. Il vise spécifiquement la compréhension des grandes classes de réactions chimiques qui ont cours en milieu naturel, soit les réactions acides-bases, les réactions de précipitation-dissolution, et les réactions d'oxydoréduction, de sorption et de formation de complexes avec des ligands organiques et inorganiques. On insiste en outre sur le concept d'alcalinité et le rôle du CO₂ atmosphérique sur l'acidité des eaux naturelles. Ce cours s'adresse à tous les étudiants ayant une formation universitaire de premier cycle en sciences ou en génie et qui désirent comprendre les concepts de base de la chimie physique appliquée aux eaux douces afin de poursuivre des recherches multidisciplinaires ou faire carrière dans un domaine en lien avec la qualité de l'eau.

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

Dans le domaine du traitement des eaux, les législations en vigueur évoluent vers une sévérité croissante aussi bien en ce qui concerne les concentrations en polluants que les charges. Le traitement des eaux représente donc un défi majeur auquel doivent inéluctablement faire face, les ingénieurs, les pouvoirs publics, les gestionnaires et les chargés de projets et la communauté scientifique. D'une façon générale, l'efficacité des traitements varie en fonction de la concentration du polluant cible, de la concentration des autres substances l'accompagnant et de la forme sous laquelle les composés se présentent. Le polluant cible peut être solidement enrobé dans

une matrice minérale ou organique, adsorbé en surface ou sur des colloïdes ou combiné à une substance organique ou inorganique. Le choix d'une stratégie de traitement nécessite une investigation propre à chaque type d'eau brute (nature de l'eau) et les facteurs externes qui peuvent intervenir (disposition des sous-produits issus du traitement, aspect économique, contexte légal, etc.). Ce cours peut être scindé en trois parties principales :

La première partie de ce cours se propose de décrire quelques procédés chimiques, physiques et physico-chimiques couramment utilisés pour le traitement des eaux tout en indiquant de façon explicite les lois et principes fondamentaux utilisés pour la mise au point de ces procédés. La deuxième partie de ce cours se propose premièrement de décrire quelques systèmes chimiques et physiques de désinfection des eaux tout en indiquant les mécanismes réactionnels d'oxydation des polluants (composés inorganiques, organiques et germes pathogènes) susceptibles d'être présents dans l'eau. Par la suite, quelques modèles mathématiques de prévision d'efficacité bactéricide sont énumérés, suivis de la présentation du mode d'action des agents bactéricide et des facteurs ou paramètre pouvant influencer l'activité bactéricide. 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.

ETE412 PRINCIPES DE LA TÉLÉDÉTECTION ET SES APPLICATIONS EN SCIENCES DE L'EAU ET DE LA TERRE (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. Les objectifs du cours sont 1) de connaître les mécanismes d'interaction entre les ondes, la surface terrestre observée et l'atmosphère et comprendre le concept de signature spectrale des objets observés; 2) connaître les principaux types de capteurs utilisés en télédétection (optiques, thermiques, hyperspectrales; micro-ondes passives et actives) et comprendre leur fonctionnement et leur utilisation; 3) Connaître les ressources disponibles pour obtenir de l'information sur les satellites en opération, les types d'images et les produits disponibles, gratuits ou payants; 4) Découvrir les nombreuses applications de la télédétection en sciences de l'eau et en sciences de la Terre (hydrologie, limnologie, géologie, géomorphologie, glaciologie,...) tant à l'échelle continentale, régionale et locale.

ETE413 TRAITEMENT ET ANALYSE NUMÉRIQUE DES IMAGES DE TÉLÉDÉTECTION (3 CR.)

Ce cours est une introduction aux principales méthodes de traitement et d'analyse des données d'observation de la Terre provenant de capteurs satellitaires, aéroportés, ou de drones. Les objectifs du cours sont : 1) d'apprendre les notions de base de formation d'une image numérique et ses caractéristiques mathématiques et statistiques; 2) de connaître les essentielles étapes de prétraitement et rehaussement d'image (ex., transformation radiométrique, correction atmosphérique, rehaussement de contrastes, rapport de bandes, débruitage, ortho-rectification, mosaïquage, etc.); 3) d'apprendre les principales approches classiques et modernes (apprentissage automatique et intelligence artificielle) d'extraction d'informations comme les classifications (supervisées vs non

supervisées) des informations (objets, caractéristiques, etc.); détection des changements (couverture et/ou utilisation du sol, déforestation, catastrophes naturelles, etc.) ou des anomalies (pollutions au sol et au milieu aquatiques, etc.).

Après avoir appris les bases de l'analyse d'image, les étudiant(e)s auront l'occasion de travailler avec les données d'observation de la Terre provenant de capteurs multispectraux, hyperspectraux, thermiques, radar polarimétrique, lidar, ou de photogrammétrie par drone. Afin de maîtriser l'analyse des images, les étudiant(e)s se familiarisent à l'utilisation de quelques logiciels libres (ex., Quantum GIS, SNAP, Google Earth Engine) ou commerciaux (ex., Geomatica, eCognition). Finalement, les étudiant(e)s auront l'opportunité d'appliquer les deux aspects théories et pratiques d'analyse de l'observation de la Terre par un mini-projet thématique selon leur intérêt.

ETE414 ANALYSE DE DONNÉES MULTIVARIÉES ET SÉRIES TEMPORELLES, APPLICATIONS ENVIRONNEMENTALES (3 CR.)

Le cours est composé en trois principales parties : les approches descriptives multivariées (analyse en composantes principales, analyse canonique des corrélations, classification hiérarchique), les modèles de régression (régressions simple et multiple, hypothèses d'utilisation, choix de modèles, sélection de variables, méthode Ridge, méthode pas-à-pas, ANOVA simple), les modèles de séries temporelles (AR, ARMA, ARIMA, etc.). Des exemples d'application environnementale pour chaque partie seront traités en utilisant le logiciel R.

ETE415 BIOTECHNOLOGIE 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 aux étudiants 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 étudiants sur le développement en cours).

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

Le cours vise à rendre les étudiants aptes à aborder des problèmes liés à la gestion de l'eau et à proposer des solutions selon un cadre de travail basé sur la gestion intégrée de l'eau par bassin versant. À fin du cours, les étudiants auront acquis les connaissances nécessaires à la compréhension : (i) de la mise en place de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant ; et (ii) des notions de base dans les diverses disciplines en support 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. La formule pédagogique jumèle les exposés théoriques sur les notions de base, l'analyse d'articles ou rapports scientifiques, et les interventions de différents professionnels du milieu de la gestion des eaux. L'évaluation du cours est basée sur des travaux individuels liés aux objectifs (i) et (ii), ainsi que la réalisation d'un projet de groupe à l'aide du système de modélisation intégrée GIBSI (Gestion intégrée des Bassins versants à l'aide d'un Système informatisé) ou de la plateforme de modélisation hydrologique distribuée PHYSITEL/HYDROTEL. Les travaux individuels peuvent contribuer jusqu'à 20 % de l'évaluation finale, le reste reposant sur la réalisation du projet de groupe.

ETE417 ASSAINISSEMENT DES EAUX USÉES (3 CR.)

Le présent cours a pour objectif de familiariser l'étudiant 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 initier l'étudiant 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.

ETE418 OCCURRENCES ET RÉCURRENCES DES EXTRÊMES EN ENVIRONNEMENT (3 CR.)

Ce cours a pour objectif de former les étudiant-es à l'analyse fréquentielle. Les bases statistiques de l'analyse fréquentielle locale sont d'abord revues (fonctions de densité de probabilité, moments statistiques et fonctions génératrices de moments). Les familles de distributions statistiques utilisées en analyse fréquentielle sont revues et les méthodes d'ajustement de ces distributions sont expliquées (méthodes des moments, méthodes des moments pondérés, L-moments, maximum de vraisemblance). Les tests statistiques et critères d'adéquation pour évaluer l'ajustement des distributions statistiques aux données sont aussi présentés. Par la suite, les étudiant-es vont apprendre les étapes et fonctionnements de l'analyse fréquentielle locale non-stationnaire, l'analyse fréquentielle régionale et l'analyse fréquentielle multivariée.

ETE419 GÉOSTATISTIQUES (3 CR.)

Ce cours vise à fournir aux étudiant-es 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). Les évaluations incluent des travaux pratiques nécessitant une expérience en programmation. De plus, une revue de littérature et une présentation sur un logiciel d'analyse géostatistique complètent l'évaluation.

ETE420 ÉTUDE D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX (3 CR.)

L'étude d'impact sur l'environnement (ÉIE) vise à minimiser, voire empêcher ces répercussions. Elle est devenue un précieux outil d'aide à la décision faisant appel, dans une approche de développement durable, à une somme considérable de connaissances tout autant techniques et scientifiques que sociales et culturelles. Le cours traite entre autres de : concept de développement durable et le concept d'impact, la législation pertinente au Québec et au Canada, les intervenants habituels en matière d'évaluation environnementale et leurs motivations diverses, les procédures d'évaluation locales et internationales, les étapes d'un dossier type, du point de vue du rédacteur comme de celui du réviseur, 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 professionnel de l'évaluation, l'évaluation environnementale stratégique, la norme BNQ 21000, la grille d'analyse de développement durable de projets, la fonction conseil auprès d'un État pour mesurer la progression des secteurs publics et privés vers le développement durable (plan d'action de développement durable, bilan national de développement durable, mesure du progrès et de l'atteinte des cibles associées aux objectifs de développement durable (ODD) à l'horizon 2030, l'analyse multicritère comme outil d'aide pour effectuer une priorisation stratégique des cibles de développement durable.

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.

ETE422 HYDROMÉTALLURGIE (3 CR.)

Ce cours présente les concepts théoriques et notions pratiques associés aux différents procédés hydrométallurgiques utilisés pour l'extraction, la récupération et la purification des éléments métalliques à partir de matrices solides et liquides. Le premier chapitre de ce cours porte sur les procédés de pré-traitement et d'extraction des métaux à partir de matrices solides. Cette partie traite notamment des différentes options de lixiviation chimique et microbienne, ainsi que des techniques physiques et physico-chimique de pré-traitement des matrices solides. Le deuxième chapitre présente l'éventail des techniques utilisées pour la récupération des métaux à partir de solutions aqueuses. Ceci comprend notamment les techniques de précipitation, d'oxydation et de réduction, de coagulation et de floculation, de cémentation, d'adsorption et de biosorption, d'échange ionique, d'extraction par solvant, de flottation, de séparation électrochimique, de photocatalyse, de séparation membranaire et de cristallisation. Le troisième chapitre traite, pour sa part, du traitement des effluents chargés en métaux dont, principalement, les eaux minières et les drainages miniers, les effluents de placage métallique, les solutions de décapage et les effluents métallurgiques. Le quatrième chapitre expose les différentes filières hydrométallurgiques utilisables pour l'extraction et la récupération des éléments métalliques à partir de divers déchets industriels et urbains. Les matrices traitées sont notamment les boues de traitement des eaux et des effluents, les boues de carbure et de pigments, les déchets solides des industries de l'aluminium et de l'amiante, les catalyseurs usagés, les cendres d'incinération, les batteries et piles usagées, les déchets de chromate, les résidus de procédés photographiques, les panneaux solaires usagés, les différents déchets électroniques, les laitiers et scories métallurgiques, les poussières de cheminées industrielles et, bien sûr, les résidus miniers. Le cinquième chapitre montre le

potentiel des procédés hydrométallurgiques pour la décontamination de matrices solides contaminées par des métaux. Ceci comprend notamment les boues d'épuration municipales, les résidus de contrôle de la pollution de l'air des incinérateurs de déchets, les déchets de bois traité, les sédiments et les sols. Finalement, le sixième chapitre apporte, pour chacun des éléments métalliques (métaux alcalins, alcalino-terreux, transition, pauvres, métalloïdes, lanthanides et actinides), des informations de base sur leurs propriétés physiques et chimiques, leurs sources et les méthodes de production, leurs principales utilisations dans le monde, ainsi que les risques associés au niveau de la santé humaine ou de l'environnement.

ETE423 HABITATS AQUATIQUES (3 CR.)

L'objectif de ce cours est de permettre aux étudiants de deuxième et troisième cycles de se familiariser avec les notions permettant d'identifier, caractériser et modéliser les habitats aquatiques, avec une emphase sur les habitats de poisson. Au terme de ce cours, les étudiant-es maîtriseront les thématiques suivantes : 1) Connaissance de base de différents types d'habitats aquatiques (rivières, plaines inondables, lacs, milieux humides, estuaires). 2) Caractérisation et évaluation quantitative/qualitative des habitats aquatiques en rivière. 3) Connectivité des habitats. 4) Notion de préférence d'habitat 4) introduction à la modélisation des habitats. De plus, des notions de base des techniques de restauration des cours d'eau seront présentées. Les évaluations incluent un examen et une présentation de projet en modélisation ou en restauration.

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.

ETE425 ÉNERGIE ET ENVIRONNEMENT (3 CR.)

Ce cours vise à faire prendre conscience aux étudiants par rapport aux enjeux de l'énergie en lien avec l'environnement. Il s'adresse aux étudiants ayant une formation universitaire de premier cycle et qui ont une base en sciences ou en génie et qui désirent comprendre les impacts de la production et de l'utilisation de l'énergie sur le changement climatique. Il s'agit de donner aux étudiants des connaissances sur les avantages et les inconvénients de la production et l'utilisation des différents types d'énergie sur l'environnement. Ainsi, les principaux objectifs de ce cours portent, d'une part sur les sources de production d'énergie et les problématiques environnementales associées; et d'autre part, sur les systèmes d'utilisation de l'énergie et leurs impacts sur l'environnement. Ce cours comporte quatre grandes parties : (1) les différentes sources d'énergie (ressources fossiles, énergies nucléaires, énergies renouvelables, etc.); (2) les bilans énergétiques et les impacts environnementaux (transformation et distribution d'énergie, rendements, gaz à effet de serre et changement climatique, etc.); (3) la gestion et économie de l'énergie; (4) les aspects économiques et la géopolitique. L'évaluation de ce cours se fera par un examen (50 %) avec accès aux documents, et un projet

court de groupe (50 %) avec rapport et présentation sur un thème de choix des étudiants en lien avec le contenu du cours.

ETE426 GÉNOMIQUE APPLIQUÉE À L'ENVIRONNEMENT (3 CR.)

Ce cours permet aux étudiants.es d'apprendre la théorie et les applications des techniques de séquençage de nouvelle génération. Plus spécifiquement, les notions d'ADN environnemental, de microbiome, de métabarcoding, de métagénomique, métatranscriptomique, métaprotéomique, métabolomiques (incluant la lipidomique), épigénétique seront couvertes. Les méthodes d'échantillonnage et de préparation et d'analyse des échantillons seront présentées. Ce cours permet également de familiariser les étudiants.es aux traitements de bases de données, 2) les techniques d'analyse de séquences, et 3) la modélisation de la structure des macromolécules. Ce cours inclut des travaux dirigés donnant lieu à des exercices divers en bioinformatique et R.

ETE427 TRAVAIL DIRIGÉ I (3 CR.)

L'étudiante ou l'étudiant au doctorat doit réaliser une activité de recherche dirigée par un membre du corps professoral de l'INRS autre que sa direction et codirection de recherche doctorale. Cette activité doit être totalement distincte de son sujet de recherche principal et son domaine doit être en dehors du domaine de celle-ci. Cette activité a pour objectif principal l'ouverture de la personne chercheuse à une recherche multidisciplinaire.

ETE428 TRAVAIL DIRIGÉ II (3 CR.)

L'étudiante ou l'étudiant au doctorat peut réaliser une seconde activité de recherche dirigée par un membre du corps professoral du Centre autre que sa direction et codirection de recherche. Cette activité doit être totalement distincte de son sujet de recherche principal et ne peut être intégrée en tout ou en partie à la réalisation de sa thèse. À la différence du travail dirigé I, le travail dirigé II peut être réalisé dans un domaine de recherche connexe à celui de la thèse.

ETE429 GESTION DE PROJET EN EAU ET ENVIRONNEMENT (3 CR.)

Définition et historique de la gestion de projets selon PM BOK de l'Institut de la gestion de projets : envergure, gestion du temps, des coûts, de la qualité, des ressources humaines, des communications, de l'information et du risque.

ETE430 FORMES ET PROCESSUS EN MILIEUX 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.

ETE431 LA GESTION ET L'INGÉNIERIE DANS L'ENVIRONNEMENT CÔTIER (3 CR.)

Avec l'élévation du niveau de la mer, l'augmentation des tempêtes et la croissance démographique dans les zones côtières, les communautés côtières sont de plus en plus exposées aux risques côtiers. Le cours est conçu pour fournir une introduction nécessaire à l'ingénierie et à la gestion côtières et à la façon dont elles sont liées aux risques côtiers. La première partie du cours portera sur le développement de la théorie et des phénomènes de base qui régissent les processus côtiers, tels que les vagues, les courants et les marées, ainsi qu'un regard de haut niveau sur l'évaluation des risques côtiers. La deuxième partie du cours examinera la manière dont les composantes de base des processus côtiers ont un impact sur les communautés côtières. Le cours examinera les risques côtiers courants au Québec et dans l'est du Canada, tels que les inondations et l'érosion côtière. En outre, il abordera les structures côtières communes pour faire face à ces risques ainsi que les boucles de rétroaction entre les structures côtières et l'environnement.

ETE433 PALÉOLIMNOLOGIE (3 CR.)

L'objectif du cours est de familiariser l'étudiant avec la paléolimnologie, ses techniques et ses applications pour les reconstructions paléoclimatiques, paléoenvironnementales, et les études d'impacts (acidification, pollution, eutrophisation, etc.). Diverses techniques analytiques, dont les propriétés physiques des sédiments, seront abordées. Une sortie sur le terrain permettra aussi à l'étudiant de se familiariser avec les techniques d'échosondage et de carottage en milieu lacustre.

ETE434 HYDRAULIQUE ET UTILISATION OPÉRATIONNELLE DES MODÈLES HEC-RAS ET SWMM (3 CRÉDITS)

Le cours vise à rendre les étudiantes et étudiants aptes à prendre en main les résultats issus des modèles HEC-RAS et SWMM et à vérifier que les bonnes pratiques de modélisation ont été appliquées pour garantir l'obtention de bons résultats. Les étudiantes et étudiants seront également confrontés à la gestion/l'obtention des données nécessaires à ces modélisations.

ETE435 GÉOINFORMATIQUE

Ce cours entend doter les membres étudiants d'une capacité de programmation des infrastructures informatiques de production et de manipulation de toute la chaîne de valeurs des données géoréférencées tout en les propulsant au premier plan de la recherche et développement en géoinformatique. Le cours est subdivisé en trois modules. Le premier aborde les différentes méthodes de production de données géoréférencées. Le second porte sur les approches sémantiques de gestion et diffusion standardisées des données facilitant leur accès de manière automatisée. Le dernier présente les technologies et modules disponibles pour la mise en œuvre d'applications géoweb s'appuyant sur les deux premiers modules. L'apprentissage par la pratique sera prise en compte dans le cadre de ce cours. Donc, les notions présentées dans chaque module seront supportées par des bibliothèques et des exemples d'algorithmes utilisant le langage de programmation Python, dans la mesure du possible. Au cours du trimestre, les membres étudiants auront à réaliser un projet consistant en un prototype de plateforme géoinformatique appliqué à un problème en géosciences. Les étudiantes et étudiants sont encouragés à

suivre les cours ETE403 ou ETE432 avant de s'inscrire à ce cours, mais il ne s'agit pas de prérequis obligatoires.

ETE436 PRINCIPES DE LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE OPÉRATIONNELLE

Ce cours intensif d'une semaine a pour objectif de familiariser les personnes participantes aux grandes étapes de la modélisation hydrologique (modélisation précipitation-débit) déterministe. La démarche inclut les grandes étapes de la modélisation, en partant des intrants aux modèles, le calage, la validation et l'interprétation des extrants. La génération de scénarios de changements climatiques sera aussi abordée.

ETE9913 PERTURBATEURS ENDOCRINIENS ET ENDOCRINOLOGIE AVANCÉE (3 CR.)

Ce cours offert sous la forme de cours magistraux et de discussions permet à l'étudiant d'acquérir les notions de physiologie, d'anatomie et de biologie cellulaire et moléculaire nécessaires pour comprendre l'action des agresseurs toxiques sur les systèmes endocrinien et reproducteur. Le contenu est principalement ciblé sur les mécanismes d'action des agents toxiques pour les systèmes endocrinien et reproducteur.

ETE511 À ETE 545 COURS SPÉCIAL/SPÉCIAUX (1 CR. À 4 CR.)

EXAMEN DOCTORAL (6 CRÉDITS)

ETE601 EXAMEN DOCTORAL (6 CR.)

L'examen doctoral a lieu au plus tard durant le quatrième trimestre du programme de doctorat. L'inscription à cette activité a lieu au début du trimestre visé.

L'examen doctoral permet de vérifier si le projet de recherche de l'étudiante ou de l'étudiant a été suffisamment bien défini et si l'étudiante ou l'étudiant a la préparation suffisante pour mener à bien son projet.

Cet examen conduit à des recommandations susceptibles de favoriser la progression des travaux.

L'étudiante ou l'étudiant doit présenter par écrit et défendre oralement devant jury, au plus tard avant la fin du 4^e trimestre, sa problématique et sa méthodologie de recherche.

THÈSE (78 CRÉDITS)

THÈSE (78 CR.)

Chaque étudiante et étudiant doit rédiger une thèse qui démontre son aptitude à mener à bien une recherche scientifique originale.