

**Maîtrise en génie minéral - profil professionnel - 3521**

**RESPONSABLE :**

Éric Rosa  
819 732-8809 poste 8229

**SCOLARITÉ :**

45 crédits, Deuxième cycle

**GRADES :**

Maître en ingénierie

**OBJECTIFS :**

Le programme de maîtrise a pour but d'approfondir les connaissances technologiques et scientifiques en génie minéral.

Le profil professionnel favorise le développement de la composante professionnelle de la formation du candidat par l'approfondissement des connaissances et l'acquisition d'une spécialité.

Le programme de maîtrise en génie minéral est offert en extension à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue en vertu d'une entente avec l'École Polytechnique.

**CONDITIONS D'ADMISSION :**

**Base études universitaires**

Être détentrice ou détenteur d'un baccalauréat en ingénierie ou d'un diplôme jugé équivalent par Polytechnique Montréal;

OU

Être détentrice ou détenteur d'un diplôme universitaire de premier cycle de nature scientifique ou pouvoir attester d'une formation jugée équivalente;

ET

Avoir obtenu une moyenne cumulative d'au moins 2,75 sur 4,0 ou 3 sur 4,3 dans ses études de 1er cycle, ou l'équivalent agréé par Polytechnique Montréal.

Une candidate ou un candidat peut demander une dérogation à cette règle en présentant à l'appui de sa demande un dossier mettant en évidence ses aptitudes à la poursuite d'études de deuxième cycle (expérience professionnelle pertinente, études subséquentes à l'obtention de son grade de premier cycle).

Obtenir l'appui d'une professeure ou d'un professeur qui accepte d'être votre directrice ou directeur d'études.

Les candidatures internationales devront rencontrer des exigences linguistiques pour l'étude de leur dossier d'admission. Les exigences linguistiques pour la maîtrise peuvent être consultées sur le site internet de Polytechnique Montréal : [www.polymtl.ca/admission/etudes-superieures/conditions-dadmission/5-exigences-linguistiques/51-exigences-linguistiques-pour-le-doctorat-et-la-maitrise-recherche](http://www.polymtl.ca/admission/etudes-superieures/conditions-dadmission/5-exigences-linguistiques/51-exigences-linguistiques-pour-le-doctorat-et-la-maitrise-recherche)

**PLAN DE FORMATION :**

Quatre axes de spécialisation sont disponibles dans la maîtrise en génie minéral :

**Géologie minière :** Modélisation géostatistique des gisements. Évaluation minière. Optimisation des exploitations. Planification et contrôle de la production. Traitement des minerais. Minéralisation en milieu sédimentaires et volcaniques. Contexte lithogéochimiques et structuraux des minéralisations.

**Géophysique appliquée :** Techniques d'analyse et d'interprétation de méthodes électromagnétiques (magnétotellurique), TBF, etc. et de méthodes de potentiel. Cartographie géologique à l'aide de la géophysique (EM, magnétisme, gravimétrie, radiométrie, etc.). Applications de la géophysique à l'exploration minière, à la recherche de l'eau, au génie et à l'environnement. Systèmes intelligents pour l'automatisation des méthodes de traitement et d'interprétation géophysiques.

**Géomécanique :** Mécanique des roches : développement de méthodes d'essais en place. Géostatistique des propriétés mécaniques des massifs rocheux. Mesures des pressions de terrains. Modélisation de la résistance au cisaillement des massifs rocheux. Analyse de stabilité en milieux discontinus. Hydrogéologie : mesure de perméabilité en place et en laboratoire. Simulation et analyse numérique. Écoulements et infiltrations (incidence sur la stabilité des ouvrages en rocher et des

haldes de déchets miniers). Géologie de l'ingénieur : pétrographie des agrégats et des bétons. Réactivité aux alcalis. Caractérisation des matériaux de carrières.

**Hydrogéologie environnementale :** Barrières hydrauliques, tapis d'étanchéité et couverture. Auscultation et suivi d'ouvrages, de sites. Problèmes hydrogéologiques et environnementaux posés par les résidus miniers. Cartographie hydrogéologique et risques de contamination. Modélisation physiques (laboratoire) et numériques (ordinateur). Amélioration de la qualité des essais hydrauliques in situ et développement de méthodes d'interprétation : piézométrie, essais de perméabilité, essais de pompage. Amélioration de la qualité des essais de perméabilité en laboratoire. Interactions des propriétés hydrauliques, mécaniques et thermiques des géomatériaux naturels ou artificiels. Géostatistique appliquée aux problèmes de contamination. Géophysique appliquée aux problèmes de pollution des nappes.

**Cours optionnels**

Les étudiants s'engagent dans un programme de profil cours. Les plans d'études sont établis selon les besoins. L'étudiant doit obtenir de 30 à 39 crédits dont au plus 9 crédits peuvent parvenir du niveau premier cycle, et par la suite choisir des activités de PROJET ou des activités de STAGE en laboratoire.

Liste des cours :

**Géologie minière**

**COURS DE L'UQAT**

GNM1013	Sujets spéciaux en génie minier (3 cr.)
GNM1016	Traitement d'images (3 cr.)
GNM1019	Géophysique appliquée (3 cr.) *
GNM1021	Introduction au traitement de données et à la modélisation 3D (3 cr.)
GNM1022	Cartographie géologique de 2D à 3D (3 cr.) ou tout autre cours choisi avec l'accord du responsable de programme, notamment parmi les cours optionnels du DESS en génie minier ( <a href="https://www.uqat.ca/etudes/irme/dess-en-genie-minier-profil-professionnel/">https://www.uqat.ca/etudes/irme/dess-en-genie-minier-profil-professionnel/</a> ).

**COURS DE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

GML6003	Séminaire de géomatériaux (3 cr.)
GML6203	Méthodes magnétiques et gravimétriques en géophysique (3 cr.)
GML6204	Méthodes électriques et électromagnétiques en géophysique (3 cr.)
GML6302	Géochimie des roches associées aux gîtes minéraux (3 cr.)
GML6303	Métallogénie (3 cr.)
GML6305	Gîtologie (2 cr.)
GML6401	Géostatistique II (3 cr.) (GML6402)
GML6402	Géostatistique I (3 cr.)
GML6403	Optimisation des opérations minières (3 cr.)
GML6502	Tectonophysique (3 cr.)

**Géophysique appliquée**

**COURS DE L'UQAT**

EVM1006	Auscultation des ouvrages en environnement minier (2 cr.) *
GNM1016	Traitement d'images (3 cr.)
GNM1019	Géophysique appliquée (3 cr.) *
GNM1021	Introduction au traitement de données et à la modélisation 3D (3 cr.)
GNM1022	Cartographie géologique de 2D à 3D (3 cr.) ou tout autre cours choisi avec l'accord du responsable de programme, notamment parmi les cours optionnels du DESS en génie minier ( <a href="https://www.uqat.ca/etudes/irme/dess-en-genie-minier-profil-professionnel/">https://www.uqat.ca/etudes/irme/dess-en-genie-minier-profil-professionnel/</a> ).

**COURS DE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

GML6003	Séminaire de géomatériaux (3 cr.)
GML6201A	Techniques géophysiques à haute résolution (3 cr.)
GML6202	Laboratoire de géophysique avancée (2 cr.)
GML6203	Méthodes magnétiques et gravimétriques en géophysique (3 cr.)
GML6204	Méthodes électriques et électromagnétiques en géophysique (3 cr.)
GML6205	Méthodes sismiques (3 cr.)

**Géomécanique**

**COURS DE L'UQAT**

EVM1002	Géotechnique appliquée à l'environnement minier (3 cr.) *
ou GNM1010	Géotechnique minière (3 cr.)
EVM1003	Hydrogéologie appliquée à l'environnement minier (3 cr.) *
EVM1004	Restauration des sites miniers (3 cr.) *
EVM1006	Auscultation des ouvrages en environnement minier (2 cr.) *

GNM1012	Mécanique des roches (3 cr.)
GNM1013	Sujets spéciaux en génie minier (3 cr.)
GNM1015	Hydrogéologie I (3 cr.)
GNM1020	Restauration des sites miniers : de la théorie à la pratique (3 cr.) (GNM1008) ou tout autre cours choisi avec l'accord du responsable de programme, notamment parmi les cours optionnels du DESS en génie minier ( <a href="https://www.uqat.ca/etudes/irme/dess-en-genie-minier-profil-professionnel/">https://www.uqat.ca/etudes/irme/dess-en-genie-minier-profil-professionnel/</a> ).

GML6914	Projet de maîtrise IV (15 cr.)
GML6918	Projet d'études supérieures (3 cr.)

\* : Disponible à distance

## PIÈCES SUPPLÉMENTAIRES ET DIRECTIVES PARTICULIÈRES :

- Les demandes d'admission pour la Maîtrise en génie minéral (3521) devront nous parvenir pour les dates limites suivantes, pour l'été le 15 janvier, l'hiver le 15 septembre et l'automne le 15 avril

Pour les étudiants étrangers, les dates sont: l'été le 1er novembre, l'hiver le 15 mai et l'automne le 15 février.

- Ce programme de Polytechnique Montréal est offert en extension à l'UQAT

- Un délai de 2 semaines est nécessaire pour l'acheminement des dossiers à la Polytechnique

### COURS DE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

CIV6205	Impacts des projets sur l'environnement (3 cr.)
CIV6301	Hydrologie (3 cr.)
CIV6404	Fondations (3 cr.)
CIV6406	Écoulement des eaux dans les sols (3 cr.)
GML6001	Mécanique des roches I (3 cr.)
GML6002	Mécanique des roches II (3 cr.)
GML6003	Séminaire de géomatériaux (3 cr.)
GML6107	Hydrogéologie (3 cr.)
GML6201A	Techniques géophysiques à haute résolution (3 cr.)
GML6402	Géostatistique I (3 cr.)
GML6502	Tectonophysique (3 cr.)
GML6503	Géologie structurale et tectonique (3 cr.)
MEC6404	Éléments finis, concepts et applications (3 cr.)
MEC6405	Analyse expérimentale des contraintes (3 cr.)

### Hydrogéologie environnementale

#### COURS DE L'UQAT

EVM1001	Développement durable et évaluation environnementale (2 cr.) *
EVM1002	Géotechnique appliquée à l'environnement minier (3 cr.) *
ou GNM1010	Géotechnique minière (3 cr.)
EVM1003	Hydrogéologie appliquée à l'environnement minier (3 cr.) *
EVM1004	Restauration des sites miniers (3 cr.) *
ou GNM1008	Environnement minier et méthodes de restauration (3 cr.)
EVM1006	Auscultation des ouvrages en environnement minier (2 cr.) *
EVM1007	Traitement des eaux minières contaminées (2 cr.) *
ou GNM1021	Introduction au traitement de données et à la modélisation 3D (3 cr.)
EVM1008	Caractérisation environnementale de rejets miniers et de minerais (2 cr.) *
EVM1009	Traitement des minerais : défis et opportunités en environnement minier (2 cr.) *
EVM1010	Méthodes de gestion des résidus miniers fins (2 cr.) *
EVM1011	Végétalisation des sites miniers (2 cr.) *
ou GNM2011	Végétalisation des sites miniers : de la théorie à la pratique (3 cr.)
EVM1012	Polluants atmosphériques miniers (2 cr.) *
EVM1013	Règlementation environnementale minière (1 cr.) *
GNM1001	Minéralogie appliquée à l'étude des minerais et leur traitement (3 cr.)
GNM1002	Remblais miniers (3 cr.)
GNM1005	Flottation des minerais (3 cr.)
GNM1012	Mécanique des roches (3 cr.)
GNM1013	Sujets spéciaux en génie minier (3 cr.)
GNM1015	Hydrogéologie I (3 cr.)
GNM1016	Traitement d'images (3 cr.)
GNM1017	Hydrogéochimie environnementale dans un contexte minier (3 cr.)
GNM1018	Traitement des effluents miniers (3 cr.)
GNM1019	Géophysique appliquée (3 cr.) *
GNM1020	Restauration des sites miniers : de la théorie à la pratique (3 cr.) (GNM1008) ou tout autre cours choisi avec l'accord du responsable de programme, notamment parmi les cours optionnels du DESS en génie minier ( <a href="https://www.uqat.ca/etudes/irme/dess-en-genie-minier-profil-professionnel/">https://www.uqat.ca/etudes/irme/dess-en-genie-minier-profil-professionnel/</a> ).

### COURS DE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

CIV6205	Impacts des projets sur l'environnement (3 cr.)
CIV6301	Hydrologie (3 cr.)
CIV6406	Écoulement des eaux dans les sols (3 cr.)
GML6003	Séminaire de géomatériaux (3 cr.)
GML6107	Hydrogéologie (3 cr.)
GML6108	Hydrogéologie chimique (3 cr.)
GML6109	Stockage géologique des déchets (3 cr.)
GML6110	Sites contaminés, impacts, restauration (2 cr.)
GML6111	Travaux de terrain en hydrogéologie (1 cr.)
GML6112	Environnement minier et restauration des sites (3 cr.)
GML6201A	Techniques géophysiques à haute résolution (3 cr.)
GML6402	Géostatistique I (3 cr.)

### PROJET, SÉMINAIRE ET STAGES

L'étudiant choisit de 6 à 15 crédits parmi les cours suivants :

CIV6966S	Stage en milieu de travail à temps partiel (12 cr.)
CIV6972S	Stage en milieu de travail (12 cr.)
GML6901	Projet de maîtrise en ingénierie I (6 cr.)
GML6902	Projet de maîtrise en ingénierie II (9 cr.)
GML6903	Projet de maîtrise en ingénierie III (12 cr.)
GML6905	Séminaires (1 cr.)

**CIV6205****Impacts des projets sur l'environnement****Objectifs :**

**Contenu :** Processus d'évaluation et d'examen des impacts (BAPE). Principes directeurs et rapport environnemental. Écologie humaine et étude de cas. Évaluation des données écologiques et écologie appliquée aux études d'impact. Aspects économiques. Aspects légaux. Projet d'aménagement, phases techniques et objectifs des activités relatives à l'environnement. La matrice d'impacts et ses paramètres. Techniques d'identification et d'évaluation des impacts. Études des différentes approches et applications pratiques : techniques Léopold, Batelle, Sorensen, Odum, Holmes, McHarg, DELPHI, etc. Modélisation : modèles écologiques, modèles fluviaux. Simulation écologique aquatique. Étude de cas.

**CIV6301****Hydrologie****Objectifs :**

**Contenu :** Introduction à l'hydrologie paramétrique. Mesures et acquisition des données en hydrologie. Analyse des fréquences et du risque en hydrologie. Modélisation hydrologique : bassins urbains, bassins ruraux, petits bassins, grands bassins. Design en hydrologie : structures mineures et structures majeures. Études spéciales de quelques phénomènes : crues, précipitations, fonte de neige et sédimentation.

**CIV6404****Fondations****Objectifs :**

**Contenu :** Reconnaissance des sols : sondages, prélèvement d'échantillons, essais in situ. État des contraintes. Paramètres géotechniques. Fondations superficielles : théories, capacité portante, coefficients de sécurité, tassements, méthodes semi-empiriques; semelles et radiers. Fondations profondes : capacité portante des pieux sollicités verticalement et latéralement.

**CIV6406****Écoulement des eaux dans les sols****Objectifs :**

**Contenu :** Écoulement permanent en milieux homogène et multi-couches, isotropes et anisotropes. Solutions graphiques et numériques. Applications aux travaux de génie civil : filtres inversés (agrégats naturels et géotextiles). Ouvrages de retenue d'eau (gradients critiques, boulangerie, érosion interne). Assèchement des fouilles (utilisation des réseaux et des formules analytiques, choix des méthodes de rabattement de nappe).

**CIV6966S****Stage en milieu de travail à temps partiel****Objectifs :**

**Contenu :** Stage d'une durée maximale de 30 semaines (540 heures)\* effectué à temps partiel sur deux trimestres consécutifs permettant à l'étudiant de réaliser ou de participer à un ou des projets de recherche, de développement, de conception, d'application, d'implantation ou d'évaluation dans un milieu de travail. Il s'adresse exclusivement aux candidats inscrits à un programme de maîtrise professionnelle. Il se fait sous la supervision conjointe d'un professeur de l'École et d'un professionnel du milieu de travail. L'étudiant doit remettre un rapport à la fin du stage (à la fin de son deuxième trimestre de stage à temps partiel). \* Minimum de 450 heures de travail.

**CIV6972S****Stage en milieu de travail****Objectifs :**

**Contenu :** Stage d'une durée maximale d'un trimestre de 15 semaines (540 heures)\* effectué à temps plein permettant à l'étudiant de réaliser ou de participer à un ou des projets de recherche, de développement, de conception, d'application, d'implantation ou d'évaluation dans un milieu de travail. Il s'adresse exclusivement aux candidats inscrits à un programme de maîtrise professionnelle. Il se fait sous la supervision conjointe d'un professeur de Polytechnique Montréal et d'un professionnel du milieu de travail. L'étudiant doit remettre un rapport à la fin du stage. \* Minimum de 450 heures de travail.

**EVM1001****Développement durable et évaluation environnementale**

**Objectifs :** Connaître les concepts de développement durable et les processus d'évaluation environnementale, en particulier les études d'impacts sur l'environnement, dans le contexte de l'industrie minière.

**Contenu :** Développement durable : définitions, principes, indicateurs, outils. Application du développement durable à l'industrie minière. Processus d'évaluation environnementale : étude d'impacts sur l'environnement, analyse du cycle de vie, évaluation environnementale stratégique. Réglementation en vigueur. Applications et exemples de cas provenant de l'industrie minière.

**EVM1002****Géotechnique appliquée à l'environnement minier**

**Objectifs :** Intégrer les différents aspects liés aux propriétés physiques, mécaniques et hydrogéologiques nécessaires pour l'étude de la stabilité physique des ouvrages miniers et à la gestion environnementale des rejets.

**Contenu :** Propriétés mécaniques et hydrogéotechniques des matériaux meubles (sols, rejets miniers) et leur méthode de détermination au laboratoire. Principes de base des écoulements en conditions saturées et non saturées et techniques de mesures

des paramètres (au laboratoire et sur le terrain). Principes d'analyse et de conception d'emplacements et de digues pour rejets miniers (consolidation et tassement, résistance au cisaillement, pression des terres, stabilité des pentes). Aspects géotechniques du guide de gestion des parcs à résidus élaboré par l'Association Minière du Canada.

**EVM1003****Hydrogéologie appliquée à l'environnement minier**

**Objectifs :** S'initier aux notions d'hydrogéologie et d'hydrologie et à leurs applications au domaine de l'environnement minier, en considérant les lois et règlements en vigueur.

**Contenu :** Cycle et bilan de l'eau. Identification géologique de l'aquifère. Propriétés hydrogéologiques des milieux poreux et facteurs d'écoulement des eaux souterraines : porosité, perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement, gradient hydraulique, niveau piézométrique, sens d'écoulement de l'eau, relation entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Mesure des niveaux piézométriques, techniques d'échantillonnage des eaux. Évaluation de l'atténuation du contaminant qui se déplace dans un milieu poreux. Règlement sur le captage des eaux souterraines.

**EVM1004****Restauration des sites miniers**

**Objectifs :** Acquérir les connaissances et outils qui permettent de comprendre les mécanismes de formation du drainage minier acide (DMA) qui est le principal problème environnemental de l'industrie minière, ainsi que les solutions pratiques les plus appropriées pour y remédier en mode prévention et en mode contrôle.

**Contenu :** La problématique générale du DMA et les principales méthodes de prédiction du DMA; les notions de base sur les méthodes de prévention du DMA basées sur la gestion des rejets (désulfuration, déposition subaquatique, méthodes alternatives de gestion de rejets) et sur les méthodes de contrôle du DMA ou méthodes de restauration : inondation des rejets, recouvrements multicouches, nappe phréatique surélevée.

**EVM1006****Auscultation des ouvrages en environnement minier**

**Objectifs :** Maîtriser le fonctionnement, l'utilisation et l'interprétation des données obtenues des divers dispositifs de monitoring des propriétés hydrogéotechniques des ouvrages utilisés dans le domaine de l'environnement minier.

**Contenu :** Fondements sur la construction des digues de confinement des rejets de concentrateur et problèmes de stabilité physiques. Fondements sur les méthodes de restauration des sites miniers : recouvrements en sol et en eau. Fondements de métrologie : notions

sur les erreurs (fidélité, justesse, précision, sensibilité, résolution, répétabilité et reproductibilité de mesures). Auscultation des digues de confinement de rejets miniers : suivi du compactage, des pressions interstitielles (piézomètres), contraintes totales (capteurs de pression), tassements (capteurs (tassomètres), déplacement horizontal et rotations (inclinomètres). Inspection visuelle des digues de confinement de rejets miniers. Auscultation des recouvrements en sol utilisés pour la restauration des sites miniers : suivi de teneur en eau volumique, succion, température du sol, concentration d'oxygène interstitiel, infiltration, paramètres météorologiques, essai de traçage, débit des effluents, débits de percolation (lysimètres). Auscultation des recouvrements en eau : suivi hydrogéochimique et hydrodynamique. Auscultation géophysique des ouvrages.

**EVM1007****Traitement des eaux minières contaminées**

**Objectifs :** Apprendre les processus impliqués dans la génération et le traitement des effluents miniers. Maîtriser l'application des principes de base en traitement des eaux dans le cas des effluents miniers contaminés. Comprendre les interactions entre les contaminants spécifiques à l'industrie minière et l'environnement. Acquérir les connaissances nécessaires pour la sélection, le design, la construction, l'opération et le suivi des systèmes de traitement des eaux minières. Apprendre le rôle, l'importance, les avantages et les limitations des essais de laboratoire par rapport aux essais de terrain. Discuter des systèmes réels de traitement des eaux minières contaminées, sur les processus impliqués, les mécanismes d'enlèvement / concentration / destruction, la performance à long terme et la stabilité des boues générées.

**Contenu :** Activité minière et sources potentielle de contamination de l'eau. Retour sur la réglementation provinciale (Directive 019) et fédérale (Règlement sur les effluents des mines de métaux) sur la qualité physico-chimique et de toxicité aquatique des effluents miniers. Stratégies de traitement des eaux contaminées. Sources, caractéristiques, principes et objectifs de traitement, et mécanismes d'enlèvement des contaminants spécifiques à l'industrie minière, tels que les métaux/métalloïdes, l'azote ammoniacal, les cyanures, le sulfate, les thiosels, les phosphates, la salinité, la radioactivité, les terres rares et les matières en suspension. Présentation et discussion des exemples de cas réels. Critères de sélection et conception, étapes à suivre et essais à réaliser au laboratoire et sur le terrain, avant la construction d'un système de traitement des eaux minières contaminées à pleine échelle.

**EVM1008****Caractérisation environnementale de rejets miniers et de minerais**

**Objectifs :** Acquérir des connaissances

théoriques et pratiques relatives à l'identification des principaux minéraux, ainsi qu'aux principaux essais utilisés dans les caractérisations environnementales de rejets miniers et de minerais. Comprendre les stratégies d'échantillonnage et de caractérisation permettant de prédire le potentiel polluant de rejets miniers et de minerais.

**Contenu :** Introduction générale à la minéralogie et aux principes physiques d'observation en lumière transmise et réfléchie. Notions de base et fondements de la radiocristallographie et en particulier de la diffraction-X. Principes de base de la cristalochimie. Étude des minéraux communs : sulfures, oxydes et hydroxydes, carbonates, sulfates et silicates. Caractérisations chimiques de base. Prédiction du drainage minier contaminé (drainage minier acide, DMA, et drainage neutre contaminé, DNC) : essais statiques (essais de type Sobek et variantes, essais NAG et variantes, essais minéralogiques) et cinétiques (cellules humides, colonnes, mini-cellules d'altération, essais en barils de terrain, parcelles expérimentales) et interprétation de ces essais.

### EVM1009

#### Traitement des minerais : défis et opportunités en environnement minier

**Objectifs :** Connaître les principaux procédés de traitement des minerais utilisés dans les opérations de métaux de base et d'or. Comprendre l'influence de ces procédés sur les problématiques associées aux rejets miniers.

**Contenu :** Mesures de séparation et bilans métallurgiques, comminution, classification, concentration gravimétrique, flottation, lixiviation, désulfuration, destruction des cyanures, épaississement et filtration. Concept de la géométallurgie.

### EVM1010

#### Méthodes de gestion des résidus miniers fins

**Objectifs :** Acquérir une formation de base sur les méthodes de gestion des résidus miniers fins (ou rejets de concentrateur) dans un contexte de développement durable. Se familiariser avec les deux principaux modes de stockage des résidus miniers fins : la déposition en surface et le remblayage souterrain. Connaître les différentes techniques et technologies mises en jeu dans le processus de gestion des résidus miniers fins. Maîtriser les démarches conceptuelles et de mise en œuvre de ces deux modes de stockage des résidus miniers fins.

**Contenu :** Déposition en surface des résidus miniers fins : les différentes techniques de déposition en surface des pulpes de résidus, des résidus épaissis (avec ou sans inclusions de stériles), des résidus en pâte et des résidus filtrés; transport de ces résidus jusqu'au point de déposition; avantages et inconvénients des techniques; propriétés hydro-géotechniques et mécanique des résidus; vulnérabilité des ouvrages de retenue de ces résidus; comportement environnemental de ces dépôts de

résidus; calcul des coûts relatifs à la mise en œuvre de ces techniques. Remblayage souterrain : typologie des remblais cimentés faits des résidus miniers fins; typologie des résidus miniers destinés à la fabrication des remblais cimentés souterrains; méthodes de fabrication des remblais miniers cimentés à l'usine; transport du remblai cimenté à travers les réseaux de pipelines; formulations des recettes de mélange de remblais et calcul des coûts du ciment; mise en place du remblai dans les vides souterrains et leur comportement in situ; comportement environnemental des chantiers remblayés.

### EVM1011

#### Végétalisation des sites miniers

**Objectifs :** Acquérir les connaissances de base théoriques et pratiques relatives aux interactions plantes-substrats miniers. Se familiariser avec le contexte réglementaire, écologique et de développement durable associé à la végétalisation des sites miniers. Développer des aptitudes à concevoir un plan de végétalisation minière dans la zone boréale. Acquérir de l'expérience à travers l'étude de cas réels et des mises en situation.

**Contenu :** Guide de restauration du MERN. Cadre conceptuel de la végétalisation minière (succession végétale, réhabilitation vs restauration écologique, ingénierie écologique, évolution à long terme et stabilité). Types de sites miniers (sablères, tourbières, mines de métaux, sites en exploitation vs sites abandonnés). Types de rejets miniers (générateurs ou pas d'acide, roches stériles, résidu de concentrateurs, boues de traitement des eaux). Limitations à l'établissement des plantes sur rejets miniers (facteurs abiotiques : ressources vs modulateurs). Besoins des plantes, écophysologie, propriétés et processus fonctionnels du système plantes-substrats. Végétalisation naturelle vs assistée. Amélioration du substrat (fertilisation, amendement, couverture de sol), valorisation de matières résiduelles fertilisantes, coûts de végétalisation. Choix du matériel végétal (ligneux vs herbacées, espèces pionnières, plantes abri, facilitation vs compétition, symbioses, tolérance aux stress, indigènes vs exotiques). Étapes d'un plan de végétalisation et suivi qualité. Arbres et services écologiques (fixation de carbone, production de biomasse). Phytoremédiation (phytostabilisation, phytoextraction des métaux). Plantes et stabilité géotechnique (stabilisation des pentes, érosion, désaturation en eau). Plantes et recouvrements à effet de barrière (biointrusion, bilan hydrique, consommation d'oxygène).

### EVM1012

#### Polluants atmosphériques miniers

**Objectifs :** Identifier les principales sources de polluants atmosphériques miniers et connaître les techniques d'échantillonnage et les méthodes de caractérisation des polluants atmosphériques. Aborder les techniques

permettant d'atténuer ces pollutions atmosphériques.

**Contenu :** La nature et la source des polluants atmosphériques miniers et leurs impacts sur l'environnement et la santé des populations. Les techniques d'échantillonnage et d'analyse, la chimie de l'atmosphère, les modèles de dispersion atmosphérique, la législation, les techniques de captage des gaz et des vapeurs et le dimensionnement des équipements. Les poussières générées sur les sites miniers et les techniques qui permettent d'atténuer ces pollutions seront également abordées.

### EVM1013

#### Règlementation environnementale minière

**Objectifs :** Acquérir les connaissances nécessaires sur les lois et les règlements qui encadrent les activités minières au Québec.

**Contenu :** Les normes, lois, règlements et directives en lien avec l'industrie minière du Québec et du Canada. Les lois et règlements à suivre durant les opérations : objectifs environnementaux de rejets (OER), programme de réduction de rejets industriels (PRRI), attestation d'assainissement, règlement sur les effluents des mines de métaux (REMM) et Directive 019, étude de suivis des effets sur l'environnement (ESEE). Rôle du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec et du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles.

### GML6001

#### Mécanique des roches I

##### Objectifs :

**Contenu :** Applications de la mécanique des roches aux travaux d'ingénierie. Propriétés des roches : mécanismes de déformation et de rupture, facteurs d'influence, modèles constitutifs. Propriétés des massifs rocheux : résistance au cisaillement des discontinuités géologiques et des massifs fragmentés, modèles d'extrapolation des résultats d'essais en laboratoire, modèles constitutifs. Instabilités des excavations souterraines par excès de contraintes: états de contraintes, stabilité à court et à long terme, soutènement naturel, soutènement artificiel. Fondations : capacité portante des massifs rocheux, prévision des tassements, calcul des fondations. Design des conduites forcées : conduites non revêtues, calcul des revêtements de béton et des blindages d'acier.

### GML6002

#### Mécanique des roches II

##### Objectifs :

**Contenu :** Investigation de sites. Détermination des propriétés des roches : essais en laboratoire, propriétés résistantes, relations contrainte-déformation, dispersion, échantillonnage, échelle, forme, saturation. Détermination des propriétés

des massifs rocheux: essais en place. Pressions de terrains : techniques de mesure, choix des techniques, modèles de calcul des contraintes. Relevés structuraux : orientation préférentielle, dispersion, écart. Systèmes de classification géomécanique des massifs. Instabilités structurales: analyses de stabilité par projection stéréographique, talus, souterrains. Pressions hydrauliques.

### GML6003

#### Séminaire de géomatériaux

##### Objectifs :

**Contenu :** Exposés et discussions de sujets choisis en rapport avec les cours ou les travaux de recherches. Discussions de publications récentes.

### GML6107

#### Hydrogéologie

##### Objectifs :

**Contenu :** Principes et équations des écoulements souterrains. Problèmes divers d'ingénierie reliés aux eaux souterraines. Essais de perméabilité en laboratoire. Réseaux d'écoulements. Migration des contaminants. Détermination des caractéristiques hydrogéologiques en place. Essais de pompage. Écoulement en milieux fissurés.

### GML6108

#### Hydrogéologie chimique

##### Objectifs :

**Contenu :** Interactions inorganiques eau-aquifère. Matière organique et polluants organiques dans les aquifères. La pollution des eaux souterraines par déchets domestiques, industriels (métaux et composés organiques), agricoles et miniers. Spéciation et interprétation des analyses des eaux souterraines.

### GML6109

#### Stockage géologique des déchets

##### Objectifs :

**Contenu :** Sélection de sites pour entreposage de déchets liquides ou solides. Barrières naturelles ou construites. Tapis d'étanchéité en argil, sol-bentonite, géomembranes. Couvertures multicouches et barrières capillaires. Coupures verticales, parois moulées, tranchées de boue. Critères de conception, méthodes de construction, surveillance de la performance. Systèmes de drainage, filtration et collecte de lixiviat. Études de cas pour des stockages en surface ou à grande profondeur. Notions d'études en laboratoire et de modélisation numérique des phénomènes.

### GML6110

#### Sites contaminés, impacts, restauration

##### Objectifs :

**Contenu :** Notions d'écotoxicologie, toxicité, cheminements, normes, moyens de contrôle. Techniques d'évaluation des

## Description des cours

sites contaminés. Notions d'études des impacts sur l'environnement : processus d'évaluation et d'examen, aspects sociaux, économiques et légaux, techniques d'évaluation, gestion des conflits, études de cas. Techniques de restauration des eaux souterraines et des terrains contaminés: problématique, chimie des contaminants, migration, interactions, métabolisme microbien, techniques en biotraitement, études en microcosmes au laboratoire, cinétiques de biodégradation, études de faisabilité. Exemples de cas réels.

### GML6111

#### Travaux de terrain en hydrogéologie

##### Objectifs :

**Contenu :** Travaux pratiques sur le terrain. Techniques géophysiques à haute résolution sur un terrain contaminé. Essais hydrogéologiques pour l'évaluation des paramètres physiques et chimiques de l'eau souterraine, et pour l'évaluation de la vitesse de migration des contaminants.

### GML6112

#### Environnement minier et restauration des sites

##### Objectifs :

**Contenu :** Problématique de gestion des rejets miniers. Processus de formation du drainage minier acide (DMA). Techniques de prédictions du DMA. Modélisation géochimique du DMA. Mouvements de l'eau et des gaz. Méthodes de contrôle du DMA. Couvertures en eau, couvertures multicouches. Traitement biologique passif du DMA. Étude de cas.

### GML6201A

#### Techniques géophysiques à haute résolution

##### Objectifs :

**Contenu :** Définition des problèmes à résoudre en génie civil, en environnement et en recherche de l'eau. Techniques géophysiques à haute résolution : gradiométrie magnétique, nanogravimétrie, électrique, électromagnétique, sismique réflexion, radar, tomographie. Résolution spatiale, bruit et profondeur d'investigation. Applications et études de cas.

### GML6202

#### Laboratoire de géophysique avancée

##### Objectifs :

**Contenu :** Mesure des propriétés physiques des roches, des minerais et des sols. Appareillage géophysique. Études sur modèles réduits. Exercices d'interprétation.

### GML6203

#### Méthodes magnétiques et gravimétriques en géophysique

##### Objectifs :

**Contenu :** Méthodes de traitement des données magnétiques et gravimétriques : utilisation de l'analyse spectrale et de

l'analyse statistique. Méthodes d'interprétation par modélisation 2D et 3D. Interprétation par inverse généralisée (Marquardt, SVD).

### GML6204

#### Méthodes électriques et électromagnétiques en géophysique

##### Objectifs :

**Contenu :** Méthode électrique : résistivité, polarisation provoquée : étude des phénomènes et des principes de cette méthode; méthodes de traitement et d'interprétation des données.

Méthodes électromagnétiques : étude des principes des techniques électromagnétiques fréquentielles et transitoires; méthodes de traitement et d'interprétation des données.

Applications de ces méthodes aux domaines d'exploration, de recherche de l'eau, de génie et d'environnement.

### GML6205

#### Méthodes sismiques

##### Objectifs :

**Contenu :** Principes fondamentaux des ondes sismiques : réflexion et réfraction des ondes planes, ondes de la surface. Sismique réflexion : méthodes d'acquisition, traitement des données, estimation des vitesses RMS sismiques, introduction à l'interprétation, application à l'exploration minière et pétrolière. Sismique réfraction : estimations des vitesses des roches, inversion 1-D, introduction à la tomographie. Applications à la structure de la croûte, à l'exploitation pétrolière, au génie et à l'environnement.

### GML6302

#### Géochimie des roches associées aux gîtes minéraux

##### Objectifs :

**Contenu :** Caractéristiques chimiques des roches associées aux gisements syngénétiques. Modification chimique des roches entourant le gisement épigénétiques. Examen de cas types : 12 types différents de gisement sont vus en détail.

### GML6303

#### Métallogénie

##### Objectifs :

**Contenu :** Les aspects géochimiques de la métallogénie : la nature des fluides hydrothermaux magmatiques métamorphiques et sédimentaires; l'altération hydrothermale; la stabilité des sulfures; la solubilité des minéraux métallifères et des minéraux de gangue associés; le transfert en masse de composés de minerais par les solutions hydrothermales; l'interprétation des isotopes de plomb, d'oxygène-hydrogène, de soufre et de carbone; les inclusions fluides; les systèmes géothermiques minéralisateurs. Rapports oraux et écrits sur des études individuelles.

### GML6305

#### Géologie

##### Objectifs :

**Contenu :** Processus physico-chimiques de concentration des métaux en milieu géologiques. Source, migration et dépôt des métaux en concentrations économiques par les fluides hydrothermaux. Analyses de stabilité, paragenèse, zonalité, altération, géothermométrie, études isotopiques pour les environnements magmatiques, volcaniques, sédimentaires et métamorphiques. Au laboratoire : identification et interprétation des minéraux et textures; examen critique des hypothèses génétiques de divers gisements classiques.

### GML6401

#### Géostatistique II

##### Objectifs :

**Contenu :** Applications de la géostatistique aux problèmes d'estimation des réserves récupérables, d'homogénéisation du minerai et de changements de support ou d'échelle rencontrés en géologie. Précision sur les réserves globales avec et sans teneur de coupure. Méthodes de simulations et intégration de données de sources différentes, imagerie stochastique.

### GML6402

#### Géostatistique I

##### Objectifs :

**Contenu :** Géostatistique linéaire et stationnaire. Le variogramme. Variance de bloc, variance d'estimation, krigeage. Généralisations multivariées, le cokrigeage. Estimations de fonctions de distributions locales et applications. Simulations conditionnelles.

### GML6403

#### Optimisation des opérations minières

##### Objectifs :

**Contenu :** Établissement des contours optimaux, le taux optimal et la teneur de coupure optimale. Planification à long, moyen et court terme. Le plan opérationnel et la répartition de l'équipement.

### GML6502

#### Tectonophysique

##### Objectifs :

**Contenu :** Élasticité du globe terrestre : séismes, mécanisme au foyer, vitesse des ondes élastiques, anisotropie sismique et structure interne du globe. Plasticité du globe terrestre : défauts cristallins, zones de cisaillement, convection du manteau, isostasie et stabilisation des cratons. Conductivité thermique et structures lithosphériques. Dynamique des systèmes solide-fluide : fusion de roches, extraction et ascension des magmas, dorsales océaniques et points chauds. Processus orogéniques et mécaniques des plaques de lithosphère.

### GML6503

#### Géologie structurale et tectonique

##### Objectifs :

**Contenu :** Théorie des plaques

tectoniques; comportement rhéologique de la croûte et du manteau; mesures de contrainte et de déformation; mécanismes de déformation et zones de cisaillement; chaînes de subduction, de collision et de décrochement; structures océaniques et continentales de distension ; méthodes d'analyse tectonique ; traitement statistique et interprétation des éléments structuraux ; discussion de cas typiques.

### GML6901

#### Projet de maîtrise en ingénierie I

##### Objectifs :

**Contenu :** Projet de maîtrise en ingénierie accompli sous la direction d'un directeur de projet et comprenant une étude de niveau supérieur sur un problème de génie ainsi que la rédaction d'un rapport de projet. Le travail comprend au moins 18 heures par semaine consacrées au projet pendant un trimestre ou l'équivalent.

### GML6902

#### Projet de maîtrise en ingénierie II

##### Objectifs :

**Contenu :** Projet de maîtrise en ingénierie accompli sous la direction d'un directeur de projet et comprenant une étude de niveau supérieur sur un problème de génie ainsi que la rédaction d'un rapport de projet. Le travail comprend au moins 27 heures par semaine consacrées au projet pendant un trimestre ou l'équivalent.

### GML6903

#### Projet de maîtrise en ingénierie III

##### Objectifs :

**Contenu :** Projet de maîtrise en ingénierie accompli sous la direction d'un directeur de projet et comprenant une étude de niveau supérieur sur un problème de génie ainsi que la rédaction d'un rapport de projet. Le travail comprend au moins 36 heures par semaine consacrées au projet pendant un trimestre ou l'équivalent.

### GML6905

#### Séminaires

**Objectifs :** À la fin du cours, la personne étudiante sera en mesure : - de se mettre au courant des développements récents en recherche dans un des domaines suivants: hydrogéologie, géologie de l'ingénieur, géophysique appliquée, métallogénie, géostatistique et évaluation minière, optimisation des opérations minières, automatisation et informatique minières; - de développer le sens critique et l'aptitude à l'analyse et à la synthèse de la littérature du domaine étudié; - d'apprendre à faire la présentation orale d'une synthèse.

**Contenu :** Exposé et discussions de sujets choisis en rapport avec les cours ou les travaux de recherches du département : hydrogéologie, géologie de l'ingénieur, géophysique appliquée, métallogénie, géostatistique et évaluation minière, optimisation des opérations minières, automatisation et informatique minières.

**GML6914****Projet de maîtrise IV****Objectifs :**

**Contenu :** Projet de maîtrise accompli sous la direction d'un directeur de projet et comprenant une étude de niveau supérieur sur un problème de génie ainsi que la rédaction d'un rapport de projet. Le travail comprend l'équivalent de 45 heures par semaine consacrées au projet pendant un trimestre.

**GML6918****Projet d'études supérieures****Objectifs :**

**Contenu :** Projet d'études supérieures accompli sous la direction d'un professeur du département et comprenant une étude d'application de haut niveau ainsi que la rédaction d'un rapport de projet. Le travail comprend au moins 9 heures par semaine consacrées au projet pendant 15 semaines pour un total de 135 heures.

**GNN1001****Minéralogie appliquée à l'étude des minerais et leur traitement**

**Objectifs :** Acquérir les notions de base de la minéralogie appliquée au domaine minier et posséder une connaissance approfondie des méthodes de caractérisations physique, chimique et minéralogique.

**Contenu :** Les différentes méthodes de caractérisation minéralogique qui peuvent être appliquées à l'étude des diverses minéralisations métalliques et non métalliques ainsi que leur application à l'exploitation minière au travers de toutes ses étapes: prospection, extraction et traitement du minerai. Les méthodes de caractérisation physique et chimique; les analyses spectroscopiques; les microscopies optique et électronique. La minéralogie et quelques notions de cristalochimie des principales familles de minéraux.

**GNN1002****Remblais miniers**

**Objectifs :** Connaître les divers remblais miniers utilisés et les avantages/désavantages de chacun. Acquérir les notions de base nécessaires au design et à l'implantation du remblais dans une opération minière. Connaître les caractéristiques des méthodes de mesure ainsi que les méthodes de contrôle de qualité.

**Contenu :** Les divers types de remblais selon le contexte d'utilisation et leur classification; leurs méthodes de préparation et de mises en place. Les caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques des remblais; les diverses méthodes de mesure au laboratoire et in situ; le contrôle de qualité. La chimie des agents de cimentation. Les notions de design de remblai, les calculs standards de stabilité, d'autoportance et dimensionnement des ouvrages de retenus (barricades).

**GNN1005****Flottation des minerais**

**Objectifs :** Comprendre le phénomène de la flottation des minerais appliquée à la gestion des résidus miniers et connaître le principe de la désulfuration des résidus miniers dans ses dimensions théorique, technique et économique.

**Contenu :** La flottation des minerais appliquée à la gestion des résidus miniers. La désulfuration des résidus miniers en tant qu'application de la flottation des minerais: aspects théorique, technique et économique. L'essor de la désulfuration en parallèle avec l'utilisation des remblais en pâte: théorie de la flottation non sélective des sulfures; réactifs de flottation; exemples typiques de procédés (laboratoire et industriels); simulation et contrôle du procédé de désulfuration.

**GNN1008****Environnement minier et méthodes de restauration**

**Objectifs :** Connaître les aspects et problèmes environnementaux liés à l'exploitation minière. Acquérir les bases nécessaires à l'environnementaliste pour l'optimisation des procédures de gestion des rejets les plus efficaces et les plus économiques.

**Contenu :** Description des principaux problèmes environnementaux générés durant les exploitations minières tels que le drainage minier acide (cas des minerais sulfureux), la radioactivité (cas des minerais radioactifs), ainsi que les problèmes liés à la gestion des rejets miniers. Notions de géochimie et minéralogie appliquée à l'étude de la prédiction du degré de pollution des rejets miniers. Les différentes méthodes de gestion des résidus miniers et de restauration des sites pollués; sélection des méthodes de restauration basée sur les aspects techniques et économiques.

**GNN1010****Géotechnique minière**

**Objectifs :** Acquérir les notions de base en géotechnique et en hydrogéologie qui rendront l'étudiant capable d'effectuer le design des ouvrages miniers et de déterminer leur stabilité.

**Contenu :** Retour sur les notions théoriques en géotechnique et en hydrogéologie. Les différents tests et méthodes utilisés dans la détermination des propriétés des matériaux naturels et miniers. La législation pertinente reliée aux ouvrages miniers. Le design et la construction des différents ouvrages miniers (digues de retenue, couvertures, etc.). L'analyse de la stabilité des ouvrages et l'utilisation de certains outils numériques.

**GNN1012****Mécanique des roches**

**Objectifs :** Interpréter les résultats d'études géologiques et géotechniques dans le but d'analyser le comportement mécanique des massifs rocheux. Identifier les paramètres nécessaires au

calcul d'un ouvrage en rocher (excavations, cavités) et choisir les essais en laboratoire et in situ propres à mesurer ces paramètres. Choisir et justifier la méthode de calcul pour définir les dispositions générales et le dimensionnement d'un ouvrage, en évaluant la sécurité et les marges d'incertitude.

**Contenu :** Description et classification géomécaniques des roches et des massifs rocheux. Propriétés mécaniques des massifs rocheux : caractéristiques de la roche, critères de rupture et lois constitutives, résistance au cisaillement des discontinuités. Stabilité des talus rocheux : modes et causes de rupture, rôle de l'eau, études de stabilité en 2D et 3D par l'équilibre limite. Stabilité des excavations : états de contraintes, calcul des soutènements par la méthode convergence-confinement, calcul des facteurs de sécurité au glissement, calcul des ancrages.

**GNN1013****Sujets spéciaux en génie minier**

**Objectifs :** Permettre à l'étudiant d'approfondir un sujet associé à ses études supérieures.

**Contenu :** Projet d'études supérieures accompli sous la direction d'un professeur du département et comprenant une étude d'application de haut niveau ainsi que la rédaction d'un rapport de projet. Le travail comprend au moins neuf heures par semaine consacrées au projet pendant quinze semaines pour un total de 135 heures. À la fin du projet, l'étudiant doit présenter ses résultats sous la forme d'un exposé oral.

**GNN1015****Hydrogéologie I**

**Objectifs :** Acquérir les connaissances de base nécessaires pour être capable d'appliquer les lois qui régissent le comportement de l'eau dans les sols et les roches dans différentes conditions rencontrées sur le terrain naturel et au niveau des ouvrages de génies. À la fin du cours, les étudiants auront les outils nécessaires pour suivre des cours plus approfondis en hydrogéologie environnementale et en hydrogéologie appliquée à la gestion des eaux souterraines.

**Contenu :** Types de roches; Propriétés physiques et hydrodynamiques des matériaux aquifères (milieux poreux et fissurés, homogènes et hétérogènes, isotropes et anisotropes) en conditions saturées et non saturées (zone vadose); Écoulements souterrains en conditions saturées : charge hydraulique, réseaux d'écoulement; Écoulements dans la zone vadose : méthodes de mesure et d'estimation de l'évaporation, l'évapotranspiration, l'infiltration; Structure et typologie des aquifères, hydraulique des puits; Notions d'hydrologie : cycle et bilan hydrologiques; Techniques de modélisation de l'écoulement.

**GNN1016****Traitement d'images**

**Objectifs :** Être en mesure de connaître

les méthodes utilisées aujourd'hui dans le traitement d'images à différentes échelles et être capable de visualiser et d'analyser les données intermédiaires de diverses natures : cartes de régions, listes de points connexes, tableaux de valeurs mesurées, etc., afin de retirer l'information maximale de l'objectif étudié. En informatique, le traitement d'images désigne l'ensemble des traitements automatisés qui permettent de produire d'autres images numériques ou d'en extraire de l'information.

**Contenu :** La résolution d'acquisition et le mode de codage utilisé lors de la numérisation, qui déterminent le degré de précision des éventuelles mesures de dimensions. L'explication du principe des algorithmes classiques de traitement d'images par le sens physique et son aspect pratique. Les applications du traitement d'images dans diverses disciplines et leur méthodologie.

**GNN1017****Hydrogéochimie environnementale dans un contexte minier**

**Objectifs :** Permettre l'apprentissage, la compréhension et l'application des principes de base de l'hydrogéochimie environnementale dans un contexte minier. Maîtriser les interactions entre les contaminants spécifiques à l'industrie minière, dont les métaux et l'environnement. Mettre en pratique les notions acquises par l'étude de plusieurs exemples de cas de sites miniers contaminés, avec un accent particulier sur les processus de transformation, de transport et de devenir des contaminants. Comprendre les processus impliqués dans la génération des eaux minières contaminées. Acquérir les connaissances nécessaires pour la construction et l'interprétation des diagrammes Eh-pH. Apprendre l'importance de la spéciation et de la biodisponibilité des métaux dans les eaux minières contaminées. Appliquer les principes géochimiques à l'évolution de l'eau souterraine et à la modélisation hydrogéochimique.

**Contenu :** Équilibres aqueux, sorption et complexation. Réactions redox, construction des diagrammes Eh-pH et pC-pH. Réactions de dissolution-précipitation, cycle du carbone, système carbonate. Formation du drainage minier acide (DMA) et du drainage neutre contaminé (DNC), catalyse bactérienne et ferrique, réactions galvaniques, géochimie des sulfures et des minéraux neutralisants. Prédiction du DMA : essais statiques et cinétiques. Sources et spéciation des métaux. Écoulement de l'eau souterraine en milieux poreux, propriétés et classification des aquifères. Hydrogéochimie et qualité des eaux souterraines. Évolution géochimique. Géochimie isotopique des eaux naturelles et traceurs environnementaux. Modélisation hydrogéochimique.

**GNN1018****Traitement des effluents miniers**

**Objectifs :** Permettre l'apprentissage et la compréhension des processus impliqués dans la génération et le

traitement des effluents miniers, en utilisant des technologies classiques et émergentes. Maîtriser l'application des principes de base en traitement des eaux dans le cas des effluents miniers contaminés par les métaux/métalloïdes, l'azote ammoniacal, les cyanures, le sulfate, les thioisels, les phosphates, la salinité, la radioactivité, les terres rares et les matières en suspension. Étudier les interactions entre ces contaminants et l'environnement. Mettre en pratique les notions fondamentales acquises par l'étude de plusieurs exemples de cas de sites miniers contaminés, avec un accent particulier sur les processus impliqués, les mécanismes d'enlèvement des contaminants, ainsi que sur l'évolution de l'efficacité et de la stabilité des systèmes de traitement à court et à long terme. Acquérir les connaissances nécessaires pour la sélection, le design, la construction, l'opération et le suivi des systèmes de traitement. Apprendre le rôle, l'importance, les avantages et les limitations des essais de laboratoire versus les essais de terrain. Appliquer les notions acquises à l'interprétation de l'évolution de la qualité des eaux en aval des systèmes de traitement des effluents miniers.

**Contenu :** Gestion de l'eau minière et réglementations provinciale et fédérale. Objectifs environnementaux de rejets. Classification, principes de base et processus se déroulant dans les systèmes de traitement passif et actif, chimique et biologique, aérobique et anaérobique/anoxique des effluents miniers. Sources, objectifs de traitement et mécanismes d'enlèvement pour les contaminants spécifiques à l'industrie minière, tels que les métaux/métalloïdes, l'azote ammoniacal, les cyanures, le sulfate, les thioisels, les phosphates, la salinité, la radioactivité, les terres rares et les matières en suspension. Études de cas réels. Critères de sélection et de design, étapes à suivre et essais à réaliser avant la construction d'un système de traitement des effluents miniers à l'échelle de terrain.

### GNM1019

#### Géophysique appliquée

**Objectifs :** Permettre l'apprentissage et la compréhension des principes associés aux diverses méthodes géophysiques et leurs applications dans différents domaines : exploration des ressources naturelles; détection des cavités, des contaminations dans le sol ou dans l'eau; surveillance de sismicité etc. Maîtriser des méthodes conventionnelles de traitement et d'interprétation de données géophysiques. Apprendre à sélectionner l'information utile provenant d'une ou plusieurs méthodes géophysiques appropriées, à l'utiliser et à l'intégrer dans leur application. Mettre en pratique les notions fondamentales acquises par l'étude d'exemples d'applications de méthodes géophysiques en exploration des ressources naturelles et en environnement.

**Contenu :** Introduction du principe des méthodes géophysiques : gravimétrie, magnétique, résistivité, électromagnétique, sismique, géoradar,

et radiométrie. Les propriétés physiques des roches, des eaux, des minerais non métalliques, semi-métalliques et métalliques. Traitement et interprétation de résultats d'observations géophysiques. Démonstration et application de méthodes géophysiques à des différents domaines : exploration des minerais, eau souterraine et sources énergétiques (lithium, pétrole, charbon etc.), au génie civil, et en environnement.

### GNM1020

#### Restauration des sites miniers : de la théorie à la pratique

**Objectifs :** Permettre l'apprentissage et la compréhension des processus impliqués dans les méthodes de restauration des sites miniers. Maîtriser les principes de base de la génération et de la prédiction du drainage minier contaminé. Étudier les principes fondamentaux à la base des différentes techniques de restauration : écoulement de l'eau et mouvement des gaz dans les milieux poreux et rocheux, mouvements thermiques dans les matériaux géologiques. ... Maîtriser et appliquer les méthodes de caractérisation et connaître les principales propriétés des rejets miniers. Connaître les principes, les facteurs d'influence, les approches de design et monitoring des principales méthodes de restauration applicables aux parcs à résidus et aux haldes à stériles. Appliquer les notions acquises à l'interprétation de résultats provenant de cas réels.

**Contenu :** Thèmes abordés : généralités sur la problématique environnementale reliée à la restauration des sites miniers; génération du drainage minier acide (DMA) et du drainage neutre contaminé (DNC); prédiction du DMA à l'aide d'essais statiques et cinétiques; écoulement de l'eau en milieu non saturé; mouvement des gaz et de la chaleur en milieu poreux; modélisation des mouvements des fluides et de la chaleur dans les milieux poreux; propriétés hydrogéotechniques des rejets miniers; recouvrement en eau; technique de la nappe surélevée; couvertures avec effets de barrière capillaire; barrières à l'infiltration d'eau; recouvrements isolants. Études de cas réels pour chaque méthode étudiée. Comparaison entre des valeurs mesurées sur site et des résultats provenant d'analyses numériques. Visite de plusieurs sites existants : Mine Doyon, Aldermac, Lorraine, Don Rouyn, Meadowbank. NOTE : Nombre de places limité. Pour vous inscrire, veuillez communiquer avec le responsable du programme.

### GNM1021

#### Introduction au traitement de données et à la modélisation 3D

**Objectifs :** Acquérir les connaissances de base relatives aux méthodes utilisées dans le traitement de données et dans la modélisation 3D. Apprendre les différentes étapes à suivre quant à la sélection de la méthode la plus appropriée pour extraire le maximum d'informations d'un projet à l'étude, en se basant sur les outils disponibles en

traitement de données et modélisation 3D.

**Contenu :** Traitements de données géoscientifiques, traitements d'images, modélisation 3D, caractéristiques de différents filtres, méthodes de segmentation et de décomposition, méthodes de discrétisation du modèle, analyse de stabilité des méthodes numériques, stratégie de vérification du résultat de modélisation.

### GNM1022

#### Cartographie géologique de 2D à 3D

**Objectifs :** Connaître les méthodes utilisées aujourd'hui dans le traitement de données et d'images en science de la terre, pour être capable d'extraire l'information ayant une signification géologique en deux et en trois dimensions.

**Contenu :** Explication du principe des algorithmes de traitement d'images en faisant le lien avec le sens physique et son aspect pratique. Applications et illustrations du traitement de diverses images dans le domaine de science de la terre et leur méthodologie (interpolation, transformation, filtre etc.). De l'observation à l'image, de l'image aux attributs, application des méthodes de la caractérisation pour la géologie de surface. Intégration d'informations multidisciplinaires (géologie-géochimie-géophysique), avec l'aide de modélisations 3D, l'extension de 2D image vers 3D espace.

### GNM2011

#### Végétalisation des sites miniers : de la théorie à la pratique

**Objectifs :** Acquérir des connaissances théoriques et pratiques sur les interactions plantes-sustrats miniers. Connaître le contexte réglementaire, le cadre conceptuel écologique et les enjeux de développement durable associés à la végétalisation des sites miniers. Développer des aptitudes à concevoir un plan de végétalisation minière dans la zone boréale. Acquérir de l'expérience à travers l'étude de cas réels et des mises en situation. Se familiariser avec les enjeux de recherche en végétalisation des sites miniers.

**Contenu :** Guide de restauration, guide sur la réhabilitation des terrains contaminés. Cadre conceptuel de la végétalisation minière (succession végétale, filtres écologiques, réhabilitation vs restauration écologique, évolution à long terme et stabilité). Types de rejets miniers solides (générateurs ou pas d'acide, roches stériles, résidus de concentrateurs, boues de traitement des eaux). Établissement des plantes sur un nouveau substrat (acquisition des ressources, relations des plantes avec d'autres organismes). Limitations à l'établissement des plantes sur rejets miniers. Techniques de végétalisation (naturelle vs assistée, matériel végétal) et d'amélioration du substrat (fertilisation, amendement, couverture de sol, stockage du sol), valorisation de matières résiduelles fertilisantes. Plan de végétalisation, validation expérimentale, indicateurs de succès. Services

écologiques (valorisation de matières résiduelles fertilisantes, fixation de carbone, production de biomasse, phytoremédiation). Plantes et recouvrements visant à contrôler la migration des fluides (biointrusion, bilan hydrique, consommation d'oxygène). Modélisation hydrogéologique intégrant l'effet de la végétation et études paramétriques.

### MEC6404

#### Éléments finis, concepts et applications

##### Objectifs :

**Contenu :** Approche directe d'analyse matricielle, principe d'énergie potentielle minimum et méthode de Rayleigh-Ritz. Formulations compatibles des éléments: solide, poutre, plaque et coque. Corps axisymétriques avec les chargements généraux. Problèmes de valeurs propres: analyses dynamique et stabilité linéaire. Problèmes avec contraintes. Formulations mixtes, hybrides et équilibrés. Méthodes des résidus pondérés. Formulation non linéaire des éléments de bare.

### MEC6405

#### Analyse expérimentale des contraintes

##### Objectifs :

**Contenu :** Jauges électriques de déformation - circuits de mesure - instruments de mesure : principes généraux, amplification, filtrage, instrumentation statique et dynamique - Systèmes d'acquisition de données - Micro-ordinateurs - Technique des vernis craquelants - Photoélasticité - Revue des autres techniques.