

Développement harmonieux de l'activité minière

Consultation

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts du Québec

Mémoire sur le Thème 3

Encadrement de l'activité minière
pour la protection de l'environnement et de la santé

Pour une gestion environnementale responsable des rejets miniers

Rédigé par Michel Aubertin, PhD,
Professeur émérite, Polytechnique Montréal

Soumis en ligne au MRNF, le 19 mai 2023

SOMMAIRE

L'exploitation des mines et le traitement des minéraux contribuent à la vitalité économique de plusieurs régions de la province. Ces activités industrielles engendrent toutefois d'importants défis techniques et certaines préoccupations environnementales, notamment en raison des grandes quantités de rejets miniers produites. Ces rejets solides et liquides doivent être gérés de façon responsable afin de protéger la population et les écosystèmes. Les entreprises minières tentent d'ajuster leurs pratiques en fonction de l'évolution des connaissances techniques et des lignes directrices émises par les ministères responsables de la réglementation (principalement le MRNF et le MELCCFP). Ce mémoire aborde différentes problématiques liées à la production et à la disposition des rejets miniers, en mettant l'accent sur les rejets de concentrateur déversés dans des parcs à résidus miniers et les roches stériles entreposées dans des haldes en surface. L'accent est mis sur les aspects géoenvironnementaux associés aux caractéristiques de ces rejets, aux modes de disposition et aux risques qui en découlent. Certaines technologies avantageuses pour minimiser ces risques sont identifiées. Le mémoire contient aussi diverses mises en garde et recommandations visant à favoriser une gestion responsable de nos ressources minérales afin de protéger l'environnement. La bibliographie fournie plus de détails sur les divers points abordés dans le document. Une courte note biographique suit.

1. INTRODUCTION

L'industrie minière constitue l'un des moteurs économiques de plusieurs régions du Québec. Les opérations minières utilisent des technologies de pointe de sorte qu'elles ont aussi un apport marqué sur le développement de la main d'œuvre et de l'expertise locale. Ces technologies servent à optimiser les différentes étapes de production des valeurs commerciales à partir des ressources minérales extraites du sous-sol. L'industrie minière doit aussi porter une attention particulière aux multiples aspects menant à une gestion efficace et sécuritaire des très grandes quantités de rejets issues de l'extraction et du traitement du minerai. La gestion des rejets solides et liquides constitue en ce sens un volet très important pour l'industrie minière, qui en produit proportionnellement plus que tout autre secteur d'activité. Par exemple, la production d'un gramme d'or par une mine à ciel ouvert peut générer plus de 4 tonnes de rejets solides et liquides, principalement sous forme de rejets de concentrateur déversés dans des parcs à résidus et de roches stériles entreposées dans des haldes en surface. Quelques-unes des plus grandes structures construites par l'Homme sont d'ailleurs des ouvrages conçus spécifiquement pour l'entreposage des rejets miniers; certains de ces ouvrages atteignent une hauteur de plus de 100 m, ont une longueur excédant une dizaine de kilomètres, et couvrent une superficie de plusieurs kilomètres carrés où sont entreposés des centaines de millions de mètres cubes de matières résiduelles.

La disposition des rejets miniers requiert des investissements majeurs afin de développer et appliquer des méthodes économiques tout en étant sécuritaire pour la population et l'environnement. Cette composante intégrante des opérations minières représente un grand défi car les rejets produits en abondance montrent souvent des caractéristiques complexes qui rendent difficile et incertaine le contrôle de leur comportement pendant l'opération de la mine et après sa fermeture.

La majorité des entreprises minières et les firmes de consultants spécialisés connaissent bien les enjeux et les risques associés aux ouvrages servant à l'entreposage de ces rejets, notamment en ce qui a trait à leur intégrité physique et aux problèmes potentiels de contamination des eaux. Malgré les progrès réalisés, on observe encore un nombre relativement élevé de défaillances majeures des ouvrages à l'échelle nationale (comme ce fut le cas à la mine Mount Polley en 2014 en Colombie-Britannique) et internationale (notamment au Brésil en 2015 et 2019). Cette situation est préoccupante car la rupture d'un ouvrage majeur (i.e. digue de parcs à résidus miniers ou halde à stériles) peut entraîner des conséquences dramatiques pour les infrastructures locales et la sécurité des personnes. De telles instabilités sont aussi susceptibles de causer des torts considérables à l'environnement. Le Québec a été relativement épargné au cours des dernières années, mais nous ne sommes pas à l'abri de tels risques, comme l'a montré par exemple la rupture d'une digue à l'ancienne

mine Opemiska en 2008. A ces défis géotechniques s'ajoutent ceux découlant de la contamination des eaux sur les sites miniers par les composés chimiques utilisés pour le traitement du minerai (p. ex. cyanures) et en raison de la réactivité de certains minéraux (p. ex. sulfures de fer) contenus dans la roche qui compose les rejets miniers.

Les normes et les pratiques en vigueur pour la gestion des rejets miniers au Québec sont décrites dans des documents de support produits principalement par le ministère de l'environnement (notamment la Directive 019, MELCCFP) et par le ministère des ressources naturelles (Guide et modalités de préparation du plan de restauration, MRNF). Ces documents doivent toutefois être **adaptés à un contexte qui évolue** avec les particularités de l'industrie minière, les connaissances scientifiques et techniques et les attentes de la Société.

Ce mémoire rappelle certains éléments importants relatifs à l'analyse, la conception et la construction des sites d'entreposage de rejets miniers, en insistant sur des points particuliers pouvant s'avérer critiques en raison des risques pour la stabilité géotechnique et géochimique des sites. Le texte comporte aussi certaines **mises en garde** et **recommandations** sur des aspects spécifiques qui peuvent s'avérer plus critiques. Les éléments de base qui sous-tendent le contenu de ce mémoire sont relativement bien connus dans l'industrie minière, mais ils ne sont pas toujours pris en compte intégralement dans la pratique. Plus de détails sur les aspects techniques et opérationnels se retrouvent dans des publications de l'auteur et collaborateurs, dont certaines sont mentionnées dans la **Bibliographie à la fin du mémoire**.

2- PROBLÉMATIQUE ET PRINCIPALUX DÉFIS

2.1 Stabilité géotechnique des ouvrages miniers

Les principales méthodes de conception et de construction des ouvrages miniers servant à l'entreposage des rejets liquides et solides (principalement les digues de parcs à résidus et les haldes à stériles) sont connues depuis longtemps, mais elles continuent d'évoluer avec l'état des connaissances et les particularités des nouvelles opérations minières. Malgré des progrès indéniables, les risques associés à de tels ouvrages demeurent toutefois bien présents encore aujourd'hui, comme le démontrent plusieurs publications récentes qui décrivent des cas de défaillance majeure. Les causes de telles défaillances sont nombreuses, surtout pour les digues de parcs à résidus miniers; mentionnons : la submersion de la crête par une crue des eaux excessive dans le bassin, une faible capacité portante ou un tassement trop marqué des fondations, l'érosion régressive ou de surface des matériaux, le glissement le long des pentes attribuable aux sollicitations statiques ou dynamiques, et la liquéfaction des résidus en cas de séisme.

La grande majorité des cas de défaillance pour les parcs à résidus surviennent en période d'opération de la mine, mais ils peuvent aussi survenir en phase post-

fermeture (p. ex. effets sismiques ou débordement dû à des précipitations abondantes). Parmi les méthodes de constructions disponibles, **les digues construites par la méthode amont sont de loin les plus vulnérables**. On note aussi que des cas de rupture ont été attribués à des erreurs humaines impliquant par exemple un manque d'attention aux détails, des problèmes de communication ou une documentation incomplète, ou de mauvaises décisions découlant en partie de fréquents changements de personnel ou des pressions découlant des besoins de la production. L'absence de suivi à la fermeture est aussi responsable de problèmes observés.

La **persistance de ces problèmes géotechniques** est décevante puisque les rétro-analyses des instabilités de tels ouvrages montrent que pratiquement tous les cas peuvent être expliqués par des principes classiques bien connus dans le domaine. Une application systématique des connaissances appropriées aurait alors suffi pour prévenir la très grande majorité des défaillances observées.

2.2 Contamination des eaux et stabilité géochimique

Outre la présence de produits chimiques utilisés pour le traitement du minerai, comme les cyanures pour l'extraction de l'or, le principal problème de nature géochimique lié à la gestion des rejets miniers est connu sous le nom de drainage minier acide (**DMA**). Ce phénomène bien connu et étudié depuis longtemps se produit naturellement lorsque des minéraux sulfureux réactifs, tels la pyrite et la pyrrhotite, sont exposés à l'eau et à l'air. Les réactions d'oxydation de ces minéraux acidifient l'eau et favorisent la mise en solution de divers éléments (incluant des métaux) contenus dans la roche. La génération de DMA est surtout due à l'excavation des roches stériles encaissant le minerai et aux rejets du concentrateur déversés dans les parcs à résidus miniers. Ces effluents acides (avec un pH souvent proche de 2 à 3) constituent une source de pollution potentiellement très dommageable pour les écosystèmes, et elles doivent être traités avant d'être retournés à l'environnement. Le traitement chimique (principalement à la chaux pour rehausser le pH) ne constitue toutefois pas une solution à long terme (voir plus loin).

Même lorsque le pH des effluents est proche de la neutralité (typiquement entre 5,5 et 8,5) et que le potentiel net de génération d'acide est faible à long terme, les rejets peuvent néanmoins produire un drainage neutre contaminé (**DNC**) contenant des concentrations excessives d'éléments solubles (comme l'antimoine, l'arsenic, le cadmium, le cobalt, le mercure, le molybdène, le nickel, le sélénium et le zinc). Les **problèmes dus au DNC** ont longtemps été jugés moins critiques que ceux découlant du DMA, mais on sait aujourd'hui que la contamination d'un effluent neutre peut avoir un impact important sur l'environnement. Certains processus chimiques produisant le DNC sont relativement similaires à ceux du DMA et les techniques de restauration peuvent aussi être assez semblables, mais ce n'est pas toujours le cas.

La protection des eaux souterraines et de surface face à la contamination des eaux minières se fait habituellement à l'aide de barrières d'étanchéité placées au fond

et sur les flancs des sites d'entreposage. La présence de grandes quantités d'eau dans les bassins engendre toutefois des gradients hydrauliques élevés pouvant mener à un écoulement marqué du lixiviat lorsqu'il y a des défauts dans le système d'étanchéité. Il est alors prudent de considérer l'installation de **systèmes d'étanchéité à double protection**, comme cela se fait pour d'autres types de rejets industriels ou domestiques; c'est cependant rarement le cas dans l'industrie minière.

3- PRÉVENTION ET CONTRÔLE DES INSTABILITÉS

3.1 Parcs à résidus

Les digues de parc à résidus miniers peuvent être vulnérables aux risques d'instabilité physique (géotechnique). Ces ouvrages sont construits selon une séquence dictée par le schéma de remplissage spécifique de chaque bassin, qui est défini selon les quantités produites par le traitement du minerai, en tenant compte de la relation entre la hauteur des digues, le volume et la masse des résidus entreposés, et la topographie des lieux. La hauteur des digues doit être adaptée aux besoins d'entreposage, avec revanche minimale acceptable à chaque étape lors des opérations, tout en tenant compte d'une **crue exceptionnelle dont l'ampleur est estimée de façon conservatrice**.

Les principaux objectifs pour la conception et la déposition des résidus devraient inclure une consolidation rapide et la stabilisation des matériaux sur le site, ce qui peut se faire par l'ajout de systèmes de drainage dans les bassins. Il faut aussi viser une réduction accélérée des pressions d'eau dans les ouvrages de retenue, notamment celles générées par l'ajout de nouvelles couches de rejets. On doit aussi **éloigner la zone submergée de la crête de la digue** et abaisser le niveau de la nappe dans le corps de celle-ci. La superficie affectée par la construction du parc à résidus doit être optimisée pour minimiser l'utilisation du territoire, et il faut aussi réduire autant que possible la grandeur du bassin de drainage en amont du site. Dans tous les cas, il faut prévenir le relâchement de contaminants dans l'environnement en assurant l'intégrité et l'étanchéité des bassins.

Plusieurs facteurs peuvent affecter la stabilité des ouvrages. Certains des plus importants sont mentionnés dans ce qui suit, avec quelques suggestions, recommandations et mises en garde visant une gestion sécuritaire des rejets.

3.1.1 Types de digues, fondations et conditions de chargement

La méthode de construction des digues a une grande influence sur les risques d'instabilité. A cet égard, il est prudent d'opter pour une technique qui permet le rehaussement progressif des digues sur une fondation ferme (compétente), ayant une bonne résistance au tassement et à la rupture. En ce sens, la méthode de construction des digues avec un axe central fixe offre plusieurs avantages. A l'opposé, il faut **éviter autant que possible la méthode de rehaussement des digues vers l'amont** qui

implique une construction sur des résidus mous. Cette dernière méthode, moins coûteuse et encore très utilisée aujourd'hui, peut induire des **risques élevés**, surtout lorsque l'épaisseur des résidus devient grande (p. ex. plus de 20 à 30 m); cette méthode engendre aussi des risques considérables dans le **cas de séismes**.

Il est également important d'assurer la stabilité des fondations sous les digues. En ce sens, il est préférable **d'éviter la construction sur des sols mous** (p. ex. argiles normalement consolidées), en raison des tassements et risques de rupture.

Les analyses de stabilité de tels ouvrages doivent tenir compte du remplissage progressive des bassins du parc à résidus, puisque l'ajout de couches en séquence induit des conditions de chargement pouvant s'avérer critiques. Les analyses de stabilité simplifiées basées par exemple sur un état stationnaire des conditions de chargement sont peu représentatives, et elles correspondent généralement à une vision trop optimiste. Il est essentiel de tenir compte du **chargement progressif dû au remplissage séquentiel des bassins** (avec ajout de nouvelles couches) et de l'effet des pressions interstitielles ainsi générées sur les contraintes effectives et la résistance des résidus et des sols, ainsi que sur le facteur de sécurité contre la rupture. Ce type d'analyse transitoire est souvent recommandé, mais il est assez rarement réalisé en pratique. Notons aussi que les analyses en contraintes totales (basées sur la résistance au cisaillement non drainée) **engendrent usuellement de grandes incertitudes** pour les résidus de mines en roches dures dont le comportement ne correspond pas bien aux conditions requises pour ce type d'analyse.

Il faut aussi tenir compte des sollicitations sismiques de façon adéquate, en adoptant une **approche prudente pour évaluer les conditions de chargement**, surtout lorsque les risques sont élevés (p. ex. choisir une récurrence basée sur une probabilité annuelle de l'ordre de 10^{-4}). Il faut également appliquer des méthodes d'analyses représentatives de **conditions sismiques**, ce qui demande une bonne caractérisation des propriétés dynamique des matériaux, l'utilisation de modèles de comportement adéquats et l'application d'outils numériques adaptés aux situations rencontrées. Les analyses sismiques devraient mener à une **conception basée sur la performance** (*Performance-based design*) définie en termes des pressions d'eau, de la liquéfaction, des contraintes induites et des déplacements ; les analyses menant à un facteur de sécurité unique sont usuellement mal adaptées à ce type de sollicitation.

3.1.2 Désulfuration environnementale des résidus

D'autres approches peuvent aussi aider à prévenir les problèmes de stabilité géotechnique (et géochimique) des ouvrages de surface. Dans le cas des résidus miniers réactifs (surtout ceux qui sont générateurs de DMA), il est possible de **séparer les minéraux sulfureux et de les entreposer séparément**, de façon distincte et appropriée. Cette séparation peut s'effectuer au moyen de procédés minéralurgiques intégrés aux étapes d'extraction au concentrateur (usuellement par flottation). Les minéraux sulfureux représentent souvent une portion limitée des résidus, et la

séparation produit alors un concentré de sulfures (générateur d'acide) moins abondant que la fraction de résidus désulfurés (non génératrice de DMA). La désulfuration réduit ainsi le volume de résidus problématiques, mais n'élimine pas les résidus réactifs. Ces résidus sulfureux peuvent parfois être retournés sous terre sous forme de remblai cimenté (voir plus loin) ou ils peuvent être entreposés séparément dans le parc à résidus. La désulfuration environnementale permet aussi de produire une fraction de résidus non (ou peu) réactive utile pour gérer et restaurer le site, notamment pour la construction d'une couverture monocouche ou multicouche. La désulfuration environnementale est particulièrement **avantageuse lorsqu'elle est combinée à d'autres techniques** qui visent une gestion intégrée des rejets de concentrateur. La désulfuration engendre toutefois des coûts additionnels, et son efficacité dépend de plusieurs facteurs comme la granulométrie des rejets et la présence d'une fraction argileuse.

3.1.3 Remblayage des ouvertures

Les rejets de concentrateur (et les roches stériles) peuvent être utilisés comme matériau de remblayage dans les **chantiers miniers souterrains**, et ou être placés **dans des fosses** pour des exploitations à ciels ouverts. Le remblayage avec des rejets miniers peut grandement aider à améliorer le mode de gestion en **minimisant leur quantité et leur empreinte en surface**. Une telle approche peut parfois être appliquée aux résidus réactifs (générateurs de DMA ou de DNC), principalement lorsque l'ajout d'agents liants assure leur stabilité chimique. Lorsque combinée à la désulfuration environnementale, cette technique de remblayage peut aider à réduire les risques environnementaux, tout en améliorant la stabilité géomécanique des ouvrages souterrains (grâce au soutènement produit par le remblai) et le comportement des rejets en surface puisque la nappe phréatique peut être abaissée sans risque d'oxydation des résidus désulfurés.

Le **remblai en pâte cimenté (RPC)** est fréquemment utilisé pour disposer des résidus miniers dans les chantiers minier souterrains. Le RPC est formé des rejets de concentrateur combiné à des agents liants tel que le ciment Portland, des laitiers de hauts fourneaux (*slag*), des scories (*fly ash*) et d'autres réactifs pouzzolaniques. Le RPC aide à la stabilité des ouvertures souterraines et il permet de réduire considérablement la quantité de résidus stockés en surface puisque qu'il est parfois possible de retourner sous terre près de la moitié des rejets de concentrateur. Lorsque ces rejets sont générateurs de DMA ou DNC, les coûts de restauration sont réduits puisque la quantité de résidus à entreposer dans les aires de stockage est moins grande (ce qui peut permettre de réduire la superficie). Les résidus réactifs dans le RPC sont moins sujets à l'oxydation en raison des propriétés du remblai et des conditions particulières d'exposition et de confinement dans les chantiers souterrains (qui se retrouvent habituellement submergés après la fin des opérations)

3.1.4 *Densification des résidus*

L'entreposage des résidus en surface peut aussi se faire en incorporant une **étape de densification** avant le déversement hydraulique, afin de réduire la teneur en eau initiale dans le parc. Les résidus densifiés peuvent avoir une teneur massique en solide (P) autour de 70 à 85% pour les résidus en pâte (comparativement à moins de 45% pour les résidus conventionnels) On peut aussi atteindre une densité supérieure pour les résidus filtrés, qui sont alors non saturés lors de leur déposition par des moyens mécaniques (camions ou convoyeurs). L'utilisation de résidus densifiés aide notamment à réduire la superficie du parc à résidus miniers et à augmenter le volume d'eau récupéré au concentrateur. La densification (et l'assèchement) des résidus peut aussi aider à augmenter la stabilité des parcs à résidus par une amélioration des propriétés géotechniques des résidus. Une portion des résidus densifiés peut aussi être cimentée afin d'ajouter une cohésion. Il y a toutefois des coûts souvent élevés pour appliquer ces techniques, et les effets bénéfiques de la densification ne sont pas toujours au rendez-vous. Il faut aussi tenir compte d'autres facteurs comme les risques accrus d'érosion éolienne des résidus asséchés, les effets des cycles de mouillage et assèchement, et la difficulté d'assurer une mise en place uniforme (p. ex. en raison de zones d'écoulement préférentielles qui peuvent se former en surface). Il se peut aussi que les résidus miniers réactifs asséchés tendent à s'oxyder et à générer du DMA ou du DNC. A cet égard, il faut faire attention aux résidus filtrés (avec $P \geq 85\%$), employés de plus en plus fréquemment dans l'industrie, lorsqu'ils sont potentiellement générateurs de DMA ou de DNC. Les **résidus filtrés réactifs peuvent alors s'oxyder lorsqu'exposés à l'air et à l'eau**. Ces résidus initialement désaturés peuvent aussi **devenir saturés suite aux infiltrations** et aux autres phénomènes de surface (comme la cryosuccion), et ainsi générer des conditions géotechniques plus critiques.

3.1.5 *Inclusions de roches stériles*

En général, les rejets de concentrateur sont gérés (déposés) séparément des roches stériles sur les sites miniers. Une technique alternative, développée principalement par l'auteur et ses collaborateurs, consiste à placer une portion ou la totalité des roches stériles à l'intérieur du parc à résidus. Les roches stériles, qui ont généralement de meilleures propriétés que les rejets de concentrateur, servent alors de matériau de renforcement, en plus de favoriser le drainage et la dissipation des pressions interstitielles. **Les inclusions de roches stériles (IRS) peuvent jouer un rôle important pour améliorer la stabilité des parcs à résidus** miniers durant le remplissage séquentiel (qui induit des surpressions interstitielles) et dans le cas de séismes. Des travaux menés depuis une vingtaine d'année, principalement à la mine Canadian Malartic, ont montré que les IRS constituent des éléments de drainage qui aident à accélérer la consolidation des rejets, ce qui augmente leur densité en place et

améliore leurs propriétés géotechniques. La géométrie particulière de ces inclusion (dimension, espacement, forme etc.) doit être évaluée en fonction des propriétés hydrogéologiques et géotechniques respectives des roches stériles et des rejets du concentrateur. Lorsque bien conçues, les IRS peuvent agir comme système drainant qui réduit rapidement la teneur en eau des résidus, produisant un effet similaire à une densification préalable au déversement.

Cette forme de co-disposition est également avantageuse pour un meilleur **contrôle du DMA ou du DNC produit par les roches stériles**, qui peuvent alors être maintenues submergées dans le parc à résidus. La présence d'eau diminue la perméabilité à l'air, réduisant ainsi la possibilité de créer des conditions favorables à l'oxydation. Il devient aussi plus facile de couvrir la totalité des rejets (stériles et résidus miniers) avec un système de recouvrement placé sur une surface peu inclinée, car on améliore l'accès au site et on réduit les effets de hauteur et de pente qui compliquent la conception et la construction de ces systèmes sur des haldes à stériles.

Cette technique induit aussi plusieurs **avantages pratiques** par rapport à aux techniques conventionnelles de stockage des résidus et stériles (entreposés à deux endroits distincts), comme la formation de compartiments dans le parc à résidus qui donne plus de flexibilité pour la déposition hydraulique. Ceci facilite aussi la restauration progressive de certaines portions du parc. La présence des IRS peut aussi aider à limiter la quantité de résidus relâchés en cas de défaillance. Les IRS doivent toutefois être **configurées adéquatement pour la gestion de l'eau** sur le site. L'application de cette technique, utilisée depuis plusieurs années à la mine Canadian Malartic, demande une planification détaillée; elle fait partie des approches de **gestion intégrée des rejets miniers**.

3.2 Gestion des roches stériles

Les roches stériles produites par les mines en roches dures sont des matériaux pulvérulents ayant une granulométrie grossière dominée par les fractions sable et gravier. Elles sont généralement entreposées en surface dans des empilements, appelées haldes, qui doivent être construits de façon à **assurer leur stabilité physique et chimique**. En raison de leurs caractéristiques intrinsèques, le comportement des haldes à stériles construites par les méthodes conventionnelles est souvent complexe et difficile à prévoir (et à mesurer). Les roches stériles contenant des minéraux sulfureux peuvent alors être la source d'une **contamination importante des eaux par les éléments retrouvés dans le DMA ou le DNC**.

Les roches stériles non réactives sont depuis longtemps utilisées comme matériaux de construction sur les sites miniers, où elles servent pour les structures de routes pour véhicules miniers et pour la construction de digues. Les roches stériles peuvent aussi être employées comme matériaux constitutifs de couvertures monocouches ou multicouches, ou retournées dans les ouvertures minières souterraines ou en fosse.

Il faut s'assurer que l'entreposage des roches stériles ne devienne une source de contamination des eaux qui circulent dans les haldes. Lorsque les roches stériles sont chimiquement réactives (sources de DMA ou DNC), il faut adapter la façon de concevoir et de construire les haldes.

La mise en place des roches stériles devrait se faire par une méthode qui permet le **rehaussement progressif de la halde avec des bancs** ayant chacun une hauteur limitée (de l'ordre de 25 m par exemple). La construction par bancs permet d'améliorer la stabilité géotechnique en rehaussant le facteur de sécurité FS de la pente. Ce facteur est usuellement proche de l'unité lorsque la pente suit l'angle de déposition naturelle (de l'ordre de 37°) sur toute la hauteur; la valeur cible usuelle de FS varie de 1.3 à 1.5.

Pour des roches stériles dont une portion est réactive, il est recommandé de faire une **disposition sélective pour les fractions chimiquement actives et inactives**, de façon à réduire l'exposition des rejets réactifs aux conditions climatiques. Le contrôle des infiltrations et des mouvements de l'eau dans la halde peut être amélioré par une **compaction des couches** de surface, qui peuvent être inclinées vers l'extérieur afin de favoriser la diversion de l'eau et limiter les écoulements au cœur de la halde. Lorsque cela est possible, les surfaces compactées et les zones de déposition à la périphérie de la halde devraient être formées de stériles non réactifs (si disponibles) afin de limiter le contact de l'eau avec les minéraux susceptibles de produire des contaminants solubles. Pour cela, il faut que les stériles réactifs et non réactifs soient bien identifiés à l'origine et qu'ils soient disposés de façons distinctes.

Une partie ou la totalité des roches stériles peut aussi servir pour construire des **inclusions dans le parc à résidus** (voir plus haut), pour le remblayage des chantiers souterrains, ou pour un remplissage des fosses dans les mines à ciel ouvert. Dans ce dernier cas, il faut assurer la stabilité géotechnique des stériles dans la fosse. Celle-ci peut alors être compromise lorsque la **déposition des stériles dans la fosse se fait uniquement à partir du haut** (p. ex. de la surface), produisant ainsi une longue pente selon l'angle de déposition au repos. Une telle configuration peut engendrer des risques pour la stabilité durant la mise en place et après la fermeture, notamment s'il y a un chargement sismique. Une construction par bancs, ou avec bermes et paliers de stabilisation, est alors conseillée.

4- RESTAURATION DES SITES D'ENTREPOSAGE

L'épuisement des réserves d'une mine mène à la cessation des activités et à des travaux associés à la phase de restauration du site. L'objectif général usuel de cette restauration à la fermeture est l'atteinte d'un état satisfaisant, ce qui implique l'élimination des risques pour la santé ou la sécurité des personnes, le contrôle de la production et de la propagation de contaminants, et l'établissement de conditions pour

que le site ne requière qu'un entretien et un suivi minimal à long terme. La restauration des sites miniers peut toutefois soulever plusieurs difficultés, surtout lorsque les rejets sont générateurs de DMA ou de DNC.

La planification de la restauration des sites d'entreposage des rejets miniers s'avère souvent beaucoup plus efficace lorsque l'on impose dès le départ des **mesures préventives** durant la période d'opération, avec une gestion des rejets qui s'intègre à l'ensemble de l'opération. Ceci permet souvent de réduire les coûts de fermeture par l'adoption de bonnes pratiques dès le début de la vie de la mine. L'expression consacrée (utilisée depuis plusieurs décennies) "*Designing for Closure*", que l'on peut traduire par une **Conception en fonction de la fermeture**, met en évidence l'importance de planifier à l'avance, et avec suffisamment de détails, les travaux requis pour la fermeture et la restauration des sites miniers. Ceci implique d'intégrer les aspects géoenvironnementaux de façon responsable pour l'ensemble de la planification des opérations minières (n.b. il est difficile de parler de développement durable pour des ressources minérales non renouvelables). Cette approche intégrée est souvent mentionnée dans les documents produits par les entreprises et les agences gouvernementales, mais son application pratique réelle demeure limitée, en dépit de ses nombreux avantages. En ce sens, l'industrie devrait viser l'application d'une approche intégrée de gestion des rejets miniers qui tienne compte des aspects géoenvironnementaux à partir de l'étude de faisabilité, en passant par l'ingénierie détaillée et aux conditions d'opération de la mine, du concentrateur (usine de traitement du minerai) et des sites d'entreposage. Une bonne planification permet en outre de mener des **travaux de restauration progressive** qui favorisent une répartition des dépenses et aident au suivi des résultats. Cette approche proactive peut aussi aider les entreprises minières à la recherche d'une plus grande **acceptabilité sociale de leurs activités**.

4.1 Prévention et contrôle

On a vu plus haut que les minéraux sulfureux présents dans les résidus miniers peuvent être séparés par des procédés de désulfuration environnementale (principalement par flottation) qui visent à retirer suffisamment de soufre des résidus pour que le pouvoir de neutralisation excède le pouvoir de génération d'acide. La désulfuration environnementale n'est toutefois pas applicable aux roches stériles, qui peuvent néanmoins être séparées selon leur minéralogie.

La prévention ou le contrôle du DMA et du DNC peut aussi se faire en **réduisant (éliminant) les apports d'eau** vers les rejets miniers réactifs entreposés en surface. On doit alors ajouter un système de recouvrement qui empêche l'infiltration de l'eau dans les rejets réactifs. De telles couvertures peuvent être formées à partir de sols fins ou de matériaux synthétiques peu perméables (p. ex. géomembranes, géocomposites bentonitiques). L'expérience a cependant montré qu'il est difficile d'assurer et de maintenir l'intégrité à long terme de ce type de barrière

hydrogéologique, surtout pour des conditions climatiques du Québec qui peuvent engendrer divers phénomènes de dégradation, incluant les effets des cycles de mouillage-séchage et de gel-dégel, le **vieillessement des matériaux synthétiques** (les polymères ont une durée de vie limitée), l'érosion, les tassements et les intrusions biologiques (racines et animaux).

L'oxygène est l'autre réactif essentiel du processus menant à la production de DMA, et il peut contribuer aussi à la formation de DNC. La **réduction de l'apport en oxygène** s'avère souvent la méthode la plus efficace pour prévenir la génération de DMA pour les parcs à résidus miniers en climat humide. On doit alors utiliser une couverture ayant une faible perméabilité à l'air (i.e. oxygène atmosphérique). L'eau, les sols fortement saturés en eau, des produits organiques en décomposition et certains matériaux synthétiques peuvent agir comme barrière à l'oxygène. Notons que la production de DMA et de DNC peut aussi se produire en conditions anaérobiques; par exemple, les résidus déjà fortement oxydés contiennent des éléments (tel le fer ferrique, Fe^{3+}) qui peuvent contribuer à l'oxydation des sulfures. D'autres éléments problématiques, comme l'arsenic, peuvent aussi être libérés et migrer dans l'eau même en l'absence d'oxygène (p. ex. en conditions réductrices). Il faut tenir compte de ces phénomènes dans le choix et la planification des travaux de restauration.

En plus des méthodes préventives qui visent à limiter l'apport d'une des trois composantes précitées (i.e. sulfures, eau, oxygène), on peut aussi appliquer des méthodes indirectes de réduction, d'atténuation ou de mitigation qui visent à réduire la vitesse de génération de DMA. Celles-ci impliquent un contrôle d'un (ou plusieurs) facteur(s) qui influence(nt) la production d'acide, tel le maintien de la température sous le point de congélation de l'eau ou l'ajout de matériaux alcalins pour ramener l'équilibre géochimique proche de la neutralité. On peut également procéder à un **minage sélectif** selon le potentiel de neutralisation net des différentes zones minéralisées. Ces approches ne sont toutefois applicables que dans des cas particuliers.

4.2 Défis techniques et opérationnels

La restauration des sites miniers soulève de nombreux défis. Plusieurs facteurs sont impliqués et certains ont grandement évolué au fil des ans, ce qui rend la tâche encore plus difficile; mentionnons par exemple :

- La diminution de la teneur de coupure des gisements miniers, qui produisent une plus grande quantité de rejets, ce qui accroît aussi la taille des ouvrages et les risques qui y sont associés ;
- La responsabilité légale accrue des entreprises, en lien avec les risques de défaillance (pour les digues de parcs à résidus et les haldes à stériles) et ceux associés à la contamination des eaux et des sites environnants ;
- La hausse significative des coûts de construction et d'entretien des ouvrages, et ceux associés à la gestion des eaux de procédé et de surface sur les sites miniers ;

- Les difficultés rencontrés pour restaurer adéquatement, de manière durable, les sites d'entreposage de rejets miniers réactifs ayant souvent des caractéristiques complexes ;
- La prise de conscience environnementale de la Société qui affecte notamment l'acceptabilité sociale des projets miniers ;
- Le resserrement des lois, règlements, normes et lignes directrices, selon une tendance qui devrait se poursuivre dans le futur.

Dans un tel contexte, les entreprises doivent appliquer les meilleures techniques et pratiques géoenvironnementales afin que le développement minier se fasse de façon responsable. Cela signifie en particulier que les exploitants miniers doivent s'occuper eux-mêmes des problèmes qu'ils ont créés, afin d'éviter de **transférer une partie du fardeau aux générations futures**. Au premier chef, ceci implique une restauration complète, durable et sécuritaire des sites d'entreposage des rejets miniers, avec un suivi approprié.

Un des principaux défis associés à la restauration des sites d'entreposage de rejets miniers, surtout ceux qui sont générateurs de DMA ou de DNC, concerne la **très longue durée de vie** des ouvrages devant servir pour une période qui excède souvent largement celle de l'opération elle-même. Dans le cas de rejets producteurs de DMA ou de DNC, cette **durée de vite est généralement indéterminée (ou indéfinie)** pour les rejets entreposés en surface. Cette condition influence plusieurs aspects relatifs au choix des techniques applicables ainsi que la conception des ouvrages qui y sont associées. Par exemple, lorsque l'analyse doit tenir compte d'une très longue durée de vie des ouvrages, la **sélection de la période de récurrence** utilisée pour chaque type d'événement de nature probabiliste (comme les précipitations, les sécheresses et les séismes) devient particulièrement critique, notamment lorsque les ouvrages servent à retenir l'eau. La durée de vie utile des matériaux est une autre préoccupation, et on devrait tenir compte du fait que **plusieurs matériaux d'origine géologique peuvent maintenir leurs caractéristiques et leur intégrité beaucoup plus longtemps que les matériaux synthétiques**, d'où les réserves souvent exprimées face à l'utilisation de produits synthétiques (e.g. géomembranes) pour recouvrir des rejets réactifs à la fermeture des sites.

4.3 Planification, gestion intégrée et estimation des coûts

Le concept précité de la conception en fonction de la fermeture (« *Designing for closure* ») implique que la planification et la construction des sites doit tenir compte, dès de départ et de façon continue, des impératifs de fermeture et de restauration afin que le mode de gestion puisse être adapté aux conditions de fin de vie du site. Le niveau de détail de la planification des travaux de restauration doit alors être suffisant pour que l'on puisse **identifier clairement les problèmes potentiels à l'avance et ainsi développer les solutions** appropriées à partir d'une analyse des conditions anticipées. Comme une opération minière est une entité qui évolue, avec des caractéristiques changeantes, il est nécessaire de mettre à jour régulièrement la

planification afin de s'adapter aux conditions du site et aux progrès technologiques dans le domaine.

Un des principes fondamentaux de cette approche intégrée de gestion des rejets repose sur **l'utilisation maximale des matériaux produits sur le site minier**, incluant les rejets de concentrateur, les roches stériles, et les sols de décapage. Ceci aide à réduire les impacts environnementaux liés à l'utilisation de matériaux d'emprunt, et favorise le développement responsable de nos ressources minérales.

Un autre élément clé de la stratégie de gestion repose sur l'adoption de **mesures préventives contre les instabilités géochimiques** afin d'empêcher autant que possible la production de DMA ou de DNC à la source. Il est généralement plus facile et plus simple de contrôler la génération d'eaux contaminées (DMA ou DNC) à la fermeture du site lorsque les processus physico-chimiques ont été contrôlés durant l'opération. **On minimisera ainsi le besoin d'un traitement chimique coûteux**, constituant aussi une source abondante de boues au comportement incertain. Un traitement passif des effluents peut être utile pour des cas particuliers, mais il ne devrait pas être requis à long terme.

Les coûts associés aux travaux de restauration des sites miniers peuvent varier considérablement d'un endroit à l'autre et ils sont généralement plus élevés lorsque les rejets sont générateurs de DMA ou DNC. Par exemple, la restauration de sites d'entreposage de rejets miniers générateurs d'eaux de drainage acides avec une couverture multicouche peut engendrer des coûts allant jusqu'à 250 000 \$ par hectare (et même plus), soit 10 à 100 fois plus que pour les travaux requis sur des sites d'entreposage de rejets non réactifs. Ces coûts élevés reflètent la complexité et l'ampleur des travaux à réaliser. En pratique, **le coût des travaux de restauration prévu pour les sites miniers est fréquemment sous-estimé**, ce qui accroît les difficultés pour les responsables de travaux à la fermeture du site. Ces coûts peuvent cependant être réduits par une bonne planification, une caractérisation rigoureuse des matériaux et du site, une intégration des modes de gestion tout au long de la vie de la mine, ainsi que par une mise en application progressive des techniques retenues pour la restauration.

Un estimé réaliste des coûts de restauration ne peut être obtenu que par une analyse suffisamment détaillée des ouvrages et des travaux à réaliser, avec une évaluation des conditions et des incertitudes qui y sont associées, incluant **les effets de conditions climatiques changeantes**. Une vision trop optimiste peut induire des difficultés additionnelles lors de la mise en application des techniques de restauration. Il est alors prudent (et souvent essentiel) d'inclure une **analyse des risques** (opérationnels, géotechniques, environnementaux, financiers, etc.) pour une meilleure planification des travaux de restauration.

L'expérience montre aussi qu'il est impératif d'assurer une bonne **caractérisation géotechnique et géochimique des matériaux et du site** afin d'éviter les problèmes. Il faut aussi exercer un suivi du comportement des ouvrages, et les

données recueillies doivent servir à valider (ou corriger) les hypothèses adoptées pour la conception. Pour les situations complexes, comme c'est souvent le cas avec les sites générateurs de DMA ou de DNC, il est souhaitable que les travaux de restauration proposés soient soumis à une **revue indépendante** par une tiers partie (ou un comité expert) qui pourra alors évaluer les approches proposées par l'entreprise (et ses consultants) et soulever les questions qui peuvent s'avérer critiques quant aux conditions d'application et aux difficultés anticipées. Ce type de revue est aussi utilisé de plus en plus régulièrement pour évaluer la qualité des travaux et la stabilité des ouvrages miniers.

Lors de la planification des travaux à long terme, il faut aussi se méfier des approches financières qui évaluent les dépenses liées à la **gestion environnementale des rejets miniers selon une valeur actualisée** (« *net present value* »). Cette approche tend à favoriser le report des investissements, car une dépense réalisée plus tard peut être considérée comme un gain à court terme. Mais il faut tenir compte des autres effets que ce report peut engendrer sur le niveau de complexité du problème et les coûts additionnels que cela peut induire à plus long terme. La clé du succès réside généralement dans la prévention associée à une bonne planification.

Rappelons à cet égard que **le traitement chimique de neutralisation des eaux ne constitue pas une solution acceptable à long terme**. La réglementation du Québec reconnaît d'ailleurs qu'il ne s'agit pas d'une méthode acceptable pour restaurer un site minier; il faut donc s'assurer que cette approche ne soit plus appliquée dans l'industrie.

La restauration des sites, qui vise à assurer une stabilité géotechnique (et géochimique) de tous les ouvrages, doit tenir compte des propriétés des matériaux et des sollicitations anticipées pour toute la durée de vie. À cet égard, **l'effet des changements climatiques** (précipitations, sécheresses, etc) doit être pris en compte de façon proactive et conservatrice. Les ouvrages associés aux travaux de restauration (couvertures, digues, haldes et autres) doivent aussi faire d'objet d'un suivi prolongé (de plusieurs dizaines ou même centaines d'années pour des rejets réactifs) et d'un entretien régulier qui leur assurera un fonctionnement adéquat. Il faut être conscient qu'il y a très peu de cas permettant de laisser (libérer) le site d'entreposage de rejets générateurs de DMA ou DNC sans surveillance et entretien. En pratique, **tant et aussi longtemps que les rejets réactifs sont présents en surface, ils demeurent disponibles pour une éventuelle production d'eaux contaminées**. Cette situation doit être bien comprise pas tous les intervenants du domaine.

5- ASPECTS COMPLÉMENTAIRES

5.1 Auscultation et entretien des ouvrages

L'analyse, la conception, la construction et la fermeture des sites d'entreposage de rejets miniers constituent un ensemble d'activités complexes. Cette

complexité requiert une évaluation détaillée des caractéristiques et des paramètres retenus pour la conception initiale, ainsi qu'un suivi des conditions *in situ* et des modifications apportées tout au long de la période de construction. Dans plusieurs cas, la conception des ouvrages miniers évolue pendant la construction, ce qui affecte leur opération ainsi que les conditions qui prévalent lors de la fermeture.

Le principal objectif de l'auscultation est de **détecter les anomalies de comportement** à temps pour apporter des correctifs appropriés, afin de garantir la stabilité physique des ouvrages, et aussi pour assurer la stabilité géochimique des rejets, la qualité de l'eau et la protection de l'environnement. On ne peut d'ailleurs pas séparer les aspects géotechniques et environnementaux puisque les deux volets sont reliés. La conception globale d'un programme d'auscultation, incluant les visites de site et le choix des appareils et de leur localisation, se fait en fonction des paramètres visés. Les appareils sont sélectionnés selon plusieurs critères, incluant la sensibilité et la précision des équipements, leur fiabilité et leur longévité, la facilité d'utilisation, le coût des composantes, de l'installation et de l'entretien, et la possibilité de lectures automatiques ou à distance. Un coût jugé élevé ne doit pas servir à négliger la mesure de paramètres importants (comme les pressions d'eau et les déplacements par exemple). Les **installations doivent aussi être inspectées régulièrement, même après la fermeture**, et les informations doivent être colligées et analysées par des professionnels responsables. Les techniques modernes de suivi (p. ex. satellites, LiDAR) devraient être utilisées pour ces activités.

5.2 Analyse de risque et plan d'urgence

La conception des ouvrages miniers doit tenir compte des risques inhérents à leur construction. À cet égard, des approches probabilistes devraient être appliquées systématiquement pour évaluer les risques en fonction des conséquences. Même si tous les objectifs et critères sont respectés, il demeure toujours une certaine probabilité que des **événements exceptionnels ou imprévus** provoquent une défaillance des ouvrages liés à l'entreposage et à la gestion des rejets miniers. L'exploitant (ou son mandataire) doit donc préparer un plan d'urgence et définir les mesures appropriées afin d'assurer la sécurité des populations et des écosystèmes avoisinants.

5.3 Dernières remarques

Nous bénéficions au Québec et au Canada d'une **expertise enviable** et reconnue dans le domaine de la gestion des rejets miniers. Ceci est très important car les rejets miniers et les ouvrages construits en surface pour leur entreposage peuvent montrer des comportements géotechniques et géochimiques complexes, qui engendrent souvent de grandes incertitudes. Pour cela, les ingénieurs et les autres professionnels du domaine doivent adopter une approche prudente (conservatrice) lors de l'analyse et de la conception.

Face aux nombreux défis, on peut aussi se **poser des questions** sur les meilleures façons d'assurer la bonne performance à long terme pour les ouvrages construits pour restaurer un site d'entreposage. Par exemple, est-il souhaitable que les gouvernements soient responsables du **suivi et de l'entretien des sites**, après une période de quelques années suite à la fin de la vie de la mine ? Quel serait alors le type de suivi qui doit être exercé, compte tenu des ressources et moyens financiers limités des gouvernements ? Ne serait-il pas plus avantageux (et équitable pour la société) **que l'entreprise elle-même s'occupe du suivi et de l'entretien à long terme** ? Mais dans un tel cas, quelle sera la situation de l'entreprise dans 50 ans, 100 ans, ou plus ? Très peu de compagnies ont des durées de vie comparables à celles que l'on doit envisager pour la période de suivi et d'entretien des ouvrages sur les sites miniers générateurs de DMA ou de DNC. Ces questions, et d'autres, devraient être débattues ouvertement afin que les décisions soient prises de façon transparente et éclairée, tant du côté industriel que de l'appareil gouvernemental.

Le développement responsable de nos ressources minérales requiert l'application de mesures qui feront en sorte que les **prochaines générations n'auront pas à réparer et payer pour les dégâts produits par celles qui les ont précédées**. Nous vivons déjà, depuis quelques décennies, avec le legs d'une industrie qui nous a laissé quelques sites abandonnés en très piteux état ; on n'a qu'à penser (au Québec) aux anciens sites miniers Manitou, Aldermac, East Sullivan et Principale, pour n'en nommer que quelques-uns. Il nous incombe de nous assurer qu'un héritage du même type ne sera pas légué aux prochaines générations. L'approche à préconiser, définie en partie dans ce qui précède, repose sur une planification rigoureuse à court, moyen et long terme, et sur la **construction d'ouvrages robustes, performants et durables qui feront l'objet d'un suivi et d'un entretien prolongé**. Il s'agit d'un élément clé pour obtenir l'acceptabilité sociale actuelle et future des projets miniers, et pour protéger l'environnement et la biodiversité à proximité des sites.

Le gouvernement du Québec est étroitement impliqué dans le processus de contrôle pour une gestion responsable des rejets miniers. A cet égard, il devrait s'assurer que les ministères concernés disposent des **ressources et de l'expertise requise pour bien réaliser leur mandat**. La réglementation liée aux exploitations minières pourrait aussi être revue afin de mieux contrôler l'utilisation du territoire et des eaux par les opérations minières (incluant des redevances représentatives de la valeur). Il semble également souhaitable d'ajouter des incitatifs accru afin de réduire la grande consommation d'énergie et l'émission des GES par les mines. L'acceptabilité sociale passe aussi par des protections accrues face aux situations où la population locale est confrontée aux effets négatifs des travaux avec équipements lourds découlant d'une trop grande proximité des installations minières, particulièrement dans les zones rurales ou touristiques.

6- BIBLIOGRAPHIE*

- Aubertin, M., Bussière, B., Bernier, B. 2002. Environnement et gestion des rejets miniers, Manuel sur cédérom, Presses internationales Polytechnique.
- Aubertin, M., Bussière, B., James, M., Jaouhar, E.M., Martin, V., Pépin, N., Mbonimpa, M., and Chapuis, R.P. 2011. Vers une mise à jour des critères de stabilité géotechnique pour la conception des ouvrages de retenue de résidus miniers. CR Symp. Mines et l'Environnement, Rouyn-Noranda. CIM, 38 p.
- Aubertin, M., James, M., Maknoon, M., Bussière, B. 2013. Recommandations pour améliorer le comportement hydrogéotechnique des haldes à stériles. GeoMontreal 2013, Proc. 66^e CGS Conference, 8 p.
- Aubertin, M., Pabst, T., Bussière, B., James, M., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., Maqoud, A. 2015. Revue des meilleures pratiques de restauration des sites d'entreposage de rejets miniers générateurs de DMA. Symp. Mines et Environnement, Rouyn-Noranda, CIM (CD Rom), 67 p.
- Aubertin, M., Bussière, B., Pabst, T., James, M., Mbonimpa, M. 2016. Review of reclamation techniques for acid generating mine wastes upon closure of disposal sites. Keynote presentation. Geo-Chicago 2016: Sustainability, Energy and the Geoenvironment, Geo-Institute, 8 p.
- Aubertin, M., Jahanbakhshzadeh, A., Saleh Mbemba, F., Yniesta, S., Pednault C. 2021. General guidelines for the design and construction of waste rock inclusions in tailings impoundment. Proc. 74th CGS Conf., GeoNiagara. 8 p.
- Aubertin, M., Maknoon, M., Ovalle, C. 2021. Waste rock pile design considerations to promote geotechnical and geochemical stability. Canadian Geotechnique -The CGS Magazine: Fall, 2(3): 44-47.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Demers, I., Aubertin, M., Fried, É., Blier, A. 2008 Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada. Miner. Eng. 21, 330–340.
- Benzaazoua, B., Taha, Y. (Ed) 2019. Towards a Sustainable Management of Mine Wastes. Special Issue, Minerals. MDPI.
- URSTM (2022). Guide de bonnes pratiques en restauration minière dans un contexte de changements climatiques. Rapport PU-2020-11-1348 (MELCCFP). 79 p.

* Une liste de références plus complète est disponible sur demande.

A propos de l'auteur

Michel AUBERTIN, Ph.D., *FCAE, FEIC, FCSCE*
Professeur Émérite, Polytechnique Montréal
Département des génies civil, géologique et des mines
Institut de recherche sur les mines et l'environnement (IRME)
michel.aubertin@polymtl.ca

Directeur général, Société canadienne de géotechnique
execdir@cgs.ca



Michel Aubertin est Professeur à Polytechnique Montréal depuis 1989. En 2001, il a été nommé Titulaire de la Chaire industrielle CRSNG Polytechnique-UQAT sur l'Environnement et la gestion des rejets miniers. Il est ensuite devenu Directeur de l'Institut de recherche sur les mines et l'environnement (IRME) à Polytechnique Montréal. Ses activités d'enseignement et de recherche portent sur divers thèmes liés à la gestion des rejets miniers et à la géotechnique minière. Tout au long de sa carrière, il a mené de nombreux travaux en collaboration avec des entreprises minières, des firmes de consultants spécialisés et diverses agences gouvernementales. Il a aussi contribué activement au développement de technologies novatrices pour aider l'industrie minière et il a produit plusieurs documents techniques servant de lignes directrices pour la conception des ouvrages miniers. Il a été nommé Professeur Émérite peu après sa retraite (en 2017) à Polytechnique Montréal, où il poursuit ses travaux de recherche. M. Aubertin est aussi Directeur général de la Société canadienne de géotechnique, dont il a été le Président en 2009-2010.