

**Doctorat en génie minéral - 1637**

**RESPONSABLE :**

Benoît Plante  
819 762-0971 poste 2476

**SCOLARITÉ :**

90 crédits, Troisième cycle

**GRADES :**

Philosophiae doctor

**OBJECTIFS :**

Le programme de doctorat en génie minéral a pour but de développer chez le candidat un haut niveau de connaissances, de rigueur intellectuelle, de curiosité scientifique et de créativité nécessaires, tant dans les activités professionnelles de pointe que dans la recherche scientifique et l'enseignement universitaire. Ce programme d'études est conçu pour permettre au candidat d'approfondir ses connaissances dans sa spécialité et d'en repousser les frontières, de comprendre et d'évaluer la littérature scientifique et de développer la maîtrise de méthodes rigoureuses de raisonnement et d'expérimentation.

Quatre axes de spécialisation sont disponibles pour le programme de doctorat en génie minéral : géologie minière, géomécanique, géophysique appliquée et hydrogéologie environnementale.

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

**CONDITIONS D'ADMISSION :**

**Base études universitaires**

Être détenteur d'un diplôme de baccalauréat en ingénierie ou d'un diplôme de maîtrise ou d'un diplôme jugé équivalent par l'École Polytechnique qui témoigne d'une formation appropriée.

Un dossier universitaire de haut niveau ne garantit pas l'accès au programme de doctorat. Le candidat doit obtenir l'appui d'un professeur qui accepte de diriger ses travaux.

**Admission directe baccalauréat-doctorat**

Un candidat qui postule à un programme de doctorat sur la base d'un diplôme de baccalauréat en ingénierie ou l'équivalent doit avoir obtenu une moyenne cumulative d'au moins 3,2/4,0 (ou l'équivalent agréé par Polytechnique Montréal) dans ses études ayant mené au diplôme de baccalauréat en ingénierie (ou l'équivalent).

Toutefois, un candidat dont la moyenne est inférieure à 3,2/4,0 (ou son équivalent) peut être admis si une recommandation favorable du Comité d'études supérieures du département ou du programme concerné est transmise au registrariat dans les délais prescrits. L'expérience du candidat peut, entre autres, être tenue en compte par le Comité d'études supérieures.

Dans certains cas, des exigences ou des contraintes particulières peuvent être imposées (cours complémentaires, admission en préparation, admission en maîtrise recherche, etc.).

Note : Pour connaître les conditions d'un passage direct de la maîtrise au doctorat sans soumettre de mémoire, voir l'article 71.3 des règlements particuliers des études supérieures de Polytechnique Montréal.

**PLAN DE FORMATION :**

**Géologie minière**

Modélisation géostatistique des gisements. Évaluation minière. Optimisation des exploitations. Planification et contrôle de la production. Traitement des minerais.

GNM9900 Thèse (75 cr.)  
15 crédits optionnels

**Cours optionnels**

L'étudiant choisit 15 crédits parmi les suivants :

Cours de Polytechnique Montréal

GML6203	Méthodes magnétiques et gravimétriques en géophysique (3 cr.)
GML6204	Méthodes électriques et électromagnétiques en géophysique (3 cr.)
GML6402A	Géostatistique (3 cr.)
GML6502	Tectonophysique (3 cr.)
GML6503	Géologie structurale et tectonique (3 cr.)
MTH6403	Programmation mathématique I (3 cr.)

**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.

GNM9900 Thèse (75 cr.)  
15 crédits optionnels

**Cours optionnels**

L'étudiant choisit 15 crédits parmi les suivants :

**Cours de Polytechnique Montréal**

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.)
GML8201	Techniques géophysiques de proche surface (3 cr.)

**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 milieu discontinu. 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.

GNM9900 Thèse (75 cr.)  
15 crédits optionnels

**Cours optionnels**

L'étudiant choisit 15 crédits parmi les suivants :

**Cours de l'UQAT**

GML6003	Séminaire de géomatériaux (3 cr.)
---------	-----------------------------------

**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.)
GML6107	Hydrogéologie (3 cr.)
GML6402A	Géostatistique (3 cr.)
GML6502	Tectonophysique (3 cr.)
GML6503	Géologie structurale et tectonique (3 cr.)
GML8201	Techniques géophysiques de proche surface (3 cr.)
MEC6216	Géothermie et applications (3 cr.)
MEC6404	Éléments finis, concepts et applications (3 cr.)
MEC6405	Analyse expérimentale des contraintes (3 cr.)

**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 physique (laboratoire) et numérique (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 à la modélisation en hydrogéologie et aux problèmes de contamination. Géophysique appliquée aux problèmes de pollution des nappes.

GNM9900 Thèse (75 cr.)  
15 crédits optionnels

#### Cours optionnels

L'étudiant choisit 15 crédits parmi les suivants :

#### Cours de l'UQAT

GML6003 Séminaire de géomatériaux (3 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.)  
GNM1008 Environnement minier et méthodes de restauration (3 cr.)

#### 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.)  
GML6107 Hydrogéologie (3 cr.)  
GML6112 Environnement minier et restauration des sites (3 cr.)  
GML6402A Géostatistique (3 cr.)  
GML8109 Stockage géologique des déchets (3 cr.)  
GML8114 Hydrogéologie des contaminants (3 cr.)  
GML8201 Techniques géophysiques de proche surface (3 cr.)

---

\* : Disponible à distance

#### NOTES :

Les étudiants de l'UQAT devront réaliser et réussir les 4 ateliers complémentaires obligatoires au doctorat de 1 crédit chacun :

CAP7001 Réussir au doctorat,  
CAP7005 Traitement de l'information scientifique et technique,  
CAP7010 La créativité à votre portée et  
CAP7015 Conduire un projet de recherche.

Ces crédits seront hors programmes et en sus des 90 crédits du doctorat. L'UQAT et Polytechnique Montréal élaboreront conjointement des moyens pour que les étudiants de l'UQAT suivent ces ateliers en minimisant leurs déplacements.

L'Atelier de formation en santé-sécurité (3 h, 0 crédit) de Polytechnique Montréal SST6000, ou son équivalent à l'UQAT autorisé par Polytechnique Montréal, est obligatoire et doit être suivi en début de programme.

**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 milieu 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).

**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.

**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.

**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 minérale 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.

**GML6402A****Géostatistique**

**Objectifs :** Géostatistique linéaire, stationnaire et non stationnaire, univariable et multivariable. Variances de blocs, de dispersion, d'estimation. Krigeages simple, ordinaire, avec dérive, avec dérive externe; formulation duale. Cokrigeage. Variogrammes, variogrammes croisés, fonctions de covariances, covariances croisées; modèles et conditions d'admissibilité. Krigeages et cokrigeages d'indicatrices

et multigaussiens. Simulations non conditionnelles et conditionnelles : méthodes des bandes tournantes, séquentielles, matricielles, spectrales; post-conditionnement. Cosimulations. Simulations plurigaussiennes, multipoints. Recuit simulé, déformations graduelles. Applications en hydrogéologie, environnement, géophysique, estimation des ressources, exploitation des mines.

**Contenu :****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 du 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.

**GML8109****Stockage géologique des déchets**

**Objectifs :** Sélection de sites pour entreposage de déchets liquides ou solides. Conditions hydrogéologiques et périmètres de protection. Barrières naturelles ou construites. Tapis d'étanchéité en argile, 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 divers stockages. Notions d'études en laboratoire et de modélisation numérique des phénomènes.

**Contenu :****GML8114****Hydrogéologie des contaminants**

**Objectifs :** Origine et propriétés physico-chimiques des principaux contaminants organiques, inorganiques et bactériologiques présents dans les sols et les aquifères. Aspects législatifs

des sols et des eaux souterraines contaminés. Identification des récepteurs de l'eau souterraine et critères applicables. Caractérisation environnementale de type phase I et II. Stratégies et techniques d'échantillonnage des sols et des eaux souterraines. Modèles conceptuels de migration des contaminants miscibles et immiscibles, denses et légers. Conception et interprétation d'essai de récupération d'hydrocarbures en phase flottante en vue de la caractérisation d'un site. Migration et influence de l'hétérogénéité d'un site sur le transport des polluants. Processus d'atténuation naturelle affectant la qualité des eaux souterraines. Suivi environnemental de la qualité des eaux souterraines.

#### Contenu :

#### GML8201

#### Techniques géophysiques de proche surface

**Objectifs :** Types de problèmes à faible profondeur rencontrés dans les sols et le roc en génie, en hydrogéologie et en environnement et transposition en modèles de distribution de propriétés physiques. Relations entre propriétés physiques des matériaux et réponses géophysiques. Techniques géophysiques à haute résolution : microgravimétrie, gradiométrie magnétique, tomographie électrique, méthodes électromagnétiques, sismique réflexion, radar géologique. Principes, réponses et interprétation; résolution spatiale, bruits et profondeur d'investigation. Avantages et limitations de chacune des techniques. Applications et études de cas.

#### Contenu :

#### GNM1001

#### Minéralogie appliquée à l'étude des minerais et leur traitement

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

**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 cristallographie des principales familles de minéraux.

#### GNM1002

#### 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).

#### GNM1005

#### 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.

#### GNM1008

#### 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.

#### GNM9900

#### Thèse

**Objectifs :** L'étudiant au doctorat en génie minéral doit rédiger une thèse qui témoigne d'une aptitude à mener à bien une recherche originale en génie minéral. La thèse sera soutenue devant jury.

#### Contenu :

#### MEC6216

#### Géothermie et applications

**Objectifs :** Ressources géothermiques à haute et basse température. Température du sol, gradient géothermique, propriétés du sol. Notions d'hydrogéologie. Survol des différents systèmes à basse température : circuits ouverts et fermés; systèmes verticaux et horizontaux. Couplage aux bâtiments et aux pompes à chaleur. Transfert de chaleur dans le sol : méthodes analytiques et numériques. Test de réponse thermique. Résistance thermique des puits. Conception, dimensionnement et simulation des systèmes verticaux. Applications : chauffage et climatisation des bâtiments, pieux énergétiques, gel du sol, « geocooling », stockage saisonnier par puits géothermiques.

#### Contenu :

#### 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.

#### MTH6403

#### Programmation mathématique I

#### Objectifs :

**Contenu :** Programmation linéaire : modélisation, méthode du simplexe, complexité, dualité, analyse de sensibilité, interprétation économique. Aspects pratiques de la programmation linéaire : langages de modélisation algébrique, stratégies de sélection de la variable entrante, logiciel CPLEX. Programmation non linéaire sans contrainte : conditions d'optimalité, convexité, méthodes du gradient, de Newton et quasi-newtoniennes. Programmation non linéaire avec contraintes : condition d'optimalité de Kuhn-Tucker, dualité lagrangienne, méthodes des directions réalisables, du gradient réduit, du gradient projeté, du

lagrangien, du lagrangien augmenté, de barrière et de pénalité. Applications en génie chimique, génie mécanique et génie industriel.