

L'industrie minière et le développement durable -

Une perspective internationale francophone



ORGANISATION INTERNATIONALE DE
la francophonie



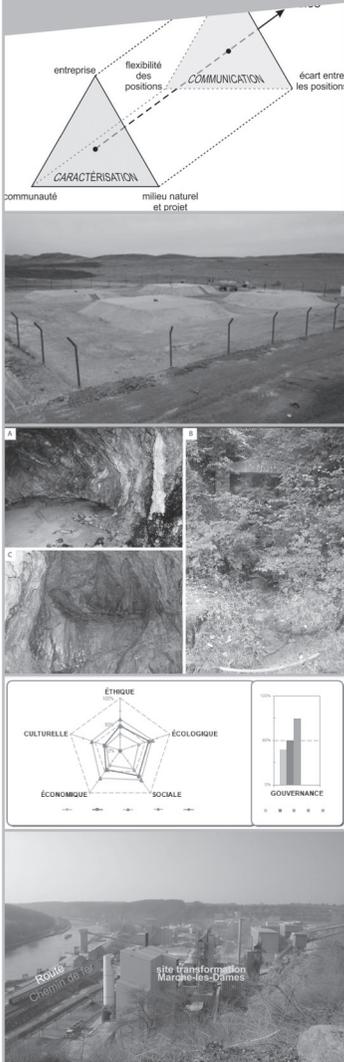
INSTITUT DE LA FRANCOPHONIE
POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE
IFDD

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi

GERM
Centre d'études sur
les ressources minérales

L'industrie minière et le développement durable -

Une perspective internationale
francophone



L'industrie minière et le développement durable –

Une perspective internationale francophone



ORGANISATION
INTERNATIONALE DE
la francophonie



INSTITUT DE LA FRANCOPHONIE
POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE
IFDD

UQAC
Université du Québec
à Chicoutimi

GERM
Centre d'études sur
les ressources minérales

Ouvrage collectif sous la direction et la coordination d'**Alain Rouleau** et de **Dominique Gasquet**.

AUTEURS

Mostafa Benzaazoua, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec, Canada

Kristina Maud Bergeron, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada

Daniel Boulianne, Ariane Phosphate Inc., Saguenay, Québec, Canada

Jean-Sébastien David, Ariane Phosphate Inc., Saguenay, Québec, Canada

Dominique Gasquet, Université Savoie Mont Blanc, Le Bourget du Lac, France

Rachid Hakkou, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc

Michel Jébrak, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada

Sylviane Legault, Comité de suivi Canadian Malartic, Malartic, Québec, Canada

Magali Rossi, Université Savoie Mont Blanc, Le Bourget du Lac, France

Alain Rouleau, Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, Québec, Canada

Olivier Riffon, Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, Québec, Canada

Ian Segers, Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, Québec, Canada

Richard Simon, Polytechnique Montréal, Montréal, Québec, Canada

David Tremblay, Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, Québec, Canada

Karyna Tremblay, Ariane Phosphate Inc., Saguenay, Québec, Canada

Claude Villeneuve, Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, Québec, Canada

Johan Yans, Université de Namur, Namur, Belgique

L'article par Bergeron et Jébrak a bénéficié de la collaboration de :

Philippe Angers, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada

Suzanne Durand, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec, Canada

Corinne Gendron, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada

Valérie Lehmann, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada

Pierre-Yves Le Meur, Institut de recherche pour le développement, Nouméa, Nouvelle-Calédonie

Charles Séguin, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada

Stéphanie Yates, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada

COMITÉ ÉDITORIAL ET DE CORRECTION

Anouck Ferroud, Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, Québec, Canada

Dominique Gasquet, Université Savoie Mont Blanc, Le Bourget du Lac, France

Alain Rouleau, Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, Québec, Canada

Françoise Côté, correctrice

Mise en page

Lorie Boudreault, infographiste

Illustrations de la couverture : extraites des articles contenus dans cet ouvrage.

ISBN : 978-2-89481-241-9 (version électronique)

Centre d'études sur les ressources minérales
Université du Québec à Chicoutimi
555, boulevard de l'Université
Saguenay (Québec), G7H 2B1, Canada
Téléphone 418-545-5011, poste 2407
<http://cerm.uqac.ca/>

© Institut de la Francophonie pour
le développement durable (IFDD) 2017
56, rue Saint-Pierre, 3^e étage
Québec (Québec), G1K 4A1, Canada
Téléphone : 418 692-5727
Télécopie : 418 692-5644
Courriel : ifdd@francophonie.org
Site Internet : www.ifdd.francophonie.org

Table des matières

Introduction au portrait du développement durable de l'industrie minière dans l'espace francophone 1
Alain ROULEAU et Dominique GASQUET

PARTIE 1 : LES DÉFIS DU DÉVELOPPEMENT DURABLE DANS L'INDUSTRIE MINIÈRE

Mines et développement durable, comment aborder la quadrature du cercle ? 5
Claude VILLENEUVE, Olivier RIFFON, Ian SEGERS et David TREMBLAY

L'indice de risque social: un nouvel outil d'évaluation des projets miniers dans un contexte de développement durable 31
Kristina Maud BERGERON et Michel JÉBRAK

PARTIE 2 : EXPÉRIENCES DE DÉVELOPPEMENT MINIER DURABLE AU QUÉBEC

Projet de mine d'apatite au Lac à Paul, Québec 41
Karyna TREMBLAY, Jean-Sébastien DAVID et Daniel BOULIANNE

Un comité de suivi d'une exploitation minière à proximité d'une communauté en transformation 55
Sylviane LEGAULT

PARTIE 3 : EXPÉRIENCES DE DÉVELOPPEMENT MINIER DURABLE EN AFRIQUE FRANCOPHONE

Défis de la formation dans le secteur minier en Afrique francophone 69
Richard SIMON

Gestion des rejets miniers au Maroc: défis et possibilités 75
Rachid HAKKOU et Mostafa BENZAAZOUA

**PARTIE 4 : EXPÉRIENCES DE DÉVELOPPEMENT MINIER
DURABLE EN EUROPE FRANCOPHONE**

**Gestion durable des ressources minérales en Wallonie (Belgique):
singularités et pistes de réflexion** 99
Johan YANS

**Conséquences environnementales et gestion des mines abandonnées et
dispersées dans les Alpes françaises** 115
Magali ROSSI et Dominique GASQUET

Introduction au portrait du développement durable de l'industrie minière dans l'espace francophone

Alain ROULEAU et Dominique GASQUET

Introduction

L'idée de cet ouvrage émane du colloque *L'industrie minière et le développement durable: une perspective internationale francophone*, tenu lors du congrès Québec Mines de novembre 2014. Ce colloque a été parrainé par le Centre Jacques Cartier, qui s'est associé pour l'occasion au ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec, lequel organise le congrès annuel Québec Mines. Il a été tenu à Québec et faisait suite à un premier colloque sur un thème similaire (*Exploitations minières passées et présentes: Impacts sur l'environnement et la société*) qui a eu lieu à Chambéry en France en novembre 2013, également dans le cadre des Entretiens Jacques Cartier. À la suite du colloque de Chambéry, Rossi et Gasquet (2014) ont rassemblé 11 articles sur les problématiques de l'après-mine.

L'exploitation de ressources minérales non renouvelables dans une perspective de développement durable peut s'apparenter à la quadrature du cercle. Cependant, l'utilisation de minéraux et de métaux constitue une condition essentielle à l'évolution de l'humanité et au développement des civilisations, depuis les outils en silex jusqu'aux appareils électroniques les plus sophistiqués. Les ressources minières sont essentiellement non renouvelables, car la constitution des gisements se produit sur une durée de milliers ou de millions d'années, évidemment bien supérieure à celle de l'extraction par l'homme du minerai d'un gisement (Goffé 2013).

De plus, la transition vers des sources d'énergie renouvelables, qui devrait devenir une réalité dans les prochaines décennies, est un facteur qui poussera à la hausse la consommation de ressources minières. En effet, cette transition va nécessiter des quantités de ressources minérales encore plus importantes que celles requises pour l'utilisation des hydrocarbures comme source d'énergie (Vidal et al. 2013). Les métaux et les minéraux qui devront être extraits seront alors plus nombreux et plus variés. La quantité de ressources minérales disponibles demeure importante de façon générale, mais les gisements à exploiter auront des teneurs de plus en plus faibles et le minerai sera de plus en plus difficile à raffiner. Cette augmentation de l'extraction de ressources minérales est accélérée davantage par le désir bien légitime de plusieurs nations d'atteindre le niveau de consommation de biens, de services et d'énergie des pays développés. Il faudra consommer des quantités plus importantes d'énergie pour extraire et raffiner le minerai, ce qui est susceptible d'accroître les impacts de cette industrie sur l'environnement. Il en

résulte que les coûts économiques et environnementaux de l'extraction des ressources minérales sont appelés à devenir de plus en plus élevés (Mousseau 2012, Jébrak 2015).

Les pays où les minerais sont extraits ne sont pas nécessairement ceux qui les transforment et consomment des produits fabriqués à partir des substances obtenus de ces minerais (Jébrak 2015). Cette dichotomie se retrouve à l'intérieur même de l'espace francophone, et elle peut engendrer des iniquités socioéconomiques qui doivent être évitées.

Il est donc possible d'anticiper une forte augmentation des activités minières et de la consommation énergétique durant les prochaines décennies, à moins que la croissance économique atteigne un plateau. En effet, plusieurs experts avancent que l'exploitation des ressources, minérales et autres, ne peut pas continuer à croître longtemps au rythme actuel, ce qui justifie pour certains une remise en question du système économique actuellement prédominant (Handal Caravantes 2015), en particulier face aux changements climatiques (Klein 2015).

Les efforts fournis pour tenter de résoudre le paradoxe d'une industrie minière durable incluent le développement de règlements et d'outils de gestion, notamment des grilles d'analyse, visant à structurer et à faciliter les démarches de développement durable au sein de l'industrie minière. Les impacts sociaux, environnementaux et économiques de l'industrie minière dépendent notamment des conditions socioéconomiques des territoires d'extraction des ressources. C'est ainsi que l'industrie minière et le développement durable présentent des visages divers et variables d'un pays à l'autre. De façon plus spécifique, différentes approches et expériences visant à concilier exploitation minière et développement durable dans différents pays francophones sont présentées ici, incluant des pays miniers développés et des pays en voie de développement ayant différents historiques miniers.

Il est opportun de documenter l'état des réflexions, des démarches et des approches visant le développement durable de l'industrie minière, à la fois chez les chercheurs et chez les agents de l'industrie. Cet ouvrage présente un portrait du développement durable de l'industrie minière dans l'espace francophone. Nous croyons que ce portrait correspond assez bien à la situation dans de nombreux autres pays.

Cet ouvrage reflète la diversité des analyses du développement durable que font les divers acteurs de la recherche et de l'industrie minière. Villeneuve et al. proposent une démarche de mise en application des principes de développement durable dans l'industrie minière, considérant tant la mine elle-même que les produits de l'extraction minérale. Ils prennent ainsi en compte les impacts environnementaux, économiques et sociaux tout au long du cycle de vie des substances minérales. Bergeron et Jébrak présentent une analyse des principales variables à considérer pour identifier des ajustements qui permettraient d'accroître l'acceptabilité sociale d'un projet. Tremblay et al. soulignent les efforts de développement durable fournis par une entreprise qui souhaite développer une mine de phosphate au Québec. Legault présente les défis auxquels fait face un comité de suivi d'une exploitation minière, soulignant que l'efficacité d'un tel comité – et donc de l'acceptabilité so-

ciétale du projet – dépend de son adaptation aux conditions locales. Simon résume les besoins en formation de personnel qualifié pour appuyer le développement de l'industrie minière en Afrique francophone, incluant les aspects environnementaux de cette industrie. Hakkou et Benzaazoua présentent les résultats de projets de gestion de résidus miniers au Maroc, visant notamment la valorisation de certains résidus ; c'est un exemple de la coopération Québec-Maroc sur les résidus miniers. Yans démontre pourquoi il est essentiel pour tous les acteurs d'intégrer au mieux les activités extractives dans les paysages environnementaux, sociaux et économiques d'un territoire densément peuplé, comme la Wallonie. Rossi et Gasquet présentent un panorama des impacts de l'exploitation des ressources minières dans les Alpes françaises depuis l'Antiquité, soulignant l'intérêt d'un suivi environnemental sur le temps long et de la valorisation touristique de plusieurs sites.

Le lecteur pourra constater que le rythme d'assimilation et de mise en pratique des principes du développement durable est variable. Cela n'est pas une surprise dans une société où les intérêts sont souvent divergents et où l'état de la réflexion se situe à des niveaux différents selon les acteurs.

Remerciements

Les auteurs de cette introduction, qui sont aussi directeurs de cet ouvrage collectif, remercient vivement tous les auteurs des articles pour leur contribution essentielle à cette publication. Ils tiennent aussi à remercier Laure Giamberini, Bruno Goffé et Anouck Ferroud pour leur travail de révision, Lorie Boudreault pour la mise en page, Françoise Côté pour la correction des épreuves et Andrée-Ann Rivard pour les procédures d'entente. Ils remercient également les organisateurs des deux colloques qui ont motivé cet ouvrage, particulièrement Magali Rossi pour celui de 2013, ainsi que Bruno Bussière et Jean-Yves Labbé pour celui de 2014. Ils soulignent l'appui indispensable du Centre Jacques Cartier et du ministère des Ressources naturelles du Québec à la tenue des colloques. Enfin, ils remercient l'Institut de la francophonie pour le développement durable pour la diffusion de cet ouvrage et Louis-Noël Jail pour la liaison fructueuse avec les directeurs de cet ouvrage.

Références

- Goffé, B. 2013. Matière et énergie : stocks et cycles [en ligne]. *Dans* L'énergie à découvert. *Sous la direction de* R. Mosseri et C. Jeandel. CNRS Éditions, p. 67–69. Disponible à http://bip.cnrs-mrs.fr/bip06/pdf/130215_Energie_Synopsis.pdf.
- Handal Caravantes, L. 2015. Mines: L'histoire d'une triple dépossession. *Dans* Dépossession: une histoire économique du Québec contemporain. *Sous la direction de* S. Tremblay-Pépin, Institut de recherche et d'information socio-économiques. Lux Éditeur, Montréal, Canada.
- Jébrak, M. 2015. Quels métaux pour demain? Les enjeux des ressources minérales. Dunod, Paris, France.
- Klein, N. 2015. Tout peut changer: Capitalisme et changement climatique. Lux Éditeur, Montréal, Canada.
- Mousseau, N. 2012. Le défi des ressources minières. Éditions MultiMondes, Montréal, Canada.
- Rossi, M., et Gasquet, D. (éd.). 2014. Exploitations minières passées et présentes: Impacts environnementaux et sociétaux. Collection EDYTEM, n° 17, Université Savoie Mont Blanc, Le Bourget du Lac, France.
- Vidal, O., Goffé, B., et Arndt, N. 2013. Metals for a Low-Carbon Society [en ligne]. *Nature Geoscience*, 6(11): 894–896. doi: 10.1038 ngeo 1993.

Mines et développement durable, comment aborder la quadrature du cercle?

Claude VILLENEUVE, Olivier RIFFON, Ian SEGERS
et David TREMBLAY

Résumé

L'opérationnalisation du développement durable dans le domaine des ressources minières comporte une dimension paradoxale. Comment parler de durabilité dans l'extraction de ressources non renouvelables? Il est toutefois possible de résoudre cette apparente contradiction en considérant une vision plus large et systémique du concept de développement durable et en appliquant à diverses échelles, les instruments appropriés. Dans cet article, nous explorons les façons dont le développement durable peut être mis en œuvre dans le monde minier. Les éléments essentiels sont associés à une vision du cycle de vie, non seulement de la mine, mais du produit de l'extraction minière et de la prise en considération des impacts environnementaux, économiques et sociaux tout au long de ce cycle de vie. La prise en compte explicite du développement durable dans les projets miniers, dans les entreprises et plus largement dans les politiques encadrant le développement minier constitue la clé pour résoudre le paradoxe de la quadrature du cercle.

1. Introduction

Est-il possible de qualifier de «durable» une activité industrielle qui repose sur l'exploitation des ressources non renouvelables? La destinée d'une mine est d'être fermée au terme d'une période plus ou moins longue d'extraction de son minerai. Cet inéluctable épuisement de la ressource est-il incompatible avec le développement durable (DD)? Cette question est d'autant plus brûlante que la demande pour les matières premières minérales augmente partout dans le monde en même temps que le consensus international milite de plus en plus pour l'application universelle des principes du DD. L'adoption, le 27 septembre 2015, par l'Assemblée générale des Nations Unies de 17 Objectifs de développement durable (ODD) et de leurs 169 cibles pour le Programme de développement des Nations Unies pour l'après 2015 en témoigne éloquemment (Nations Unies 2015).

La conciliation entre l'expansion de l'industrie minière et les exigences du DD représente effectivement un grand défi et plusieurs insuffisances persistent en matière d'opérationnalisation du concept dans ce secteur. D'aucuns pourraient croire qu'il s'agit d'un dilemme qui s'apparente à la quadrature du cercle.

représenté par une valeur de 1 ou 100%. La dimension gouvernance, plus opérationnelle que les autres, est représentée par un histogramme. La figure 1 montre la performance d'un projet hypothétique évalué à trois moments différents de sa mise en œuvre.

La nature dynamique du modèle utilisé est particulièrement importante pour bien comprendre comment appliquer le concept. En effet, le diagramme permet de concevoir à la fois la performance pour chaque dimension et l'équilibre entre les dimensions, illustrant du même coup la vision systémique qu'il faut développer afin d'éviter le déplacement des impacts et la nature perfectible de toute politique, stratégie, programme ou projet. Les six dimensions représentent des éléments permettant de satisfaire les besoins humains, en référence à la définition du rapport Brundtland (Commission mondiale sur l'environnement et le développement [CMED] 1988) et d'autres textes internationaux parus par la suite (Villeneuve 1998, Villeneuve et al. 2016).

Le développement minier peut-il se qualifier dans un tel modèle ? Le DD est une hypothèse qui reste à démontrer dans le domaine minier comme ailleurs. En effet, on ne peut qualifier quelque chose de durable qu'à posteriori. Malgré les doutes qui sont véhiculés un peu partout, nous sommes persuadés qu'en analysant de manière complexe et systémique les problématiques propres au secteur minier, des propositions innovantes peuvent être mises de l'avant.

3. Les enjeux du monde minier

Cette section présente quelques enjeux du secteur minier qui interpellent le développement durable dans chacune de ses dimensions.

3.1 La nature du développement minier

Le premier enjeu du développement minier tient dans la nature non renouvelable et dans la répartition géographique des structures géologiques favorables. Il n'y a donc pas de relation entre le lieu d'extraction et le lieu d'utilisation de la ressource, non plus que de correspondance entre la demande des minéraux et l'abondance des ressources.

Le développement peut être vu comme un processus d'adaptation visant à améliorer une situation perçue comme perfectible. Le développement minier, pour sa part, vise à satisfaire les besoins de marchés mondiaux qui serviront *in fine* à mieux répondre à des besoins exprimés par des humains. Dans une perspective économique classique, l'augmentation de l'activité économique, qui se traduit par une progression du PIB, est un signe d'augmentation de la richesse. Celle-ci représente une meilleure marge de manœuvre pour satisfaire les besoins des sociétés. La croissance économique est donc considérée à la fois comme le résultat et l'objectif du développement. C'est une boucle de rétroaction positive. Mais il y a certains secteurs d'activité humaine où cette rétroaction est problématique. C'est particulièrement le cas de l'industrie minière ; dans un monde aux ressources limitées, il est impossible d'entretenir indéfiniment une boucle de rétroaction positive lorsque l'activité principale du secteur est basée sur l'extraction de ressources non renouvelables. Il faut donc d'abord distinguer la vie de la mine

qui est un processus unidirectionnel (exploration, mise en production, exploitation, fermeture, réhabilitation du site) du cycle de vie des ressources extraites de la mine qui peut, ou non, impliquer une phase de recyclage plus ou moins efficace après le traitement du minerai et sa première utilisation.

En effet, le recyclage des éléments métalliques est possible, quoique rendu difficile par l'intégration d'autres éléments dans des alliages, des matériaux composites, etc. (Rombach 2006). À titre d'exemple, le recyclage de l'aluminium, qui est facile et très rentable en termes énergétiques, est limité à environ 30% des volumes d'aluminium produits dans le monde chaque année (World Aluminum Institute 2015). L'amélioration de la performance du recyclage est possible, mais il faut concevoir et mettre en place des filières et des modes de fabrication intégrés dans une optique d'écoconception (United Nations Environment Programme 2013). Le recyclage est carrément impossible pour des éléments comme les terres rares qui sont utilisées en petite concentration dans divers produits. Quant à des ressources comme les phosphates, et surtout les carburants fossiles, ils sont dissipés ou détruits par leur usage de sorte que les flux de ces ressources géologiques sont unidirectionnels.

L'augmentation de la demande des ressources minérales se justifie par le rôle qu'elles jouent dans la satisfaction de besoins humains diversifiés. Comme le développement durable vise à répondre aux besoins de la génération actuelle tout en permettant aux générations futures de répondre aux leurs, selon la définition de la commission Brundtland (CMED 1988), le développement minier devrait s'inscrire dans une vision large du développement durable malgré la nature finie des ressources.

Selon Steffen et al. (2011) de l'International Geosphere Biosphere Program, nous serions entrés dans un nouvel intervalle de temps géologique appelé l'Anthropocène, où l'impact de l'humanité se fait sentir à l'échelle planétaire. Cette période se caractérise par l'expansion tant des effectifs humains que de la technologie, le tout se traduisant par une consommation accélérée des ressources énergétiques et minérales.

Les prévisions sur l'évolution démographique annoncent pour 2050 deux milliards de nouveaux «consommateurs» portant à neuf milliards le nombre d'humains sur Terre. Cette croissance de la demande devrait être accompagnée par un quadruplement de l'économie mondiale (Organisation de coopération et de développement économique [OCDE] 2012) et par un doublement de la consommation d'énergie. Pour atteindre, en 2050, le niveau de vie des habitants des pays membres de l'OCDE, il faudrait que l'économie mondiale soit multipliée par quinze dans la même période (Jackson 2009). La pression pour satisfaire cette demande croissante devrait influencer à la hausse la demande pour les ressources minérales, nonobstant les efforts de recyclage et d'économie circulaire qui pourraient être mis en place d'ici là

Il est donc vraisemblable que la demande pour des ressources minérales soit en hausse à divers degrés, avec comme conséquence une raréfaction des gisements «faciles» ou «conventionnels». L'accès aux nouveaux gisements engendrera des coûts financiers, environnementaux et sociaux de plus en plus élevés (Bihouix et Guillebon 2010, Laforce et al. 2012). En effet, les gisements miniers seront de moins bonne qualité et de teneurs plus faibles en minerais. Les sites éloignés et les conditions cli-

matiques hostiles poseront de nouveaux défis, d'autant plus qu'ils se situent souvent à proximité d'écosystèmes fragiles lorsqu'ils ne sont pas proches de périmètres urbanisés (Mousseau 2012). Or, les mines peuvent avoir des impacts négatifs à chacune des étapes du cycle de vie (à toutes les phases : exploration, construction, exploitation et fermeture/restauration et sur toutes les activités incluant le transport, la transformation des ressources et leur élimination). Ces retombées affectent à l'échelle locale le potentiel d'autres types d'activités économiques, ainsi que diverses composantes du milieu social et écologique. Dans certaines régions où les ressources minérales sont abondantes, les impacts cumulatifs peuvent être très sérieux. Cette vue d'ensemble est rarement évoquée ou considérée par les États ou les promoteurs qui limitent leur analyse aux projets ponctuels, aux apports économiques et aux conséquences de la phase d'exploitation. Idéalement, les impacts du développement minier devraient être regardés dans une perspective de cycle de vie (chacune des étapes de fabrication du produit) afin de s'assurer que les impacts contrôlés par le projet, associés aux fournisseurs de services et de produits de même qu'aux changements affectés par la modification du marché, soient inventoriés, réduits et/ou compensés minimalement à l'échelle locale. En effet, les retombées d'un projet minier peuvent affecter à cette échelle le potentiel économique d'autres types de ressources génératrices d'activités économiques, mais aussi diverses composantes du milieu social et écologique.

Par conséquent, l'industrie minière fait aujourd'hui face à différents enjeux économiques, environnementaux, sociaux, éthiques, culturels et de gouvernance. Cette énumération couvre l'ensemble des dimensions du développement durable exposées précédemment.

3.2 Enjeux économiques

L'industrie minière a été largement visée dans les débats sur les effets économiques réels des industries extractives. L'abondance de ressources naturelles, considérée longtemps comme un puissant vecteur de croissance économique, a été critiquée dans les travaux pionniers de Prebisch (1950) et de Singer (1950). Leur théorie prédisait la détérioration lente des termes de l'échange des pays en développement et leur appauvrissement, c'est-à-dire la chute des prix des produits primaires exportés par ces pays par rapport aux prix des produits manufacturés (transformés) importés des pays développés. Toutefois, cette théorie a été contestée par d'autres études économiques (Kolstad 2007, Béland et Tiagi 2009) qui suggèrent que la bonne gouvernance et les mesures politiques et économiques adaptées seraient des facteurs essentiels pour permettre à l'abondance des ressources minières de contribuer à une croissance économique positive.

Un autre effet économique a été qualifié par Sachs et Warner (1995) de « syndrome hollandais » faisant référence aux difficultés éprouvées par l'économie hollandaise à la suite de la mise en exploitation, dans les années 1960, des réserves de gaz naturel. La performance économique des pays décroîtrait lorsque la dépendance à l'exportation des minéraux s'accroît (Pegg 2003, Papyrakis et Gerlagh 2004), vu l'augmentation du taux de change des monnaies nationales et la migration du travail et

du capital en provenance des autres secteurs productifs nationaux. Cela provoquerait une baisse des exportations agricoles et manufacturières, et de ce fait une économie spécialisée fort dépendante du secteur minier et de ses fluctuations. Mousseau (2012) qualifie le Canada de «vrai cas de la maladie hollandaise».

Le phénomène *boom and bust* caractérise aussi les retombées économiques de l'industrie minière (The Pembina Institute 2008, Tremblay et al. 2013). Une période de forte croissance économique est alors suivie par une rapide décroissance. La première phase correspond, en général, à la création d'emplois, à la mise en place des infrastructures et services sociaux ainsi qu'aux redevances minières (Pelletier 2012). La seconde phase correspond à la décroissance économique de la fin des projets miniers. Le caractère éphémère de ces retombées est plutôt compatible avec un type de développement limité à la durée de vie de la mine (Villeneuve 2012). Le caractère cyclique du prix des minéraux ajoute aussi une incertitude permanente sur la valeur de l'extraction des ressources et sur la fiabilité des retombées économiques, fragilisant ainsi les communautés mono-industrielles.

3.3 Enjeux environnementaux

Les impacts environnementaux associés à l'industrie minière sont nombreux et variables selon les phases du cycle de vie d'une mine (Environmental Law Alliance Worldwide 2010, Pelletier 2012, Villeneuve 2012). Ils peuvent affecter, de manière temporaire ou permanente, l'eau, l'air, le sol et la biodiversité.

Selon la couverture végétale présente, la mise en place des infrastructures minières (routes, forages, parcs à résidus, etc.) nécessite le défrichage, le déblaiement, l'excavation des terrains et leur remblai. Cela entraîne un changement d'usage des terres, la modification de la topographie et la détérioration, voire la destruction des sols. Ces transformations perturbent le régime hydrologique et le fonctionnement des bassins versants (Commission économique pour l'Afrique 2011, Société de l'eau souterraine Abitibi-Témiscamingue 2012). Durant la phase d'exploitation, le potentiel de contribution de l'industrie minière aux changements climatiques est indiscutable (Pearce et al. 2009, Villeneuve 2012). Cette industrie affecte d'une part l'absorption de dioxyde de carbone (CO₂) du fait de la déforestation et, d'autre part, les émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre (GES), attribuables aux besoins énergétiques et aux explosifs.

L'exploitation minière requiert une très grande quantité d'eau, parfois en détournant un ou des cours d'eau, ainsi qu'un certain nombre de produits chimiques comme le cyanure dans le cas des mines aurifères (Bihouix et Guillebon 2010, Pelletier 2012). Les sites d'entreposage de rejets miniers occasionnent la plus importante source d'impacts sur la qualité de l'eau par la production d'eaux de drainage minier et sur la qualité de l'air par les poussières aéroportées (Aubertin et al. 2002, Bussière et al. 2005, Plante et al. 2009). En outre, le drainage peut entraîner la présence de contaminants de lixiviation à forte teneur en sulfates et riches en métaux lourds toxiques même à très faible dose (cadmium, cuivre, plomb, arsenic, etc.), voire des matières radioactives, dans le cas des mines d'uranium, par exemple (Pelletier 2012, Bureau d'audiences publiques

sur l'environnement 2015). Certains métaux lourds peuvent être relâchés (Lei et al. 2010) et devenir « biodisponibles » dans les réseaux trophiques, menaçant ainsi la santé et même la vie des organismes biologiques (Álvarez-Valero et al. 2009). Il n'existe pas aujourd'hui de remède universel au problème environnemental majeur que pose ce phénomène (Genty 2012). D'autres voies de disposition des rejets miniers dans la mer, lorsque la localisation des mines le permet, ont été utilisées dans le passé, mais leur innocuité environnementale n'est pas démontrée et cette pratique est désormais interdite dans plusieurs pays, dont le Canada.

L'exploitation minière a également une incidence sur les écosystèmes et la biodiversité durant le cycle de vie de la mine et même après sa fermeture; incidence due notamment à la suppression de la végétation, du sol de couverture, au déplacement de la faune, aux matières et liquides polluants et enfin aux nuisances sonores (Conseil international des mines et métaux 2006, Environmental Law Alliance Worldwide 2010). L'avifaune, les poissons, certains reptiles, les rongeurs fouisseurs et les petits mammifères peuvent être sévèrement affectés. À la fin de vie de la mine, sa fermeture laisse un terrain complètement bouleversé, marqué souvent par des fosses, des stériles et des bassins de décantation (Bihouix et Guillebon 2010, Pelletier 2012). Le sol est en général impropre à l'agriculture et a besoin d'être revégétalisé. Enfin, certains sites miniers sont abandonnés sans aucune restauration (Mousseau 2012, Initiative nationale pour les mines orphelines ou abandonnées 2013). Cette pratique déplorable, qui était la norme jusque dans les années 1970 au Québec, est aujourd'hui plus rare dans les pays industrialisés où les règlements obligent à constituer une fiducie pour la remise en état des lieux après l'exploitation. Dans les pays en voie de développement, d'autres problèmes surviennent en raison de la difficulté des autorités à contrôler les mouvements de population et des pratiques comme l'orpaillage ou le creusage de mines sauvages au pourtour des gisements en exploitation ou après la fin de vie d'une mine.

Enfin, les infrastructures et opérations minières seraient vulnérables aux changements climatiques (Pearce et al. 2009, Villeneuve 2012). La fonte du pergélisol dans les pays nordiques, les phénomènes météorologiques extrêmes et l'augmentation des précipitations pourraient endommager l'intégrité des ouvrages hydrauliques et des structures de confinement des rejets et déchets miniers. Ces phénomènes contribueraient à l'accroissement de l'érosion, du drainage minier et de la pollution des eaux, par exemple par le cyanure (Stratos Inc. 2011). La fonte des glaces et l'effondrement des sols présenteraient des risques pour la sécurité des ponts de glace et l'intégrité structurale des routes terrestres, des ponts et des pistes d'atterrissage en milieu nordique. Ces nouveaux paramètres du climat doivent être pris en considération dans la conception des mines, dans la phase d'opération et à la fermeture des mines.

Les atteintes à l'environnement sont donc multiples, mais restent variables en fonction de la sensibilité des sites, du climat régional et des mesures d'atténuation des impacts mises en œuvre avant, pendant et après l'exploitation d'un gisement.

3.4 Les enjeux sociaux, culturels et éthiques

Les activités minières ont également des effets sur les communautés touchées, essentiellement les employés et leurs familles, les communautés locales et ceux qui résident dans le voisinage des sites miniers. Un nombre considérable de perturbations et de déficiences ont été constatées sur les plans sociaux et culturels, et elles posent des questions éthiques. Ces impacts varient selon le niveau de développement du pays concerné (Commission économique pour l'Afrique et Union africaine 2011, Laforce et al. 2012). Ce portrait contrasté est intimement lié aux politiques et réglementations mises en place, à l'efficacité de leur application, à la culture locale et aux structures sociales.

L'exploration et l'exploitation minières perturbent incontestablement le mode de vie des autochtones, leurs coutumes et leurs valeurs symboliques (Conseil international des mines et métaux 2010, Environmental Law Alliance Worldwide 2010). L'occupation de leurs terres et leurs déplacements, l'afflux de travailleurs allochtones et le passage d'une économie locale de subsistance à une économie avec des flux monétaires plus importants peuvent affecter la cohésion des communautés et l'ordre social. Lorsque des mesures de formation et de discrimination positive à l'embauche ne sont pas prises en amont de l'exploitation, la main-d'œuvre locale se voit le plus souvent confinée aux emplois subalternes ou au travail auxiliaire.

Les lieux de travail peuvent être aussi une source de tensions et de conflits entre autochtones et travailleurs allochtones; ces derniers ne développant pas ou peu de sentiment d'appartenance à la communauté d'accueil. Dans les sites éloignés, ce phénomène est accentué par la main-d'œuvre dite «volante», selon le principe du travail par rotation avec service de navette (Conseil international des mines et métaux 2010).

L'alcoolisme, la toxicomanie, la prostitution et les jeux de hasard constituent de sérieux problèmes dans de nombreuses communautés minières (Conseil du statut de la femme du Québec 2010).

Dans les pays en développement, le fléau du travail des enfants et l'inexistence de conditions minimales du travail ou l'ignorance de droits syndicaux désavantagent encore les employés locaux (Commission économique pour l'Afrique et Union africaine 2011, Levacher 2012). Par contre, dans les pays développés, les salaires restent assez élevés et les normes de sécurité du travail sont respectées. La disparité dans les salaires et les conditions de travail entre les travailleurs de la mine et les autres membres de la communauté peuvent alors engendrer des difficultés. Les femmes, qu'elles soient autochtones, employées ou conjointes d'employés, sont aussi affectées (Conseil du statut de la femme du Québec 2010).

L'industrie minière a d'autres impacts sur l'ensemble des communautés. L'immigration non contrôlée et la croissance démographique liée à l'activité économique locale induisent une forte pression sur les services sociaux tels que la santé, l'éducation, le logement et le commerce, lorsqu'ils sont disponibles au préalable (Buxton 2012). Des problèmes de santé et de sécurité au travail sont liés à l'exposition prolongée aux contaminants dans la poussière, l'air, l'eau et le sol ou à la consommation de produits

contaminés comme les poissons, les animaux sauvages, les plantes et l'eau (Conseil international des mines et métaux 2010, Environmental Law Alliance Worldwide 2010, Mousseau 2012).

Ces mélanges de populations, l'importation de valeurs et de pratiques nouvelles, l'ignorance des langues et des traditions locales, peuvent signifier l'altération quelquefois irréversible de la culture des populations affectées. Cela se traduit par des tensions sociales à tous les niveaux.

3.5 Les enjeux de gouvernance

En l'absence d'un cadre de gouvernance clair, les impacts de l'industrie minière peuvent avoir des effets négatifs durables. Dans les pays où les lois encadrant l'activité minière sont déficientes ou mal appliquées, où sévit la corruption des autorités nationales ou régionales, et où des conflits ethniques interviennent, les entreprises doivent se doter d'outils d'autorégulation et se soumettre à des normes qui leur permettent d'éviter ou d'atténuer les impacts sur les autres dimensions du DD.

Le défi primordial est d'instaurer une vision globale, multidimensionnelle et à long terme. Cette vision ne peut être renforcée que par une collaboration internationale, une homogénéisation des normes, des principes et des modèles de DD, et une meilleure application des bonnes pratiques, la majorité des entreprises qui exploitent des gisements miniers étant des transnationales (Mousseau 2012, The Natural Resource Charter 2012).

Une bonne gouvernance des entreprises devrait se caractériser par :

- une efficacité énergétique à tous les niveaux ;
- plus d'efficacité dans l'extraction, la transformation et le recyclage ;
- la planification holistique des rapports avec les communautés affectées ;
- une qualité d'encadrement de la santé et la sécurité des employés ;
- des mesures de protection de l'environnement et de réduction des nuisances ;
- une stratégie de remise en état des milieux perturbés ;
- une perspective de développement industriel intégrant le cycle de vie des produits.

Au carrefour de tous ces éléments, l'ensemble des parties prenantes sont donc tenues de comprendre et d'accepter leurs rôles et leurs responsabilités, et d'apprendre à les opérationnaliser d'une manière plus inclusive et durable. Mais l'industrie minière n'est pas la seule à être interpellée. En effet, il doit y avoir complémentarité entre les actions des parties prenantes à trois niveaux : dans les projets où le DD s'inscrit dans le quotidien, dans la gestion organisationnelle des entreprises où il s'incarne dans les processus et les valeurs ainsi que dans la gestion sociétale au sens large. Nous allons présenter les conditions permettant d'appliquer le DD à chacun de ces niveaux.

4. Appliquer le développement durable à l'échelle des projets miniers

Les impacts d'un projet minier dépendent très directement du mode de gestion prévalant dès sa conception et tout au long du cycle de vie de la mine. Ce niveau de «gouvernance» a été identifié comme un élément-clé dans la construction d'un avenir durable de l'exploitation minière localement et globalement (Buxton 2012). Ce niveau correspond à une **stratégie pragmatique** (Villeneuve et al. 2016), où le DD progresse par l'implantation d'actions qui visent à apporter des améliorations concrètes touchant ses différentes dimensions, selon les enjeux ou les perspectives propres à chaque projet. Les objectifs du DD sont atteints par le cumul d'initiatives, bien que l'analyse de la performance se fasse dans le cadre géographique et temporel du projet. Ainsi, en fonction de leur contexte territorial et des enjeux soulevés par une ou des parties prenantes, chaque projet peut alors être conçu ou évalué en fonction de critères de DD spécifiques au contexte. Cela peut se faire au moyen d'outils d'analyse comme les analyses économiques, sociologiques et culturelles, l'évaluation environnementale et l'analyse de DD. Ces outils permettent le choix et le suivi d'indicateurs pertinents. Il est alors possible d'influencer rapidement et efficacement les projets. Appliqués en amont, ils préviennent efficacement les problèmes et facilitent la communication du risque et l'acceptabilité sociale.

Une pareille démarche peut se construire à partir d'un diagnostic initial du projet, visant l'identification de lacunes, de possibilités et de projets potentiels. Des bonifications sont élaborées pour atteindre des objectifs et cibles consensuels, déterminés à partir d'un cadre de référence. C'est une stratégie qui peut se révéler féconde pour les entreprises minières qui peuvent agir de manière différenciée sur chaque projet.

On trouve dans les dernières années au Québec et ailleurs dans le monde de très nombreux exemples de ce type d'initiatives (Villeneuve 2012). Celles-ci sont imposées par les autorités réglementaires ou font l'objet de mesures volontaires.

Toutefois, si ce travail à la pièce permet de progresser malgré des moyens et des échéanciers limités, il demeure difficile pour une entreprise de colliger l'information sur l'ensemble des projets et de rendre les apprentissages transférables à d'autres situations. Une stratégie par projet n'implique pas nécessairement de système de gestion de l'information ni de processus intégrés et transversaux. Il faut donc une forme de reddition de comptes et une stratégie de communication appropriées. Les regroupements d'informations peuvent être confiés à des tiers, gouvernements ou regroupements sectoriels d'entreprises, même si on se heurte rapidement à des problèmes de confidentialité et de crédibilité dans les sources de données.

5. Appliquer le développement durable à l'échelle des entreprises minières

Les **stratégies planificatrices** (Villeneuve et al. 2016) préconisent l'adaptation des outils de gestion stratégiques pour faire progresser l'application des principes de DD dans les organisations. L'utilisation d'un système de gestion favorise une démarche évolutive, flexible et adaptative, orientée vers l'amélioration continue, mais avec une vision claire des objectifs à atteindre.

Dans une **stratégie planificatrice**, la dynamique du DD est d'abord axée sur le processus plutôt que sur les résultats prévisibles (Villeneuve et al. 2016). Ce processus est cohérent avec la démarche du *Plan Do Check Act* (Shewhart 1986), un outil de gestion organisationnelle, ou encore avec l'éco-circuit proposé par Ferrand (2000), qui détaille les étapes d'un tel système de gestion.

Ce type de stratégie implique également de vérifier régulièrement que les perspectives de développement de la mine suivent les objectifs du DD. C'est une stratégie qui demande de documenter les processus à l'échelle de l'entreprise, de mesurer les indicateurs et d'inciter l'entreprise à rendre des comptes, de façon à permettre une réaction ou une adaptation lorsque nécessaire. Ce processus, qui est routinier pour la dimension économique d'un projet minier doit embrasser aussi bien les autres dimensions du DD. Une semblable démarche permet une adaptation des outils et des principes du DD à la culture de la collectivité, grâce à la réflexion stratégique qui entoure le processus.

Au niveau organisationnel, une stratégie planificatrice du DD devrait permettre à une entreprise d'instaurer une vision globale, multidimensionnelle et à long terme de son développement, et d'utiliser des outils pertinents et adaptés pour encadrer cette démarche dans un processus d'amélioration continue. Des systèmes de gestion du DD devraient permettre de prendre en compte l'ensemble des considérations économiques, sociales, écologiques, éthiques et culturelles dans les processus de gestion et de gouvernance pour analyser cette complexité.

Ce type de stratégie trouve sa pertinence dans le contexte actuel de l'industrie minière. Face à la multiplication des pressions externes, les entreprises minières se préoccupent de plus en plus d'améliorer leur crédibilité et de satisfaire les attentes des parties prenantes. Cette préoccupation représente un impératif stratégique pour répondre aux exigences réglementaires, maximiser la valeur pour l'actionnaire et minimiser les risques et enjeux liés à leurs activités (Smouts et Antoine 2008, Lefebvre-Dutilleul 2012). Plusieurs études et enquêtes internationales ont retracé la transition progressive des initiatives des entreprises minières en matière de DD et de responsabilité sociale (ou sociétale) des entreprises (RSE) (KPMG 2012, McMahon et Cervantes 2012, PwC 2013). La RSE peut être définie comme une forme de contribution des entreprises au DD. Celui-ci constitue un objectif à atteindre alors que la responsabilité sociale comporte une modalité de réponse s'exprimant à travers des stratégies, des dispositifs de gestion, etc. (Capron et Quairel-Lanoizelée 2010). En d'autres termes, la RSE concerne la gestion des impacts sociaux et environnementaux des décisions et des activités d'une entreprise se traduisant par un comportement

éthique et transparent (Aubrun et al. 2010), dans une démarche le plus souvent planificatrice.

La communication de l'entreprise avec les parties prenantes est essentielle pour bâtir une plus grande confiance et assurer la coopération et la participation effective du public à la prise de décision (Buxton 2012). La qualité de l'information et de son utilisation, son accessibilité et sa crédibilité affectent l'interaction de tous les acteurs du secteur minier (Aubrun et al. 2010). L'accès à l'information constitue aussi un gage de transparence et une condition critique pour l'acceptabilité sociale (Chaire en éco-conseil 2012, The Natural Resource Charter 2012). L'utilisation d'indicateurs de performance requérant des informations qualitatives ou quantitatives spécifiques sur des performances ou des résultats liés à l'organisation permettra d'obtenir des informations comparables qui illustrent un changement au fil du temps. En matière de divulgation de l'information, la reddition de comptes représente un outil de communication incontournable pour qu'une compagnie minière démontre ses bonnes performances (Capron et Quairel-Lanoizelée 2010). La majorité des entreprises de grande envergure publient des rapports de DD qui sont ou non inclus dans leurs rapports annuels ou financiers (PwC 2012). Certains publient sur leur site web des informations de durabilité. Les cadres de DD les plus utilisés sont ceux du Global Reporting Initiative et du Conseil International des Mines et Métaux (PwC 2012). Au Québec, l'Association minière du Québec et ses membres adhèrent, depuis juin 2014, à l'initiative *Vers le développement minier durable*, «un programme conçu pour améliorer graduellement les pratiques environnementales et sociales des sociétés minières». Ils doivent évaluer tous les ans leur rendement lié à 23 indicateurs classés dans 6 catégories : la gestion des résidus, les relations avec les autochtones et les collectivités, la gestion de la conservation de la biodiversité, la gestion de l'énergie et des émissions de gaz à effet de serre, la santé et la sécurité, et la planification de la gestion de crise (<http://www.amq-inc.com/lindustrie-miniere/developpement-durable>).

Il existe des limites et des difficultés à l'application de cette approche dans le domaine minier. D'emblée, la structure du processus peut sembler complexe, ce qui peut décourager certaines entreprises. Les systèmes de gestion peuvent être longs à mettre en place et ne pas donner de résultats concrets à court terme. L'adaptation des pratiques pour intégrer le développement durable dans un établissement existant ne répare pas nécessairement les passifs. De même, lorsqu'une entreprise acquiert les actifs d'une autre, elle hérite aussi de ses passifs et de ses modes de gestion. Cela se traduit parfois par des effets qui entachent la réputation d'une entreprise, même si elle a implanté une démarche de DD.

Enfin, le risque des politiques cosmétiques (*greenwashing*) et de l'autocertification souvent complaisante de l'industrie, ne peut être écarté. Bien que les entreprises minières aient déployé des efforts non négligeables pour l'atténuation des impacts environnementaux et le renforcement des processus participatifs, les défis environnementaux et sociaux doivent être abordés et réglés avec davantage de transparence. Or, la majorité des entreprises minières procèdent à la promulgation de codes de conduite sans y adjoindre ni politique ni procédure d'application.

Enfin, cette stratégie n'implique pas nécessairement des questionnements plus globaux (paradigme, logique économique, structure du marché, etc.). Pour réellement changer les façons de faire dans le monde minier, il faut un troisième niveau, la gestion sociétale.

6. Gouvernance sociétale du monde minier

Plusieurs enjeux sont difficilement intégrables à l'échelle des projets ou des entreprises, et doivent être gérés à l'échelle sociétale: diversification de l'économie locale, éducation et formation continue, développement culturel et social, production d'un maximum de valeur ajoutée près des lieux d'extraction, développement des connaissances (recherche), approche de cycle de vie des projets. En effet, le DD s'incarne dans les outils de gouvernance que notre société se donne pour mieux vivre entre nous et avec la nature, par exemple les lois et règlements encadrant l'évaluation environnementale, les mécanismes de redistribution de la richesse, les systèmes d'éducation et de santé publics qui contribuent à l'atteinte de ses objectifs. Il procède par hypothèses dans l'incertitude du futur. Il est à la fois un objectif et un cadre de référence dans un monde en changement. Pour illustrer le besoin d'une gouvernance sociétale, qui regroupe les gouvernements, les ONG, la société civile, les médias et les centres de recherche, voici trois lieux d'implication pertinents.

6.1 Le renforcement des responsabilités gouvernementales

Les gouvernements sont généralement fiduciaires des ressources naturelles de leur territoire et doivent les gérer au bénéfice de leurs citoyens présents et futurs (Buxton 2012, OCDE 2012, The Natural Resource Charter 2012). Ils doivent contribuer à toutes les étapes de la «chaîne de décisions» du développement de ressources naturelles, c'est-à-dire de l'établissement des conditions de l'exploration et de l'extraction, des contrôles environnementaux jusqu'à l'investissement des redevances, notamment la promotion du développement et la diversification économique.

En effet, l'État est responsable d'encadrer une industrie minière pour qu'elle œuvre sur une base soutenable et qu'elle réponde aux aspirations des groupes concernés en demeurant prospère et compétitive (Campbell 2012). La conciliation de ces grands objectifs illustre bien la situation, que Szablowski (2010) qualifie de «difficile», devant laquelle sont placés la plupart des États à fort potentiel minier. Le gouvernement, en tant que régulateur, a de nombreux rôles qui peuvent apparaître contradictoires: promoteur du développement économique, auditeur qui vérifie la conformité, et en même temps, médiateur entre les communautés et les entreprises, de même que responsable de la gestion durable des ressources naturelles (Buxton 2012). Des politiques gouvernementales et des cadres réglementaires efficaces ont donc un rôle important à jouer dans le renforcement des responsabilités gouvernementales envers l'industrie minière (Lambert 2012). La conformité des politiques minières avec le DD ne pourrait être garantie que par une «gouvernance» réussie des ressources

(The Natural Resource Charter 2012). Cette gouvernance est tributaire de la volonté politique selon les différentes échelles des autorités gouvernementales, de l'aptitude et de la capacité à prendre des décisions difficiles et complexes, et à les mettre en œuvre avec succès.

La coopération et la complémentarité entre les secteurs sont aussi nécessaires. Les gouvernements devraient établir des cadres de planification intégrée de l'utilisation des terres en vue d'équilibrer les différents droits d'occupation et d'utilisation du territoire, ainsi que les multiples intérêts, souvent concurrentiels, entre les différents secteurs (agriculture, foresterie, exploitation pétrolière, aménagement urbain, etc.) (Nature Québec 2010, Buxton 2012). Quant aux règles de conformité des projets miniers, la plupart des recommandations proposées s'articulent autour de trois éléments principaux : les conditions et normes d'autorisation, le suivi des activités minières et la postfermeture (Mousseau 2012).

Au Québec, malgré la récente réforme du régime minier, le *free mining*, lequel consacre la préséance des droits miniers sur d'autres droits et usages, est fort critiqué (Campbell 2012, Mousseau 2012). Depuis 2009, l'Ontario a établi un ordre de préséance différent pour le sud et le nord de la province, donnant ainsi une prise aux citoyens sur le développement minier du territoire dans les zones habitées et un mécanisme plus élaboré pour l'exercice des droits des autochtones (Ministère du Développement du Nord et des Mines 2012).

La contribution du secteur public à l'opérationnalisation du DD en industrie minière suppose que les institutions publiques disposent des compétences et des capacités humaines et matérielles nécessaires pour assumer pleinement leur rôle de régulateur (Campbell et al., 2012). Le recours nécessaire à des ressources humaines et intellectuelles pour gérer le secteur permettra de doter les pouvoirs publics de capacités suffisantes pour la négociation des clauses et conditions des accords d'exploitation des gisements minéraux, l'administration du système fiscal et des accords conclus, la tarification et les redevances minières, ainsi que le suivi et l'inspection. La gestion de l'information et son partage avec les parties prenantes du secteur minier sont aussi importants. Pour ce faire, il est primordial que le gouvernement ait les informations et les outils de gestion lui permettant d'acquérir et de maintenir une bonne connaissance de l'ensemble des facteurs qui influencent le secteur minier.

Pour assurer une bonne gouvernance du secteur minier, il importe que les gouvernements sachent éclaircir leurs rôles et responsabilités à chacune des étapes et qu'ils agissent avec rigueur et transparence. L'adoption d'un cadre de référence en développement durable devient alors un outil permettant de justifier et de suivre l'évolution des projets et leurs impacts sur le territoire dans chacune des dimensions du DD.

7. La recherche

Comme nous l'avons vu jusqu'ici, les enjeux du développement minier vont bien au-delà de la géologie et des aspects financiers. La collaboration avec des équipes universitaires interdisciplinaires peut permettre de « penser en dehors du trou ». Il importe en effet d'introduire dans le monde minier des innovations sociétales et environnementales susceptibles de répondre aux nouveaux enjeux du DD.

Jusqu'à présent, de nombreuses solutions et pistes potentielles ont été proposées pour minimiser les multiples impacts, favoriser l'acceptabilité sociale et relever les défis de l'industrie minière en y rendant le DD opérationnel. Cependant, pour certaines solutions, plusieurs limites persistent et empêchent d'obtenir les résultats ciblés. L'innovation et le développement des activités de recherche s'avèrent une très bonne voie pour renforcer « l'intelligence minière » et trouver des solutions novatrices aux défis du DD (Bouyouf 2007, Varet 2007, Kerr 2010, OCDE 2012, Réseau entreprise et développement durable 2012).

L'innovation minière, souvent considérée du point de vue technologique, devrait se baser sur des approches multidimensionnelles et pluridisciplinaires (Filippou et King 2011, Minalliance 2012, OCDE 2012). Elle peut être aussi réglementaire, institutionnelle, économique, sociale et comportementale (Réseau entreprise et développement durable 2012). Plusieurs domaines nécessitent encore plus de recherche, d'expérimentation et de réflexion. Ces domaines concernent les différentes dimensions du développement minier durable et exigent plusieurs expertises.

Les questions de la régulation du secteur minier, de l'élaboration de normes, de réglementations, d'outils de la RSE, d'analyse du DD, la mise en place des technologies d'exploration et d'exploitation minières plus efficaces, des produits miniers de type *low-tech* ainsi que l'économie verte et le recyclage des métaux sont les plus fréquemment citées.

Sur le plan environnemental, des recherches sur la lutte contre la pollution, le drainage minier, les mesures d'atténuation des changements climatiques, l'efficacité énergétique, la gestion des eaux industrielles et la restauration des sites miniers sont encore nécessaires. En outre, la santé et la sécurité au travail et l'innovation sociale en matière d'approches participatives et de changement de comportements des consommateurs font encore défaut (Buxton 2012, Campbell 2012, OCDE 2012).

À titre d'exemple, la Chaire en éco-conseil de l'UQAC collabore depuis près de dix ans avec des entreprises minières et a produit des recherches sur les émissions de gaz à effet de serre de différentes options d'exploitation et de transport du minerai, le potentiel de création de puits de carbone sur les parcs à résidus, l'écologie industrielle pour la réhabilitation des parcs à résidus, le potentiel de substitution de carburants fossiles par des carburants lignocellulosiques issus de la biomasse résiduelle, l'implantation de politiques de développement durable dans l'entreprise, l'analyse de développement durable appliquée à des projets miniers (Tremblay et al. 2013), l'organisation de processus participatifs par le dialogue (Segers 2014) en amont d'un processus d'audiences publiques (Huybens et al. 2012) et même la valeur spirituelle de certains éléments du territoire (Henry et Huybens 2013).

Les entreprises minières jouent un rôle important comme catalyseurs de l'innovation (Réseau entreprise et développement durable 2012). En conséquence, les entreprises ne devraient pas considérer les initiatives d'innovation comme des centres de coûts, mais bel et bien comme des occasions à la fois de contrecarrer leurs impacts, d'optimiser leurs performances et d'augmenter leur rentabilité. L'innovation peut se révéler complexe, coûteuse et nécessite parfois beaucoup de temps et de travail de recherche et de consultation. Les entreprises minières devraient alors collaborer entre elles et étendre leurs réseaux de partenariat notamment avec les industries transformatrices des ressources minières, les ONG et les associations industrielles. Les gouvernements sont tenus aussi d'imposer des exigences de transfert technologique (Mousseau 2012).

7.1 Diffuser les bonnes pratiques

Suivant la même logique de la portée globale du DD et de la bonne gouvernance, les actions innovatrices doivent être diffusées largement à l'échelle mondiale et renforcées dans les pays miniers émergents ou en développement (OCDE 2012). La plupart des initiatives sont conçues par les pays développés notamment en Australie et en Amérique de Nord comme le Global Mineral Research Alliance, considéré comme un partenariat pionnier en matière d'innovation et de recherche minières. Plus récemment, les pays européens se sont mobilisés à travers l'initiative de l'Union européenne, « Une union pour l'innovation », concernant l'ensemble de la chaîne de valeur des matières premières et des initiatives nationales comme le programme de la « Mine verte » visant à faire de la Finlande un leader de l'éco-performance dans l'industrie minière. La diffusion des connaissances offre un cadre efficace de diffusion des savoirs et peut contribuer à l'évolution des normes (OCDE 2012). Cela implique un gros travail de formation et de développement des compétences techniques dans les pays du Sud ainsi que la mise en place de dispositifs d'échange d'information entre pays au niveau régional, et une capacité d'analyse stratégique et de prospective globale qui ne peut être concentrée dans les mains de quelques pays (Varet 2007). L'internationalisation du savoir peut être appuyée par la mise en place d'un cadre juridique et des incitations financières qui encouragent la mobilité des chercheurs et la coopération internationale sur des programmes de recherche destinés à surmonter des défis planétaires.

L'adaptation aux changements climatiques est un exemple de secteur où l'innovation est primordiale. L'activité minière se fait sous la plupart des conditions climatiques, partout dans le monde sauf en Antarctique. Les changements climatiques auront des impacts potentiels sur les infrastructures, le transport, l'énergie, les opérations et l'environnement. La récurrence accrue d'événements extrêmes demande une révision des paramètres d'exploitation. La recherche peut ici jouer un rôle pour prévenir les accidents, et pour améliorer la sécurité globale et l'innocuité environnementale des activités minières (Villeneuve 2012).

8. Conclusion

Les enjeux du DD liés à l'industrie minière se révèlent complexes. Les débats et les interpellations des parties prenantes envers le monde minier en témoignent tout autant que les réponses qu'apporte ce dernier. Cela implique autant l'opérationnalisation des politiques sectorielles par les administrations publiques et les acteurs politiques, que la mise en œuvre de bonnes pratiques de l'industrie, justifiées par une volonté de DD. Malheureusement, les impacts encourus dans le passé, le lourd héritage de sites orphelins et les pratiques actuelles de certains acteurs industriels, tant dans les pays développés que dans les pays en voie de développement, montrent qu'un large fossé reste à combler, et ce, pour chacune des dimensions du DD.

Ce défi met en cause une responsabilité partagée entre les parties prenantes, quoique le partage ne soit pas facile à délimiter. Il exige notamment le renforcement des responsabilités gouvernementales, l'instrumentation et la généralisation des bonnes pratiques de la part des industries minières, mais aussi le développement d'une réflexion éthique plus généralisée concernant le rôle de l'industrie minière dans la satisfaction des besoins des humains d'aujourd'hui et de demain.

Alors, comment rendre opérationnel le développement durable dans le monde minier ?

Comme il existe de nombreux outils de DD, il importe que l'ensemble des parties prenantes, et au premier chef les entreprises ainsi que les gouvernements, réfléchissent sur leurs finalités et approches afin de choisir les bons outils, de même que les bonnes stratégies de mise en œuvre. Dorénavant, les exigences des parties prenantes, les changements prévisibles des conditions de marché tout au long de la période d'opération des mines, l'adaptation aux nouveaux enjeux des changements climatiques et les enjeux de fin de vie vont devoir être pris en considération avant d'accorder les certificats d'autorisation. De plus, le dialogue avec les communautés d'accueil devrait être assuré tout au long du cycle de vie des projets.

La compréhension du DD et de ses défis dans le secteur minier s'est nettement améliorée dans la dernière décennie. Bien que la durabilité en industrie minière constitue indéniablement un processus complexe, il est temps d'identifier les lacunes et faiblesses des pratiques actuelles ainsi que les possibilités et issues novatrices. C'est un préalable pour en tirer des leçons en vue d'améliorer à la fois la performance de l'industrie, l'acceptabilité des projets et leur innocuité environnementale. En termes simples, il faut « penser la mine au-delà du trou ». Le développement minier durable repose sur une vision systémique, consensuelle, multi-parties prenantes et globale dans un monde en perpétuel changement. L'objectif est double : réconcilier les antagonismes des intérêts et objectifs des parties prenantes, et assurer les besoins actuels et futurs en ressources minières. Toutes les parties prenantes devront collaborer et s'engager. Il est nécessaire que chacun prenne sa part de responsabilité dans la transformation du modèle de développement de l'industrie minière, en adoptant les bonnes pratiques et en agissant sur le terrain pour favoriser le changement souhaité.

La mondialisation, le déséquilibre Sud-Nord, la corruption et l'atteinte aux droits humains sont autant de facteurs d'incertitude qui nécessitent un travail de longue haleine. Il interpelle la gouvernance à trois niveaux et si la volonté est présente, et que les outils sont correctement appliqués dans une perspective à moyen et long terme, il est réalisable.

À l'instar des géomètres babyloniens, on peut résoudre la quadrature du cercle, sans jamais y parvenir parfaitement. On pourra arriver à opérationnaliser le développement durable dans le domaine minier en appliquant une démarche d'amélioration continue pragmatique, déterminée et transparente.

Remerciements

Les auteurs remercient la Chaire en éco-conseil et ses partenaires du monde minier (Rio Tinto Alcan, ArcelorMittal Exploitation minière Canada, Iamgold, Niobec, Ressources d'Arianne, Mines Virginia) qui ont fourni, par les divers contrats de recherche réalisés en partenariat avec la Chaire au cours des dernières années, le matériel qui a permis la rédaction de cet article. Nos remerciements vont aussi à madame Najoua Bensalah pour le travail accompli pendant son stage postdoctoral à la Chaire.

Références

- Álvarez-Valero, A.M., Sáez, R., Pérez-López, R., Delgado, J., et Nieto, J.M. 2009. Evaluation of heavy metal bio-availability from Almagrera pyrite-rich tailings dam (Iberian Pyrite Belt, SW Spain) based on a sequential extraction procedure [en ligne]. *Journal of Geochemical Exploration*, **102**(2): 87–94. doi: 10.1016/j.gexplo.2009.02.005.
- Aubertin, M., Bernier, L., et Bussière, B. 2002. Environnement et gestion des rejets miniers. Manuel sur cédérom. Presses internationales Polytechnique, Montréal, Canada.
- Aubrun, M., Bermond, F., Brun, E., Cortot, J.-L., Delchet-Cochet, K., Graffin, O., Jounot, A., et Ponrouch, A. 2010. ISO 26000: responsabilité sociétale: comprendre, déployer, évaluer. AFNOR éd., La Plaine-Saint-Denis, France.
- Béland, L.-P., et Tiagi, R. 2009. Economic Freedom and the «Resource Curse»: an Empirical Analysis [en ligne]. Fraser Institute, Vancouver, Canada. Disponible à https://www.fraserinstitute.org/sites/default/files/EconomicFreedomandResourceCurse_1.pdf.
- Bihouix, P., et Guillebon, B. de. 2010. Quel futur pour les métaux? Raréfaction des métaux: un nouveau défi pour la société. EDP sciences, Les Ulis, France.

- Bouyouid, F. 2007. L'institutionnalisation de la responsabilité sociale de l'entreprise: principes théoriques [en ligne]. *Dans* Communication au 5^e Congrès de l'ADERSE, Grenoble, France. Disponible à http://www.waderse.org/docatelecharger/congres_aderse_2008/actes/Articles/Session%201.1/Linstitutionnalisation%20de%20la%20Responsabilite%20Social.pdf [cité le 29 septembre 2015].
- Bureau d'audiences publiques sur l'environnement. 2015. Les enjeux de la filière uranifère au Québec [en ligne]. BAPE, Québec, Canada. Rapp. 308. Disponible à: <http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/rapports/publications/bape308.pdf>.
- Bussièrre, B., Aubertin, M., Zagury, G.J., Potvin, R., et Benzaazoua, M. 2005. Principaux défis et pistes de solution: Les ressources minérales et le développement de l'Afrique pour la restauration des aires d'entreposage de rejets miniers abandonnées. *Dans* Symposium 2005 sur l'environnement et les mines, Rouyn-Noranda, Canada. Cédérom. [cité le 20 décembre 2013].
- Buxton, A. 2012. MMSD+10: Reflecting on a Decade of Mining and Sustainable Development [en ligne]. International Institute for Environment and Development, Londres, Royaume-Uni. Disponible à <http://pubs.iied.org/pdfs/16041IIED.pdf> [cité le 29 septembre 2015].
- Campbell, B.K. 2012. Activités minières et enjeux de développement: mise en contexte pour une discussion sur le rôle des différents acteurs [en ligne]. *Dans* Séminaire de réflexion organisé par l'AQOCI, Centre interdisciplinaire de recherche en développement international et société (CIRDIS). Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada. Disponible à http://www.icim.uqam.ca/IMG/pdf/BCampbell_-_AQOCI_-_26-03-2012.pdf [cité le 29 septembre 2015].
- Capron, M., et Quairel-Lanoizelée, F. 2010. La responsabilité sociale d'entreprise. La Découverte, Paris, France.
- Chaire en éco-conseil. 2012. Acceptabilité sociale des projets miniers: l'apport des processus participatifs. Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, Canada.
- Commission économique pour l'Afrique et Union africaine. 2011. Les ressources minérales et le développement de l'Afrique: rapport du groupe d'études international sur les régimes miniers de l'Afrique [en ligne]. Section des publications et de la gestion des conférences de la CEA, Addis-Abeba, Éthiopie. Disponible à http://www.uneca.org/sites/default/files/PublicationFiles/mineral_report_fre.pdf [cité le 29 septembre 2015].
- Commission mondiale sur l'environnement et le développement. 1988. Notre avenir à tous. Les Éditions du Fleuve, Montréal, Canada.

- Conseil du statut de la femme du Québec. 2010. Les femmes et le Plan Nord : pour un développement nordique égalitaire [en ligne]. Québec, Canada. Disponible à <https://www.csf.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/avis-les-femmes-et-le-plan-nord-pour-un-developpement-nordique-egalitaire.pdf> [cité le 30 septembre 2015].
- Conseil international des mines et métaux. 2006. Guide de bonnes pratiques : exploitation minière et biodiversité [en ligne]. Londres, Royaume-Uni. Disponible à <http://hub.icmm.com/document/925> [cité le 29 septembre 2015].
- Conseil international des mines et métaux. 2010. Guide de bonnes pratiques : les peuples autochtones et l'exploitation minière [en ligne]. ICMM, Londres, Royaume-Uni. Disponible à <http://www.icmm.com/languages/french> [cité le 29 septembre 2015].
- Environmental Law Alliance Worldwide. 2010. Guide pour l'évaluation des projets EIE du domaine minier. Chapitre 1. Généralités sur l'exploitation minière et ses impacts [en ligne]. ELAW, Oregon, États-Unis. Disponible à <http://www.elaw.org/files/mining-cia-guidebook/Full%20French%20Guidebook.pdf> [cité le 29 septembre 2015].
- Ferrand, D. 2000. Piloter l'environnement dans l'entreprise. Ordre des ingénieurs du Québec. Montréal, Canada.
- Filippou, D., et King, M.G. 2011. R&D prospects in the mining and metals industry [en ligne]. Resources Policy, 36(3): 276–284. doi: 10.1016/j.resourpol.2011.04.001.
- Genty, T. 2012. Comportement hydro-bio-géo-chimique de systèmes passifs de traitement du drainage minier acide fortement contaminé en fer [en ligne]. Thèse de doctorat en sciences de l'environnement, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Canada. Disponible à <http://depositum.uqat.ca/269/1/thomasgenty.pdf>.
- Henry, P., et Huybens, N. 2013. Les services spirituels rendus par le Lac à Paul [en ligne]. Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, Canada. Disponible à <http://constellation.uqac.ca/2549/>.
- Huybens, N., Segers, I., Dessureault, P.-I., et Villeneuve, C. 2012. Acceptabilité sociale des projets miniers : l'apport des processus participatifs. [en ligne]. Université du Québec à Chicoutimi, Chaire de recherche et d'intervention en éco-conseil, Saguenay, Canada. Disponible à <http://ecoconseil.uqac.ca/rapports-dintervention/>.
- Initiative nationale pour les mines orphelines ou abandonnées. 2013. Rapport annuel 2013 [en ligne]. Association minière du Canada (AMC), Ottawa, Canada. Disponible à <http://mining.ca/sites/default/files/documents/Rapportannuel2013.pdf> [cité le 29 septembre 2015].

- Jackson, T. 2009. Prosperity Without Growth?: the Transition to a Sustainable Economy [en ligne]. Sustainable Development Commission, Royaume-Uni. Disponible à <http://www.sd-commission.org.uk/publications.php?id=914>.
- Kerr, R. 2010. Stakeholders' Views of Mining and Sustainable Development [en ligne]. GlobeScan, Toronto, Canada. 2393. Disponible à <http://www.globescan.com/component/edocman/?view=document&id=62&Itemid=591>.
- Kolstad, I. 2007. The Resource Curse: Which Institutions Matter?. CMI, Bergen, Norway.
- KPMG. 2012. Mining Financial Reporting Survey 2012 [en ligne]. KPMG, Switzerland. Disponible à <http://www.kpmg.com/Ca/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/Mining-Financial-Report-Survey-2012-Compressed7.pdf> [cité le 29 septembre 2015].
- Laforce, M., Campbell, B.K., et Sarrasin, B. (éd.). 2012. Pouvoir et régulation dans le secteur minier : leçons à partir de l'expérience canadienne. Presses de l'Université du Québec, Québec, Canada.
- Lambert, I.B. 2012. Geoethics: a perspective from Australia [en ligne]. Annals of Geophysics, **55**(3): 377–378. doi: 10.4401/ag-5556.
- Leblanc, D. 2015. Towards Integration at Last? The Sustainable Development Goals as a Network of Targets [en ligne]. Departement of Economic & Social Affairs, New York, United States. DESA Working Papers No. 141. Disponible à http://www.un.org/esa/desa/papers/2015/wp141_2015.pdf.
- Lefebvre-Dutilleul, V. 2012. Codes de bonne conduite. Chartes éthiques: outils de gestion des risques. Lamy, Rueil-Malmaison, France.
- Lei, L., Song, C., Xie, X., Li, Y., et Wang, F. 2010. Acid mine drainage and heavy metal contamination in groundwater of metal sulfide mine at arid territory (BS Mine, Western Australia) [en ligne]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, **20**(8): 1488–1493. doi: 10.1016/S1003-6326(09)60326-5.
- Levacher, C. 2012. Les sociétés transnationales minières face au droit des peuples autochtones. Quels acteurs, pour quels enjeux? [en ligne]. Groupe International de travail pour les Peuples Autochtones, Serves, France. Disponible à http://gitpa.org/web/RAPPORT_CLAIRE.pdf.
- McMahon, F., et Cervantes, M. 2012. Survey of Mining Companies 2011/2012 [en ligne]. Fraser Institute, Vancouver, Canada. Disponible à <https://www.fraserinstitute.org/sites/default/files/mining-survey-2011-2012-rev.pdf>.

- Minalliance. 2012. 100 innovations dans le secteur minier [en ligne]. Montréal, Canada. Disponible à http://www.48inter.com/mines-fr/pdf/100innovations_secteur_minier.pdf.
- Ministère du Développement du Nord et des Mines. 2012. Modernisation de la Loi sur les mines [en ligne]. Toronto, Canada. Disponible à <http://www.mndm.gov.on.ca/fr/mines-et-des-mineraux/loi-sur-les-mines/modernisation-de-la-loi-sur-les-mines>.
- Mousseau, N. 2012. Le défi des ressources minières. Éditions MultiMondes, Québec, Canada.
- Nations Unies. 2015, septembre 25. L'Assemblée générale adopte un Programme de développement durable ambitieux pour « transformer notre monde » d'ici à 15 ans [en ligne]. Disponible à <http://www.un.org/press/fr/2015/ag11688.doc.htm> [cité le 2 juillet 2016].
- Nature Québec. 2010. Loi sur les mines : servir le bien commun avant les intérêts privés [en ligne]. Québec, Canada. Disponible à http://www.naturequebec.org/fichiers/Aires_protegees/ME10-05-05_Mines.pdf [cité le 29 septembre 2015].
- OCDE. 2012. Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2050 : les conséquences de l'inaction, Synthèses. Organisation de coopération et de développement économique, Paris, France.
- Papyrakis, E., et Gerlagh, R. 2004. The resource curse hypothesis and its transmission channels [en ligne]. *Journal of Comparative Economics*, **32**(1) : 181–193. doi: 10.1016/j.jce.2003.11.002.
- Pearce, T., Ford, J.D., Prno, J., et Duerden, F. 2009. Climate Change and Canadian Mining: Opportunities for Adaptation [en ligne]. ArcticNorth Consulting, Canada. Disponible à http://www.davidsuzuki.org/publications/downloads/2009/Climate_Change_And_Canadian_Mining.pdf.
- Pegg, S. 2003. Poverty Reduction or Poverty Exacerbation? World Bank Group Support for Extractive Industries in Africa [en ligne]. Department of Political Science, Indiana University Purdue University Indianapolis (IUPUI), Indiana, USA. Disponible à <https://www.oxfamamerica.org/static/oa3/files/poverty-reduction-or-poverty-exacerbation.pdf>.
- Pelletier, F.-N. 2012. L'avenir minier du Québec : les sujets environnementaux et de territoire : conversation publique sur l'avenir minier du Québec [en ligne]. Institut du Nouveau Monde, Montréal, Canada. Disponible à http://inn.qc.ca/Centre_doc/6-Avenir-minier_sujets_environnementaux_et_de_territoire.pdf [cité le 30 septembre 2015].

- Plante, B., Benzaazoua, M., et Bussière, B. 2009. Importance de la rétention des métaux en drainage neutre contaminé [en ligne]. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Canada. Disponible à http://www.polymtl.ca/enviro-geremi/pdf/articles/plante_CS_mai2009_MB.pdf [cité le 29 septembre 2015].
- Prebisch, R. 1950. The Economic Development of Latin America and its Principal Problems [en ligne]. Economic Commission for Latin America, United Nation Department of Economic Affairs, New York, États-Unis. Disponible à <http://archivo.cepal.org/pdfs/cdPrebisch/002.pdf>.
- PwC 2012. Mine: The Growing Disconnect: Review of Global Trends in the Mining Industry - 2012 [en ligne]. PricewaterhouseCoopers, Toronto, Canada. Disponible à <http://download.pwc.com/gx/mining/pwc-mine-2012.pdf> [cité le 29 septembre 2015].
- PwC 2013. Analyse sommaire des régimes de droits miniers de différentes juridictions [en ligne]. PricewaterhouseCoopers, Toronto, Canada. Disponible à http://www.finances.gouv.qc.ca/documents/Autres/fr/AUTFR_RegimesDroitsMiniers.pdf [cité le 29 septembre 2015].
- Réseau entreprise et développement durable. 2012. Innover pour le développement durable: un guide à l'intention des dirigeants [en ligne]. REDD, Montréal, Canada. Disponible à http://nbs.net/fr/files/2012/12/Rapport_executif_Innovationpdf [cité le 29 septembre 2015].
- Rombach, G. 2006. Limits of metal recycling. *Dans Sustainable Metals Management: Securing Our Future - Steps Towards a Closed Loop Economy. Sous la direction de A. von Gleich, R.U. Ayres, et S. Gößling-Reisemann.* Springer, Dordrecht, Pays-Bas, p. 295–312.
- Sachs, J.D., et Warner, A. 1995. Natural Resource Abundance and Economic Growth [en ligne]. National Bureau of Economic Research, Inc. 5398. Disponible à <http://econpapers.repec.org/paper/nbrnberwo/5398.htm>.
- Segers, I. 2014. Dialogue, éthique et développement durable pour la pratique de l'éco-conseil [en ligne]. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, Canada. Disponible à <http://ecoconseil.uqac.ca/dialogue-ethique-et-developpement-durable-pour-la-pratique-de-leco-conseil/>.
- Shewhart, W.A. 1986. Statistical Method From the Viewpoint of Quality Control. Dover Publications, Inc., New York, États-Unis.
- Singer, H.W. 1950. The distribution of gains between investing and borrowing countries [en ligne]. The American Economic Review, 40(2): 473–485. Disponible à <http://www.jstor.org/stable/1818065>.

Smouts, M.-C., et Antoine, S. 2008. Le développement durable: les termes du débat. 2^e éd. Armand Colin, Paris, France.

Société de l'eau souterraine Abitibi-Témiscamingue. 2012. L'eau souterraine en bref : menaces à l'eau souterraine [en ligne]. Amos, Canada. Disponible à http://sesat.ca/eau_menace.aspx [cité le 29 septembre 2015].

Steffen, W., Persson, Å., Deutsch, L., Zalasiewicz, J., Williams, M., Richardson, K., Crumley, C., Crutzen, P., Folke, C., Gordon, L., Molina, M., Ramanathan, V., Rockström, J., Scheffer, M., Schellnhuber, H.J., et Svedin, U. 2011. The Anthropocene: from global change to planetary stewardship [en ligne]. *AMBIO*, **40**(7) : 739–761. doi: 10.1007/s13280-011-0185-x.

Stratos Inc. 2011. Climate Change and Acid Rock Drainage - Risks for the Canadian Mining Sector [en ligne]. MEND, Ottawa, Canada. MEND Report 1.61.7. Disponible à <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2013/01/1.61.7.pdf> [cité le 29 septembre 2015].

Szablowski, D. 2010. Operationalizing free, prior, and informed consent in the extractive industry sector? Examining the challenges of a negotiated model of justice [en ligne]. *Canadian Journal of Development Studies*, **30**(1–2):111–130doi:10.1080/02255189.2010.9669284.

The Natural Resource Charter. 2012. Introduction [en ligne]. Disponible à <http://naturalresourcecharter.org/content/preamble> [cité le 30 septembre 2015].

The Pembina Institute. 2008. Boom to Bust: Social and Cultural Impacts of the Mining Cycle [en ligne]. The Pembina Institute, Canada. Disponible à https://www.pembina.org/reports/boom_bust-final.pdf [cité le 30 septembre 2015].

Tremblay, D., Bensalah, N., Côté, H., et Villeneuve, C. 2013. Rapport de la démarche d'analyse de développement durable du projet minier Arnaud selon la grille d'analyse de la Chaire en éco-conseil [en ligne]. Université du Québec à Chicoutimi, Chaire de recherche et d'intervention en éco-conseil, Saguenay, Canada. Disponible à http://ville.sept-iles.qc.ca/CLIENTS/1-villesi/docs/upload/sys_docs/20130319_Rapport_analyse_DD_Mine_Arnaud_VF.pdf [cité le 29 septembre 2015].

United Nations Environment Programme. 2013. Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Reuter, M. A., Hudson, C., van Schaik, A., Heiskanen, K., Meskers, C., et Hagelüken, C.

Varet, J. 2007. Ressources minérales et développement durable [en ligne]. 4D, L'Encyclopédie du développement durable, Paris, France. Rapp. 43. Disponible à http://www.encyclopedie-dd.org/IMG/pdf_N-_43_Varet.pdf [cité le 30 septembre 2015].

- Villeneuve, C. 1998. Qui a peur de l'an 2000?: guide d'éducation relative à l'environnement pour le développement durable. Éditions MultiMondes Montréal, Canada.
- Villeneuve, C. 2012. Climate Change: Challenges for the Mining Industry. Jamgold Workshop, September 17, 2012, Saguenay, Canada.
- Villeneuve, C., Riffon, O., et Tremblay, D. 2016. Comment réaliser une analyse de développement durable? Guide d'utilisation de la grille d'analyse de développement durable [en ligne]. Chaire de recherche en éco-conseil, Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, Canada. Disponible à <http://constellation.uqac.ca/3959/>.
- World Aluminum Institute. 2015. Aluminum for Future Generations [en ligne]. Disponible à <http://recyclingworld-aluminium.org/review/industry-structure.html> [cité le 29 septembre 2015].

L'indice de risque social : un nouvel outil d'évaluation des projets miniers dans un contexte de développement durable

Kristina Maud BERGERON et Michel JÉBRAK

Avec la collaboration de : Stéphanie YATES, Charles SÉGUIN, Valérie LEHMANN, Philippe ANGERS, Corinne GENDRON, Suzanne DURAND et Pierre-Yves LE MEUR

Résumé

Y a-t-il des conditions qui influencent la réception d'un projet minier ? Peut-on prédire le niveau d'acceptabilité sociale qu'un projet minier aura dès ses débuts ? Ces questions ont orienté une équipe multidisciplinaire dans leur travail pour développer un outil qui pourrait être utilisé par les investisseurs et les entrepreneurs miniers, ainsi que les gouvernements et les communautés, au début d'un projet d'exploration minière. Reconnaissant que certaines situations sont très volatiles, l'analyse a néanmoins conduit à l'identification d'un nombre relativement restreint de variables qui peuvent être évaluées par toutes les parties prenantes alors que le projet en est encore à ses premières phases. Si certaines variables sont fixes et stables ou à évolution lente, d'autres peuvent être modifiées, ce qui peut faciliter l'identification de changements qui permettraient d'accroître l'acceptabilité sociale d'un projet. Le Québec, au Canada, a servi à développer et tester l'indice de risque social, mais il est possible d'étendre cet indice à d'autres régions en l'adaptant. Ce document résume le processus qui a conduit à la conception de l'indice.

1. Contexte

À la suite du rapport Brundtland (Commission mondiale sur l'environnement et le développement 1988), la notion de développement minier durable a fait l'objet de très nombreux travaux au cours de ces dernières années. D'une part, l'idée même de développement minier durable apparaît comme un oxymore dans une approche de soutenabilité forte : on ne saurait échanger un capital environnemental contre un capital économique ou humain dans cette vision absolue du développement durable. D'autre part, dans une approche écologique transactionnelle, le développement minier peut être considéré comme durable si la mine contribue significativement au développement social et économique (Jébrak 2015). Plusieurs questions surgissent alors. Comment évaluer la valeur du capital environnemental (ressources minérales et environnement) par rapport à celle des capitaux économiques et humains ? Sur quels termes doit-on faire le calcul ? Comment concilier les valeurs différentes de chacun des groupes sociaux ? Comment peut-on obtenir un consensus ?

La complexité de ces questions fondamentales a conduit la majorité des chercheurs à se pencher sur des questions plus empiriques (Hojem 2014). Ainsi, la transparence et la responsabilité des entreprises sont devenues des enjeux majeurs pour toutes les industries. L'accord de sécurité du Bangladesh a été adopté à la suite de la tragédie du Rana Plaza pour l'industrie du vêtement, et les Principes directeurs relatifs aux entreprises ont été approuvés à l'unanimité par le Conseil des droits de l'homme des Nations Unies en 2011. L'industrie minière est familière avec ce type d'engagements. L'Initiative pour la transparence des industries extractives et le Processus de Kimberley sur le marché du diamant sont parmi les initiatives les plus connues développées par l'industrie, les ONG et les gouvernements.

La plupart des outils et des lignes directrices qui ont été élaborés pour l'industrie minière doivent être appliqués au cours de la phase d'exploitation. Ainsi, le Forum intergouvernemental sur l'exploitation minière, les minéraux, les métaux et le développement durable a produit un cadre directif en 2010 qui propose un modèle de contribution de l'industrie minière au développement durable. De même, l'initiative canadienne *Vers le développement minier durable* s'applique aux opérations minières. Or, de nombreux projets rencontrent des obstacles bien avant cette phase, lors de l'exploration et de la mise en valeur du projet minier. De plus, sans exclure une démarche d'amélioration continue, c'est lors de la planification d'un projet que se situent les meilleures chances de minimiser ses impacts négatifs et de maximiser ses impacts positifs. La contribution des différentes parties prenantes peut grandement aider à améliorer un projet qui n'est pas encore totalement finalisé.

Des recherches montrent qu'une intervention précoce est à l'avantage de toutes les parties prenantes. Une étude récente a calculé les montants perdus par les sociétés minières lorsque les opérations sont interrompues : ceux-ci peuvent atteindre 20 millions US\$ par semaine (Franks et al. 2014). Par contre, lors de l'exploration précoce, 10 000\$ par jour sont en jeu ; et pour l'exploration avancée, ils peuvent aller jusqu'à 50 000\$ par jour !

L'Institut Fraser publie tous les ans une enquête sur les sociétés minières dans le monde. Dans son rapport 2013, des questions ont été ajoutées sur les retards dans l'approbation ou l'autorisation des projets en raison de l'opposition du public. Les réponses montrent que plus de 36% des entreprises ont été dans cette situation. La cause la plus courante justifiant l'opposition était les impacts sur l'environnement ou l'utilisation de l'eau, dans plus de 59% des cas, et les droits ou titres autochtones, dans près de 32% des cas. Les retards étaient de 6 mois à 4 ans, la réponse la plus courante étant de 2 à 4 ans (Wilson et al. 2014, p. 77–78). Ces délais au démarrage d'un projet peuvent constituer des coûts importants pour les entreprises d'exploration, souvent de petite taille. Ils peuvent modifier l'économie globale d'un projet en diminuant d'autres dépenses, ou même conduire à l'annulation du projet si celui-ci ou l'entreprise qui le porte ne sont pas assez robustes. Toutefois, le temps de la réflexion, de la négociation et de l'ajustement entre les parties prenantes peut aussi contribuer à une amélioration de la qualité du projet et le rendre plus durable.

Ces coûts et ces retards ainsi que leur fort impact médiatique ont conduit un nombre croissant d'équipes de recherche à travailler sur la notion de permis social d'opérer (PSO; *social licence to operate*, SLO en anglais; par exemple: Owen et Kemp 2013, Prno et Slocombe 2014, Moffat et Zhang 2014), une expression de plus en plus utilisée dans les industries extractives. Cette notion souligne que le parfait respect des lois et règlements en place ne suffit pas pour répondre aux exigences sociales. Le PSO est intangible, non écrit, et variable dans le temps. C'est donc un concept d'usage difficile, malaisé à mesurer; il est relié à la légitimité de l'entreprise promotrice du projet, et donc à la confiance qu'il peut y avoir entre les parties prenantes. Toutefois, étant donné que cette notion est née dans le contexte d'un usage par l'industrie, les outils d'évaluation qui en sont issus renvoient la plupart du temps aux caractéristiques et aux actions de l'entreprise, sans prendre en compte les volets relatifs à la communauté et au projet proprement dit. Nous avons donc tenté de mieux mobiliser l'ensemble de ces composantes dans un contexte de prévision plus que d'acquisition du PSO.

2. Développer un nouvel outil

Une équipe multidisciplinaire basée à l'Université du Québec à Montréal (Canada) a travaillé sur un indice de risque social pour mieux comprendre les conditions qui influent sur le PSO au cours de la phase d'exploration. Nous voulions développer un outil qui soit utile pour toutes les parties prenantes (investisseurs, sociétés minières, communautés et gouvernements) au début d'un projet minier, alors qu'il est encore possible de changer certains aspects de celui-ci. Des études complètes sur les impacts environnementaux sont nécessaires pour l'obtention des permis et de certificats menant à la construction du site minier; l'outil est utile avant cette étape, alors que le projet est plus facile à changer.

Partant de l'idée que certains aspects d'un projet minier sont quasi fixes, tels que la localisation du site, les caractéristiques de la communauté la plus proche et les particularités de la société promotrice du projet minier, notre recherche consistait tout d'abord à identifier ces aspects les plus importants en relation avec l'acceptabilité sociale. En d'autres termes, quels sont les aspects conditionnant le plus la réception d'un projet par une communauté?

En outre, et pour les raisons exposées plus haut, les relations communautaires commencent aujourd'hui le plus tôt possible dans un projet. Certaines communications (au sens très large du terme) ont donc déjà eu lieu entre l'entreprise et la communauté lorsque le projet atteint l'exploration avancée, et il est d'après nous possible d'identifier des critères pour évaluer la qualité de cette communication et ses premiers résultats.

Un modèle théorique a donc été créé pour structurer le projet. Il est construit sur deux triangles: le premier est l'espace de la caractérisation, et le second, de la communication (figure 1).

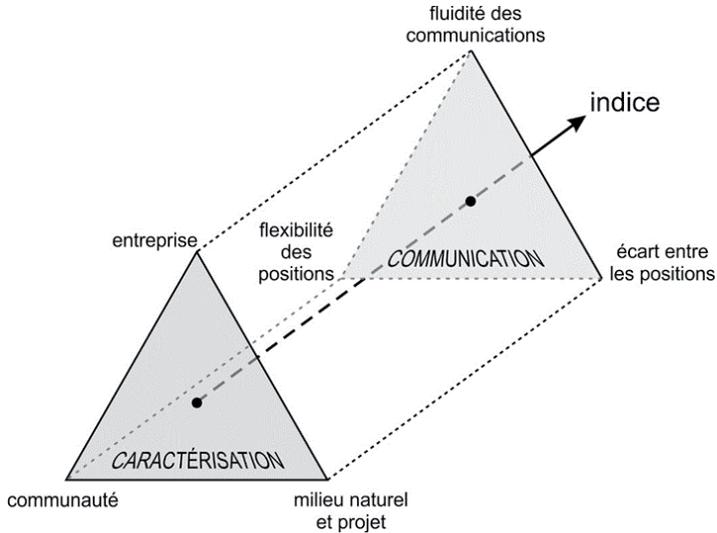


Figure 1: Le modèle montre comment l'information pertinente pour l'indice est organisée en différents espaces : la caractérisation et la communication.

Dans les trois angles du premier triangle, on trouve le projet et son environnement naturel, la communauté où il sera situé, et la société qui développe le projet. Dans le second triangle, l'espace de la communication, on tient compte de la distance entre les positions des acteurs, de la flexibilité des positions de ceux-ci et de la fluidité des communications entre eux.

Pour chacun des angles de ces triangles, les facteurs-clés qui influencent le risque social ont été identifiés. Le second triangle est beaucoup plus sujet à interprétation que le premier. Bien que nous ayons tenté de les réduire, les perceptions ne peuvent pas totalement être exclues de l'espace de la caractérisation, car nous avons constaté que, dans certains cas, elles étaient plus pertinentes que l'aspect objectif du facteur. Ainsi, la notion de toxicité peut se comprendre de différentes manières : les chimistes ont une échelle, les biologistes, une autre, qui peut varier selon les espèces concernées. Les préoccupations du grand public, évaluées à partir du nombre de pages web sur le sujet, se concentrent davantage sur des éléments abondants comme le fer, que sur des éléments réellement toxiques, mais plus rares, comme le mercure. Nous avons donc dû arbitrer entre ces différentes conceptions.

Dans le triangle anthropologique minier, trois parties sont généralement mobilisées : l'État, l'entreprise et la communauté. L'État a toujours joué un rôle important dans la construction économique et sociale des projets miniers, et les entreprises mondialisées mettent parfois les États en concurrence. Cependant, nous avons choisi de retirer la composante étatique du calcul de l'indice de risque social. En effet, les projets examinés sont tous au Québec, dans un contexte de juridiction stable favorable à l'industrie. Les juridictions locales restent présentes du fait que les autorités municipales sont incluses dans notre conception de la communauté.

Il serait plus exact de dire que l'État a été mis de côté, car son influence sur les différents projets peut être considérée comme une constante. L'État agit sensiblement de la même manière pour tous les projets, n'influençant pas de manière déterminante les conditions d'accueil de ceux-ci.

Pour développer l'indice de risque social, la méthodologie adoptée inclut quelques phases. La première a été de réaliser des revues de la littérature dans différentes disciplines pour aider l'équipe à sélectionner les variables les plus importantes pour chacun des angles des triangles. De longues discussions ont également été nécessaires pour obtenir un nombre limité de variables, puisque notre objectif était de faire un outil relativement simple, qui ne nécessiterait pas beaucoup de temps ou de ressources à utiliser. Pour chaque variable, les différentes valeurs qu'elle pourrait prendre et leur relation avec les risques sociaux ont été évaluées par l'équipe.

Ce travail a été fait pour les deux triangles, mais pour le second sur la communication, l'équipe a décidé que sa contribution à l'indice serait de qualifier les résultats du premier triangle avec une perspective pour l'avenir. Le résultat après l'analyse avec l'indice de risque social est donc composé de trois échelles : A, B, C ou D pour le premier triangle, +, -, ou = pour le second, et un pourcentage reflétant la proportion de variables où l'information a été fournie, i.e. la disponibilité des données.

Pour être en mesure d'évaluer la validité des résultats obtenus par l'indice, deux tests séparés ont été entrepris. Le premier est une analyse de la presse sur des mêmes projets miniers qui ont été évalué par l'indice. Selon cette analyse, les projets ont été classés à partir du moins risqué au plus risqué socialement. Le deuxième test avait un objectif similaire, à savoir l'obtention d'un classement des mêmes projets miniers, selon l'opinion d'informateurs-clés, des personnes ayant une très bonne connaissance des projets miniers au Québec et représentant les quatre groupes d'utilisateurs potentiels pour l'indice (i.e. les entreprises, les investisseurs, les communautés et les gouvernements). Les trois classifications (indice, presse, experts) ont ensuite été comparées. Les résultats montrent des différences acceptables, l'indice présente donc un degré de fiabilité élevé.

Le questionnaire pour la partie de la communication a été révisé par quelques spécialistes de la communication. Celui-ci n'a cependant pas encore été véritablement mis à l'épreuve parce qu'il n'est pas possible de l'utiliser pour considérer une situation ayant beaucoup évolué par rapport au moment de l'exploration avancée, comme c'était le cas pour les projets ayant été retenus pour les tests.

3. Résultats et discussion

Pour le premier triangle, les variables sélectionnées par l'équipe sont présentées dans le tableau 1. Pour le questionnaire relatif à l'espace de la communication, les éléments couverts par les questions sont présentées dans le tableau 2.

L'indice de risque social est d'abord pertinent pour les personnes qui participent à un projet ou qui sont affectées par celui-ci. Il peut aussi être utilisé par des personnes extérieures à un projet minier donné, sans être directement impactées. L'équipe

a envisagé dès le début de la conception de l'indice que les résultats des différentes parties prenantes interpellées par un même projet minier ne seraient pas identiques et varieraient en fonction de leur appréciation de certains aspects de celui-ci. Différents acteurs dans la même situation auront donc des résultats différents, parce que l'outil comprend l'évaluation de certaines perceptions. Loin de le rendre non pertinent, l'indice pourrait rendre possible la tenue de discussions sur une base commune et ainsi dégager un espace de dialogue constructif.

Le modèle d'organisation de l'information requise pour l'indice et illustré à la figure 1 devra être révisé lorsque d'autres juridictions (provinces, pays) seront examinées et comparées. L'État et ses ramifications (lois, institutions, pratiques) peuvent être une source de risque et peuvent modifier la façon dont un projet minier est proposé et examiné. L'équipe de recherche entreprend actuellement cette seconde étape, tout en visant une plus large diffusion de l'indice de risque social au Québec entre tous les intervenants dans le monde minier.

Tableau 1: Variables relatives à l'espace de la caractérisation.

Caractéristiques				
	Indicateurs	Composantes	Variables	
ENTREPRISE				
Points de repère	1	Organisation		Taille de l'entreprise
	2			Présence de personnel affecté aux relations communautaires
	3			Présence du développement durable dans la structure
	4	Historique		Âge de l'entreprise
	5			Infractions environnementales répertoriées
	6		Histoire des relations communautaires	Occurrence de difficultés avec les communautés rapportées dans les médias
	7		Présence locale	Situation du siège social
	8			Présence d'un bureau local de projet
	9	Direction	Compétence	Années d'expérience
	10			Passage dans une majeure d'un des membres de l'équipe de direction
	11		Éthique	Infraction financière
	12			C.A. multidisciplinaire
	13		Leadership	Leadership (Direction d'association)

Caractéristiques			
	Indicateurs	Composantes	Variables
PROJET ET MILIEU NATUREL			
	1	Substance	Toxicité
	2		Perception de toxicité
	3		Toxicité sanitaire (y compris les rejets)
	4	Valeur du projet	Toxicité environnementale (y compris les rejets)
	5		Valeur du projet (teneur x tonnage x prix)
	6	Localisation	Transformation
	7		Distance par rapport aux communautés avoisinantes (km)
	8		Distance par rapport au plus proche plan d'eau (km)
	9	Exploitation	Distance par rapport à des sites protégés (culturels ou environnementaux) ou fragiles
	10		Mode d'exploitation
	11		Taille (production en tonnes par jour)
			Emplois directs
COMMUNAUTÉ			
	1	Économie	Type de communauté
	2		Importance de l'industrie minière dans l'économie de la communauté
	3	Main-d'œuvre disponible	Densité de la population dans la MRC ou la municipalité (habitants par km carré)
	4		Taux de diplomation postsecondaire pour la communauté
	5	Sociologie	Taux de chômage pour la communauté
	6		Villégiateurs
	7		Ratio du nombre de chalets par rapport aux résidences
	8		Capacité de mobilisation
	9	Historique	Valeur perçue du lieu
	10		Signification du lieu (attachement identitaire)
	11	Réactions	Autochtonie
	12		Droits autochtones sur le territoire visé
		Historique de projets non miniers	
		Historique de projets miniers	
		Réactions médiatiques par rapport au projet	
			Événements marquants et leur interprétation (positive/négative)
			Événements marquants et leur interprétation (positive/négative)
			Importance et nature positive ou négative du suivi médiatique

Tableau 2: Variables de l'espace de la communication.

Écart entre les positions	Fluidité des communications	Flexibilité des positions
Nature des aspects sur lesquels il y a divergence dans les points de vue des parties prenantes du projet	Présence d'un interlocuteur de l'entreprise pour les membres de la communauté	Degré d'ouverture de l'entreprise
Connaissance du contexte local par l'entreprise	Pouvoir de l'interlocuteur de l'entreprise	Degré d'ouverture des acteurs locaux
Connaissance des contraintes et des impératifs de l'entreprise par la communauté	Outils et modes de communication utilisés par l'entreprise	Climat de la discussion
	Outils et modes de communication utilisés par les intervenants préoccupés par le projet	Espace de négociation pour d'éventuels éléments litigieux du projet
	Désir des acteurs locaux d'être consultés davantage	Qualité du dialogue
	Degré d'influence des acteurs locaux sur le projet	

4. Conclusion

Le projet d'analyse de l'indice du risque social s'est focalisé sur des aspects constitutifs de la communauté, du projet et de l'entreprise, en cherchant à détecter les aspects rendant l'acceptabilité sociale plus ou moins probable. Par exemple, une communauté dont l'économie repose sur le secteur minier sera vraisemblablement plus réceptive à un nouveau projet que si c'est un secteur complètement neuf pour elle. Ou encore, une entreprise ayant déjà commis des infractions environnementales aura plus de difficultés à faire admettre sa volonté de faire un projet le plus propre possible.

L'indice a été conçu de manière à examiner les aspects qui semblent avoir le plus d'effet sur l'acceptabilité sociale, et certains de ceux-ci se rapportent directement au développement durable et aux valeurs qu'il porte (participation et engagement, protection du patrimoine culturel, par exemple). On peut penser qu'un projet respectant le cadre du développement durable aura plus de facilité à susciter l'acceptabilité sociale, si toutefois le développement durable n'est pas uniquement conçu sous l'angle de la soutenabilité forte par les parties prenantes de la communauté. Les critères que l'on utilise pour vérifier l'adhésion au développement durable, et même les principes qui sous-tendent ceux-ci (qu'expose la [Loi québécoise sur le développement durable](#), par exemple), peuvent donc être utiles pour qui cherche à discerner le degré d'acceptabilité d'un projet minier lorsqu'il est en exploration. Inversement, l'indice de risque social peut concourir à une analyse centrée sur le développement durable d'un projet minier.

Remerciements

Ce projet a été réalisé grâce au soutien financier du Fonds pour l'éducation et la saine gouvernance de l'Autorité des marchés financiers et les informations, renseignements, opinions et avis exprimés dans le présent document n'engagent que la responsabilité des auteurs. Le contenu de ce document ne reflète pas nécessairement l'opinion de l'Autorité des marchés financiers et les erreurs éventuelles relèvent uniquement de la responsabilité des auteurs. Le projet a également bénéficié de fonds de recherche provenant de la Chaire en entrepreneuriat minier UQAT-UQAM. Nous remercions sincèrement ces deux organisations. Nous sommes reconnaissants à l'égard d'Alexandre Gomez, d'Édith Viau, de Gabrielle Côté et d'Annie Auger, étudiant-es à l'UQAM, qui ont participé à la réalisation du projet.

Références

- Commission mondiale sur l'environnement et le développement. 1988. Notre avenir à tous. Les Éditions du Fleuve, Montréal, Canada.
- Franks, D.M., Davis, R., Bebbington, A.J., Ali, S.H., Kemp, D., et Scurrah, M. 2014. Conflict translates environmental and social risk into business costs [en ligne]. Proceedings of the National Academy of Sciences, **111**(21): 7576–7581. doi: 10.1073/pnas.1405135111.
- Hojem, P. 2014. Making Mining Sustainable: Overview of Private and Public Responses [en ligne]. Luleå University of Technology, Sweden. Disponible à http://www.ltu.se/cms_fs/1.124549!/file/rapport%20making%20mining%20sustainable_low.pdf.
- Jébrak, M. 2015. Quels métaux pour demain?: Les enjeux des ressources minérales. Dunod, Paris, France.
- Moffat, K., et Zhang, A. 2014. The paths to social licence to operate: An integrative model explaining community acceptance of mining [en ligne]. Resources Policy, **39**: 61–70. doi: 10.1016/j.resourpol.2013.11.003.
- Owen, J.R., et Kemp, D. 2013. Social licence and mining: A critical perspective [en ligne]. Resources Policy, **38**(1): 29–35. doi: 10.1016/j.resourpol.2012.06.016.
- Prno, J., et Slocombe, D.S. 2014. A systems-based conceptual framework for assessing the determinants of a social licence to operate in the mining industry [en ligne]. Environmental Management, **53**(3): 672–689. doi: 10.1007/s00267-013-0221-7.
- Wilson, A., Cervantes, M.A., et Green, K.P. 2014. Fraser Institute Annual Survey of Mining Companies 2013 [en ligne]. The Fraser Institute, Vancouver, Canada. Rapp. 2013. Disponible à <https://www.fraserinstitute.org/sites/default/files/mining-survey-2013.pdf>.

Projet de mine d'apatite au Lac à Paul, Québec

Karyna TREMBLAY, Jean-Sébastien DAVID
et Daniel BOULIANNE

Résumé

Le phosphore est l'un des éléments essentiels à la vie. Bien qu'il soit destiné à différentes applications, la majorité du phosphore extrait des mines est destinée à la fabrication d'engrais pour l'agriculture, contribuant ainsi à répondre à la demande en nourriture de la population mondiale croissante.

La société Arianne Phosphate développe un projet minier situé à environ 200 kilomètres au nord de la ville de Saguenay visant la production annuelle de 3 millions de tonnes de concentré d'apatite. La réalisation de ce projet de 1,2 milliard de dollars US est basée sur des principes de développement durable. Très tôt dans l'élaboration de son projet, l'entreprise a fait le choix de placer l'environnement, l'aspect social ainsi que l'importance des retombées économiques régionales au cœur de ses priorités. De même, elle consulte et travaille avec les Premières Nations innues touchées par son projet. En adoptant une politique de développement durable dès les premières étapes du développement de son projet, Arianne Phosphate vise à faire du projet Lac à Paul une référence pour les générations futures.

1. Arianne Phosphate Inc.

Arianne Phosphate est une compagnie minière junior fondée en 1997 sous le nom de Ressources d'Arianne Inc. Elle a été inscrite à la Bourse de croissance TSX-Venture de Toronto en 2003 sous le symbole DAR, après une prise de contrôle inversée approuvée par les actionnaires de Minerais Bruneau inc. Depuis 2013, elle porte le nom d'Arianne Phosphate Inc. et ses actions se négocient maintenant à la Bourse de croissance TSX-Venture de Toronto sous le symbole DAN, à la Bourse de Francfort sous JE9N, et à la bourse américaine Over-the-Counter QX (OTCQX) sous le symbole DRRSF. Son siège social est situé à Saguenay, Québec, Canada. Bien qu'elle ait jadis eu des intérêts plus diversifiés, la Société se consacre aujourd'hui exclusivement au développement de son projet de mine d'apatite du Lac à Paul.

Les valeurs de la Société sont basées sur la gestion des enjeux sociaux et environnementaux, visant ainsi à être en mesure de maximiser la création de valeurs pour ses parties prenantes. Ces valeurs sont : 1) responsabilité et imputabilité dans les modes

de gestion; 2) honnêteté et intégrité dans les relations avec les parties prenantes; 3) rigueur et cohérence dans l'exercice des compétences; et 4) clarté et transparence dans la diffusion de l'information.

Le présent article dresse un portrait sommaire du projet Lac à Paul. Nous y aborderons brièvement les sujets suivants: l'origine et les applications du phosphore, le projet et son potentiel, ainsi que la place du développement durable dans le projet du Lac à Paul.

2. Le phosphore: un élément essentiel

Le phosphore est un composant de l'ADN (acide désoxyribonucléique), de l'ARN (acide ribonucléique), de l'ATP (adénosine triphosphate) et des phospholipides qui forment les membranes cellulaires. Dans l'organisme, il joue également un rôle important dans la conversion de l'énergie solaire, la nourriture, les carburants et les fibres. Il s'agit d'un élément indispensable à la vie. Il n'a aucun substitut connu.

Le phosphore est aussi essentiel pour le processus de la photosynthèse, pour le métabolisme des sucres, pour le transfert et le stockage d'énergie, pour la division et la croissance cellulaire, ainsi que pour la transmission de l'information génétique.

Le phosphore est l'un des trois composants des fertilisants, avec l'azote (N) et le potassium (K). Bien que la majorité du produit soit utilisée dans la fabrication de fertilisants, comme l'illustre la figure 1, une partie de la production de concentré d'apatite est destinée à la nourriture animale et humaine, de même qu'à la fabrication de divers produits de consommation domestique et autres. Le phosphore est d'ailleurs utilisé dans la métallurgie, le traitement des eaux, le dentifrice, les cosmétiques, etc.

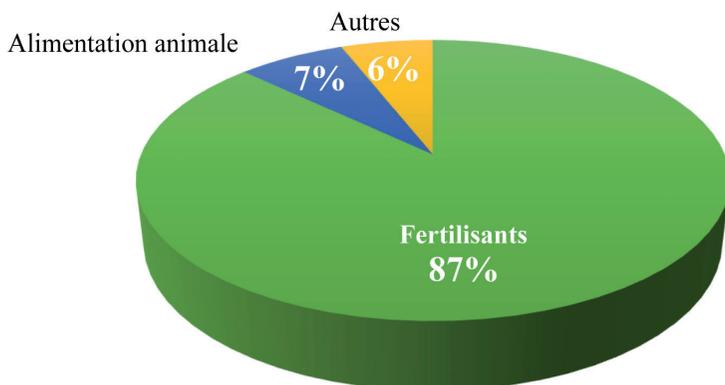


Figure 1: Utilisation du phosphore.

3. Le projet minier du Lac à Paul

Du point de vue technique, le projet Lac à Paul d'Arianne Phosphate Inc. consiste à exploiter une mine d'apatite située à environ 200 kilomètres au nord de ville de Saguenay. Cette mine traitera 18 millions de tonnes de minerai, ce qui permettra de produire annuellement 3 millions de tonnes de concentré de phosphate, et ce, sur une durée d'au moins 26 ans.

La figure 2 montre la localisation générale du projet minier. De plus, bien qu'il s'agisse d'un rendu préliminaire, la figure 3 donne un aperçu du futur site.

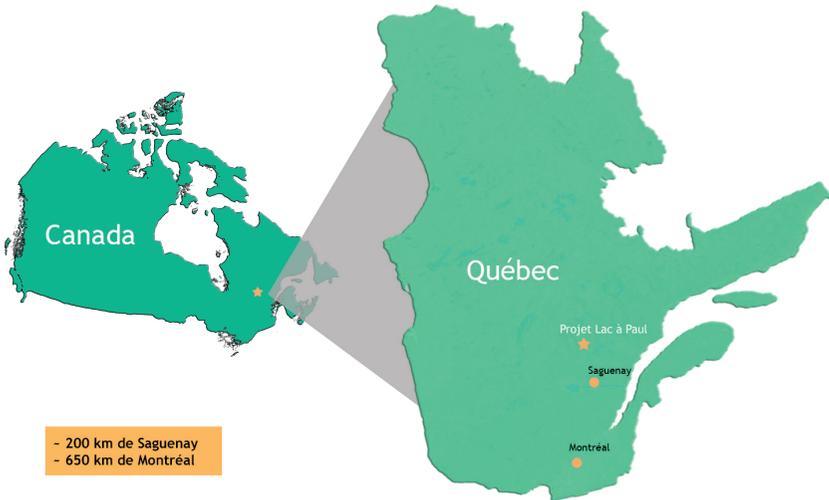


Figure 2: Localisation générale du projet minier Lac à Paul.



Figure 3: Aperçu du futur site du projet minier Lac à Paul.

La roche extraite sera minée à ciel ouvert par méthode traditionnelle. Elle sera dynamitée, chargée par pelle mécanique et transportée par camion jusqu'à un concasseur primaire. Elle sera broyée à 175 microns et acheminée vers des séparateurs magnétiques, éliminant ainsi la magnétite et une partie de l'ilménite s'y trouvant. Par la suite, cette roche broyée sera dirigée vers des cellules de flottation afin d'y récupérer l'apatite. Le concentré ainsi produit sera épaissi, filtré et séché jusqu'à ce qu'il atteigne un taux d'humidité de 2%. Ce procédé permettra de produire un concentré d'apatite de très grande qualité titrant 39% P_2O_5 , lequel sera destiné au marché des fertilisants ainsi qu'aux marchés de spécialités (alimentations humaine et animale, piles et autres).

Lorsqu'il est examiné de plus près, ce projet de 1,2 milliard de dollars US est cependant beaucoup plus complexe qu'il n'y paraît. En fait, il ne représente pas seulement l'exploitation d'une mine, mais il constitue d'abord et avant tout un projet social ayant un enjeu de développement économique qui requiert la concertation de ses parties prenantes ainsi qu'une harmonie avec le milieu.

4. Le potentiel du projet

La découverte de minéralisation phosphatée dans le secteur du Lac à Paul remonte à près de 20 ans alors que SOQUEM et Mine d'or Virginia y avaient identifié la présence d'apatite, obtenant une intersection de 7,56% P_2O_5 sur 117,96 mètres dans un de leurs forages (Roy 2000). Le groupe étant alors à la recherche de nickel et de cuivre, les travaux avaient été abandonnés. En 2008, au moment où la demande pour les roches phosphatées croît considérablement, Ressources d'Arianne¹ lance de nouveaux travaux d'exploration dans ce secteur, qui se révélera plus tard contenir l'un des plus importants gisements d'apatite au Canada. Devant la présence significative de ressources en phosphate et après des campagnes d'exploration, une étude d'opportunité économique est réalisée par IOS Services Géoscientifiques inc. (Girard et de l'Étoile 2010). Deux études de préfaisabilité sont plus tard réalisées par Met-Chem Canada et SGS Canada (Bilodeau et al. 2011, 2012), puis une étude de faisabilité économique par Cegertec Warley Parsons (Coté et al. 2013), toutes réalisées selon la norme NI 43-101 (<http://www.lautorite.qc.ca/fr/placement-valeurs-pro.html>).

Le gisement se distingue à l'échelle mondiale par la pureté du concentré de phosphate qu'on y retrouve et la quantité de ses réserves évaluées à 472 millions de tonnes à 6,9% P_2O_5 de réserves prouvées et probables (teneur de coupure à 3,5% P_2O_5) établies à partir des 590 Mt à 7,1% P_2O_5 de ressources mesurées et indiquées de la Zone Paul (teneur de coupure à 4,0% P_2O_5), selon l'étude de faisabilité d'octobre 2013. Cependant, selon une nouvelle estimation NI 43-101 des ressources minérales (M+I) rendue publique dans un communiqué de presse émis le 18 février

1. Aujourd'hui: Arianne Phosphate.

2015 par Arianne Phosphate, les ressources mesurées et indiquées² de la Zone Paul et ses Extensions Ouest et Est sont maintenant évaluées à 702,7 millions de tonnes à 7,17% P_2O_5 avec une teneur de coupure à 4,0% P_2O_5 (Duplessis et Rachidi 2015). Cette estimation a été réalisée par Goldminds Geoservices Inc. à la suite des résultats de la campagne de forage de l'automne 2014 (Guérin-Tremblay 2015) ainsi que d'une réinterprétation détaillée des unités géologiques de la Zone Paul et de ses Extensions Ouest et Est.

Des travaux d'exploration de surface ont également été réalisés durant l'été 2014 sur les zones Mini-Paul et Naja, ainsi que sur l'Extension Est. De plus, la Zone Naja a été testée par un forage durant la campagne de l'automne 2014. Les résultats de ces travaux démontrent un excellent potentiel pour la présence de minéralisation phosphatée sur ces deux zones (Guérin-Tremblay 2015). La figure 4 montre la localisation de ces zones, ainsi que celles de la Zone Nicole, de la Zone Paul et de ses extensions, à partir de la carte illustrant la première dérivée verticale obtenue selon le levé magnétique aéroporté de 2014 fourni par Géophysique GPR International (Létourneau et Paul 2014).

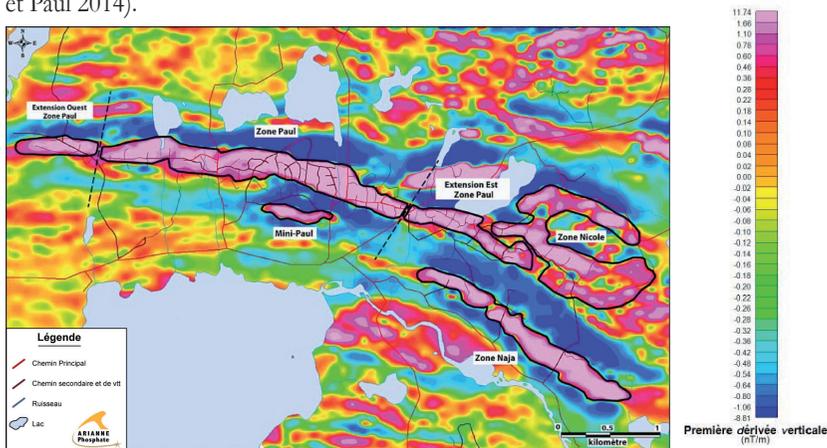


Figure 4 : Localisation des zones minéralisées sur la carte de la première dérivée verticale du levé magnétique aéroporté.

Il est opportun de souligner que la propriété du Lac à Paul est constituée de 500 CDC (Claim Désigné sur Carte) totalisant une superficie de plus de 27 000 hectares qui renferme bon nombre d'autres indices minéralisés en P_2O_5 .

Le tableau 1 énumère les zones minéralisées où des estimations de ressources ont été réalisées à ce jour, selon la norme NI 43-101 (Bilodeau et al. 2012, Duplessis et Rachidi 2014a, 2014b, 2015).

- Mise en garde: Les ressources minérales présentées ici ne sont pas des réserves minérales, car elles n'ont pas été démontrées par une étude de viabilité économique.

Tableau 1: Zones minéralisées avec estimations des ressources (2015).

Zone	Ressources présumées ⁱ	Ressources mesurées et indiquées ⁱ
Zone Paul (février 2015)	26 Mt à 6,58 % P ₂ O ₅ (teneur de coupure à 4 % P ₂ O ₅)	702,2 Mt à 7,16 % P ₂ O ₅ (teneur de coupure à 4 % P ₂ O ₅)
Zone Manouane		164 Mt à 5,9 % P ₂ O ₅ (teneur de coupure à 2,43 % P ₂ O ₅)
Zone Nicole	78 Mt à 5,34 % P ₂ O ₅ (teneur de coupure à 3,5 % P ₂ O ₅)	
Zone Traverse	17 Mt à 5,98 % P ₂ O ₅ (teneur de coupure à 3,5 % P ₂ O ₅)	
Zone TraMan	146 Mt à 5,30 % P ₂ O ₅ (teneur de coupure à 3,5 % P ₂ O ₅)	
Zone 2	64 Mt à 4,55 % P ₂ O ₅ (teneur de coupure à 2,43 % P ₂ O ₅)	

ⁱMise en garde: Les ressources minérales présentées ici, à l'exception d'une partie des ressources de la Zone Paul, ne sont pas des réserves minérales, car elles n'ont pas été démontrées par une étude de viabilité économique. Il n'est pas certain que de futurs travaux d'exploration catégoriseraient ces ressources présumées en ressources indiquées ou mesurées.

5. L'origine des phosphates des roches du Lac à Paul

P Les phosphates de roches sont d'origine sédimentaire ou ignée et comprennent différents minéraux telles les phosphorites et l'apatite.

o Les roches phosphatées sédimentaires ont généralement une teneur en P₂O₅ se situant entre 15 et 35%. Elles se forment graduellement au fond des océans et peuvent contenir de nombreux contaminants. Les roches ignées phosphatées renferment, pour leur part, de 4 à 15% de P₂O₅. Elles sont issues de magmas ultramafiques et contiennent généralement peu ou pas de contaminants. Le gisement du projet Lac à Paul est constitué de roches phosphatées ignées. Le tableau 2 permet de constater que les dépôts ignés comme celui du Lac à Paul présentent des avantages significatifs par rapport aux dépôts sédimentaires. Ils sont toutefois plus rares.

Tableau 2: Comparaison des dépôts ignés et des dépôts sédimentaires.

	Dépôts ignés (tel Lac à Paul)	Dépôts sédimentaires
Teneur de P_2O_5 dans la roche	4 à 15 % P_2O_5	10 à 30 % P_2O_5
Concentration (traitement chimique)	Récupération à plus de 85 % (et jusqu'à > 90 %)	Récupération entre 65 % et 85 %
Teneur de P_2O_5 dans le concentré	35 à 41 % P_2O_5	29 à 35 % P_2O_5
Qualité du concentré	Contient peu ou pas de contaminants	Contient généralement des contaminants (métaux lourds, uranium, cadmium)

6. Le développement durable: une priorité

Arianne Phosphate aspire à être reconnue comme étant une compagnie minière performante dans la gestion de ses enjeux sociaux et environnementaux, en vue de maximiser la création de valeurs pour ses parties prenantes. Les principes du développement durable servent donc de guide à l'évolution du projet Lac à Paul. Dès 2008, Arianne Phosphate a entrepris une démarche visant l'établissement d'une politique de développement durable. Plus tard, en 2011, une politique a été rédigée en collaboration avec la Chaire en éco-conseil de l'Université du Québec à Chicoutimi (Les Ressources d'Arianne Inc. 2011). De plus, Arianne a réalisé un diagnostic stratégique de développement durable qui lui a permis de définir sa vision et ses priorités stratégiques, ainsi que de développer un plan d'action en ce sens. Ariane s'est ainsi donné cinq priorités: 1) utiliser de façon responsable le territoire et ses ressources, en limitant les impacts environnementaux de ses opérations; 2) communiquer de façon proactive, permanente et transparente avec ses parties prenantes; 3) être un partenaire de croissance au sein de la région et de la société québécoise; 4) permettre à ses employés d'évoluer dans un milieu sécuritaire et motivant; 5) adopter une approche responsable de gouvernance et de gestion de ses opérations.

Chacune de ces priorités stratégiques est définie par deux ou trois objectifs. Des actions prioritaires et des actions potentielles sont définies pour atteindre les objectifs fixés. Il en résulte un plan d'action qui permettra à Arianne Phosphate d'en mesurer l'évolution.

Du point de vue opérationnel, ce plan s'est traduit par une liste d'actions à réaliser à court, moyen ou long termes. Cette priorisation permettra à la Société d'optimiser les ressources humaines et financières nécessaires et de mieux répondre aux préoccupations formulées tant par les employés de l'entreprise que par les parties prenantes.

6.1 Économie – Le projet d'une région

Le taux de chômage de la région administrative du Saguenay—Lac-Saint-Jean est plus élevé que la moyenne québécoise. En 2014, par exemple, environ 14 000 personnes étaient à la recherche d'un emploi dans la région. Cette situation est en partie attribuable à la crise du bois d'œuvre, aux gains de productivité de la grande industrie, à l'absence de grands projets et à la fin de chantiers d'importance. De surcroît, la région a dû composer avec un recul de l'investissement privé au cours des dernières années. Entre 2001 et 2014, la croissance de l'emploi dans la région a ainsi été trois fois moins rapide que celle du Québec.

Avec des retombées économiques estimées à 12,6 milliards de dollars CA au Québec sur 25 ans et des recettes globales pour les gouvernements fédéral et provincial de près de 4 milliards de dollars CA, le projet Lac à Paul est le plus important projet des dix dernières années au Saguenay—Lac-Saint-Jean et l'un des plus grands projets miniers de la dernière décennie au Québec. Dans un rapport d'analyse présenté à la compagnie minière en janvier 2014, la firme d'experts Raymond Chabot Grant Thornton estime que les retombées économiques en termes d'emplois seront considérables. En effet, ce rapport évalue à près de 2 250 le nombre d'emplois directs et indirects générés par année durant les deux ans requis pour la construction, soit des revenus d'emplois de plus de 300 millions de dollars CA. Durant les vingt-cinq premières années d'opération de la mine, les revenus d'emplois atteindront plus de 1,6 milliard de dollars CA alors que près de 1 000 emplois directs et indirects seront créés. De plus, près de 300 emplois directs et indirects seront associés aux travaux de restauration du site minier, ce qui se traduira par des revenus d'emplois de plus de 14 millions de dollars CA.

Arianne souhaite maximiser les retombées régionales, notamment en favorisant l'embauche de main-d'œuvre locale. La Société estime que plus de 60% des travailleurs requis pour la construction des infrastructures seront originaires de la région. En ce qui concerne la maintenance et l'approvisionnement des opérations, ce chiffre pourrait atteindre 80 à 85%. Les employés de la mine, pour leur part, devraient provenir à plus de 90% de la région.

6.2 Social

L'aspect social est l'un des défis du projet Lac à Paul. C'est pourquoi Arianne a tenu, dès 2009, des rencontres publiques et privées de consultation et d'information auprès de différents groupes. En novembre 2013, après la réalisation d'études détaillées, la Société a apporté une modification importante à son scénario de transport et a alors annoncé sa décision de transporter son concentré phosphaté par camion en utilisant les routes forestières des Monts-Valin depuis la mine jusqu'à un terminal maritime dont la construction était prévue dans le secteur de Saint-Fulgence. L'annonce de ce scénario a soulevé de l'opposition et des questionnements, amenant ainsi Arianne à multiplier le nombre de rencontres et à participer à un groupe de travail réunissant la municipalité de Saint-Fulgence, la MRC du Fjord-du-Saguenay, et un regroupement de citoyens nommé Collectif de l'Anse à Pelletier. Ce dernier s'opposait à l'aménagement d'un terminal maritime dans le secteur de résidence des citoyens. Ce groupe de travail a

permis à la compagnie minière de faire évoluer davantage son scénario et, en vertu des préoccupations exprimées par les citoyens, de déplacer à l'intérieur du territoire de la municipalité de Sainte-Rose-du-Nord l'emplacement du terminal maritime nécessaire à l'expédition de son concentré vers les marchés. À la dissolution du groupe, la Société a mis en place la «Table de consultation territoire et entreprise» grâce à laquelle elle informe les différentes entités politiques et sociales touchées.

Parallèlement à ces comités, Arianne a organisé des rencontres avec des villégiateurs des Monts-Valin, ainsi qu'avec les propriétaires, les résidants, les gestionnaires des ZEC concernées et les villégiateurs qui occupent ou fréquentent les abords de la route de transport du concentré et du futur terminal maritime, lequel sera construit et opéré par Port de Saguenay. Depuis, Arianne a signé des ententes lui permettant de consolider l'acceptabilité sociale dans les secteurs visés.

6.3 Relations avec les Premières Nations

Le projet Lac à Paul étant situé au lieu-dit Nitassinan, Arianne Phosphate tient également compte des préoccupations et des intérêts des Premières Nations concernées par le projet, soit les communautés de Pessamit, Mashteuiatsh et Essipit. Pour cette raison, la Société et les communautés ont ratifié, en juin 2015, une entente de coopération couvrant les phases d'exploration et de préconstruction du projet. Arianne souhaite ainsi se doter d'un processus de négociation pour une entente sur les répercussions et avantages, fluide et proactif, tout en favorisant le développement des communautés visées.

6.4 Médias sociaux

Les nouvelles technologies ont amené, au cours des vingt dernières années, des changements considérables dans les façons de communiquer. L'apparition d'Internet et la popularité grandissante des médias sociaux ont conduit les entreprises à revoir leurs méthodes de communication ainsi que les types de messages véhiculés. Bon nombre d'entreprises souhaitent désormais non seulement informer la population, mais également faciliter les interactions. Arianne Phosphate est l'une de ces entreprises. Dès 2006, elle s'est dotée d'un site Internet qui a été revu en 2014 dans le but d'offrir un outil permettant de combler de façon plus efficace les attentes de la population et des investisseurs, actuels et futurs. Toujours dans l'objectif de rendre l'information facilement accessible, mais également de pouvoir donner aux intéressés la possibilité de s'exprimer sur le projet et d'avoir réponse à leurs questions, Arianne Phosphate possède aussi deux comptes Twitter, une page Facebook, un canal YouTube, une page LinkedIn, et est également présente sur Flickr.

6.5 Comité de suivi

La création d'un comité de suivi indépendant de tout projet minier est prévue dans la Loi sur les mines du gouvernement du Québec. Le Comité de suivi d'Arianne est formé de membres bénévoles souhaitant contribuer positivement au projet, et ce, dans une perspective de développement durable.

Le mandat du Comité de suivi consiste à :

- établir et maintenir la communication entre Arianne Phosphate et ses parties prenantes ;
- faire le suivi du projet, des engagements d'Arianne Phosphate et des conditions du certificat d'autorisation ;
- faire des recommandations à la Société pour l'aider à atteindre ses objectifs et ses engagements ;
- faire connaître à la direction d'Arianne les préoccupations soulevées par les parties prenantes ;
- relayer les informations relatives au projet à la population ;
- tenir au moins une réunion par trimestre, pour un minimum de quatre par année ;
- indiquer à la Société les besoins des parties prenantes en matière de vulgarisation ;
- tenir au minimum une consultation publique par année ;
- produire un rapport annuel dans lequel il rend compte de ses activités, des préoccupations, suggestions et commentaires des parties prenantes, et des recommandations faites à la compagnie, pour l'aider à atteindre ses objectifs et ses engagements ;
- être informé des plaintes, suggestions et commentaires sur le projet du Lac à Paul et participer à leur traitement ;
- porter à la connaissance du ministre toute question relative à l'exploitation minière qui appelle l'action du gouvernement et lui soumettre des recommandations.

L'ensemble des démarches entreprises par Arianne Phosphate génère un impact positif sur l'acceptabilité sociale du projet. De même, ces démarches ont permis à la Société de bonifier le projet de façon significative.

6.6 Environnement

Les préoccupations environnementales sont au cœur du travail qu'effectuent quotidiennement les employés de la Société. Ainsi, bon nombre d'améliorations et de modifications ont été apportées en vue de réaliser un projet dont l'impact environnemental sera moindre.

L'élimination de l'acide sulfurique et de l'amidon ainsi que d'une grande partie de la soude caustique utilisée dans le procédé de traitement du minerai fait partie de ces améliorations. En plus de permettre à la Société de diminuer l'impact du procédé sur l'environnement, cette élimination prend également en compte une préoccupation exprimée lors de consultations publiques au cours desquelles des citoyens avaient fait part à Arianne de leur crainte en ce qui a trait au transport de l'acide sulfurique et des risques possibles de contamination de l'environnement en cas de déversement.

Parmi les optimisations aussi réalisées, citons en exemple (1) la recirculation de l'eau du parc à résidus afin de diminuer le pompage d'eau fraîche, (2) l'utilisation des infrastructures routières existantes pour l'approvisionnement de la mine et le transport

du concentré, ainsi que (3) le choix d'utiliser le gaz naturel liquéfié pour l'alimentation des camions de transport du concentré. Soulignons également que l'usine de production du concentré sera alimentée entièrement par énergie hydroélectrique. Elle ne générera donc aucun gaz à effet de serre, ce qui est peu commun dans le domaine minier. De même, les pelles requises pour l'extraction des matériaux de la mine seront, elles aussi, alimentées à l'hydroélectricité.

De plus, depuis l'été 2009, Ariane Phosphate adhère à un programme de comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre (GES) (Dessureault 2009). Cette comptabilisation s'inscrit dans la volonté des dirigeants de la Société de réduire l'empreinte écologique des activités d'Ariane. L'inventaire des GES permettra de cibler les opérations les plus émettrices de GES et de mettre en place des mesures de compensation ou de réduction adaptées. Les rapports de comptabilisation des GES sont publics et peuvent être consultés sur le site Internet de la Société, sous l'onglet Environnement.

La comptabilisation des GES émis par les activités d'exploration minière est une innovation. En effet, la majorité des analyses de cycle de vie commence au moment de l'extraction et néglige la phase de l'exploration qui n'est pas sans répercussions, puisque cette dernière fait partie intégrante du cycle de vie d'un produit. La Société étudie les différentes avenues afin de compenser ses émissions de GES et ainsi devenir «carboneutre» lors de la période d'exploration.

Souhaitant innover davantage, Ariane Phosphate a aussi fait produire par la Chaire en éco-conseil de l'Université du Québec à Chicoutimi une estimation des gaz à effet de serre qui seront émis durant la durée de vie de la mine (Dessureault et al. 2010). Il s'agit d'un outil supplémentaire d'évaluation des impacts de la mine sur l'environnement.

Toujours dans un esprit de développement durable, Ariane a fait l'achat de la Pourvoirie du Lac-Paul (figure 5) qu'elle opère de la mi-mai à la mi-septembre. Les activités de la pourvoirie se poursuivront au cours de la construction de la mine ainsi que lors de son opération. Déjà, l'équipe de la Société a amorcé une réflexion préliminaire sur une nouvelle offre de service combinant les activités sportives de chasse et de pêche ainsi que le volet industriel du secteur. Ariane souhaite ainsi que le projet Lac à Paul devienne une référence en matière de cohabitation, apte à inspirer d'autres entreprises.



Figure 5: L'île de la Pourvoirie du Lac-Paul.

7. Conclusion: vers de meilleures pratiques

L'équipe d'Arianne Phosphate vise à faire du projet Lac à Paul une référence pour les générations futures en termes de responsabilités environnementale et sociale. Les artisans du projet ne souhaitent pas seulement satisfaire aux exigences d'aujourd'hui, ils visent aussi à les dépasser. Pendant au moins 26 ans, chaque jour, des hommes et des femmes travailleront à l'extraction du minerai et à la production d'un concentré qui contribuera à subvenir aux besoins croissants de la planète en nourriture. Arianne Phosphate souhaite que ses travailleurs, la région du Saguenay–Lac-St-Jean et tout le Québec soient fiers de la mine du Lac à Paul et qu'ils le soient encore lorsque le site sera complètement restauré.

Remerciements

Merci à Ghislain Goyette, directeur métallurgie, ainsi qu'à Stéphanie Lavaure, géologue de projets, tous deux membres de l'équipe d'Arianne Phosphate, pour leur précieuse contribution à la réalisation de cet article.

Références

- Bilodeau, M.L., Buchanan, M.J., Cassoff, J., Duplessis, C., Rivard, S., et Skiadas, N. 2011. NI 43-101 Technical Report on the Pre-Feasibility Study, Lac à Paul Apatite Project, Québec, Canada. SGS Canada Inc., Geostat, Met-Chem Canada Inc. and Journeaux Assoc., Division of Lab Journeaux Inc. Project Number: 2010-052.
- Bilodeau, M.L., Buchanan, M.J., Cassoff, J., Duplessis, C., Rivard, S., et Skiadas, N. 2012. NI 43-101 Technical Report on the Pre-Feasibility Study Update (50 ktpd Milling Rate), Lac à Paul Apatite Project, Québec, Canada. SGS Canada Inc., Geostat, Met-Chem Canada Inc. and Journeaux Assoc., Division of Lab Journeaux Inc. Project Number: 2010-052.
- Côté, F., Duplessis, C., Gagnon, G., Guimont, H., Kelahan, M.E., Latulipe, S., Topalovic, A., Turgeon, B., Vallée, P., Verreault, M., et Wingate, E. 2013. Feasibility Study to Produce 3Mtpy of High Purity Apatite Concentrate at the Lac à Paul Project, Québec, Canada [en ligne]. Cegertec Worley Parsons, Saguenay, Québec. NI 43-101. Disponible à http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/mine_apatite_lac-a-paul/documents/PR5.1_annexe3AN.pdf.
- Dessureault, P.-L. 2009. Guide de comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre. Inventaire des gaz à effet de serre pour une compagnie minière selon la norme ISO 14064-1. Chaire de recherche et d'intervention en éco-conseil, Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, Canada.
- Dessureault, P.-L., Villeneuve, C., et Wells, J.-R. 2010. Estimation des gaz à effet de serre émis durant la durée de vie de la mine. Chaire de recherche et d'intervention en éco-conseil, Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, Canada.
- Duplessis, C., et Rachidi, M. 2014a. Mémoire sur l'estimation des ressources minérales de la Zone Nicole, Lac à Paul, Québec, Canada. Goldminds Geoservices Inc., Québec, Canada.
- Duplessis, C., et Rachidi, M. 2014b. Mémoire sur l'estimation des ressources minérales de la Zone TraMan Sud et Traverse, Lac à Paul, Québec, Canada. Goldminds Geoservices Inc., Québec, Canada.
- Duplessis, C., et Rachidi, M. 2015. Mémoire - Mise à jour de l'estimation des ressources NI 43-101, Projet du Lac à Paul, Québec, Canada. Goldminds Geoservices Inc., Québec, Canada.

- Girard, R., et de l'Étoile, R. 2010. Preliminary Economic Assesment and Mineral Resources Update, the Lac à Paul Apatite-Ilmenite Project, Saguenay–Lac-Saint-Jean Area, Québec, Canada. IOS Services Géoscientifiques inc., Project 197 and SGS Canada, Project P201017, Saguenay, Canada. A 43-101 Compliant Technical Report.
- Guérin-Tremblay, H. 2015. Rapport des travaux de terrain été-automne 2014, propriété du Lac à Paul, SNRC 22E10 et 22E15, Saguenay–Lac-Saint-Jean, Québec, Canada. Ariane Phosphate Inc, Saguenay, Canada.
- Les Ressources d'Ariane Inc. 2011. Politique de développement durable. Les Ressources d'Ariane Inc., Saguenay, Canada.
- Létourneau, O., et Paul, R. 2014. Levé géophysique magnétique hélicoptéré, région du Lac-Saint-Jean, Québec, feuillets SNRC 22E10 et 22E15, rapport d'acquisition, projet Lac à Paul. Géophysique GPR International inc., Montréal, Canada. M-14763.
- Roy, L. 2000. Travaux d'exploration 1999. Projet Chute des Passes 1279, 1279-1. Soquem Inc., Québec, Canada. GM 58190.

Un comité de suivi d'une exploitation minière à proximité d'une communauté en transformation

Sylviane LEGAULT

Résumé

Cet article a été rédigé à l'automne 2015, peu de temps avant que le gouvernement du Québec adopte un nouveau règlement qui encadre maintenant la mise sur pied, la composition et la mission des comités de suivi liés aux exploitations minières. À l'automne 2015, le seul comité de suivi lié à une exploitation minière en activité au Québec était celui de la mine Canadian Malartic. Il était alors souhaité que le modèle offert par le Comité de suivi Canadian Malartic¹ inspire les décideurs à certains égards. Les préoccupations partagées par plusieurs administrateurs prenant part au Comité de suivi Canadian Malartic face au projet de règlement se résumaient principalement à la crainte de voir un modèle uniforme de comité de suivi être imposé. Un modèle qui ne tiendrait pas compte des spécificités locales de chaque milieu. Un cadre régi par des règles rigides aurait pour effet de limiter la capacité des administrateurs d'adapter la structure, la composition et le fonctionnement de leur comité de suivi en fonction des spécificités inhérentes à la réalité changeante de leur milieu de vie. Une réalité économique, environnementale et sociale inévitablement soumise au changement et dont la transformation s'accélère indéniablement lorsque arrive une industrie majeure dans le voisinage.

C'est ainsi qu'à la lumière d'une expérience sur le terrain, à Malartic, un point de vue est présenté sur les éléments fondamentaux qui devraient guider la composition et le fonctionnement des comités de suivi liés à des industries minières au Québec.

1. Introduction

Les dispositions légales adoptées par le gouvernement du Québec en décembre 2013, dans le cadre de la nouvelle Loi sur les mines, exigeront des entreprises minières la mise sur pied d'un comité de suivi dans les 30 jours suivant l'obtention de leur bail minier. Avant l'entrée en vigueur de ces nouvelles dispositions légales, des modifications seront apportées au Règlement sur les substances minérales

1 Après l'acquisition de la mine Canadian Malartic par le partenariat Agnico-Eagle et Yamana Gold, le Comité de suivi Osisko Malartic est devenu le Comité de suivi Canadian Malartic.

(Gouvernement du Québec 2015). Les modifications qui seront apportées au Règlement préciseront certaines modalités concernant la mission, la composition et le fonctionnement des comités de suivi.

Au moment même où ces changements législatifs ont lieu, le seul comité de suivi attaché à une exploitation minière au Québec est celui formé à Malartic, en 2010. Ce comité fut instauré par la compagnie minière Osisko, selon certaines des recommandations émises par le Bureau d'audiences publiques sur l'environnement en 2009 (BAPE 2009). D'autres comités de suivi attachés à des entreprises industrielles telles qu'Alcan ou Magnola ont existé au Québec avant 2010, mais jamais un comité de suivi n'avait été créé en lien avec une exploitation minière.

Le point de vue partagé dans les lignes qui suivent est principalement marqué par l'inquiétude de voir soustraite aux acteurs locaux la possibilité d'établir un comité de suivi à l'image de leur milieu. Ce point de vue, élaboré en collaboration avec Michel Gilbert, ingénieur géologue, président du Comité de suivi Osisko Malartic en 2013-2014, soutient qu'il est fondamental qu'un comité de suivi soit le reflet des spécificités de chaque **milieu** d'accueil et des **enjeux** qui y sont soulevés face à une **activité industrielle**. Ces trois variables, à savoir le milieu, le projet (ou l'activité industrielle en cours) et les enjeux, présentent un caractère évolutif qui exige un suivi étroit. S'ajoute à ces variables le niveau d'acceptabilité sociale qui colore le climat dans lequel travaille un comité de suivi. Le niveau d'acceptabilité sociale influencera inévitablement la nature du travail effectué par un comité de suivi ainsi que le ton et la nature des échanges dont il est l'hôte (Gagnon et al. 2000).

2. Le milieu

Le milieu touché par l'activité industrielle et économique d'une exploitation minière correspond à une zone, aux limites variables, définie selon les impacts connus. À l'intérieur de chaque milieu touché se trouve un contexte territorial spécifique, marqué par la présence ou l'absence d'activités humaines. En milieu agricole, sur les rives du golfe Saint-Laurent, en forêt ou à proximité d'une zone urbanisée, le milieu touché présentera différents contextes territoriaux et humains. La composition d'un comité de suivi, sa structure et son fonctionnement devraient être à l'image des spécificités locales de chaque milieu.

Puisque l'établissement d'un comité de suivi vise la participation de la communauté locale (Gouvernement du Québec 2015) selon une approche de gestion élargie des impacts générés par une entreprise minière, nous pensons que le comité de suivi d'une exploitation minière devrait être administré en majeure partie par la communauté locale. La volonté de mettre sur pied un comité de suivi à l'image de son milieu repose sur la reconnaissance d'un savoir et d'une capacité d'action de la population locale. Les modalités proposées dans le projet de règlement laissent plutôt aux entreprises minières le mandat d'administrer les comités de suivi, ce qui nous semble inadéquat. Une gestion socialement responsable de ces comités devrait passer par la formation d'une structure indépendante de la minière, comme un organisme à but non lucratif administré par des citoyens et des acteurs locaux.

Dans une perspective de développement durable, il est essentiel de maintenir un dialogue avec les citoyens qui sont des intervenants-clés permettant la compréhension des enjeux que soulèvera la présence d'une activité industrielle lourde, telle qu'une exploitation minière. Parce que les résidents d'un territoire incarnent et connaissent leur milieu de vie, ils pourront apporter une contribution essentielle à l'élaboration de solutions appropriées. La présence de citoyens au sein même du conseil d'administration permettra au comité de suivi de répondre à son mandat premier d'être un lieu de dialogue avec la communauté touchée.

Le projet minier Canadian Malartic est situé en plein cœur de Malartic (figure 1) une ville de 3 500 personnes. Cette ville rassemble à l'intérieur d'un rayon de 3 km, les principales composantes d'une petite municipalité : quartiers résidentiels, artères commerciales, institutions publiques (école, garderie, hôpital, hôtel de ville, église).



Photo : Vicky Neveu.

Figure 1 : Entrée est de la ville de Malartic, 2014.

Il s'agit d'un contexte urbain de petite dimension où, en 2008, lorsque les travaux de construction de la mine ont débuté, les occupations du territoire étaient principalement de nature résidentielle et commerciale. À quelques exceptions près, les gens du milieu occupaient Malartic comme lieu de résidence. Un camping, bien connu en Abitibi-Témiscamingue, se trouve aussi à Malartic. Ce camping accueille plusieurs saisonniers pendant l'été. Depuis la fermeture de l'usine Domtar en 2006, la ville mono-industrielle et minière qu'a longtemps été Malartic se transformait en «ville dortoir». La grande majorité des gens vivant à Malartic ont choisi d'habiter une petite agglomération près d'une plus grande ville, soit Val-d'Or située à environ 25 km. Ce choix repose sur différents motifs, mais un élément commun semble ressortir : celui de la quiétude propre aux plus petites agglomérations. Une enquête menée par la Chaire Desjardins en développement des petites collectivités de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (LeBlanc et al. 2012) abonde dans le même sens. Cette enquête mentionne :

Une forte majorité (88 %) pensait en 2006 que Malartic était une alternative entre la ville et la campagne.

Presque tout le monde (98 %) considèrerait que Malartic ètait un endroit pour èlever une famille (p. 42).

Même si Malartic peut ètre défini différemment selon l'interlocuteur choisi, il n'en demeure pas moins que les différentes manières dont plusieurs se représentent Malartic ont des points communs propres à ce milieu. Investir temps et ressources pour prendre connaissance de chaque milieu à travers les gens qui y vivent permet d'en saisir les spécificités locales. Ce type de travail devrait idéalement ètre accompli par un anthropologue ou un sociologue formé pour l'effectuer. La présence de l'auteur à Malartic, depuis 2013, lui permet de constater que les relations que les individus ou groupes d'individus établissent avec leur milieu, ainsi que le lien d'appartenance avec ce milieu, détermineront en grande partie leurs réactions face aux transformations en cours et à venir.

En ajout à l'acquisition de connaissances théoriques du contexte territorial qui s'effectue en début de projet par le promoteur, l'établissement et l'entretien de contacts réguliers avec la population locale mènent à une compréhension plus fine des relations que les gens du milieu entretiennent avec leur environnement. Ces relations sont construites à travers le temps, à la suite des expériences vécues et des usages qu'ils font de ce milieu de vie. Que ce soit pour y habiter, pratiquer des loisirs ou y travailler, les relations établies avec le milieu varieront, ainsi que le lien d'appartenance à ce lieu. Suivant ce raisonnement, une meilleure compréhension des relations que les citoyens entretiennent avec leur environnement devrait permettre également une meilleure compréhension de leurs réactions face à des activités minières qui se développent à proximité de leur milieu de vie.

La connaissance que les humains possèdent de leur environnement n'est en majeure partie ni scientifique, ni technique, ni même historique au sens disciplinaire du terme, mais plutôt expérientielle ou vernaculaire (Gagnon et al. 2000). Ils ont une connaissance de l'environnement qu'ils habitent, qui leur provient de l'expérience qu'ils en font au quotidien, eux-mêmes et avec les autres. Cette fine connaissance des lieux est d'une grande valeur lorsqu'on cherche à comprendre les composantes qui définissent la qualité de vie d'une communauté.

Les impacts des opérations minières sur un milieu seront observés et expérimentés par la population locale. À titre d'exemple, à Malartic, des résidants signalaient une augmentation des retombées de poussières sans avoir pris connaissance des résultats d'analyses mensuelles effectuées à partir des échantillons prélevés dans les appareils de suivi de la qualité de l'air. Le point de vue des résidants qui observent et font l'expérience de retombées de poussières au quotidien devrait ètre considéré par les autorités publiques tout autant que les résultats scientifiques d'échantillonnage lorsqu'on souhaite comprendre les impacts d'opérations industrielles sur un milieu de vie.

À Malartic, la minière Osisko a développé un projet de fosse à ciel ouvert dont le niveau de proximité avec un milieu habité est unique au Québec et au Canada. Les résidants les plus près de la fosse, ainsi que l'artère commerciale (rue Royale) qui traverse cette petite municipalité, se retrouvent par endroits à moins de 150 mètres des activités de la minière. La rue de la Paix, rue la plus rapprochée de la fosse, se situe

à 80 mètres de celle-ci. Cette proximité avec un milieu habité et commercial est sans doute l'élément déclencheur d'une vigilance accrue de la population envers les impacts des opérations minières ainsi qu'au rôle du Comité de suivi à l'égard de ces impacts.

3. Le projet

En ajout à la proximité du projet avec le milieu habité, l'ampleur de la mine Canadian Malartic est également une composante déterminante du rôle adopté et des enjeux investis par le Comité de suivi Canadian Malartic (CSCM). Actuellement, la fosse longue la municipalité d'est en ouest. Elle fait 1,5 km de long. Un mur (figure 2) a été construit pour atténuer les nuisances provenant des opérations minières. Le «mur vert» devait agir comme une barrière pour limiter la propagation du bruit et de la poussière.



Photo: Vicky Neveu.

Figure 2: Mur vert en hiver! Malartic, 2014.

L'usine de la mine Canadian Malartic traite en moyenne un peu plus de 50 000 tonnes de minerai par jour. Des sautages peuvent avoir lieu jusqu'à deux fois par jour selon les conditions météorologiques. La mine a produit une moyenne de 135 000 onces d'or par trimestre depuis le début de l'année 2014 (Mine Canadian Malartic, communication personnelle, 2015).

Certains qualifient Malartic de «laboratoire à grande échelle». Cette expression, bien qu'elle déplaise à plusieurs qui se sentent cobayes malgré eux, fait entre autres référence à tous les appareils de suivi environnemental installés dans la ville. En effet, on y compte 7 sismographes qui mesurent les vibrations et surpressions générées par les sautages, 2 stations de suivi de la qualité de l'air ainsi que 4 sonomètres. Ces appareils fournissent des données scientifiques difficiles à déchiffrer pour le commun des mortels. L'un des mandats du CSCM est de prendre connaissance des résultats de ces suivis environnementaux et d'en comprendre la portée. Il est possible de visualiser la localisation des appareils de suivi environnemental sur le site web de Mine Canadian Malartic GP en suivant lien : <http://communaute-canadianmalartic.com/fr/suiviset-conformites>.

4. Les enjeux

L'arrivée d'une industrie minière entraîne plusieurs transformations dans une communauté. De nouvelles personnes ou familles viendront s'installer pour travailler à la mine, d'anciens résidents déménageront à la suite de l'arrivée de la mine. Le pouvoir

d'achat de certains augmentera grâce à un nouvel emploi bien rémunéré. D'autres verront peut-être leur qualité de vie réduite par des nuisances telles que le bruit, la poussière, les vibrations et les autres perturbations. Pour certains, les impacts seront davantage positifs, pour d'autres les changements seront regrettables. À Malartic, des tensions sont nées entre des groupes de citoyens faisant une expérience très différente des impacts générés par les opérations minières. Des alliances se sont formées entre certaines personnes faisant face aux mêmes difficultés ou entre celles qui partagent un nouveau lieu de travail et un rythme de vie commun.

Une étude ethnologique effectuée par l'Institut national de santé publique du Québec (Brisson et al. 2015) illustre en plusieurs points l'enjeu touchant la dégradation du climat social. Voici des extraits provenant des annexes de cette étude détaillant les résultats obtenus :

[...] les «partisans» de la minière ne voient pas que des gens peuvent vivre la situation d'une manière différente de la leur. Ils trouvent que les citoyens «pour les mines» mettent l'accent sur leurs gains personnels, faisant fi des difficultés que peut rencontrer le reste de la communauté avec la reprise des activités minières (p. 40).

Les participants jugent que l'incompréhension mutuelle et les positions souvent tranchées adoptées par chaque groupe ont causé des tensions dans la population et entraîné une «division», un «déchirement», un «effritement», une «coupure» ou une «scission» du tissu social. Cette situation a eu des répercussions négatives sur les liens sociaux dans la communauté...Un nouvel arrivant travaillant à la mine raconte que «certains étaient pour Osisko, d'autres contre. La guerre était pognée, pis: "lui j'veux plus lui parler" (p. 42).

La dégradation du climat social à Malartic est une problématique dans laquelle s'est investi le CSCM. Pour bien comprendre ce phénomène, des relations continues avec les partisans des deux camps sont nécessaires. À l'instar de la minière, un travail est aussi effectué afin que soit évité et même dénoncé tout encouragement à la formation de groupes polarisés au sein de son équipe de travail : «les pour» vs «les contres». Pour sa part, le CSCM soutient et diffuse un discours nuancé permettant d'être critique à l'égard des impacts provenant des opérations minières sans être contre la présence de la mine.

Plusieurs enjeux soulevés par l'arrivée d'une exploitation minière sont associés aux attentes et aux craintes propres à la communauté touchée. Puisque la communauté n'est pas un tout homogène, les perceptions sur les gains et les pertes que devrait générer cette activité industrielle sont diverses et parfois même opposées. L'enjeu de la dégradation du climat social démontre que les dynamiques sociales qui naîtront dans le milieu impacté doivent être analysées de près par le comité de suivi afin d'en connaître toutes les dimensions.

Un autre enjeu présent à Malartic est celui du respect des normes environnementales. Ces normes ne suffisent cependant pas à protéger la qualité de vie des résidents vivant à proximité des opérations minières. Par exemple, les nuisances subies telles que les vibrations et surpressions provoquées par les sautages sont perçues par les résidents des quartiers les plus près de la fosse comme étant responsables de dommages à leur résidence. La mine se défend en répétant que les vibrations et surpressions générées par les sautages respectent les normes environnementales. De leur côté, les experts des autorités gouvernementales qui veillent à l'application de ces normes n'ont pas le mandat d'examiner les plaintes concernant des dommages résidentiels. De plus, selon les scientifiques américains qui ont établi les normes de vibration et surpression sur lesquelles le ministère de l'Environnement s'appuie (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement [BAPE] 2009), aucun dommage ne peut être causé à des résidences par des vibrations et surpressions respectant les normes établies. Étant donné la position des autorités gouvernementales et malgré celle de la mine à cet égard, le CSCM s'est investi dans un dialogue avec la mine pour en arriver à une démarche conjointe visant à documenter et améliorer les connaissances sur les dommages résidentiels rapportés par plusieurs citoyens.

En 2013, des résidents des secteurs ruraux de Rivière-Héva, municipalité voisine de Malartic, ont exprimé des inquiétudes et des préoccupations concernant l'alimentation en eau potable de leurs puits domestiques. En appui à leurs préoccupations, le conseil municipal de cette ville voisine rappelait que selon les modélisations des impacts projetés avant l'entrée en exploitation de la mine, le rabattement de la nappe phréatique pourrait atteindre un rayon de 7 km entourant la fosse (BAPE 2009). Ce rayon inclut les puits des résidents de Rivière-Héva, inquiets. Donc, un rayon de 7 km a été tracé pour déterminer les limites du milieu touché. Ce rayon incluait, comme le rapport du BAPE le mentionnait, une cinquantaine de puits domestiques. Pour calmer les inquiétudes soulevées par les résidents propriétaires de puits domestiques, le CSCM a contacté les experts du Groupe de recherche sur les eaux souterraines (GRES) de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT). Dans un premier temps, le conseil d'administration du CSCM souhaitait mieux comprendre l'enjeu soulevé. Après des échanges fort intéressants entre le conseil d'administration et les hydrogéologues du GRES, une assemblée publique fut organisée pour partager ces informations avec les citoyens et pour leur donner la chance de poser leurs questions aux spécialistes. À la suite de cette assemblée publique, une étude a été demandée par la mine pour caractériser les puits des résidents situés à l'intérieur du rayon de 7 km. Quatre de ces puits privés ont été instrumentés afin d'effectuer un suivi du niveau de la nappe phréatique. Ce suivi sera effectué pour les 10 prochaines années ou jusqu'à la fin des opérations de la mine. Pour effectuer un suivi étroit de cet enjeu des puits domestiques, le CSCM a modifié ses règlements généraux en y ajoutant un siège de délégué du conseil municipal de Rivière-Héva.

Ces exemples démontrent la souplesse de gouvernance que doit posséder un comité de suivi afin de pouvoir s'ajuster aux enjeux soulevés par le milieu. Se gouverner en toute indépendance donne de la flexibilité. Sous la forme d'un organisme à but

non lucratif, un comité de suivi défient une souplesse lui permettant de s'ajuster selon les préoccupations du milieu et l'évolution du projet. Dans un contexte où les enjeux sont nombreux, il est à nos yeux essentiel qu'un comité de suivi puisse fonctionner à partir d'une structure indépendante, complètement dissociée de la minière et de l'administration municipale qui pourraient défendre des intérêts qui leur sont propres. Le comité de suivi doit être en mesure de prendre des décisions et de poser des gestes en toute indépendance.

Les enjeux soulevés par la population locale peuvent également s'avérer différents des enjeux médiatisés par des groupes environnementaux œuvrant à une échelle nationale. À Malartic, il a été décidé par le CSCM qu'il concentre son travail sur les enjeux locaux soulevés par la population locale. Nous prétendons que tous les comités de suivi devraient fonctionner selon cette approche puisque aucune autre organisation ne remplit ce mandat. Une approche qui met à l'avant-plan les enjeux ou les problématiques soulevés par la population locale sera beaucoup plus en mesure de répondre à l'esprit de la nouvelle Loi sur les mines. L'article 101.0.3. stipule que la minière doit «[...] favoriser l'implication de la communauté locale sur l'ensemble du projet» (Parlement du Québec 2013).

Enfin, il faut retenir qu'au-delà des connaissances scientifiques, les enjeux qui animeront le cœur des citoyens seront des déterminants majeurs du travail dans lequel s'investira un comité de suivi afin d'être une organisation utile et légitime à leurs yeux. D'un milieu à l'autre, et selon les caractéristiques du projet minier ou de la mine en exploitation, différents enjeux seront soulevés par la population locale. L'établissement d'un lien de confiance avec la population locale à travers des échanges répétés ainsi qu'une position de neutralité au sein d'une communauté permet de solidifier la structure en termes de crédibilité et de légitimité.

5. Le comité de suivi

Le CSCM a été conçu comme un lieu de dialogue entre différentes parties prenantes touchées par l'exploitation de la mine Canadian Malartic. Dès sa formation, le CSCM s'est donné pour mandat de faire entendre la voix des citoyens qui ne bénéficiaient d'aucune structure pour s'adresser formellement aux autres instances telles que la direction de la minière, les ministères et les autorités municipales. Chaque mois, le CSCM rassemble sept administrateurs incluant quatre résidents de Malartic. Six délégués s'ajoutent aux sept administrateurs pour un total de treize intervenants. Les délégués n'ont pas droit de vote lors de la prise de décision, mais étant donné leurs connaissances respectives, un pouvoir d'influence leur est accordé. Les délégués participent aux discussions qui ont lieu en première partie des rencontres mensuelles, puis ils se retirent de l'assemblée. Ensuite, les décisions sont prises par les administrateurs. Les délégués sont les suivants :

1. le maire de Malartic;
2. le maire de Rivière-Héva;
3. le directeur en développement durable de la mine;

4. le représentant du ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie ;
5. le représentant du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte aux changements climatiques ;
6. le représentant de la Direction régionale de la santé publique.

L'expertise apportée par la présence des délégués offre un soutien essentiel au travail des administrateurs. Au besoin, les administrateurs, dans un souci de neutralité, font aussi appel à des experts indépendants pour une meilleure compréhension et une analyse plus nuancée des problématiques soulevées. Des cadres spécialisés, employés par la mine Canadian Malartic, offrent aussi des explications aux membres du conseil d'administration du CSCM. Les administrateurs qui siègent au CSCM ont ensuite le mandat de transférer ces informations à l'ensemble de la population. Pour ce faire, le CSCM diffuse ces informations par publipostage, dans *Le P'tit Journal de Malartic*, sur son site Internet² ainsi que lors d'assemblées publiques qu'il organise.

En 2013, le CSCM a modifié ses règlements généraux afin que tous les citoyens de Malartic et de certains secteurs ruraux de Rivière-Héva en deviennent membres d'office. Avant cet amendement aux règlements généraux, les citoyens qui souhaitaient être membres devaient remplir un formulaire d'adhésion. Aujourd'hui, il n'existe plus aucune procédure d'adhésion. Un rayon de 7 km limite actuellement la zone territoriale sur laquelle veille le CSCM. Tous les résidants qui habitent à l'intérieur de ce rayon sont membres du CSCM. Autrement dit, cela signifie que le CSCM travaille pour eux. Comme dans tout organisme à but non lucratif, l'assemblée générale des membres constitue l'autorité suprême de celui-ci. Lors de l'assemblée générale annuelle (AGA), les membres entérinent la composition du CSCM et les amendements apportés aux règlements généraux. On y discute du bilan annuel d'activités et des objectifs pour l'année à venir.

Les membres ont le droit de vote sur toute motion qui pourrait être déposée lors de l'AGA³. L'application à venir de la nouvelle loi sur les mines, soit la Loi 70 modifiant la Loi sur les mines, limitera sans doute l'autonomie des comités de suivi en contraignant cette capacité d'adaptation que possède actuellement le CSCM. La Loi 70 stipule que : « Les membres du comité sont choisis selon la méthode déterminée par le locataire. [...] Le locataire détermine le nombre de représentants qui composent le comité » (article 101.0.3).

C'est en 2009 que la minière Osisko a mandaté la Chaire Desjardins en développement des petites collectivités de l'UQAT afin de constituer un comité de suivi. Nous considérons que le mandat donné par la minière à une organisation indépendante était un geste très judicieux. Ce geste a permis de donner au CSCM une crédibilité qui aurait sans doute été impossible à obtenir si la minière en avait déterminé la composition.

La formation du CSCM a aussi été marquée par un contexte particulier. À

2 L'adresse du site Internet du CSCM est : <http://comitesuivicm.org/>

3 Pour en connaître davantage sur la composition du CSCM ou ses règlements généraux, il est possible de consulter son site en suivant ce lien : <http://comitesuivicm.org/qui-sommes-nous/conseil-dadministration/>

l'époque, trois comités citoyens s'étaient préalablement formés dans la communauté :

1. le regroupement des locataires relocalisés ;
2. le regroupement des citoyens du quartier sud ;
3. le Comité de vigilance.

À la différence du CSCM, ces comités ont été le produit de mobilisations citoyennes défendant leurs intérêts respectifs. Les intérêts défendus par ces comités touchaient certains groupes de citoyens de Malartic et non l'ensemble des citoyens. Dans ce contexte, le CSCM s'est positionné comme une entité plus neutre à l'écoute de l'ensemble des citoyens. Le premier président du Comité de suivi Osisko Malartic, monsieur Guy Lemire, avait écrit en 2010 les propos suivants dans la première lettre de convocation envoyée aux administrateurs :

[...] Il (signifiant le Comité de suivi) n'est pas un comité de pression, de revendication, de vigilance ou de propagande, mais il doit rappeler l'entreprise, les ministères et la municipalité à leurs engagements et obligations et il doit être un très bon véhicule des préoccupations de la population locale et régionale.

On perçoit dans les propos de monsieur Lemire l'équilibre fragile que doit maintenir le CSCM. Ce dernier doit relever le défi d'entretenir un dialogue de qualité à la fois avec l'entreprise, les citoyens, les ministères et les autorités municipales en place. Le maintien de ce dialogue est essentiel au CSCM qui ne travaille pas en termes de revendications ou de dénonciation, mais plutôt dans une approche de recherche de solution.

L'embauche d'un employé par le CSCM permet aux citoyens de bénéficier d'une coordonnatrice qui rend possible cette participation et cette rigueur ; ce poste est occupé par l'auteure depuis le printemps 2013. Cette dernière possède une formation universitaire en anthropologie qui s'avère très pertinente dans le cadre de cet emploi. Cette formation lui permet de naviguer avec discernement à travers les jeux de pouvoir qui s'opèrent dans cette arène minière. Un rôle de traductrice et de médiatrice⁴ lui revient fréquemment afin de clarifier les points de vue défendus par les différents intervenants, soit l'entreprise minière, les groupes citoyens, l'administration municipale et les directions régionales des différents ministères. À l'exception des citoyens, les autres parties possèdent des ressources qui leur permettent de défendre leurs points de vue. Le CSCM souhaite combler cette absence de ressource, en offrant aux citoyens une personne formée pour les écouter, améliorer leurs connaissances des enjeux et faire entendre leur point de vue. La mission du CSCM (voir l'encadré 1) est éloquente à cet égard.

4 Ces rôles furent également discutés par l'anthropologue Pierre-Yves Le Meur lors d'un séminaire offert par la Chaire en entrepreneuriat minier de l'UQAT, le 23 mai 2014.

Mission du Comité de suivi Canadian Malartic

Le Comité de suivi a pour mission de mettre en avant, en toute indépendance, les questions ou problématiques pouvant nuire à la qualité de vie des citoyens dans le but de favoriser des solutions qui contribueront à la cohabitation harmonieuse entre la mine Canadian Malartic et les communautés de Malartic et de Rivière-Héva tout en veillant à l'édification d'une collectivité durable (RÉSOLUTION 08-CSCM-15).

6. De l'acceptabilité sociale à une cohabitation harmonieuse

L'acceptabilité sociale repose sur la perception des risques et sur les attentes de la population locale face à un projet minier. Les risques perçus et les attentes des citoyens sont grandement influencés par le type de relations que les citoyens entretiennent avec le milieu touché. À leur tour, ces relations sont marquées par des valeurs communes et personnelles reflétant aussi le caractère solide ou fragile du lien d'appartenance à ce milieu de vie.

Aux risques et aux attentes exprimées par la population locale à l'égard d'un projet minier avant son entrée en exploitation s'ajoutent des pertes et des gains de qualité de vie, lorsque les impacts des opérations minières se font ressentir. Les pertes et les gains, ainsi que les risques et les attentes, composent les enjeux soulevés par les citoyens. La compréhension des enjeux soulevés par les différentes parties prenantes d'une activité industrielle évoluera en fonction des apprentissages, des expériences vécues et des influences extérieures. Bien que le CSCM travaille dans le but de contribuer à une cohabitation harmonieuse entre la communauté locale et la minière, il ne contrôle pas toutes les sources d'influence qui agiront sur la perception des risques et des attentes ainsi que sur la valeur accordée par les citoyens aux gains et aux pertes de leur qualité de vie. Des éléments extérieurs au comité de suivi affecteront la compréhension et l'expérience de chacun à l'égard des enjeux soulevés. Par exemple, ces influences peuvent provenir de l'attitude de l'entreprise minière envers la population locale, des discours tenus par des groupes de pressions ou encore de gestes posés par des minières provenant d'autres milieux.

La considération accordée par la minière aux risques perçus et aux pertes subies par les citoyens favorisera une cohabitation plus harmonieuse ainsi qu'un niveau d'acceptabilité sociale plus élevé. Pour répondre aux attentes suscitées, notamment en termes de retombées économiques, une connaissance des spécificités locales permettra aussi une meilleure identification des investissements qui contribueront à l'édification d'une collectivité durable. Les stratégies adoptées pour prendre en compte les risques perçus, les attentes et les pertes subies par les citoyens devraient varier selon les valeurs véhiculées par la population locale et leur vision du développement du territoire qu'ils occupent.

Considérer le caractère dynamique du niveau d'acceptabilité sociale vient appuyer l'idée selon laquelle les comités de suivi doivent être indépendants afin de pouvoir être responsables de leurs décisions. Ils doivent, en outre, pouvoir ajuster leur composition ainsi que leur fonctionnement à la réalité mouvante dans laquelle ils travaillent. Le comité de suivi est perméable (Gagnon et al. 2000) au niveau d'acceptabilité sociale accordé aux activités d'une industrie dans un milieu donné. Le travail et les dynamiques relationnelles à l'intérieur du comité de suivi seront influencés par le climat d'acceptabilité sociale dans lequel il fonctionne. À l'inverse, le comité de suivi influencera ce niveau d'acceptabilité par les gestes qu'il posera.

7. Conclusion

Les idées avancées dans cet écrit soutiennent que les spécificités locales du milieu où sera implanté un projet minier devraient avoir un impact majeur sur la composition, la structure et le mode de fonctionnement du comité de suivi qui y sera mis en place. Il est primordial de maintenir et d'entretenir des relations étroites avec la population locale pour mettre en place une structure durable et un mode de fonctionnement satisfaisant pour toutes les parties.

Qu'ils habitent, fréquentent, gouvernent ou exploitent le milieu touché, les citoyens soulèveront des **enjeux** marqués par les relations qu'ils entretiennent avec ce milieu. Par ailleurs, ces enjeux évolueront dans le temps selon la compréhension que chaque partie en aura. Un comité de suivi devrait être une structure dont le rôle premier est celui d'être un lieu de dialogue et de partage de connaissances entre ses membres. Les comités de suivi devraient combler l'espace vide au niveau local en offrant aux citoyens un lieu et une ressource pour faire valoir leurs attentes, leurs préoccupations et leurs craintes, associées à l'arrivée d'une minière dans leur milieu de vie. La participation citoyenne étant la pierre angulaire sur laquelle repose l'existence même des comités de suivi.

À Malartic, la présence de la **mine** a amené plusieurs changements. La proximité de la fosse avec le milieu urbanisé et l'ampleur de cette exploitation génèrent des impacts propres à cette mine. Le travail dans lequel s'investit le CSCM est lié aux activités de la minière et aux impacts que celles-ci génèrent dans la communauté.

Ainsi, parce que le milieu où s'installera une industrie minière possède ses propres spécificités, il est fondamental que la structure, la composition et le fonctionnement d'un comité de suivi soient le reflet de ces caractéristiques locales. Pour effectuer un travail qui soit utile et pertinent pour une communauté, un comité de suivi doit être construit à l'image de son **milieu**. Le comité doit travailler sur les **enjeux** qui y sont soulevés en lien avec les activités de la mine. Ces trois variables (figure 3) étant toutes perméables à la fluctuation du niveau d'acceptabilité sociale ou à la variation de la qualité de cohabitation entre la communauté et son voisin corporatif.

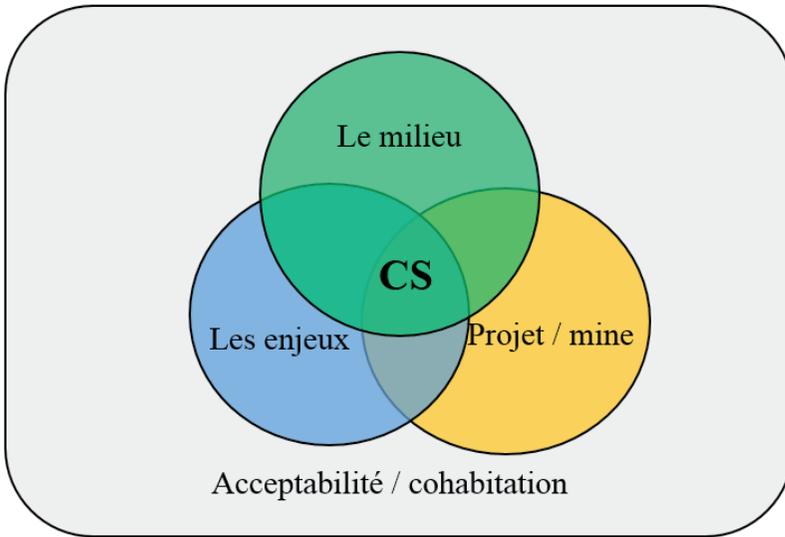


Figure 3: Trois variables déterminantes d'un comité de suivi (CS).

Ainsi, les règles législatives encadrant les comités de suivi devraient être orientées de manière à permettre aux communautés locales de construire des comités à leur image. Enfin, les comités de suivi devraient permettre d'adopter une gestion intégrée à l'échelle de la communauté. Ils devraient offrir un lieu de dialogue entre les citoyens et la minière afin de prendre des décisions concertées entre les différents acteurs. Ces relations étroites entre la population et l'industrie sont essentielles à la mise en place d'une gestion durable du territoire.

Remerciements

L'auteure tient à remercier tous ceux et celles qui ont participé aux activités du CSCM depuis son entrée en poste en avril 2013. Plus particulièrement, elle remercie monsieur Michel Gilbert pour l'avoir, dans un premier temps, invitée à occuper le poste de coordonnatrice du CSCM, puis, dans un deuxième temps, pour avoir discuté avec elle, à plus d'une reprise, des idées présentées dans ce texte. Rappelons que certaines de ces idées ont fait l'objet d'une conférence à Québec en novembre 2014.

Un remerciement spécial s'exprime aussi à monsieur Stéphane Bessette pour avoir accepté de réviser le contenu de cet article. Monsieur Bessette agit également à titre de délégué de la Direction de santé publique de l'Abitibi-Témiscamingue au sein du CSCM. Ses conseils ont plus d'une fois été d'une grande utilité.

Références

- Brisson, G., Morin-Boulais, C., Bouchard-Bastien, E., et Fortin, M.-J. 2015. Effets individuels et sociaux des changements liés à la reprise des activités minières à Malartic, période 2006-2013 [en ligne]. Institut national de santé publique du Québec. Disponible à <http://www.deslibris.ca/ID/246114> [cité le 9 mars 2016].
- Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE). 2009. Projet minier aurifère Canadian Malartic : rapport d'enquête et d'audience publique [en ligne]. Québec, Canada. Rapp. 260. Disponible à <http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/rapports/publications/bape260.pdf> [cité le 9 mars 2016].
- Gagnon, C., Gauthier, M., Côté, G., Champagne, P., Miller, F., et Simard, L. 2000. Analyse et évaluation du fonctionnement de dix comités de suivi environnemental au Québec : étude exploratoire [en ligne]. Agence canadienne d'évaluation environnementale, Ottawa, Canada, p. 73. Disponible à http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/mine_apatite_lac-a-paul/documents/DD3.pdf [cité le 9 mars 2016].
- Gouvernement du Québec. 2015. Substances minérales autres que le pétrole, le gaz naturel et la saumure — Modification [en ligne]. *Dans* Projet de règlement. Loi sur les mines (chapitre M-13.1). 2015, p. 1303–1306. Disponible à <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=1&file=63190.pdf> [cité le 3 novembre 2015].
- Leblanc, P., Asselin, H., Ependa, A., Gagnon, A., et Pelletier, L. 2012. Transformations et bouleversements d'un territoire : Le cas de la municipalité de Malartic [en ligne]. Chaire Desjardins en développement des petites collectivités de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Canada. Disponible à <https://depot.erudit.org/id/003725dd> [cité le 9 mars 2016].
- Parlement du Québec. 2013. Projet de loi n° 70 : Loi modifiant la Loi sur les mines [en ligne]. *Dans* Assemblée nationale du Québec, première session, quatrième législature. Éditeur officiel du Québec. Disponible à <http://www.assnat.qc.ca/fr/travaux-parlementaires/projets-loi/projet-loi-70-40-1.html> [cité le 3 novembre 2015].

Défis de la formation dans le secteur minier en Afrique francophone

Richard SIMON

Résumé

De nombreux pays africains francophones misent sur le secteur minier pour leur développement économique. Cet essor de l'industrie minière s'accompagne de besoins en main-d'œuvre croissants. Afin de maximiser l'emploi de leurs citoyens et réduire le recours à des ressortissants étrangers, ces pays doivent développer la formation allant des ouvriers spécialisés aux professionnels. Cet article trace un portrait des difficultés et défis relatifs à la formation dans les pays africains francophones selon le type d'emploi et donne des pistes de solution pour surmonter ces défis.

1. Introduction

Depuis plusieurs années, de nombreux pays africains misent sur l'industrie minière internationale pour développer leur économie. La production minière africaine a donc pris une ampleur considérable dans la dernière décennie. Pour de nombreux pays, ces activités minières industrielles sont récentes et présentent de nouveaux défis en termes de formation de la main-d'œuvre, autant pour répondre aux besoins de l'industrie qu'à ceux des institutions nationales et locales pour assurer une bonne gouvernance du secteur.

2. Secteur minier en Afrique francophone

Le secteur minier dans les pays francophones est en pleine effervescence. La montée fulgurante des prix des matières premières à partir des années 2000 a favorisé l'exploration et la mise en production de nombreux gisements en Afrique, particulièrement dans le secteur aurifère. Ainsi, la production aurifère africaine (excluant l'Afrique du Sud qui a un long historique minier) est passée de 171 tonnes en 2000 (7% de la production mondiale) à 371 tonnes en 2013, soit 13% de la production mondiale (United States Geological Survey 2016). Les pays africains francophones sont responsables de 54% de cet accroissement de la production, passant de 48 tonnes à 155 tonnes. Par ailleurs, certains pays qui exploitaient déjà depuis plusieurs décennies différents minéraux à travers des entreprises nationales ouvrent depuis quelques années leur territoire à des investisseurs étrangers. Naturellement, afin de maximiser les retombées économiques pour leurs citoyens, ces pays visent à ce que la majorité (voire la totalité) des emplois générés soient occupés par leurs citoyens. Plusieurs pays font

donc face à des besoins nouveaux et croissants de formation de la main-d'œuvre dans ce secteur.

3. Besoins en formation

Les besoins en formation nécessaires pour couvrir le secteur minier vont des ouvriers spécialisés aux professionnels et présentent des défis distincts.

3.1 Ouvriers spécialisés

Les ouvriers spécialisés regroupent divers corps de métiers : mineurs, conducteurs d'équipements lourds, foreurs, dynamiteurs, électriciens, mécaniciens, chaudronniers, etc. Dans la plupart des pays africains existent des centres de formation pour certains métiers généralistes (électriciens, mécaniciens et chaudronniers). Toutefois, ces centres sont souvent mal équipés ou ne disposent pas d'équipement à la fine pointe des technologies utilisées dans les mines modernes. Pour les métiers spécifiques au secteur minier, il n'existe que très peu de centres de formation, et ceux-ci ne permettent généralement pas de répondre en nombre et en qualité aux besoins de l'industrie. Les compagnies minières se retrouvent donc dans l'obligation de former sur le tas la majorité de leurs ouvriers spécialisés. Cela engendre des coûts supplémentaires aux opérations et affecte la productivité de l'entreprise.

Par ailleurs, la formation du personnel ne faisant pas partie de la mission première de leur entreprise, plusieurs compagnies minières ont de la difficulté à trouver de bons formateurs et à développer des programmes adaptés à la réalité locale. De plus, la langue peut aussi constituer un problème pour la formation, le français n'étant pas la langue maternelle des ouvriers nationaux. Bien que le français soit généralement enseigné dans les écoles primaires et secondaires des pays francophones, le niveau de scolarité des ouvriers ainsi que leur maîtrise du français peuvent être un obstacle à la communication et au transfert de connaissances. Cela pose en effet des difficultés tant lors de l'apprentissage que du travail comme tel, les instructions pouvant être mal comprises ou interprétées. De plus, comme un bon nombre de cadres supérieurs sont des travailleurs étrangers ne parlant pas français, la qualité des informations transmises de part et d'autre laisse souvent à désirer.

3.2 Techniciens supérieurs

Les techniciens supérieurs sont sans doute le maillon faible des entreprises minières opérant en Afrique francophone. Leur formation ne peut se faire sur le tas comme celle des ouvriers. Cette formation, qui dure deux ou trois ans, doit se dérouler dans un centre de formation disposant des équipements nécessaires au travail des techniciens. Malheureusement, très peu de pays possèdent des centres bien équipés. De plus, rares sont ceux qui offrent actuellement des formations en technologie minérale dans les spécialités de l'exploitation, de la géologie et du traitement de minerai. Aussi, bien que les besoins en nombre de techniciens dépassent de beaucoup ceux en ingénieurs et géologues, les priorités des gouvernements nationaux sont généralement tournées

vers la formation universitaire plutôt que celle de techniciens. Les compagnies minières doivent donc soit employer des techniciens étrangers à fort prix soit utiliser des ingénieurs nationaux dans des rôles de techniciens supérieurs. Ces derniers ne sont toutefois pas formés pour remplir ce rôle et leur motivation devant ce type de travail est généralement très faible, générant une insatisfaction tant de l'employé que de l'employeur.

Par ailleurs, lorsque des centres de formation existent, le recrutement des étudiants représente une autre difficulté. En effet, dans plusieurs pays africains, la sélection des étudiants est liée aux résultats des études secondaires. Les meilleurs accèdent aux universités alors que ceux ayant de moins bons résultats sont dirigés vers les centres de formation technique. Au Canada, et dans les pays occidentaux en général, ce sont les étudiants qui choisissent de suivre une formation technique qui correspond à leurs aptitudes et leur intérêt. Leur motivation envers leur formation et plus tard envers leur travail est donc élevée, comparativement aux élèves africains pour qui cette formation est le signe d'un échec de l'admission à l'université.

3.3 Géologues

Presque tous les pays africains ont des programmes universitaires en géologie ou génie géologique. Lorsque le pays a un certain niveau d'activité minière, beaucoup d'étudiants optent pour cette formation et le nombre de diplômés est généralement suffisant pour répondre aux besoins du marché. Cependant, les formations offertes sont généralement très théoriques, comportent peu de stages pratiques ou de travaux de terrain, et ne répondent pas aux besoins des compagnies minières. Les diplômés, lorsqu'ils obtiennent un emploi, sont souvent relégués à des tâches subalternes et restent limités dans leur progression de carrière. De plus, à cause de la barrière de la langue (la majorité des géologues étrangers ne parlant pas le français), peu d'entreprises minières et d'exploration prennent contact avec les universités locales pour offrir des stages qui pourraient améliorer la formation pratique des diplômés. D'un autre côté, les universités n'ont pas l'habitude d'établir des contacts avec les entreprises. De tels échanges permettraient aux professeurs (qui ont peu d'expérience industrielle) d'améliorer leur enseignement et de développer des stages appropriés pour les étudiants.

En ce qui a trait à l'aspect technologique, les universités sont aussi mal fournies en équipements et en logiciels informatiques. Il devient donc très difficile pour les étudiants de développer leur expérience pratique et les compétences qui leur permettraient de décrocher un emploi et d'y être performant. Ainsi, malgré de grands besoins en main-d'œuvre dans ce domaine, beaucoup d'emplois sont occupés par des étrangers alors qu'un grand nombre de géologues nationaux sont sans emploi.

3.4 Ingénieurs miniers

L'industrie minière étant très récente dans plusieurs pays africains francophones, il n'existe que très peu de programmes de génie minier en français en Afrique. De plus, la France, qui accueille beaucoup d'étudiants africains, n'a plus d'activité minière d'importance sur son territoire et offre peu de programmes de génie minier. Les possibilités pour un étudiant désirant obtenir une formation en français dans ce domaine restent limitées. Quelques pays africains ayant un historique minier plus important ont des programmes, mais leur capacité d'accueil est bien en deçà des besoins. Le Québec a vu son nombre d'étudiants africains exploser dans les dernières années, mais les coûts pour y étudier sont très élevés et le nombre de bourses disponibles reste faible.

Plusieurs pays, particulièrement en Afrique de l'Ouest ont des projets de création d'écoles de mines qui incluraient un programme en génie des mines, mais les investissements nécessaires pour ces ouvertures font défaut. Par ailleurs, même si le financement était présent, la grande difficulté de recruter des professeurs en génie minier demeure un frein majeur à la création de ces programmes. En effet, recruter des professeurs francophones qui répondent aux exigences universitaires (soit de détenir un doctorat) est un défi même dans les pays développés. Ainsi, trouver un professeur dans ce domaine alors qu'il n'y a pas de diplômés nationaux devient extrêmement ardu.

3.5 Professionnels en environnement

Les aspects environnementaux sont encore très mal couverts en Afrique, particulièrement dans les pays où l'activité minière et industrielle est très récente. Ainsi, il n'existe à ce jour pratiquement pas de formations spécifiques en environnement et encore moins en environnement minier. Si les pays d'Afrique francophone désirent utiliser le secteur extractif comme vecteur de développement économique, ils devront se doter de politiques environnementales rigoureuses afin d'éviter de reproduire les erreurs commises dans les pays industrialisés. Pour ce faire, ils devront développer leur propre expertise en ce domaine. À cet égard, l'Institut canadien international des ressources et du développement est présentement en train de développer des programmes de formation en environnement et gestion des rejets miniers dans quelques pays d'Afrique de l'Ouest (Institut canadien international des ressources et du développement 2016). Ce projet consiste à renforcer les programmes de géologie et de génie géologique en intégrant des cours en gestion des rejets miniers, en développant des stages industriels et en intégrant des projets de recherche appliquée. Ces programmes devraient être opérationnels à partir de l'automne 2017.

3.6 Ingénieurs métallurgistes

Pour ce qui est de la minéralurgie et de la métallurgie, il se fait relativement peu de transformation en sol africain, et par conséquent, il n'existe que très peu de programmes dans ce domaine. Les besoins en ingénieurs métallurgistes sont donc très limités et ne justifient généralement pas la création coûteuse de programmes de formation dans ce domaine. Les compagnies minières ont donc recours à des ingénieurs

étrangers ou des ingénieurs nationaux qui ont été formés en Europe ou en Amérique du Nord. Étant donné le coût des équipements requis pour offrir ce type de formation et les faibles besoins en diplômés, il est peu probable que des programmes de formation dans ce domaine soient développés dans un avenir rapproché. La solution la plus économique consisterait alors à offrir des bourses aux étudiants nationaux pour qu'ils aillent se former à l'étranger.

3.7 Autres professionnels

L'industrie minière a également besoin de plusieurs autres types de professionnels tels que des ingénieurs électriques, ingénieurs mécaniques, ingénieurs civils, comptables, juristes, etc. La plupart des pays africains ont des programmes de formation qui couvrent ces domaines. Ces programmes sont toutefois de qualité inégale et plusieurs auraient besoin d'être révisés pour mieux répondre aux besoins de l'industrie minière.

4. Conclusion

Si les pays d'Afrique francophone désirent utiliser l'industrie minière comme vecteur de développement économique, il est essentiel qu'ils puissent fournir la main-d'œuvre nécessaire au secteur. Les experts nationaux ainsi formés pourront fournir aux compagnies minières la main-d'œuvre qualifiée dont elles ont besoin et permettront également de réduire les coûts d'opération, générant ainsi une plus grande croissance du secteur. Les experts nationaux permettront également au pays de se doter de politiques minières et environnementales qui seront en phase avec leurs valeurs et leurs objectifs de développement. La gouvernance du secteur minier sera ainsi améliorée et permettra d'attirer plus d'investissement dans ce secteur.

Toutefois, les défis liés à la formation restent nombreux et demandent une meilleure collaboration entre les parties prenantes. Nous en donnons ici des exemples.

Les compagnies minières doivent participer davantage à la formation tant sur les plans financier qu'opérationnel et établir des liens avec les centres de formation. Les compagnies minières doivent également accueillir plus de stagiaires afin de parfaire leur formation pratique.

Les centres de formation et universités doivent également aller à la rencontre du secteur industriel afin de s'assurer que leurs cursus et les modes de formation répondent aux besoins de l'industrie. Les universités doivent s'éloigner du mode traditionnel de formation et viser à développer une plus grande autonomie des étudiants par une approche par projet et travail en équipe. Les universités doivent également améliorer les aspects pratiques de leurs formations.

Les gouvernements doivent réfléchir à de nouveaux modes de financement des centres de formation et être ouverts à l'embauche de professeurs n'ayant pas le profil traditionnel du professeur d'université.

Les pays développés (particulièrement les pays ayant de nombreuses compagnies minières œuvrant en Afrique) doivent s'engager davantage et faciliter la collaboration entre leurs institutions de formation et leurs vis-à-vis africains.

Les institutions de formation québécoises, qui jouissent d'une grande expertise minière francophone, doivent également collaborer plus intensément avec les institutions africaines afin de renforcer les capacités de ces dernières.

Références

Institut canadien international des ressources et du développement. 2016. Rapport annuel 2015 des activités de Polytechnique Montréal au sein de l'Institut canadien international des ressources et du développement. Polytechnique Montréal, Montréal, Canada.

United States Geological Survey. 2016. Gold: Statistics and Information [en ligne]. Disponible à <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gold/> [cité en février 2016].

Gestion des rejets miniers au Maroc : défis et possibilités

Rachid HAKKOU et Mostafa BENZAAZOUA

Résumé

Dans le cadre d'un partenariat entre l'Université Cadi Ayyad (UCA, Maroc) et l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT, Canada), une Chaire de recherche du Centre de recherches pour le développement international (CRDI, Canada) en gestion et stabilisation des rejets industriels et miniers a été mise en place depuis 2009. Il s'agit d'un projet financé par le CRDI visant un transfert des connaissances canadiennes dans ce domaine vers le Maroc. La thématique de recherche répond à des enjeux qui intéressent le Maroc, pays de tradition minière, et vise à proposer des solutions adaptées en matière de gestion des rejets miniers et de restauration des sites. Elle apporte également des expertises et des outils très utiles en rapport avec les enjeux internationaux de réutilisation de déchets minéraux dans différentes filières de valorisation.

Les résultats des recherches en laboratoire ainsi que sur le terrain ont abouti à la conception d'un schéma optimal pour la réhabilitation complète du site minier de Ket-tara (30 km au nord-ouest de Marrakech) en tenant compte du climat semi-aride de la région ; un concept qui pourrait être reproduit dans d'autres sites ciblés au Maroc dans le cadre de nos travaux. Par ailleurs, il a été montré que le domaine de la construction (en forte croissance au Maroc) peut constituer une filière prometteuse pour absorber les rejets miniers stables chimiquement, et permettre ainsi de préserver les ressources naturelles (argiles, sables et graviers) actuellement surexploitées. Ainsi, les stériles et les boues de lavage des phosphates (groupe OCP), les stériles schisteux de l'ancienne mine d'antracite de Jerada, les rejets de l'usine de calamine de Hajjar et les rejets miniers de Zeïda et Mibladen (plomb) dans la Haute-Moulouya (entre le Moyen et le Haut Atlas) pourraient être valorisés respectivement comme matières premières pour la fabrication de céramiques, de bétons, de briques cuites et de mortiers.

1. Introduction

Le Maroc, pays minier par excellence, connaît une activité intense dans ce domaine, et ce, depuis plusieurs siècles. Cette activité s'explique par la richesse et la diversité de ses ressources minérales. En effet, le Maroc n'est pas seulement un géant mondial dans le marché des phosphates, il possède aussi de bonnes positions dans le secteur des métaux non ferreux (zinc, plomb, cuivre, argent, etc.) et des minéraux industriels

(baryte, fluorite, etc.). L'exploitation et la valorisation des substances minérales jouent donc un rôle important dans le développement économique et social du Maroc.

Officiellement, on considère qu'environ 240 mines ont été exploitées au Maroc, actuellement fermées pour la plupart. Des exploitations souterraines de petite taille produisant 100 t/j jusqu'à des exploitations à ciel ouvert de taille significative produisant des milliers de tonnes de minerai par jour sont répertoriées. Le Maroc compte environ 200 sites miniers abandonnés de plus ou moins grande taille. Aucun dispositif efficace n'a été mis en place pour gérer l'abandon de ces anciennes mines et pour maîtriser les éventuels impacts négatifs des rejets sur l'environnement. En effet, des quantités importantes de rejets miniers, constitués de résidus de concentration et de roches stériles d'exploitation, ont été laissées sur place sans mesure de confinement et sans prévoir de travaux de réhabilitation. Sur le plan social, de nombreuses régions qui dépendaient presque exclusivement de l'industrie minière sont de nos jours sinistrées et sans solution en vue. Il est à signaler que seulement quelques études (Boularbah et al. 2006, El Hachimi et al. 2007, Hakkou et al. 2008a, Smouni et al. 2010) se sont intéressées aux impacts environnementaux et sociaux des mines abandonnées à travers le Maroc.

Dans ce contexte, une chaire de recherche du Centre de recherches pour le développement international (CRDI, Canada) en « gestion et stabilisation des rejets industriels et miniers » a été mise en place depuis 2009. Ce projet est financé par le CRDI, dans le cadre d'un partenariat entre l'Université Cadi Ayyad (UCA, faculté des sciences et techniques, Marrakech, Maroc), l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT, Canada) et le Centre de développement de la région du Tensift (Marrakech). L'un des principaux objectifs du projet est de développer, aussi bien en laboratoire que sur le terrain, des méthodes de restauration rentables et adaptées aux conditions climatiques semi-arides, afin de gérer et de stabiliser les déchets miniers nocifs, et d'investiguer pour d'autres (inertes) des voies de valorisation possibles.

Des activités de recherche, de caractérisation environnementale et de solutions de réhabilitation ont été menées dans le cas de 9 sites miniers : Tiwine (manganèse), Tiouit (argent, or, cuivre) et Zgounder (argent) dans l'Anti-Atlas; Erdouz (plomb, zinc) dans le Haut Atlas; Kettara (pyrrhotine: FeS) dans le massif des Jbilet; Zeïda et Mibladen (plomb) dans la Haute-Moulouya (entre le Moyen et le Haut Atlas); Jerada (anthracite) et Touissit (zinc, plomb) dans l'Oriental (figure 1). En outre, des travaux de recherche ont été menés selon des évaluations techniques, économiques et environnementales pour le recyclage et la valorisation de certains rejets miniers stables chimiquement.

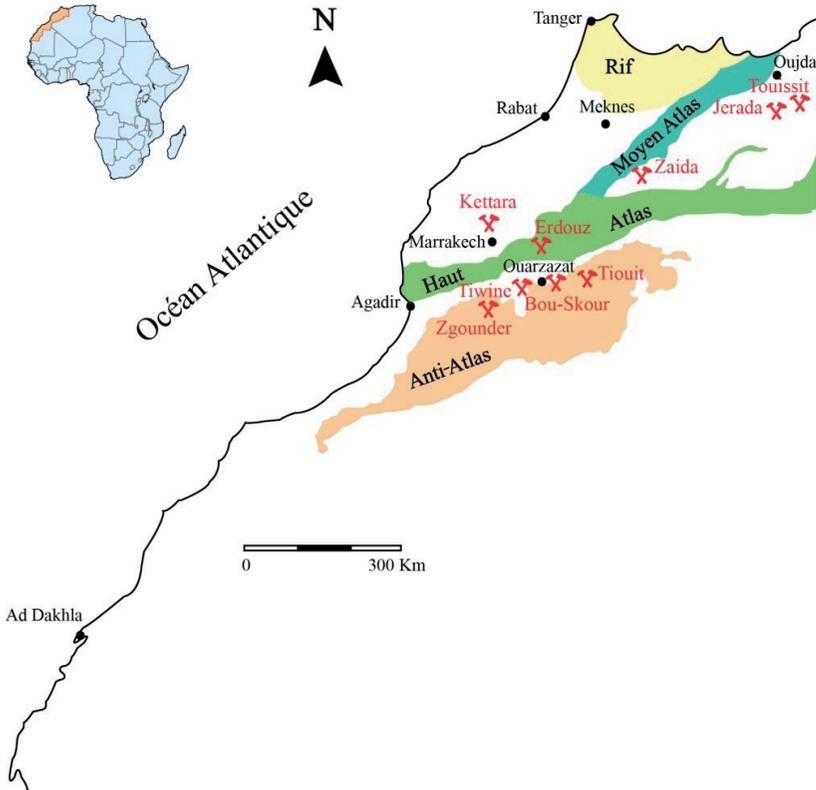


Figure 1: Situation de certaines mines abandonnées au Maroc, qui ont fait l'objet d'études par la Chaire de recherche du CRDI en gestion et stabilisation des rejets industriels et miniers.

Cet article présente la synthèse des résultats du projet de réhabilitation de l'ancienne mine de Kettara, revalorisée à l'aide d'une couverture évapotranspirante à base de stériles issus des exploitations voisines de phosphates. Par ailleurs, nous donnerons des exemples de fabrication de matériaux de construction à partir des rejets miniers en tant que matière première en substitut aux sables, graviers et argiles naturels. Ces ressources naturelles sont souvent surexploitées au détriment de la conservation des terres arables et de la lutte contre l'érosion continentale. Il s'agit des rejets de l'ancienne mine de charbon de Jerada, des rejets de l'usine de calamine de Hajjar, ainsi que des stériles et des boues de lavage de phosphates et des rejets du district minier de la Haute-Moulouya (Zeïda et Mibladen).

2. Méthodologie

Les anciens sites miniers de Zeïda, Mibladen, Touissit, Kettara, Jerada, Boubker, Tiouit, Zgounder et Tiwine sont répartis géographiquement sur tout le Maroc (figure 1); ils ont été choisis pour évaluer leurs impacts environnementaux (Hakkou et al. 2008a, 2008b, Battioui et al. 2013, 2016, Khalil et al. 2013, 2014, Goumih et al. 2013, Lghoul et al. 2014, Argane et al. 2015a, El Adnani et al. 2015). Une caractérisation approfondie de rejets échantillonnés dans chacun de ces sites a été menée en vue de déterminer leurs propriétés physiques, chimiques et minéralogiques, ainsi que leurs comportements géochimique et environnemental.

Une prévision fiable du drainage minier acide (DMA) est nécessaire en vue de développer les scénarios de réhabilitation appropriés. Pour mieux prévoir le DMA, des essais de type statique ont été effectués. Ils consistent à faire le bilan du potentiel de génération d'acidité (PA) et du potentiel de neutralisation du matériel étudié. La méthode utilisée est la méthode *acid-base accounting* modifiée (Lawrence et Wang 1997, Bouzazhah et al. 2015). Les résultats obtenus ont permis de classer chaque site minier en fonction de son potentiel de génération d'acide (figure 2).

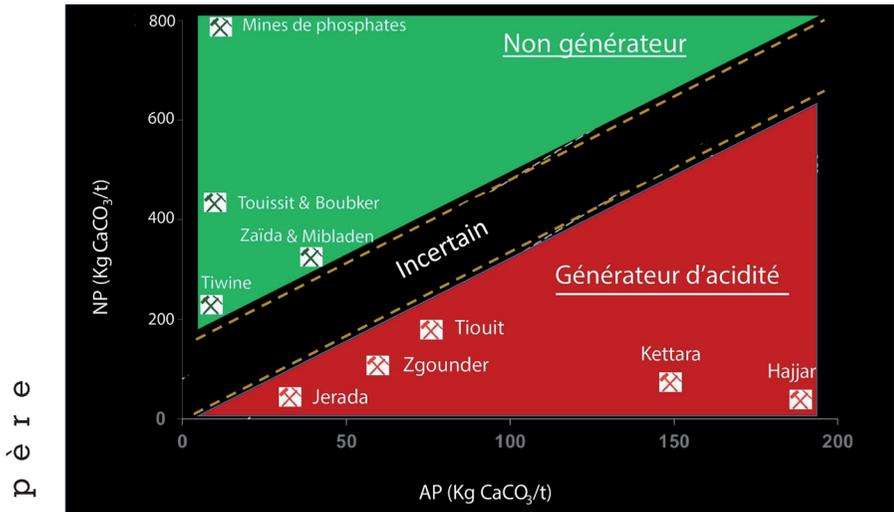


Figure 2: Classification des sites miniers étudiés selon leur potentiel générateur d'acidité.

Concernant un des sites démontrés comme générateurs de DMA, nous avons entrepris des tests de réhabilitation *in situ* à l'aide d'une couverture à base de stériles des mines de phosphates. Pour d'autres, la désulfuration environnementale combinée avec l'extraction de l'or résiduel a été testée avec succès. Quant aux sites miniers renfermant des déchets non acides, des tests visant leur réutilisation dans le secteur de la construction ont été menés. Il s'agit de l'utilisation des déchets comme additifs dans les mortiers et/ou bétons, ou comme matière première pour la fabrication de briques cuites et de céramiques.

3. Projet de réhabilitation de l'ancienne mine de Kettara à l'aide d'une couverture à base de rejets calcaires des phosphates

Entre 1964 et 1981, la mine de Kettara, située à 30 km au nord-ouest de Marrakech (figure 3), avait produit plus de 5,2 millions de tonnes de concentré de pyrrhotite afin d'alimenter le complexe chimique de Safi (Maroc Chimie, OCP) servant pour la fabrication de l'acide sulfurique.

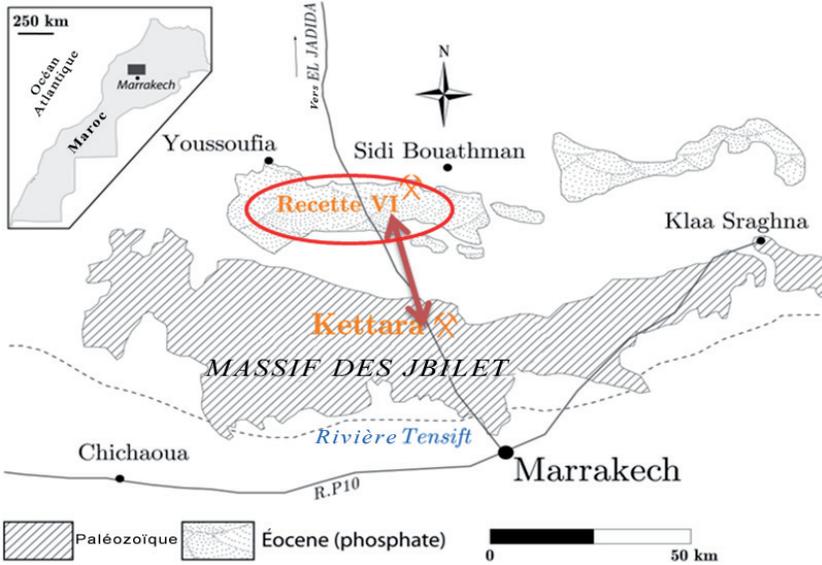


Figure 3: Carte de situation de Kettara et de la mine de phosphate Recette VI, Gantour.

À la suite des difficultés éprouvées par les organismes concernés par la production de la pyrrhotite et son utilisation à l'unité de grillage installée à Safi (Sociétés SEPYK et BRPM, et Groupe OCP), il a été décidé de fermer la mine de Kettara à partir du mois de juin 1982. Il a été estimé que durant la période de l'activité minière d'extraction de pyrrhotite (1965-1982), la mine de Kettara avait produit plus 3 Mt de stériles et de résidus miniers riches en sulfures très réactifs. Ceux-ci ont été déposés en surface sans se préoccuper de l'ampleur de l'empreinte écologique néfaste (figures 4a et 4b). L'ensemble des rejets de la mine couvre une grande superficie estimée à plus de 28 ha. Le volume total des rejets grossiers et des stériles est estimé à environ 450 000 m³ qui sont placés directement sur les schistes altérés qui forment le substratum naturel. Par ailleurs, environ 460 000 m³ de résidus fins ont été stockés dans le parc à résidus qui occupe une superficie de l'ordre de 3,4 ha (Lghoul et al. 2012a). Ces rejets sont très polluants, car leur teneur en carbonates est pratiquement nulle et leur teneur en soufre sous forme de sulfures est élevée (1,62 à 14,5%). Les sulfures présents dans les rejets miniers de Kettara sont constitués principalement de pyrrhotite et de quantités moindres de pyrite ou de traces de sphalérite et de chalcopryrite (Hakkou

et al. 2008a). Signalons que les éléments de valeur (Cu, Pb, Zn...) présentent des teneurs très faibles. Aucune récupération de ces éléments ne pourrait être envisageable actuellement.

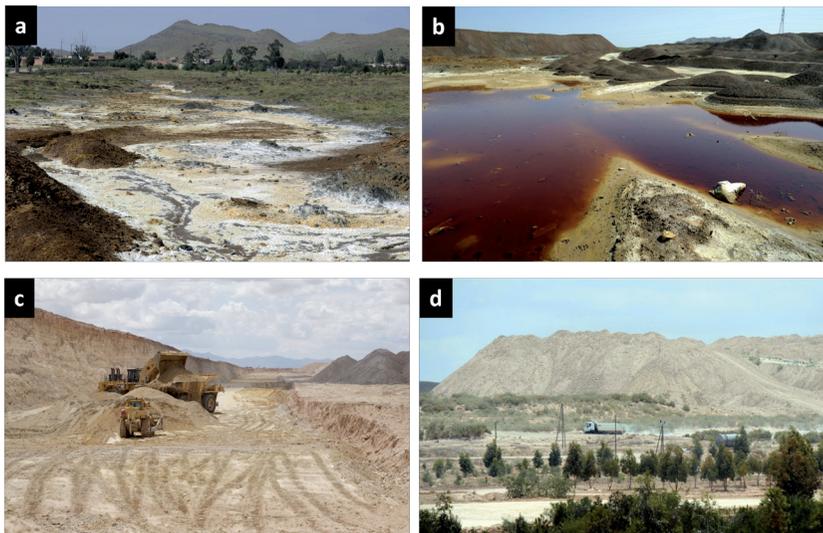


Figure 4: Photos des sites de Kettara et de Gantour: a) des précipités secondaires formés dans le réseau hydrographique, b) DMA au site de Kettara, c) l'extraction de phosphates à la mine Gantour (Recette VI, OCP), d) les stériles de phosphates riches en calcaires (mise à terribil).

Les 2 000 habitants du village de Kettara sont «encerclés» par les rejets et sont exposés quotidiennement aux poussières et à des émanations gazeuses (souffrées) issues des rejets miniers hautement réactifs. La caractérisation générale du site de Kettara a révélé qu'il s'agit d'un site très générateur de DMA et qu'il engendre une forte pollution (Hakkou et al. 2008a, 2008b). Les rejets stockés initialement à l'état humide reçoivent aussi des apports en eau par la pluie. Les phénomènes de formation du DMA s'enclenchent alors par suintement ou ruissellement de l'eau sur le lieu de stockage.

D'une manière générale, les eaux de ruissellement à Kettara (figure 4a) sont fortement sulfatées (14 200 mg/L), ont une salinité très élevée, se traduisant par une conductivité très élevée, et elles présentent un faible pH (2,9 à 4,2). En outre, les teneurs en Cu et Zn ont atteint 58 et 45 mg/L respectivement (Lghoul et al. 2012b, 2014, Ouakibi et al. 2013). Étant donné que le substratum de Kettara est composé de schistes fracturés et altérés, l'infiltration du DMA affecte fortement l'eau de la nappe phréatique située à une profondeur variant entre 10 et 20 m. Par ailleurs, l'étude d'impact sur les sols environnants a mis en évidence une véritable contamination des sols à Kettara par le Cu, le Pb, le Zn, l'As et le Fe. Les concentrations de ces éléments chimiques dans les sols dépassent largement les valeurs du fond géochimique local (Khalil et al. 2013).

En vue de la restauration du site de Kettara (où les précipitations annuelles sont d'environ 150 mm et l'évapotranspiration potentielle de 2 000 mm/an), Hakkou et al. (2009) ont suggéré l'utilisation de rejets calcaires phosphatés comme composante d'un système de recouvrement hydrogéologique de type *Store & Release* (SR). Ces rejets alcalins, générés par la mine de Gantour (Recette VI) exploitant les phosphates dans une région située non loin de la mine de Kettara (figures 4c et 4d), sont inertes à dominante carbonatée (40% CaCO_3 , 20% MgCO_3).

Des essais préliminaires en colonnes instrumentées ont été réalisés afin de déterminer si les rejets calcaires phosphatés avaient les propriétés adéquates en tant que composante principale d'un recouvrement SR (Bossé et al. 2013, 2015a, 2015b, Bossé 2014). Les résultats obtenus en laboratoire ont montré qu'une couche de rétention constituée de 1 m de puissance de rejets calcaires phosphatés peut limiter les infiltrations profondes. Sous des conditions climatiques naturelles, les infiltrations ne dépassent pas 10 cm de profondeur. Lors d'événements de précipitation extrêmes (pluviométrie maximale probable: 155 mm/j) calculée à partir des données météorologiques de Marrakech (Bossé et al. 2013), les infiltrations d'eau n'ont pas dépassé 75 cm de profondeur. Afin de mettre ce concept en essai *in situ*, quatre cellules expérimentales instrumentées de 100 m² (10 m x 10 m) ont été réalisées directement sur le parc à rejets miniers de Kettara (figure 5). Le comportement hydrogéologique de ces parcelles a été évalué sous des conditions naturelles et extrêmes (155 mm/j) pour les cellules de 100 cm d'épaisseur de rejets miniers phosphatés. Dans chacun des cas testés, les rejets miniers phosphatés ont efficacement stocké et libéré les eaux météoriques. Sous des conditions climatiques naturelles; les senseurs situés à 10 et à 25 cm de profondeur ont été affectés. Sous des conditions extrêmes, les sondes situées de 10 à 75 cm de profondeur ont également été affectées. Aucune percolation n'a été mesurée.

Les résultats de recherche et développement décrits ci-dessus permettent d'envisager le schéma de réhabilitation de l'ancienne mine de Kettara en grandeur nature (figure 6). Cela représentera une première au Maroc, qui compte de nombreux sites abandonnés générant le même type de pollution. La mise en œuvre industrielle du procédé de stabilisation des rejets miniers de Kettara consistera à mettre en place une couche de matériaux alcalins fins à base de stériles riches en calcaire issus de l'extraction des phosphates, sur les stériles et rejets grossiers de Kettara. Le matériau fin disposé en couche sur un matériau de granulométrie grossière joue le rôle de barrière capillaire qui doit bloquer l'accès de l'eau aux stériles et donc empêcher le processus d'oxydation.

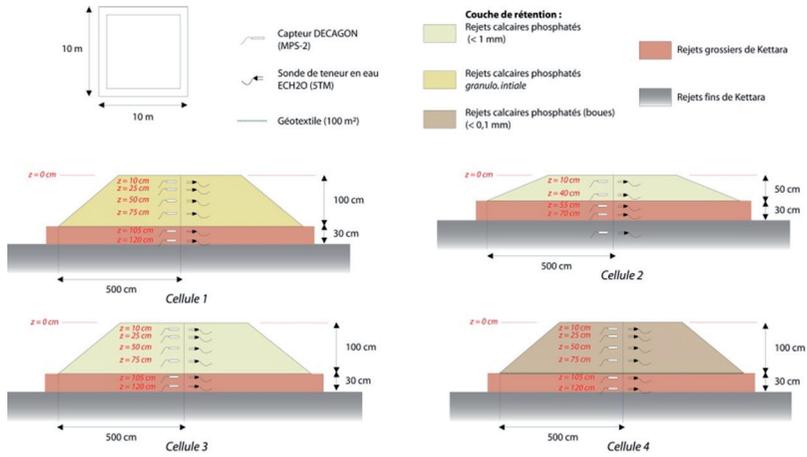


Figure 5: Schéma des cellules instrumentées installées *in situ* à Kettara (Bossé et al. 2015a).

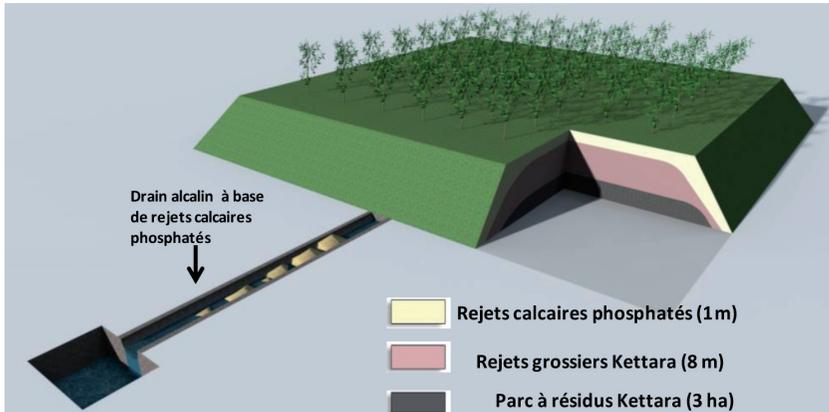


Figure 6: Configuration proposée pour la restauration du site minier de Kettara (Ouakibi et al. 2014).

Par ailleurs, en guise de solution provisoire, Ouakibi et al. (2013, 2014) ont étudié le traitement passif des effluents de DMA de la mine de Kettara à l'aide de ces mêmes stériles calcaires phosphatés issus des exploitations minières de phosphates. Cette solution pourrait être utile dans le cas où l'eau s'exfiltrerait du site une fois restauré, après des pluies anormalement importantes. Ainsi, les travaux démontrent qu'un système de collecte des eaux de DMA et un drain alcalin à base de stériles de phosphates permettraient de stabiliser le pH à des valeurs élevées et entraînerait la précipitation des métaux (Ouakibi et al. 2014).

4. Exemples de valorisation proposée pour les rejets miniers non générateurs d'acidité

Les études réalisées sur les rejets issus d'autres sites miniers au Maroc permettent de mettre en œuvre des moyens efficaces pour éliminer ou atténuer l'impact des déchets ou de les valoriser. Le domaine de la construction peut constituer une filière profitable pour absorber les rejets miniers stables chimiquement. Les motivations demeurent la protection de l'environnement et l'amélioration visuelle des sites débarrassés, mais aussi et surtout, la création d'emplois par la mise en place de nouvelles unités industrielles de fabrication de matériaux à partir des rejets miniers en tant que matière première et substitut des sables, graviers et argiles, souvent abusivement exploitées. Il a été montré que le domaine de la construction, qui connaît un grand essor au Maroc, offre la possibilité de « consommer » les rejets miniers stables chimiquement, épargnant les ressources naturelles fragiles et non renouvelables. Quatre exemples, basés sur des études accomplies par la Chaire du CRDI sont proposés ci-dessous.

4.1 Valorisation des stériles de l'ancienne mine de charbon de Jerada comme matériaux de construction innovants et durables

La mine d'antracite de Jerada, située au nord-est du Maroc à 60 km au sud de la ville d'Oujda (région de l'Oriental), a produit entre 1960 et 2001, environ 25 millions de tonnes de déchets solides (stériles) stockés en milieu urbain (figure 7). Ces stériles constituent une source de contamination pour l'environnement du fait de la localisation urbaine des terrils et de leur teneur en acidité et en sulfures. De plus, la population de Jerada est très importante, soit de l'ordre de 105 000 habitants selon le recensement de 2014. Il s'agit de l'un des sites miniers les plus problématiques au Maroc. Une exploitation artisanale clandestine dans des conditions inhumaines demeure active comme l'une des sources importantes d'emplois de cette région.



Figure 7 : Stériles miniers stockés en plein milieu urbain à Jerada.

La qualité des eaux souterraines à Jerada et ses alentours a été étudiée par Battioui et al. (2013). Le pH des eaux mesuré en différents points est généralement compris entre 7 et 8, traduisant une légère tendance alcaline des eaux souterraines de la région. Les analyses physico-chimiques de ces eaux témoignent d'une forte pollution. Cette dernière se traduit principalement par des concentrations très élevées en sulfates (700 mg/L) issus de l'altération des stériles d'exploitation de la mine d'antracite, et en nitrates (300 mg/L) provenant des explosifs utilisés lors des minages et de l'usage excessif d'engrais dans les champs agricoles environnants.

En vue de réduire les impacts négatifs des rejets miniers de Jerada, des études ont été réalisées pour évaluer la faisabilité de valorisation des rejets de la mine de charbon de Jerada dans le domaine des matériaux de construction comme granulats pour mortiers et bétons. En effet, ces rejets présentent des propriétés physiques, chimiques et minéralogiques justifiant leur réutilisation comme matériaux de construction. Des mortiers de maçonnerie et des bétons à différents pourcentages de substitution des granulats naturels par les stériles de Jerada ont été confectionnés. Leurs propriétés physiques et mécaniques ainsi que leur durabilité ont été évaluées selon les normes de construction en vigueur. Les résultats ont montré que l'augmentation du taux de substitution (> 30%) entraîne une certaine diminution des performances de ces matériaux (affaissement, temps de prise, résistance mécanique et durabilité; figures 8 et 9). La figure 8 révèle l'effet négatif du rejet sur la résistance à la flexion du mortier. Cette

décroissance de la résistance mécanique est probablement due au plus grand pouvoir d'absorption d'eau du rejet, qui va empêcher l'hydratation complète du ciment, et va gêner par la suite la formation du silicate de calcium hydraté (CSH) responsable de la résistance mécanique. Aussi, l'aspect friable du rejet par rapport au sable pourrait expliquer la réduction de la résistance mécanique des mortiers en fonction du taux de substitution.

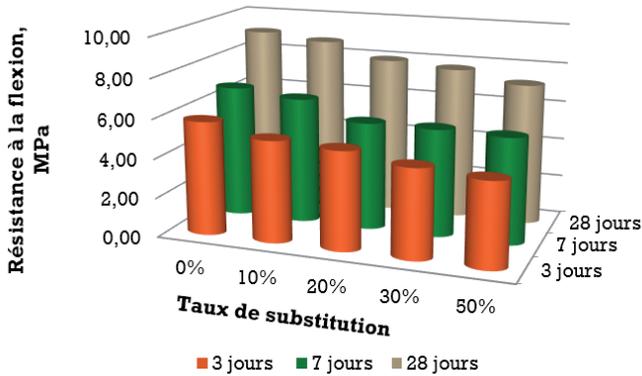


Figure 8 : Résistances à la flexion des mortiers à différents âges.

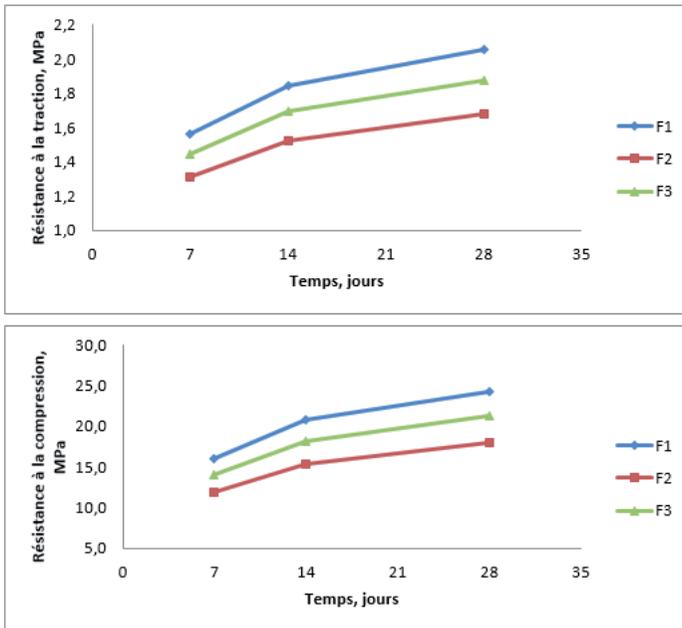


Figure 9 : Propriétés mécaniques des bétons en fonction de la durée de maturation; F1 : béton de référence utilisant 100% des granulats naturels; F2 : béton utilisant 100% des granulats du rejet; F3 : béton utilisant 100% des gravillons du rejet et 20% de la fraction sableuse substituée par le rejet lavé.

Une autre voie très prometteuse de valorisation des stériles de charbon a été entreprise et vise la récupération du charbon résiduel et la fabrication de briques cuites (Taha et al. 2014, 2015, 2016). Cette étude a montré la possibilité de production d'un charbon d'antracite de très haute qualité qui pourrait être utilisé par les stations de production d'énergie. Les rejets de ce procédé de décharbonnage ont été utilisés par la suite pour la fabrication de briques cuites. Les résultats des tests de caractérisation des propriétés technologiques et environnementales ont montré la faisabilité de fabrication de briques cuites contenant jusqu'à 100% des rejets du procédé de décharbonnage des stériles de Jerada (figure 10). Ces briques écologiques présentent le double de la résistance mécanique de la brique de référence. Le procédé de décharbonnage a permis non seulement de récupérer une grande quantité du charbon résiduel et de produire des briques écologiques à partir des stériles de Jerada, mais aussi de réduire significativement les quantités de gaz à effet de serre qui peuvent être dégagées au cours du procédé de cuisson traditionnel des briques.

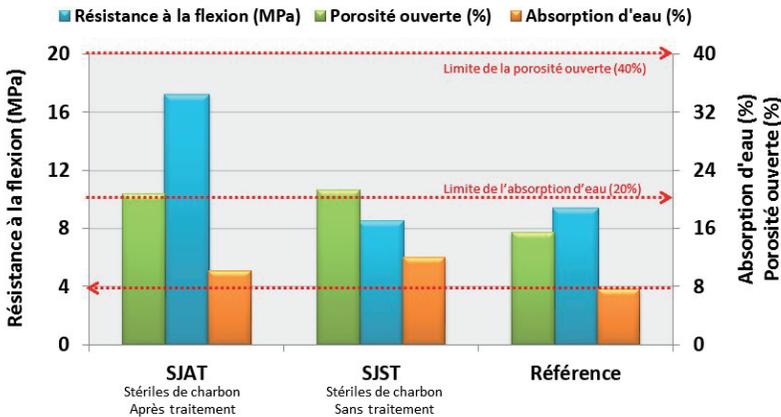


Figure 10: Quelques propriétés technologiques des briques à base de 100% des stériles de Jerada (Taha et al. 2016). Les flèches pointillées rouges représentent les limites requises par les normes de construction (ASTM C67-03 2003).

Points de repère

4.2 Évaluation du potentiel d'utilisation des rejets des mines de phosphate comme matériau de construction et céramique

Au Maroc, les exploitations minières des phosphates à ciel ouvert, génèrent chaque année des millions de tonnes de roches sans valeur économique qui sont excavées et entreposées aux abords des mines (mise à terril). Étant donné la teneur élevée en carbonates de ces stériles, ils ne présentent pas une menace de pollution des eaux comme cela a été démontré par des travaux récents (Hakkou et al. 2009, Bossé et al. 2013, Ouakibi et al. 2013, 2014). Ils constituent cependant une source de nuisance paysagère. Par ailleurs, dans les usines d'enrichissement en voie humide de phosphate brut, la fluorapatite est séparée des minéraux de la gangue associés par une

combinaison de différentes unités de traitement des minerais impliquant concassage et criblage, lavage et/ou flottation. Ce processus génère d'énormes quantités de boues et de rejets de flottation qui sont stockés dans des bassins de plusieurs dizaines d'hectares ; ce qui constitue un grand défi de gestion pour l'exploitant (figure 11). L'amoncellement de ce sous-produit constitue un problème pour leur stockage et pour la sauvegarde de l'environnement.



Figure 11: Image Google montrant la mine à ciel ouvert et les bassins de stockage de boues de lavage des phosphates à Youssoufia.

Les exploitations minières de phosphates doivent faire face à un tonnage très important de matériaux réputés inertes. Les méthodes d'entreposage en surface des déchets miniers constituent une technologie à faible coût largement utilisée. Toutefois, les parcs à résidus et les haldes à stériles sont des ouvrages difficiles à gérer et dans la majorité des cas, coûteux à restaurer. Ils occupent des superficies très importantes qui contribuent en général à l'empreinte écologique de l'exploitation. Actuellement, dans un contexte d'incitation à une gestion durable des sous-produits minéraux, la priorité la plus adéquate pour gérer efficacement les rejets miniers est d'abord de réduire leur production, puis, si possible, de recycler/réutiliser les résidus.

Plusieurs études ont été entreprises afin de développer de nouvelles techniques qui permettraient une gestion effective et durable de ces sous-produits minéraux. Vu la teneur élevée en carbonates dans les stériles et les boues de lavage des phosphates, ils ne présentent pas une menace de pollution des eaux comme démontré par des travaux récents (Hakkou et al. 2009, Bossé et al. 2013, 2015a, 2015b, Ouakibi et al. 2013, 2014). À priori, les rejets de phosphates possèdent des propriétés géotechniques prometteuses (Bossé et al. 2013) et constituent ainsi d'excellents substituts à certaines matières premières.

L'utilisation potentielle des boues de lavage phosphatées dans le domaine de la céramique, plus précisément comme matériaux de base pour la production et le façonnage des agrégats légers a été également évaluée par Loutou et al. (2013). Les résultats

préliminaires ont montré que ce déchet industriel peut être utilisé pour diverses applications céramiques telles que les agrégats légers, après avoir amélioré leur plasticité par des amendements d'argile locale et de cendres. Des céramiques à hautes caractéristiques mécaniques ont ainsi été façonnées, qui sont capables de rivaliser avec des produits commerciaux fabriqués avec des matériaux communément utilisés ou avec différents autres déchets industriels étudiés récemment

Par ailleurs, Hakkou et al. (2016) ont montré que certaines roches de la couverture des gisements de phosphates ont un grand potentiel d'utilisation dans des mosaïques en pierre, des carrelages et des revêtements de sol en pierre naturelle, du revêtement mural, etc. A titre d'exemple, le calcaire, les marnes siliceuses et le silex «nougaté» pourraient concurrencer le marbre ou la céramique (figure 12). L'extraction par une exploitation sélective de ces blocs et leur vente pourrait permettre à l'OCP de réduire considérablement le prix de revient de l'extraction des phosphates.

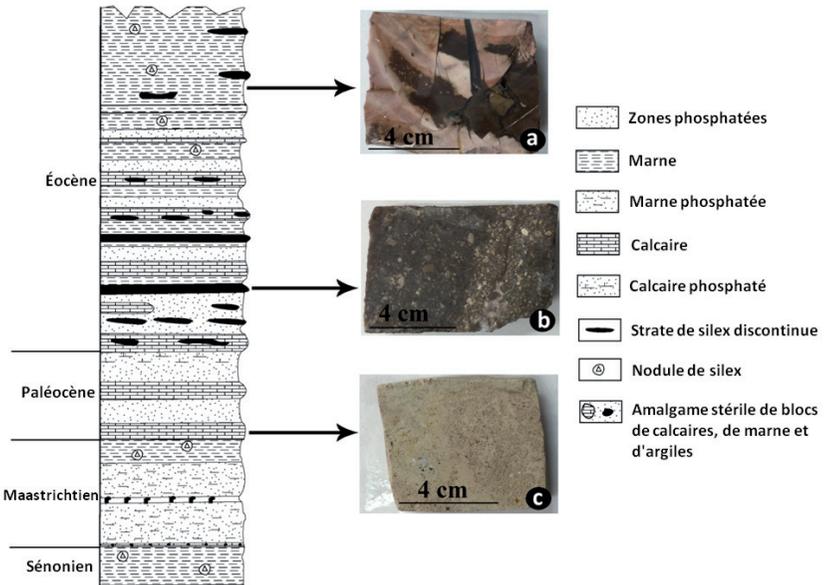


Figure 12: Illustration de certaines roches issues des exploitations minières du Gantour à Benguérir: a) marne siliceuse, b) silex «nougaté» et c) calcaire (Hakkou et al. 2016).

4.3 Valorisation du rejet minier de calamine de l'usine hydrométallurgique de Hajjar dans la brique d'argile

La consommation des ressources naturelles non renouvelables (argile, sable, etc.) dans le domaine des matériaux de construction est très importante au Maroc. Cette consommation est fatale pour les terres arables requérant des centaines de milliers d'années pour se constituer et ayant un rôle capital dans le maintien des équilibres écosystémiques.

Les rejets de l'usine hydrométallurgique de calamine de la Société Managem (site Hajjar) ont été étudiés pour leur potentiel d'utilisation comme matériaux de substitution à l'argile pour la fabrication de briques rouges, largement utilisées dans la construction au Maroc (Taha et al. 2016). Cette voie de valorisation permet de stabiliser physiquement et chimiquement les composés potentiellement contaminants à travers leur fixation dans la phase vitreuse de la brique cuite à haute température. L'objectif de cette étude était de substituer le maximum d'argile utilisée pour la fabrication des briques cuites, par des rejets de calamine traités, en respectant les normes de construction et la législation environnementale. Les résultats de caractérisation physiques ont montré que les rejets du procédé de calamine présentent une granulométrie très fine et sont constitués essentiellement de gypse, de quartz et de calcite. L'étude de faisabilité de fabrication de briques, effectuée au laboratoire (figure 13), a permis de montrer que la substitution de l'argile naturelle par les rejets de calamine influence grandement les propriétés des briques dérivées (la résistance mécanique, la porosité, l'absorption d'eau, le retrait de cuisson, etc.). Pour cette raison, il était question dans cette étude d'évaluer le comportement de ces propriétés en fonction du taux de substitution de l'argile par les rejets de calamine.



Figure 13: Briques à base des rejets de calamine, avant et après cuisson (Taha et al. 2016).

La figure 14 présente un résumé des résultats obtenus dans cette étude. Lors du procédé de cuisson des briques, plusieurs transformations physiques et minéralogiques des matières premières se produisent. Ces transformations influencent grandement les propriétés physiques et mécaniques des briques. En effet, les résultats ont montré que l'augmentation du taux de rejets de calamine dans les briques cuites provoque une

diminution de la résistance à la flexion et une augmentation de la porosité et du retrait de cuisson. Ce comportement est lié à plusieurs paramètres physiques et chimiques. L'augmentation de la porosité provoque une augmentation de l'absorption d'eau. La résistance mécanique diminue, en passant de 17 MPa pour la brique de référence à 7 MPa quand une quantité de 30 % de rejets de calamine est ajoutée. En effet, dans une tentative d'augmenter le taux de substitution et d'améliorer la résistance mécanique, du verre recyclé a été utilisé. Les résultats ont montré que l'ajout de ce dernier permet d'augmenter la résistance mécanique mais aussi la porosité et donc l'absorption d'eau des briques à base des rejets de calamine.

En prenant en considération les résultats obtenus et en se basant sur les limites fixées par les normes de construction, il est conclu que des briques cuites présentant de bonnes propriétés physiques et mécaniques peuvent être fabriquées en substituant jusqu'à 30 % de l'argile naturelle par des rejets de calamine. Les résultats des essais de lixiviation des briques à base de 30 % des rejets de calamine montrent que les polluants libérés sont au-dessous des limites fixées par la réglementation environnementale des États-Unis (US-EPA 2009).

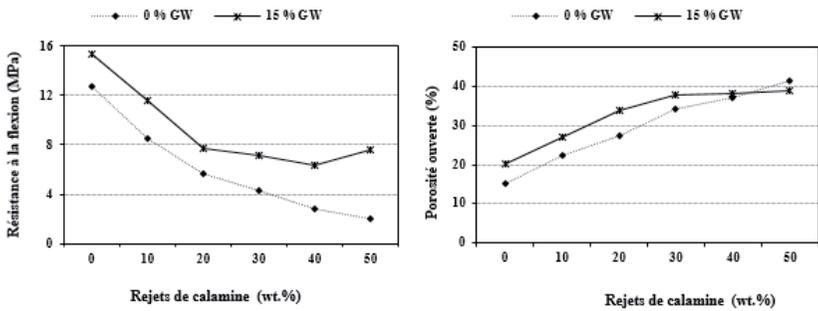


Figure 14: Évolution des propriétés physiques et mécaniques des briques cuites en fonction du taux de rejet de calamine et de verre recyclé (GW) (Taha et al. 2015a).

4.4 Valorisation des résidus miniers de la Haute-Moulouya pour la fabrication de mortier et de béton

Cette partie est largement inspirée des travaux d'Argane et al. (2014, 2015b, 2015a, 2015c, 2016). La Moulouya est l'une des régions marocaines qui a connu une intense exploitation de gisements polymétalliques depuis les années 1930. En effet, cette région renfermait d'importantes minéralisations ayant constitué les plus gros gisements de plomb et de zinc du Maroc. La mine de Zeïda (1972 - 1985) et celle de Mibladen (1938 - 1983) ont généré respectivement 16 Mt et 6 Mt à 4 % Pb de minerais (Direction des mines 1990). Alors que le district polymétallique de Touissit-Boubker a produit 75 Mt de minerais ayant une teneur moyenne de 5 % Pb et 3 % Zn. Cette intense activité minière a été accompagnée par la production d'importantes quantités de rejets miniers liquides et solides.

Après l'arrêt de l'exploitation, ces sites miniers ont été abandonnés, laissant place à des ruines (ateliers, laveries), des lacs de carrière, des empilements de stériles d'exploitation et des millions de tonnes de rejets de concentrateur, entreposés dans des parcs à résidus (figure 15). Ces derniers ont produit, sous l'influence de l'érosion hydrique et éolienne, une contamination des ressources en eau et des sols avoisinants.



Figure 15: Photos illustrant l'utilisation non contrôlée des rejets miniers de Zeïda et de Mibladen comme agrégats pour la confection de mortier.

À cette problématique vient s'ajouter un autre risque majeur, qui est celui de l'utilisation non contrôlée des rejets miniers, principalement ceux de Zeïda et de Mibladen, comme matériaux de construction prisés. En effet, ces rejets miniers riches en métaux résiduels, sont considérés par les habitants de la région comme un sable naturel et sont utilisés dans la formulation de mortier de finition et de surfacage des murs d'habitation. Cet enduit lissé traditionnel constituerait ainsi une probable source de contamination par les métaux, suivant une lixiviation potentielle ou autres voies de transmission vers l'homme. On peut aussi prévoir des risques de dégradation mécanique, liés surtout à la non-conformité de ces granulats miniers et aux différences relatives aux impératifs de qualité propres à ce type d'usage.

Les travaux récents réalisés par Argane mentionnés plus haut se donnent aussi comme objectif global d'étudier la faisabilité technique d'utilisation des rejets miniers à faible teneur en sulfures comme substitut du sable conventionnel pour la confection de mortiers d'enduit et de maçonnerie (Argane et al. 2015b, 2016). Cette évaluation a été entreprise en fonction de deux problématiques principales. La première consiste en l'estimation des risques liés à l'utilisation informelle des rejets à faible

teneur en sulfures provenant des deux sites miniers abandonnés (mines de Zeïda et de Mibladen). La deuxième problématique s'inscrit dans une vision innovatrice de considération des résidus miniers à faible teneur en sulfures comme substituts de matières premières et non comme déchets. En effet, ces résidus présentent un important potentiel de réutilisation, notamment comme matériaux de construction remplaçant les sables conventionnels.

Divers mélanges de mortiers contenant différentes proportions de résidus ont été étudiés en fonction de plusieurs paramètres comme la maniabilité, le temps de prise, la densité, l'absorption d'eau, la résistance à la compression, la mise en retrait et le séchage. La lixiviation de métaux a aussi été évaluée (figure 16). Les résultats obtenus (Argane et al. 2014, 2015a, 2015b, 2015c) ont d'abord montré que les rejets miniers utilisés dans la région de la Moulouya (Zeïda et Mibladen) sont caractérisés par la présence de concentrations importantes d'éléments traces métalliques, notamment en plomb (variant de 3 610 à 5 940 mg/kg), arsenic (20 à 80 mg/kg), chrome (20 à 190 mg/kg), cuivre (20 à 310 mg/kg) et zinc (80 à 275 mg/kg). La présence du plomb (principal contaminant dans les rejets) est liée aux deux phases minérales : la galène (PbS) et la cérusite (PbCO₃). Dans le cas d'utilisation des rejets à faible teneur en sulfures comme agrégats pour mortier, il a été observé que les principales propriétés affectant les performances des mélanges obtenus sont la concentration résiduelle en Pb-Zn et la teneur en fines dans les rejets. En effet, la consistance et la résistance à la compression des mortiers diminuent avec l'augmentation du taux de substitution des rejets à faibles teneurs en sulfures. Par ailleurs, le temps de prise, la densité et l'absorption d'eau des mortiers augmentent. Il est aussi important de noter que l'utilisation de rejets à forte teneur en Zn ($\approx 3\%$) peut inhiber totalement l'hydratation des ciments et estomper leur durcissement. La récupération du minerai de zinc par flottation est en cours d'étude en laboratoire. La mobilité des éléments traces métalliques présents dans les rejets a été globalement freinée après incorporation dans les mortiers. Toutefois, le seul élément lixivié lors d'essais en laboratoire et à des valeurs faibles est le Pb (0,077 mg/L pour Zeïda et 0,025 mg/L pour Mibladen). Les autres éléments (As, Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Mn, Ti et Zn) ont montré des valeurs très faibles ou en dessous des limites de détection.



Figure 16: Élaboration d'éprouvettes de mortiers à base de rejets miniers de Zeïda et essais de durabilité et de lixiviation.

Globalement, les résultats obtenus confirment que la réutilisation des rejets miniers à faible teneur en sulfures comme agrégats pour mortier pourrait constituer une méthode durable pour une gestion effective de ces sous-produits minéraux. Cette approche, couplée à une désulfuration environnementale, pourrait être éventuellement appliquée à tous les types de rejets (différents taux de sulfures) afin de parvenir idéalement à une boucle fermée de gestion des résidus miniers. Des essais écotoxicologiques sur les mortiers sont nécessaires afin de vérifier leur non dangerosité (Argane et al. 2014, 2015a).

5. Conclusion

Grâce au projet de la Chaire de recherche en gestion et stabilisation des rejets miniers, financé par le CRDI (Canada), plusieurs retombées ont vu le jour à la suite de la réalisation des travaux de recherches sur certains rejets miniers du Maroc. Une expérience en matière de techniques de stabilisation des déchets miniers au Maroc et de restauration durable des sites a été acquise. Elle permettra une gestion intégrée plus efficace et moins coûteuse des rejets miniers sulfurés au Maroc. L'environnement autour du site de Kettara et principalement du village avoisinant (2 000 habitants) sera sauvegardé grâce au projet de réhabilitation qui a été élaboré afin de limiter le phénomène de DMA. En tenant compte du climat semi-aride de la région, une technique innovante est proposée afin de réhabiliter le site minier de Kettara. Elle consiste en l'utilisation d'une couverture évapotranspirante à base de stériles calcaires générés par la mine de phosphates du Gantour, dans une région située non loin de Kettara. En effet, les résultats obtenus au laboratoire en colonnes instrumentées et à l'échelle pilote sur le terrain ont montré qu'une couche de rétention constituée de 1 m de hauteur de rejets calcaires phosphatés peut limiter les infiltrations profondes et limiter le DMA.

Par ailleurs, il est possible de réutiliser certains rejets miniers stables chimiquement dans des bétons, des mortiers et des briques, ce qui permettra d'éliminer des résidus stockés en surface et donnera naissance à de nouvelles filières dans l'exploitation de ces rejets comme matériaux de construction. Des économies substantielles en matière d'exploitation des ressources naturelles non renouvelables (sables, graviers, etc.) sont attendues et une réponse devrait être donnée à la demande accrue des grands chantiers de construction du Maroc (routes, autoroutes, ponts, etc.) en matières premières. Les rejets de l'ancienne mine de charbon de Jerada, ceux de l'usine de production de calamine; les boues de lavage des phosphates et les rejets du district minier de la Haute-Moulouya (Zeïda et Mibladen) possèdent des propriétés géotechniques prometteuses et constituent ainsi d'excellents substituts à d'autres matières premières non renouvelables.

Remerciements

Les auteurs remercient le CRDI, établi à Ottawa au Canada, pour la subvention accordée pour la réalisation des travaux de recherche cités dans cet article.

Références

- Argane, R., Benzaazoua, M., Bouamrane, A., et Hakkou, R. 2014. Valorisation des rejets miniers du district Pb-Zn de Touissit-Boubker (région orientale-Maroc) [en ligne]. *Déchets Sciences & Techniques*, **66**: 38–44. Disponible à : http://odel.irevues.inist.fr/dechets-sciences-techniques/docannexe/file/629/4_argane.pdf.
- Argane, R., Benzaazoua, M., Bouamrane, A., et Hakkou, R. 2015a. Cement hydration and durability of low sulfide tailings-based renders: A study in Moroccan constructions [en ligne]. *Minerals Engineering*, **76**: 97–108. doi: 10.1016/j.mineng.2014.10.022.
- Argane, R., Benzaazoua, M., Hakkou, R., et Bouamrane, A. 2015b. A comparative study on the practical use of low sulfide base-metal tailings as aggregates for rendering and masonry mortars [en ligne]. *Journal of Cleaner Production*, **112**, **Part 1**: 914–925. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.06.004.
- Argane, R., Benzaazoua, M., Hakkou, R., et Bouamrane, A. 2015c. Reuse of base-metal tailings as aggregates for rendering mortars: Assessment of immobilization performances and environmental behavior [en ligne]. *Construction and Building Materials*, **96**: 296–306. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.029.
- Argane, R., El Adnani, M., Benzaazoua, M., Bouzahzah, H., Khalil, A., Hakkou, R., et Taha, Y. 2016. Geochemical behavior and environmental risks related to the use of abandoned base-metal tailings as construction material in the Upper-Moulouya District, Morocco [en ligne]. *Environmental Science and Pollution Research International*, **23**(1): 598–611. doi: 10.1007/s11356-015-5292-y.
- ASTM C67-03. 2003. Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile. American Society for Testing and Materials International (ASTM) Committee, West Conshohocken, Pennsylvania, PA 19428, USA.
- Battioui, M., Benzaazoua, M., Hakkou, R., Bouzahzah, H., Jilali, A., et Sbaa, M. 2013. Impact of mining wastes on groundwater quality in the province of Jerada (Eastern Morocco). *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, **5**(8): 1601–1615.
- Battioui, M., Bouzahzah, H., Benzaazoua, M., Hakkou, R., et Sbaa, M. 2016. Column kinetic tests assessing geochemical behavior of mine wastes in the Jerada Coal District (Morocco) [en ligne]. *Mine Water and the Environment*, **35**(4): 497–507. doi: 10.1007/s10230-016-0395-3.

- Bossé, B. 2014. Évaluation du comportement hydrogéologique d'un recouvrement alternatif constitué de rejets calcaires phosphatés en climat semi-aride à aride [en ligne]. Thèse de doctorat, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda. Disponible à <http://depositum.uqat.ca/576/> [cité le 2 juin 2014].
- Bossé, B., Bussière, B., Hakkou, R., Maqoud, A., et Benzaazoua, M. 2013. Assessment of phosphate limestone wastes as a component of a store-and-release cover in a semiarid climate [en ligne]. *Mine Water and the Environment*, **32**(2): 152–167. doi: 10.1007/s10230-013-0225-9.
- Bossé, B., Bussière, B., Hakkou, R., Maqoud, A., et Benzaazoua, M. 2015a. Field experimental cells to assess hydrogeological behaviour of store-and-release covers made with phosphate mine waste [en ligne]. *Canadian Geotechnical Journal*, **52**(9): 1255–1269. doi: 10.1139/cgj-2014-0263.
- Bossé, B., Bussière, B., Maqoud, A., Hakkou, R., et Benzaazoua, M. 2015b. Hydrogeological behavior of a store-and-release cover: A comparison between field column tests and numerical predictions with or without hysteresis effects [en ligne]. *Mine Water and the Environment*. doi: 10.1007/s10230-015-0350-8.
- Boularbah, A., Schwartz, C., Bitton, G., et Morel, J.L. 2006. Heavy metal contamination from mining sites in south Morocco: 1. Use of a biotest to assess metal toxicity of tailings and soils [en ligne]. *Chemosphere*, **63**(5): 802–810. doi: 10.1016/j.chemosphere.2005.07.079.
- Bouzahzah, H., Benzaazoua, M., Plante, B., et Bussiere, B. 2015. A quantitative approach for the estimation of the "fizz rating" parameter in the acid-base accounting tests: A new adaptations of the Sobek test [en ligne]. *Journal of Geochemical Exploration*, **153** : 53–65. doi: 10.1016/j.gexplo.2015.03.003.
- Direction des mines. 1990. Panorama de l'industrie minière. Ministère de l'Énergie et des Mines, Royaume du Maroc.
- El Adnani, M., Plante, B., Benzaazoua, M., Hakkou, R., et Bouzahzah, H. 2015. Tailings weathering and arsenic mobility at the abandoned Zgounder silver mine, Morocco [en ligne]. *Mine Water and the Environment*: 1–17. doi: 10.1007/s10230-015-0370-4.
- El Hachimi, M.L., El Founti, L., Bouabdli, A., Saïdi, N., Fekhoui, M., et Tassé, N. 2007. Pb et As dans des eaux alcalines minières: contamination, comportement et risques (mine abandonnée de Zeïda, Maroc) [en ligne]. *Revue des sciences de l'eau*, **20**(1): 1–13. doi: 10.7202/014903ar.

- Goumih A., Adnani M.E., Hakkou R., et Benzaazoua M. 2013. Geochemical behavior of mine tailings and waste rock at the abandoned Cu–Mo–W Azegour Mine (Occidental High Atlas, Morocco) [en ligne]. *Mine Water and the Environment*, **32**(2) : 121–132. doi: 10.1007/s10230-013-0221-0.
- Hakkou, R., Benzaazoua, M., et Bussière, B. 2008a. Acid mine drainage at the abandoned Kettara Mine (Morocco): 1. Environmental characterization [en ligne]. *Mine Water and the Environment*, **27**(3) : 145–159. doi: 10.1007/s10230-008-0036-6.
- Hakkou, R., Benzaazoua, M., et Bussière, B. 2008b. Acid mine drainage at the abandoned Kettara Mine (Morocco): 2. Mine waste geochemical behavior [en ligne]. *Mine Water and the Environment*, **27**(3) : 160–170. doi: 10.1007/s10230-008-0035-7.
- Hakkou, R., Benzaazoua, M., et Bussière, B. 2009. Laboratory evaluation of the use of alkaline phosphate wastes for the control of acidic mine drainage [en ligne]. *Mine Water and the Environment*, **28**(3) : 206–218. doi: 10.1007/s10230-009-0081-9.
- Hakkou, R., Benzaazoua, M., et Bussière, B. 2016. Valorization of phosphate waste rocks and sludge from the Moroccan phosphate mines: challenges and perspectives [en ligne]. *Procedia Engineering*, **138** : 110–118. doi: 10.1016/j.proeng.2016.02.068.
- Khalil, A., Hanich, L., Bannari, A., Zouhri, L., Pourret, O., et Hakkou, R. 2013. Assessment of soil contamination around an abandoned mine in a semi-arid environment using geochemistry and geostatistics: Pre-work of geochemical process modeling with numerical models [en ligne]. *Journal of Geochemical Exploration*, **125** : 117–129. doi: 10.1016/j.gexplo.2012.11.018.
- Khalil, A., Hanich, L., Hakkou, R., et Lepage, M. 2014. GIS-based environmental database for assessing the mine pollution: A case study of an abandoned mine site in Morocco [en ligne]. *Journal of Geochemical Exploration*, **144** : 468–477. doi: 10.1016/j.gexplo.2014.03.023.
- Lawrence, R.W., et Wang, Y. 1997. Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage. *Proc. 4th International Conference on Acid Rock Drainage*, Vancouver, Canada, p. 449–464.
- Lghoul, M., Kchikach, A., Hakkou, R., Zouhri, L., Guérin, R., Bendjoudi, H., Téxido, T., Penã, J.A., Enriquè, L., Jaffal, M., et Hanich, L. 2012a. Étude géophysique et hydrogéologique du site minier abandonné de Kettara (région de Marrakech, Maroc): contribution au projet de réhabilitation [en ligne]. *Hydrological Sciences Journal*, **57**(2) : 370–381. doi: 10.1080/02626667.2011.637495.

- Lghoul, M., Maqsoud, A., Hakkou, R., et Kchikach, A. 2014. Hydrogeochemical behavior around the abandoned Kettara mine site, Morocco [en ligne]. *Journal of Geochemical Exploration*, **144**: 456–467. doi: 10.1016/j.gexplo.2013.12.003.
- Lghoul, M., Teixidó, T., Peña, J.A., Hakkou, R., Kchikach, A., Guérin, R., Jaffal, M., et Zouhri, L. 2012b. Electrical and seismic tomography used to image the structure of a tailings pond at the abandoned Kettara mine, Morocco [en ligne]. *Mine Water and the Environment*, **31**(1): 53–61. doi: 10.1007/s10230-012-0172-x.
- Loutou, M., Hajjaji, M., Mansori, M., Favotto, C., et Hakkou, R. 2013. Phosphate sludge : thermal transformation and use as lightweight aggregate material [en ligne]. *Journal of Environmental Management*, **130**: 354–360. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.09.004.
- Ouakibi, O., Hakkou, R., et Benzaazoua, M. 2014. Phosphate carbonated wastes used as drains for acidic mine drainage passive treatment [en ligne]. *Procedia Engineering*, **83**: 407–414. doi: 10.1016/j.proeng.2014.09.049.
- Ouakibi, O., Loqman, S., Hakkou, R., et Benzaazoua, M. 2013. The potential use of phosphatic limestone wastes in the passive treatment of AMD: A laboratory study [en ligne]. *Mine Water and the Environment*, **32**(4): 266–277. doi: 10.1007/s10230-013-0226-8.
- Smouni, A., Ater, M., Auguy, F., Laplaze, L., Mzibri, M.E., Berhada, F., Filali-Maltouf, A., et Doumas, P. 2010. Évaluation de la contamination par les éléments traces métalliques dans une zone minière du Maroc oriental [en ligne]. *Agriculture*, (4): 273–279. doi: 10.1684/agr.2010.0413.
- Taha, Y., Adnani, M., Hakkou, R., et Mansori, M. 2014. Valorisation du rejet minier de calamine de l'usine hydrométallurgique Hajjar dans la brique d'argile. Conférence internationale *Régler le cas des rejets miniers à travers de meilleures pratiques de gestion*, Marrakech, Maroc, 5 au 7 mai 2014.
- Taha, Y., Benzaazoua, M., Hakkou, R., et Mansori, M. 2015. Reuse of treated calamine process mine tailings and glass wastes in fired bricks making [en ligne]. Wascon, Conference on Resource Efficiency in Construction, Santander, Spain, 16 juin 2015. doi: 10.13140/RG.2.1.2830.3524.
- Taha, Y., Benzaazoua, M., Hakkou, R., et Mansori, M. 2016. Natural clay substitution by calamine processing wastes to manufacture fired bricks [en ligne]. *Journal of Cleaner Production*, **135**: 847–858. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.200.
- US-EPA 2009. Hazardous Waste Characteristics: A User-Friendly Reference Document [en ligne]. US Environmental Protection Agency. Disponible à <https://www.epa.gov/hw/user-friendly-reference-document-hazardous-waste-characteristics>.

Gestion durable des ressources minérales en Wallonie (Belgique) : singularités et pistes de réflexion

Johan YANS

Résumé

Le présent article rappelle, si besoin en est encore, que le caractère non renouvelable des ressources minérales est une préoccupation déjà assez ancienne chez les géologues. L'article se focalise ensuite sur le cas singulier des ressources du sous-sol wallon. En Belgique, le sous-sol est géré par les régions (Bruxelles-Capitale, Flandre et Wallonie). La Wallonie possède un sous-sol assez diversifié (surtout composé de roches sédimentaires) et un riche passé carrier et minier. Aujourd'hui, on y exploite exclusivement des matières premières minérales (calcaires, dolomies, craies, grès, argiles, porphyres, sables), utilisées à 80% sur le territoire belge. Le secteur carrier wallon se singularise par de nombreux sites, de taille assez modeste, qui cohabitent «naturellement» avec d'autres utilisations du (sous)-sol (développement urbain, agriculture, sylviculture, conservation de zones naturelles, exploitation des eaux souterraines...). Il est donc essentiel pour tous (carriers compris) d'intégrer au mieux les activités extractives wallonnes dans les paysages environnementaux, sociaux et économiques. Dès 1995, une brochure portant sur le réaménagement biologique des carrières après exploitation a été publiée par l'administration wallonne. Les carriers veillent aujourd'hui à un aménagement en cours d'exploitation. Pour l'avenir, fournir des arguments scientifiques transdisciplinaires, fondés sur des bases monodisciplinaires solides, est requis pour envisager une stratégie durable, raisonnée et crédible. Le public et les décideurs politiques sont clairement demandeurs. C'est dans ce cadre que, depuis une dizaine d'années, les industriels, l'administration et les centres de recherche wallons sensibilisent citoyens et décideurs politiques. Pour ce faire, à court terme, le Service géologique wallon, dont les missions demeurent encore floues, devrait être renforcé.

1. Introduction. Le caractère non renouvelable des ressources du sous-sol

De tous temps, l'homme a exploité les ressources du sous-sol : âges de la pierre (paléo- méso- néolithique), du cuivre (chalcolithique), du bronze, du fer (sidérolithique), constituent autant de périodes définies par des minerais, des techniques et des produits. Les Romains démontrèrent une connaissance approfondie des ressources métalliques de leur Empire. Durant la première partie du XX^e siècle, l'activité minière a répondu à une large diversification des demandes. On a alors exploité, y compris en Wallonie (Belgique), des puits, mines et carrières de taille plutôt modeste, sans vraiment prêter attention aux impacts environnementaux et sociaux.

Aujourd'hui, la très grande majorité des objets utilisés proviennent (in)directement de matières premières issues du sous-sol, y compris dans le domaine du développement durable : des minerais de lithium (Li) pour les batteries, du néodyme (Nd) pour les aimants des éoliennes, du sélénium (Se) et de l'indium (In) pour les panneaux photovoltaïques, du terbium (Tb) pour les tubes cathodiques, pour donner quelques exemples. À ces éléments, il faut ajouter de nombreux minéraux industriels : sable pour le verre, matières carbonées pour les résines, calcaires et granulats pour le ciment et le béton par exemple. De plus, l'extraction et le traitement des ressources du sous-sol requièrent environ 10% de la consommation mondiale d'énergie (US Energy Information Administration 2013) en majorité produite par le charbon, la lignite, le pétrole, le gaz et/ou l'uranium, autant de matières premières issues du sous-sol. En cette période de transition, et dans un contexte de population mondiale et d'urbanisation croissantes, l'extraction minière est donc fort sollicitée, y compris pour les énergies et les produits renouvelables.

On peut dire d'une ressource qu'elle est renouvelable quand son renouvellement au cours du temps par les processus naturels équilibre au moins sa consommation par l'homme (Goffé 2013). Toutes les matières géologiques sont non renouvelables sur notre planète : la vitesse de (re)constitution (= genèse des gisements, en milliers/millions d'années) est évidemment bien inférieure au taux de consommation. C'est le cas des ressources énergétiques dites fossiles (charbon, gaz et huiles) mais aussi de toutes les ressources minérales (dont celles mentionnées ci-dessus). Le caractère non renouvelable d'une ressource est la résultante de plusieurs paramètres, incluant bien entendu la quantité des réserves sur Terre, mais également l'accès à ces réserves pour un coût déterminé, l'impact environnemental que l'exploitation génère, voire la perception du minerai par la société civile. Ainsi, le charbon évoque en Wallonie des sentiments historiques souvent négatifs, un sujet qui sera discuté dans la partie 3.

Or, la conscientisation publique du caractère non renouvelable des ressources géologiques sur notre planète reste (volontairement ou non) limitée. Largement débattue en ce qui concerne le pétrole, la discussion demeure encore fragmentaire pour les métaux et les minéraux industriels. La demande est pourtant en hausse, surtout dans une perspective de réduction de la consommation des hydrocarbures qui conduirait à une augmentation significative de l'extraction minière (Vidal et al. 2013). Déjà, au cours des dix dernières années, la production de minerai de fer a connu une croissance

de 180 % à l'échelle mondiale, celle du cobalt de 165 %, celle du lithium de 125 % et celle du charbon de 44 % (Fabrégat 2012). Au début du XXI^e siècle, la valeur des géo-ressources a considérablement augmenté. Le cours du cuivre, par exemple, est passé d'environ 1 500 EUR/tonne en 2000 à plus de 7 300 EUR/tonne début 2011, pour se maintenir à environ 4 400 EUR/tonne fin septembre 2016. Le Programme des Nations Unies pour l'environnement estime qu'un scénario *business-as-usual* conduirait, d'ici 2050, à un triplement de l'extraction des ressources minérales globales, par définition non renouvelables sur notre planète...

L'homme a-t-il prêté attention aux causes/conséquences durables (environnementales, sociales, politiques et économiques) de ses exploitations minérales? Plusieurs secteurs, souvent acteurs, sembleraient tarder à prendre conscience de l'importance du caractère non renouvelable des ressources géologiques. Bonneuil et Fressoz (2013) suggèrent au contraire que le dérèglement de notre environnement se serait fait en toute connaissance de cause! Dans les milieux strictement géologiques, la prise de conscience de ce problème est en effet déjà assez ancienne. Ainsi, dès 1980, lors d'un colloque international tenu à Paris, les géologues reprenaient déjà des citations de 1948.

Aujourd'hui [lire en 1948], la terre nous apparaît petite, elle n'est plus qu'un espace limité dont les ressources sont elles-mêmes limitées. En ce domaine, comme en bien d'autres, l'humanité se trouve donc à un véritable tournant de son histoire. Souhaitons donc que les hommes s'orientent le plus rapidement possible vers une utilisation plus rationnelle, plus pacifique et moins égoïste des matières premières dont la nature les a pourvus.

Et Guillemin (1980) de poursuivre, dans le prologue de ce colloque :

Il y a plus de dix ans [lire en 1970], je faisais partie de quelques-uns qui ont pensé que notre civilisation industrielle allait affronter une crise qui devait en changer les paramètres, basés sur une course absurde à la croissance, dans le gaspillage des ressources naturelles. [...] Je crois donc qu'à présent, les responsables politiques sont conscients de la gravité de cette crise, et parfois, hélas, des opportunités qu'elle peut offrir; mais heureusement, ce colloque est là pour le prouver, nombre de géologues conscients de l'utilité humaine de leur métier, plaidaient déjà par leurs travaux, pour une gestion plus scientifique et plus juste des ressources du sous-sol.

Ces quelques phrases pourraient constituer l'une des conclusions du colloque *L'industrie minière et le développement durable: une perspective internationale francophone*, tenu en 2015!

Il est donc nécessaire d'accélérer l'inévitable et souhaitable transition vers une gestion davantage durable des ressources du sous-sol, par définition non renouvelables, et qui, à l'instar de l'eau (une autre ressource géologique), doivent être considérées comme des biens communs mondiaux. Pour ce faire, il faudra s'appuyer sur une approche holistique, en considérant notamment les pôles environnementaux, politiques, sociaux, sociétaux, économiques et géologiques de la problématique. Le présent article

se concentre sur le cas, assez singulier, des ressources minérales en Wallonie (Belgique).

2. L'extraction des ressources du sous-sol en Wallonie: historique et état de la question

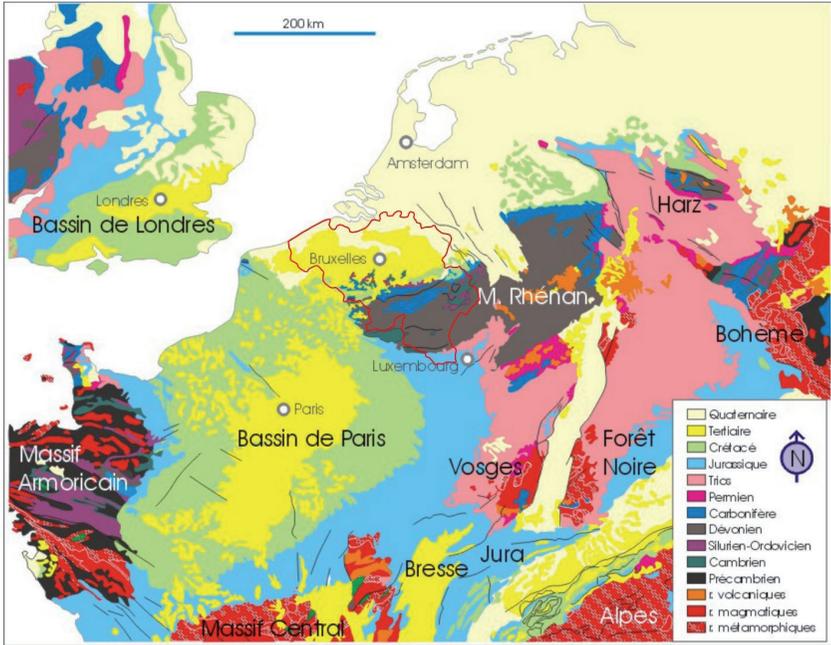


Figure 1: Carte géologique simplifiée de l'Europe de l'Ouest; le trait rouge délimite la Belgique; modifiée d'après Yans et DeKoninck (2016).

Le sous-sol wallon comprend des roches de tous les systèmes géologiques et une relativement grande diversité de roches sédimentaires (figure 2). On y retrouve assez peu de roches magmatiques, même si l'intérêt des porphyres est à souligner dans l'industrie extractive wallonne. La Wallonie demeure l'une des régions de référence dans l'histoire de la géologie: plusieurs concepts et périodes géologiques (Frasnien, Famennien, Tournaisien, Viséen,...) y ont été définis. On doit par exemple à Dumont (1832) la subdivision du Carbonifère inférieur entre les Calcaires de Tournai et de Visé, deux villes wallonnes. En outre, les termes locaux suivants sont encore utilisés: Montien, Warnantien, Livien, Molinacien, Namurien, Ivorien, Hastarien, Dinantien, Couvinien, Burnotien, Gedinnien, Salmien.

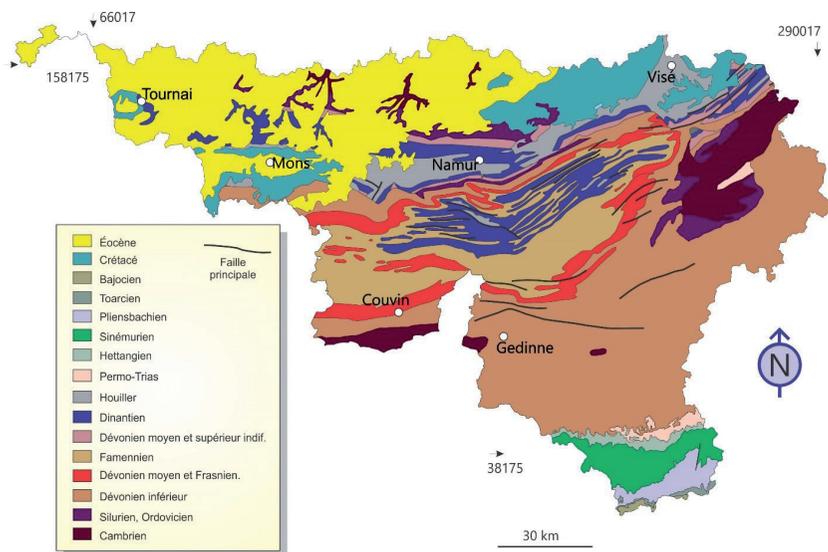


Figure 2: Carte géologique simplifiée de la Wallonie, reprenant la localisation de plusieurs villes wallonnes

La Wallonie s'appuie sur un très riche passé minier: silex taillés, tertres d'oppaillage gaulois, minerais de fer, phosphates, «marbres» rouges/gris/bleus/noirs, argiles, minerais de Zn(-Pb) de type calamines et charbonnages sont autant de ressources du sous-sol exploitées à travers le temps. Par exemple, les marbres (au sens carrié du terme) noirs wallons, du Frasnien et du Viséen, ont alimenté de très nombreuses constructions comme le forum de Bavay (France) ou le château de Versailles; ils constituent également plusieurs mobiliers célèbres (tombe de Philippe le Hardi à Dijon; Groessens 2002). Les gisements zincifères générés par l'oxydation de sulfures sont appelés calamines en référence au village de La Calamine, dans l'est de la Wallonie (Coppola et al. 2008).

Depuis les lois de 1980 et 1993, la gestion du sous-sol en Belgique est une compétence strictement régionale (3 régions: Bruxelles-Capitale, Flandre, Wallonie). Chaque région gère, de façon autonome, ses politiques en la matière (études d'incidence, permis, conditions d'octroi, contrôles...). En revanche, le secteur conserve une certaine structure nationale, avec la Fedix qui réunit, à l'échelle belge, une grande partie des industriels concernés par l'extraction et la transformation de roches non combustibles. La lithostratigraphie de la Belgique, au sens scientifique du terme, est évidemment dépourvue de frontières linguistiques: une synthèse lithostratigraphique de la Belgique a été publiée par Bultynck et Dejonghe (2001) et actualisée par Dejonghe (2006), ce qui n'exclut pas des ajustements/discussions lors de la cartographie régionale de chaque région¹.

1. Pour la Wallonie : <http://geologie.wallonie.be/site/geoprod/geologie>.

De nos jours, seules des matières de type *raw materials* (ou matières premières minérales) sont extraites du sous-sol wallon : citons, sans souci d'exhaustivité, des argiles pour les briqueteries, tuileries et cimenteries, de la craie pour le ciment et la chaux, du porphyre pour le ballast, du calcaire pour la chaux, de la dolomie pour la chaux magnésienne, du sable, des pierres ornementales (pierre bleue belge, par exemple). Ces matières contribuent d'une façon substantielle à l'économie wallonne et forment la base d'un potentiel technologique innovant, générateur d'emplois diversement qualifiés. L'essentiel du tonnage extrait du sous-sol wallon concerne le granulat : en 2014, on estimait la production de granulat en Belgique à près de 65,4 millions de tonnes, contre 65,8 millions de tonnes en 2013 (Fediex 2014). Le secteur de l'extraction wallonne concernerait environ 3 000 emplois directs, auxquels il faut ajouter les emplois indirects, lesquels sont estimés à 16 000 postes pour le transport, la manutention, l'entretien et la réparation des équipements de carrière, selon Poskin (2010). Environ 80 % de la production wallonne est écoulée sur le territoire belge, ce qui limite les transports de matières et les nuisances associées.

L'extraction des ressources du sous-sol wallon est singulière et, malgré de relativement faibles tonnages, on recense un assez grand nombre de sites carriers : plus de 160 sites inscrits au plan de secteur en zone d'extraction (dont 38 sites intermittents) sur le territoire wallon de 16 844 km², soit environ 1 site tous les 100 km² (chaque carré de 10 km/10 km contient donc en moyenne une carrière...). À l'heure actuelle, la zone d'extraction porte sur une superficie totale de 14 691 hectares, soit moins de 1 % du territoire wallon. Les sites sont exploités par de grands groupes belges et internationaux (Lhoist, Carmeuse, Heidelbergcement, Holcim, Sibelco, etc.) ou par des entreprises familiales qui tentent de rester compétitives. Il n'existe plus de mine en Wallonie. Le nombre de carrières souterraines a connu une diminution draconienne : de plus de 400 en 1913 à une seule actuellement, soit la carrière de marbre noir de Mazy (Remacle 2005).

3. Perception du secteur carrier par le citoyen wallon

Mis à part des riverains (directs) des carrières, les extractions wallonnes demeurent assez méconnues du public et des décideurs politiques wallons. Et lorsqu'elles sont connues, les carrières sont perçues, en Wallonie comme partout ailleurs, comme des lieux qui « polluent », « détruisent le paysage », « augmentent le charroi », « alimentent le grand capital », « tuent la flore et la faune », « représentent des dangers environnementaux et sociaux permanents », exploitant des ressources naturelles par essence non renouvelables et donc en apparente contradiction avec le développement durable (Yans 2015). À ces perceptions, mondiales, s'ajoutent des sentiments négatifs davantage locaux, liés à l'histoire de la Wallonie. Les reconversions difficiles, tant au niveau social qu'environnemental, dans les charbonnages (le dernier charbonnage wallon a fermé en 1984) et la sidérurgie, tous deux associés à leurs débuts aux matières premières locales, demeurent dans les esprits et contribuent à une image négative du secteur minier dans l'opinion publique wallonne (« gueules noires », immigrations plus ou moins réussies,

dramas sociaux, conquêtes ouvrières parfois de type *Germinal*...). Parmi les causes de ces reconversions difficiles figure un relatif manque de (pré)vision industrielle liée aux matières premières du sous-sol wallon, notamment associé à des lacunes quant à l'approche intégrée de la problématique.

4. L'avenir de l'extraction des ressources du sous-sol en Wallonie, dans un contexte de développement durable

Dans un contexte de développement durable, l'avenir de l'extraction des ressources du sous-sol wallon passera par un renforcement de plusieurs aspects, liés à différents pôles du développement durable. Quelques-uns sont développés ci-dessous.

4.1 Pôle environnemental : favoriser la biodiversité en carrière pendant et après l'exploitation

La biodiversité des carrières wallonnes est une préoccupation déjà ancienne. Dès 1995, le Ministère de la Région wallonne publiait une brochure intitulée *Réaménagement biologique des carrières après exploitation* (Coppée et al. 1995; figure 3a). Plusieurs anciens sites carriers, aujourd'hui réhabilités (figure 3d), sont inscrits au plan de secteur en Zone humide d'intérêt biologique (figure 3c). Un recensement biologique des carrières wallonnes a été réalisé par Remacle (2005). Plus récemment, des plans d'aménagement des carrières, en cours d'exploitation, ont été réalisés par plusieurs sociétés extractives (figure 3b). La carrière offre en effet une combinaison de milieux souvent différents, indispensables à l'établissement de nombreuses espèces végétales et animales². Des efforts sont ainsi consentis pour promouvoir la biodiversité des sites d'exploitation³.

4.2 Pôle social : améliorer, encore et encore, la sécurité des travailleurs

Dans la sphère sociale, la sécurité des travailleurs wallons est un sujet peu médiatisé. Des normes de sécurité de plus en plus strictes, combinées à l'intensification de la sensibilisation du personnel à la sécurité, portent leurs fruits : en six années, la fréquence d'accident a chuté de plus de 60% et le taux de gravité de près de 45% (Fedieux 2014).

2. <http://www.cbr.be/fr/publications>, consulté le 29-09-2015.

3. <http://www.quarrylifeward.com/> (et brochures associées), consulté le 25-09-2015.



Figure 3: a) Première page de la brochure *Réaménagement biologique des carrières après exploitation*. Cette brochure, datant de 1995, témoigne que le sujet est une préoccupation déjà assez ancienne en région wallonne. b) Étude écologique, en cours d'exploitation, de la carrière de kaolin HeidelbergCement de Transinne (commune de Libin, Groupe HeidelbergCement, en collaboration avec D. Colart, conseiller en environnement indépendant). c) Panneau indiquant une zone humide d'intérêt biologique (site de Gembes). d) Réaménagement en zone humide d'intérêt biologique du site de Gembes.

P o i n t s d e r e p è r e

4.3 Pôle économique : vers un retour à des carrières locales ?

La gestion durable des carrières s'appréhende à l'échelle globale et non régionale. L'Europe est clairement dépendante des ressources minérales extraites hors de son territoire. Au sein même du territoire, les transports de matières premières sont significatifs. Ce constat, couplé aux coûts croissants des transports de matières premières (coûts «réels» et environnementaux), conduirait à un retour vers des exploitations davantage locales, à terme. À l'échelle globale, la carrière «locale» serait-elle, tout bien considéré, un chaînon insoupçonné de la transition vers une voie plus durable? Dans ce cas, il est probable que les carrières wallonnes doivent poursuivre leur intégration dans leur environnement, nonobstant le syndrome du «Pas dans ma cour»

(NIMBY, pour *Not in my backyard*), très présent en Europe. En outre, afin de faciliter la cohabitation avec l'urbanisation croissante, il est certain que les carrières wallonnes devront s'approfondir, au risque de rencontrer les aquifères et devoir rabattre la nappe. Dès lors, une saine gestion des roches et de l'eau sera à garantir, notamment en proposant un indice d'interaction entre l'activité extractive et les captages environnants (Collier et al. 2015).

4.4 Pôle politique : informer le décideur

Favoriser le recyclage (la Belgique est un leader mondial en ce domaine) et l'utilisation des stériles, revoir les besoins, mieux gérer la demande et la durée de vie des produits sont autant de pistes nécessaires pour poursuivre l'extraction des ressources du sous-sol dans un constant souci de développement durable (Yans 2013). En sus et surtout, la gestion durable des ressources géologiques nécessite une constante information transdisciplinaire de la problématique, notamment à l'attention de l'opinion publique et des décideurs.

En ce domaine, la transdisciplinarité doit s'appuyer sur des bases monodisciplinaires robustes, tout en restant accessible aux exploitants, riverains, scientifiques, décideurs, administratifs et autres citoyens. C'est dans cette optique que se sont tenus les colloques *Which quarry for tomorrow* en 2012 à Bruxelles et *Gas shales in Belgium?* en 2013 à Namur (Yans et al. 2013). De tels événements, accessibles à tous, s'articulent autour d'intervenants belges et provenant de pays adjacents soumis, en cette matière, à des défis similaires à ceux de la Wallonie. Ces colloques s'avèrent constructifs en vue d'évaluer la pertinence de l'exploitation des matières premières du sous-sol. Ainsi, le colloque *Gas shales in Belgium?* conclut (Yans et al. 2013): *"the gas potential in Belgium is under-explored, knowledge dispersed, reporting to public and authorities unorganised, policy undecided. The opinions emitted so far and widely published in the media are premature: the first molecule of shale gas in Belgium is yet to find"*. Comment dès lors prendre des décisions raisonnées, dans un domaine essentiel pour l'avenir énergétique et environnemental de la Wallonie, en ne connaissant pas un minimum la qualité, la quantité et la géométrie de la substance utile? Dans la foulée, des études géologiques détaillées des roches concernées ont été publiées (Nyhuis et al. 2014) et jettent les premiers jalons en vue d'estimer le réel potentiel en gaz de schiste de la Wallonie.

À ce propos, le cas de la Wallonie n'est pas unique en Europe. Le citoyen européen ne décèle que peu de signe vers une carence (pénurie ou incurie) des ressources du sous-sol, même si certains médias se focalisent depuis quelques mois/années sur les «minerais de sang», davantage sans doute pour les aspects sociaux qu'économiques. La seule manifestation médiatique significative demeure l'impact sur le climat des gaz à effet de serre, associés aux combustibles fossiles. Ni la rareté ni les prix des minerais et des produits fabriqués à partir de ces matières ne traduisent un manque réel. Depuis quelques mois, le prix des combustibles fossiles baisse, mettant parfois en doute les récentes prévisions, un peu déraisonnables sans doute, de «spécialistes» dans le domaine. Il est du devoir des universités, centres de recherche, administrations concernées et médias, de rassembler les acteurs et d'instruire en

dressant un spectre complet des paramètres, de façon strictement factuelle, de la même manière que les décisions relatives à la biodiversité ou au climat doivent s'appuyer sur des bases biologiques ou climatologiques robustes. Le citoyen est demandeur, le décideur politique aussi. Pour prendre des décisions aussi crédibles (et «rentables politiquement») que durables, il est nécessaire de s'appuyer sur des arguments transdisciplinaires raisonnés et des bases monodisciplinaires solides (Yans 2015).

4.5 Intégration des pôles: nécessité d'une parfaite gestion de l'espace wallon

Avec environ un site d'extraction tous les 100 km², il est évident que la gestion des ressources du sous-sol wallon doit parfaitement s'intégrer dans les paysages environnementaux, économiques et sociaux de la région. Les exploitations doivent intégrer plusieurs contraintes, dont l'urbanisation croissante, la préservation des zones naturelles et des ressources en eau.

L'exemple des quatre carrières sises aux environs de Marche-les-Dames, exploitées par le Groupe Lhoist, est représentatif de la problématique en Wallonie (figure 4). Les carrières Dolomeuse, Wartet et Marda exploitent les dolomies du Groupe de Namur (Mississippien), pour la fabrication de chaux magnésienne. La carrière de Marchempré exploite les calcaires des formations des Grands Malades et de Lives. Les quatre carrières et les sites de transformation de la roche extraite sont implantés à proximité immédiate des habitations, sur deux communes distinctes (Namur – capitale de la Wallonie et Andenne) avec lesquelles dialoguer. Le site est bordé par la Meuse (ce qui a des impacts sur l'exhaure) et entouré de zones urbanisables et agricoles. Le site utilise la route (autoroute de Wallonie à proximité), le chemin de fer et le fleuve Meuse pour ses transports. Une excellente intégration des exploitations/utilisations, sur une superficie très réduite, est donc requise. Le site extrait environ 5 millions de tonnes de matière, ce qui en fait la carrière de dolomie avec le plus important tonnage d'Europe.

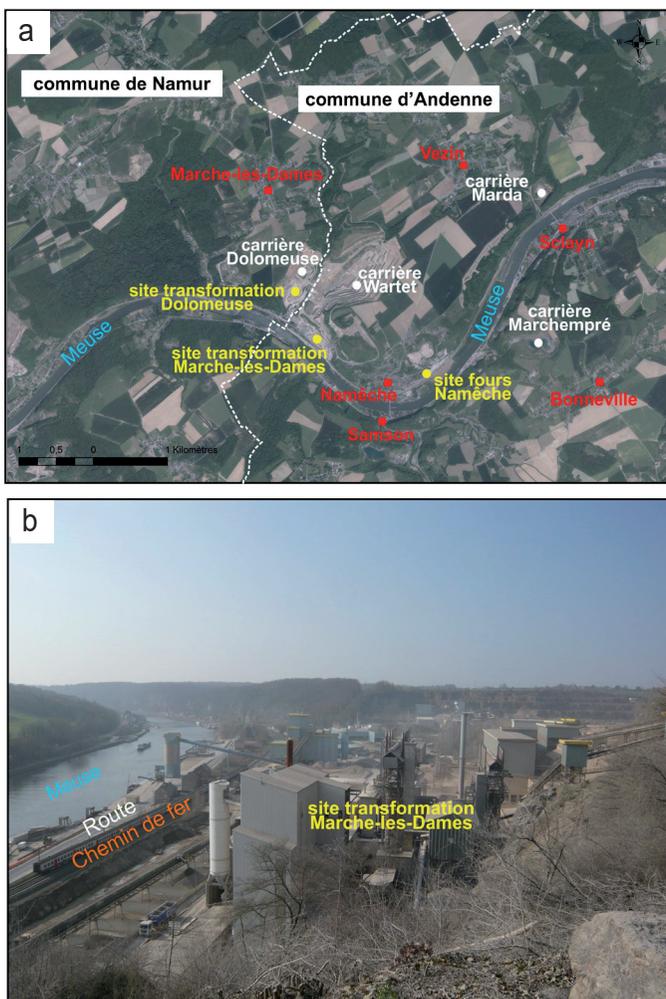


Figure 4: a) Vue aérienne des carrières aux environs de Marche-les-Dames (Groupe Lhoist). On remarquera que les carrières sont intégrées dans le tissu urbain et agricole, à proximité immédiate de la Meuse. b) Vue du site de transformation de dolomie de Marche-les-Dames (Groupe Lhoist). Les transports sont assurés par la route, le chemin de fer et la Meuse, directement accessibles.

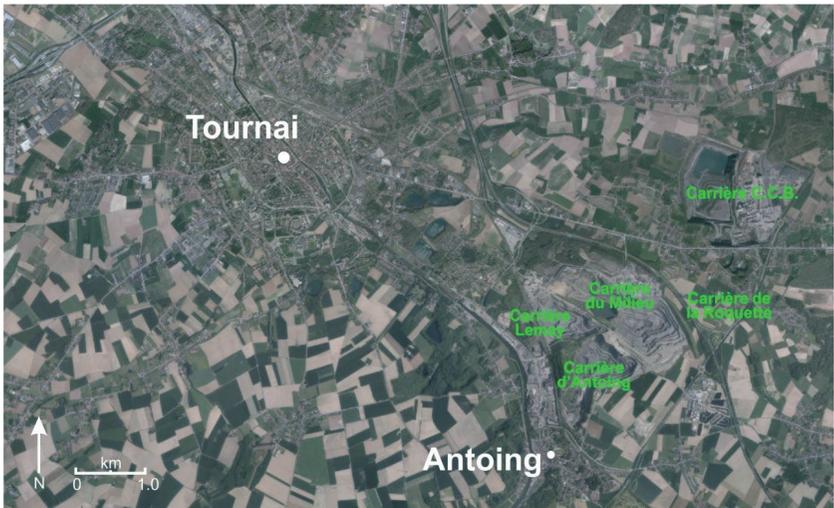
Un autre exemple est offert par la carrière de kaolin de Transinne, où l'intégration avec la gestion forestière/paysagère est manifeste (figure 5).



Commune de Libin; Google Earth.

Figure 5: Vue satellitaire de la carrière de kaolin de Transinne.

Un dernier exemple montre les carrières de calcaire à proximité immédiate de la ville de Tournai (figure 6), le lieu du stratotype historique du Tournaisien.



NAVTEQ 2014, SPW, orthoplans 2013, portail Région wallonne.

Figure 6: Vue satellitaire des sites carriers exploités entre Tournai et Antoing.

5. Conclusion

L'administration publique wallonne, en charge des dossiers de permis et/ou des impacts des ressources du sous-sol wallon, est parfois très démunie: la connaissance des occurrences, gîtes et gisements du sous-sol wallon demeure imparfaite, voire fragmentaire. Manque de personnel en charge de ces dossiers, dispersion de ce personnel dans différentes administrations (Direction générale opérationnelle), dispersion des données et manque de synthèse scientifique publiée et accessible ralentissent le fonctionnement optimal des dossiers. Des cas de dossiers nécessitant plus d'une décennie pour une instruction ne sont pas rares. Comment, dans ces conditions, valoriser le secteur, alors que les perspectives industrielles sont évidemment gérées dans un délai bien différent ? L'adoption par le parlement wallon du Code de Développement Territorial (CoDT) en avril 2014 est une réforme en profondeur du Code wallon de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, du patrimoine et de l'énergie puisqu'il est désormais possible d'introduire conjointement une demande de modification de plan de secteur et une demande de permis.

Tous les acteurs, pour informer et/ou décider et/ou exploiter, ont besoin d'une véritable stratégie des ressources du sous-sol wallon. Dans sa première stratégie wallonne du développement durable (Service public de Wallonie 2013), la Wallonie stipule:

Sur le plan des ressources naturelles, il est bien identifié que des informations sont disponibles de façon extensive dans les travaux relatifs à l'état de l'environnement wallon, mais il n'est pas permis, à l'heure actuelle, d'en dégager les données synthétiques et agrégées que le niveau stratégique du présent exercice nécessite, tels des seuils à ne pas dépasser dans les prélèvements des ressources naturelles inventoriées, de façon à respecter leur taux de renouvellement.

En ce qui concerne les ressources du sous-sol, le taux de renouvellement est très long, quasiment infini.

Dans cette optique, il est temps de mettre en place une administration pour centraliser les données transdisciplinaires (approches géologiques, économiques, sociales, politiques, urbanistiques et environnementales) et servir de référence afin de conseiller le décideur politique et définir une stratégie claire en la matière. On soulignera la création, il y a peu, du Service géologique wallon. Cette structure, encore peu organisée et dont les missions demeurent floues, serait un outil idéal pour gérer efficacement les ressources du sous-sol wallon, dans une nécessaire approche transdisciplinaire.

Remerciements

L'auteur remercie le Centre Jacques Cartier et le F.R.S.-F.N.R.S. de Belgique (dossier 2014/C 18/5/C55 – IB/LID – 14325) pour les subsides octroyés en vue d'assister au colloque Québec-Mines 2014 *L'industrie minière et le développement durable: une perspective internationale francophone*. Le Groupe Lhoist (et particulièrement monsieur A. Lauwers) est remercié pour les informations et autorisations associées à la carrière de dolomies de Marche-les-Dames. Bruno Goffé est chaleureusement remercié pour ses commentaires très pertinents qui ont significativement amélioré le présent manuscrit.

Références

- Bonneuil, C., et Fressoz, J.-B. 2013. L'Événement Anthropocène - La Terre, l'histoire et nous. Éditions du Seuil, Paris, France.
- Bultynck, P., et Dejonghe, L. 2001. Guide to a revised lithostratigraphic scale of Belgium. *Geologica Belgica*, **4/1-2**: 1–168.
- Collier, L., Barthélemy, J., Carletti, T., Moriamé, M., Sartenaer, A., et Hallet, V. 2015. Calculation of an interaction index between the extractive activity and groundwater resources [en ligne]. *Energy Procedia*, **76**: 412–420. doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.852.
- Coppée, J.-L., Noiret, C., et Clesse, B. 1995. Réaménagement biologique des carrières après exploitation. Les Bocages ASBL, Ministère de la Région wallonne, Direction générale des ressources naturelles et de l'environnement, Brochure technique, **2**: 79.
- Coppola, V., Boni, M., Gilg, H.A., Balassone, G., et Dejonghe, L. 2008. The «Calamine» nonsulfide Zn–Pb deposits of Belgium: Petrographical, mineralogical and geochemical characterization [en ligne]. *Ore Geology Reviews*, **33**(2): 187–210. doi: 10.1016/j.oregeorev.2006.03.005.
- Dejonghe, L. 2006. Chronostratigraphic units named from Belgium and adjacent areas. *Geologica Belgica*, **9/1-2**: 1–224.
- Dumont, H. 1832. Mémoire sur la constitution géologique de la Province de Liège. Académie royale de Belgique, Bruxelles.
- Fabrégat, S. 2012. L'industrie extractive en plein boom [en ligne]. Actu-Environnement, Cogiterra, Paris, France. Disponible à <http://www.actu-environnement.com/actu/news/industrie-mines-minerais-terres-rares-fossiles-15084.php4> [cité le 9 mars 2016].
- Fediex. 2014. Rapport annuel 2014 [en ligne]. Fédération belge des industries extractives. Disponible à <http://www.fediex.be/upload/files/RA%20Fediex%20FR%202014.pdf> [cité le 21 septembre 2015].
- Goffé, B. 2013. Matière et énergie : stocks et cycles [en ligne]. *Dans* L'énergie à découvrir *Sous la direction de* R. Mosseri et C. Jeandel. CNRS Éditions, p. 352. Disponible à http://bip.cnrs-mrs.fr/bip06/pdf/130215_Energie_Synopsis.pdf.
- Groessens, E. 2002. Les matériaux de construction de Belgique et du nord de la France. *Géologues*. **133**: 84–91.
- Guillemin, C. 1980. Prologue. *Dans* Ressources minérales. Mémoires du Bureau de recherches géologiques et minières n° 106.

- US Energy Information Administration. 2013. International Energy Outlook 2013 [en ligne]. Disponible à <https://www.eia.gov/outlooks/archive/ieo13/> [cité le 6 avril 2017].
- Nyhuis, C., Rippen, D., et Denayer, J. 2014. Facies characterization of organic-rich mudstones from the Chokier Formation (Lower Namurian), South Belgium. *Geologica Belgica*, **17/3-4**: 311–322.
- Poskin E. 2010. Activités extractives en Wallonie : une coordination nécessaire [en ligne]. Rapport Etopia, 11 p. Disponible à http://www.etopia.be/IMG/pdf/Poskin_extraction.pdf (consulté le 12 septembre 2012).
- Remacle, A. 2005. L'inventaire des carrières de Wallonie (Belgique) : présentation générale et aspects entomologiques [en ligne]. Notes fauniques de Gembloux, **57**: 73–79. Disponible à <http://www.gembloux.ulg.ac.be/entomoOld/wp-content/uploads/2012/07/15751.pdf>.
- Service public de Wallonie. 2013. Première stratégie wallonne de développement durable [en ligne]. Disponible à http://www.wallonie.be/sites/wallonie/files/pages/fichiers/1ere_strat_dd.pdf [cité le 23 septembre 2015].
- Vidal, O., Goffé, B., et Arndt, N. 2013. Metals for a low-carbon society [en ligne]. *Nature Geoscience*, **6**(11): 894–896. doi: 10.1038/ngeo1993.
- Yans, J. 2013. Gestion durable des ressources minérales wallonnes : pistes de réflexions en vue d'une meilleure intégration de la problématique. *Dans Actes du 1^{er} congrès interdisciplinaire du développement durable. Quelle transition pour nos sociétés?* Namur, Belgique, p. 195–206.
- Yans, J. 2015. L'exploitation des ressources non renouvelables du sous-sol dans une perspective de développement durable : la vision du géologue transdisciplinaire. *Dans Actes du 2^e congrès interdisciplinaire du développement durable. Comment accélérer la transition?* Louvain-la-Neuve, Belgique. [en ligne]. Disponible à <http://congrestransitiondurable.org/51469/document> [cité le 23 septembre 2015].
- Yans, J., Dusar, M., Swennen, R., Delcambre, B., Cornet, C., Rippen, D., et Goemaere, E. 2013. *Gas Shales in Belgium?* Symposium Proceedings. Namur, Belgique.

Conséquences environnementales et gestion des mines abandonnées et dispersées dans les Alpes françaises

Magali ROSSI et Dominique GASQUET

Résumé

L'exploitation des ressources minières dans les Alpes françaises est une histoire ancienne, de plus de 2 500 ans. Bien que présentant de faibles tonnages, des centaines de gisements ont été exploités depuis l'Antiquité jusqu'au XX^e siècle. Les dernières exploitations alpines ont cessé dans les années 1970, si bien que la plupart des mines sont désormais abandonnées, voire parfois tombées dans l'oubli. Si les principaux minerais exploités sont le Fe, le Cu et le Pb-Ag, les gisements métallifères présentent des minéralisations très variées (Ag, Au, U, Hg...), souvent de nature polymétallique. L'industrie minière a été importante dans les Alpes françaises (plusieurs millions de tonnes de Fe, 200 000 t Pb, 100 000 t Zn et 500 t Ag), en particulier au Moyen Âge et durant l'ère industrielle, contribuant ainsi fortement à l'anthropisation et au développement socioéconomique des vallées et des versants. Actuellement à l'abandon, les mines et plus particulièrement les haldes disséminées sur une grande partie du territoire, sont soumises à l'altération et se dégradent lentement, constituant ainsi une source potentielle de contamination des eaux et des sols. En parallèle, les galeries subissent des affaissements localisés. L'impact environnemental et les potentiels risques miniers n'ont pas été évalués pour la plupart des sites alpins. En effet, malgré leur nombre important, seuls quelques sites font actuellement l'objet d'un suivi environnemental : il s'agit d'une gestion de l'urgence. Le passé minier des Alpes françaises n'est toutefois pas totalement oublié : le patrimoine minier est mis en valeur à travers des sentiers thématiques, des musées, et des visites de galeries souterraines.

1. Introduction

Les Alpes françaises sont caractérisées par une abondance des gîtes et de petits gisements métallifères, de nature très diverse (Fe, Cu, Pb-Zn-Ag, etc.), qui ont très fortement influencé l'anthropisation des montagnes sur plus de 2 000 ans et la création de voies de transport nombreuses. Elles ont connu une très forte activité minière depuis l'Antiquité (voire dès le Bronze ancien pour le Cu (Gattiglia et Rossi 1995, Bailly-Maître et Gonon 2006, Guyard et al. 2007) jusqu'au milieu du XX^e siècle ; les dernières mines ayant fermé dans les années 1970. Trois périodes d'intense activité ont été répertoriées par les historiens (Borrel 1883, Prieur et al. 1983, Mollard 1984, Duverney 1988) et sont enregistrées dans les archives naturelles (Arnaud et al. 2005, 2010, Guyard et al. 2007, Garçon et al. 2012) : la période romaine pour le Pb et l'Ag, le

Moyen Âge pour les Pb, Ag et Fe, et enfin la période de développement industriel, de la fin du XVIII^e siècle à la fin du XIX^e siècle, pour le Cu et le Fe. Dès la fin du XIX^e siècle, cette activité minière décline en raison de l'épuisement de certains gisements et de la baisse de rentabilité liée à la découverte, ailleurs dans le monde, de gisements plus riches, de tonnages beaucoup plus importants et beaucoup plus faciles à exploiter.

L'ensemble des mines alpines ferme donc progressivement au cours du XX^e siècle: la dernière mine en exploitation a cessé son activité dans les années 1970 (Mâcot-La Plagne). Une fois les exploitations fermées, les infrastructures ont généralement été démantelées, et les sites ont été abandonnés souvent en l'état, avant d'être peu à peu envahis par la végétation. Depuis la fin des années 1990, l'État français s'est approprié les questions de l'après-mine, notamment en termes de prévention des risques et de sécurisation des anciens sites miniers désormais désaffectés. Toutefois, dans le cas des Alpes, beaucoup de travail reste à faire concernant l'évaluation des risques environnementaux associés aux anciennes activités minières.

Afin de comprendre la répartition et la formation des gisements métallifères des Alpes du Nord, il est nécessaire dans un premier temps de comprendre la géologie et la formation de la chaîne alpine. Puis, un inventaire général des gisements et gîtes métallifères des Alpes françaises est abordé. Le cadre administratif de l'après-mine est ensuite précisé. Enfin, les impacts et risques environnementaux qui découlent de l'abondance de ces nombreuses mines, très dispersées et aujourd'hui abandonnées, sont présentés, de même que quelques exemples de mise en valeur de ce patrimoine industriel et minier.

2. Contexte géologique et métallogénie

2.1 Géologie et formation des Alpes

La chaîne des Alpes s'est formée au cours de la collision entre l'Eurasie et l'Afrique *sensu-lato* au cours de l'ère tertiaire. Pour comprendre la structuration des Alpes, il est nécessaire de remonter dans le temps jusqu'à l'ère primaire, il y a plus de 300 Ma. À la fin du Carbonifère et au début du Permien (vers 300 Ma), tous les continents étaient regroupés en un supercontinent appelé «la Pangée», qui était traversé par une grande chaîne de montagne: la chaîne Varisque, dont on trouve encore des traces en Amérique du Nord (Appalaches) et en Europe (Massif armoricain, Massif central, Carpathes, Bohême) (Bour 2010). Vers 250 Ma, au Trias, la Pangée se morcelle, ouvrant ainsi un océan alpin, appelé la Téthys, entre l'Eurasie au nord et le Gondwana (future Afrique) au sud. L'ouverture océanique se poursuit jusque vers 160 Ma (Jurassique), où s'amorce le rapprochement entre l'Eurasie et le Gondwana. Ce rapprochement conduit à la fermeture progressive de l'océan Téthys entre le Jurassique moyen et le Crétacé, grâce à la subduction, vers l'est dans la partie française (vers le sud en Europe de l'Est), de la plaque européenne sous la plaque africaine. Une fois l'océan Téthys complètement refermé, cette subduction est relayée par la collision de ces deux plaques (50 Ma), aboutissant à la formation des reliefs alpins.

Pendant la collision, un large domaine comportant les marges des deux plaques ainsi que l'océan alpin, a été raccourci de plusieurs centaines de kilomètres. Ce raccourcissement a pour résultat l'empilement des marges continentales et des fonds océaniques les uns sur les autres faisant ainsi disparaître la plus grande partie de la croûte océanique. Cette collision et l'enfouissement qui en a résulté ont entraîné une forte déformation et un métamorphisme des roches plus anciennes (Varisques) qui constituaient les marges continentales.

Ainsi, trois entités bien distinctes, qui correspondent à des roches d'âge et de nature différents, sont présentes dans les Alpes (figure 1).

- (i) Les terrains de l'ère primaire, ou Paléozoïque, sont représentés par un socle métamorphique et magmatique (granites, micaschistes, gneiss) Varisque, plus vieux que 300 Ma comprenant des terrains du Cambrien au Dévonien, et par les formations détritiques et riches en charbon du Carbonifère et du Permien.
- (ii) Les terrains de l'ère secondaire, ou Mésozoïque, représentent la couverture sédimentaire du socle Varisque. Ils comportent des grès et conglomérats du Permien et du Trias, qui sont les produits d'érosion de la chaîne Varisque, du gypse et des dolomies triasiques, et des calcaires et marnes du Jurassique et du Crétacé, qui sont des dépôts océaniques.
- (iii) Les terrains de l'ère tertiaire, ou Cénozoïque, correspondent aux produits de la démolition des Alpes elles-mêmes. Il s'agit des « molasses » notamment du plateau suisse et du Bas-Dauphiné.

Les Alpes internes correspondent à la partie la plus orientale de la marge européenne qui a été enfouie le plus profondément lors de la subduction. Il s'agit donc de roches de socle (massifs cristallins internes, non représentés sur la figure 1) et de sédiments fortement métamorphisés. Les Alpes externes quant à elles correspondent à une partie de la marge européenne plus proche du continent, qui n'a donc pas subi la subduction, mais uniquement la collision. Il s'agit donc de roches du socle (massifs cristallins externes) et de sédiments mésozoïques peu métamorphisés. Les Alpes externes sont séparées des Alpes internes par un grand chevauchement transcrustal appelé le Front pennique (figure 1).

Les Alpes françaises appartiennent essentiellement au domaine externe (figure 1). Les massifs cristallins externes (Mont-Blanc, Aiguilles Rouges, Belle-donne, Pelvoux, Argentera), qui représentent les plus hauts sommets, sont constitués de roches varisques re-déformées et re-métamorphisées à l'Alpin. Le domaine helvétique et le Jura sont constitués des séries calcaires et marneuses du Jurassique et du Crétacé, fortement déformées à l'Alpin (plis, chevauchements). Le domaine briançonnais appartient quant à lui au domaine interne. Il est essentiellement constitué de roches du Carbonifère et du Permo-Trias, fortement déformées et métamorphisées.

Tous les contextes géodynamiques et orogéniques sont donc réunis pour la formation de gisements métallifères d'importance, même si les phases tectoniques successives ont contribué à leur dispersion. L'histoire polyphasée de la formation des Alpes

se répercute sur la concentration au tardi-Varisque des minéralisations et leur remobilisation pendant l'orogénèse alpine (Ypma 1963, Clavel 1963, Cabrol 1967, Court 1971, Ducrot 1974, Beuchat 1999).

2.2 Inventaire et répartition géologiques des mines/lien avec le contexte géologique

Les milliers de mines inventoriées dans les Alpes du Nord par Durand (2005, 2010) montrent que les concentrations minérales dépendent fortement des formations géologiques et des domaines structuraux.

Dans les Alpes (Meloux 1975), les minéralisations principales du domaine externe sont essentiellement situées dans deux zones.

- (i) Dans les massifs cristallins externes on retrouve notamment du Pb-Zn à Sainte-Marie du Fouilly pour le massif du Mont-Blanc-Aiguilles Rouges ; du Fe sous forme de sidérite, et du Cu dans la province des Hurlières ; du Fe seul dans la province d'Allevard et un peu d'Ag aux Chalanches pour Belledonne ; du F avec Pb, Zn, Ag dans le massif du Rocheray.
- (ii) Dans les chaînes subalpines (domaine helvétique), de nombreux gisements de fer sidérolithique ont été exploités dans les calcaires urgoniens. Il s'agit de petits gisements, exploités depuis le XII^e siècle, se présentant sous forme de «poches karstiques» décimétriques ou le long de failles comme dans les Bauges (Sambuy, Semnoz...) et en Chartreuse (Bovinant, Chartreuse de Curière, Pal de Fer de Montfort...). Plus au sud (Diois) des petits gisements de Pb et Zn ont été exploités dans les calcaires jurassiques.

Il existe également des gisements notables dans deux zones internes.

- (i) Dans la zone piémontaise, seul le gisement de Saint-Véran (Hautes-Alpes) a fourni, en France, du Cu en quantité notable ; plus au nord-est, en Italie, les gisements du Val d'Aoste (Cogne, Praborna, la Thuile...) ont fourni Au, Ag, Mn, Cu, Fe depuis le Moyen Âge jusqu'au XX^e siècle.
- (ii) Dans la zone briançonnaise, il s'agit essentiellement d'exploitations de Pb-Ag comme à Mâcot-La Plagne, Peisey-Nancroix, et Largentière-La Bessée.

Notons enfin que le bassin molassique ne contient aucune minéralisation métallique d'importance.

Au total, la production, dans les Alpes françaises, est estimée à quelques millions de tonnes pour le Fe (largement dominant), 200 000 t pour le Pb, 100 000 t pour le Zn, 2 000 t environ pour le Cu et 500 t pour l'Ag (Meloux 1975).

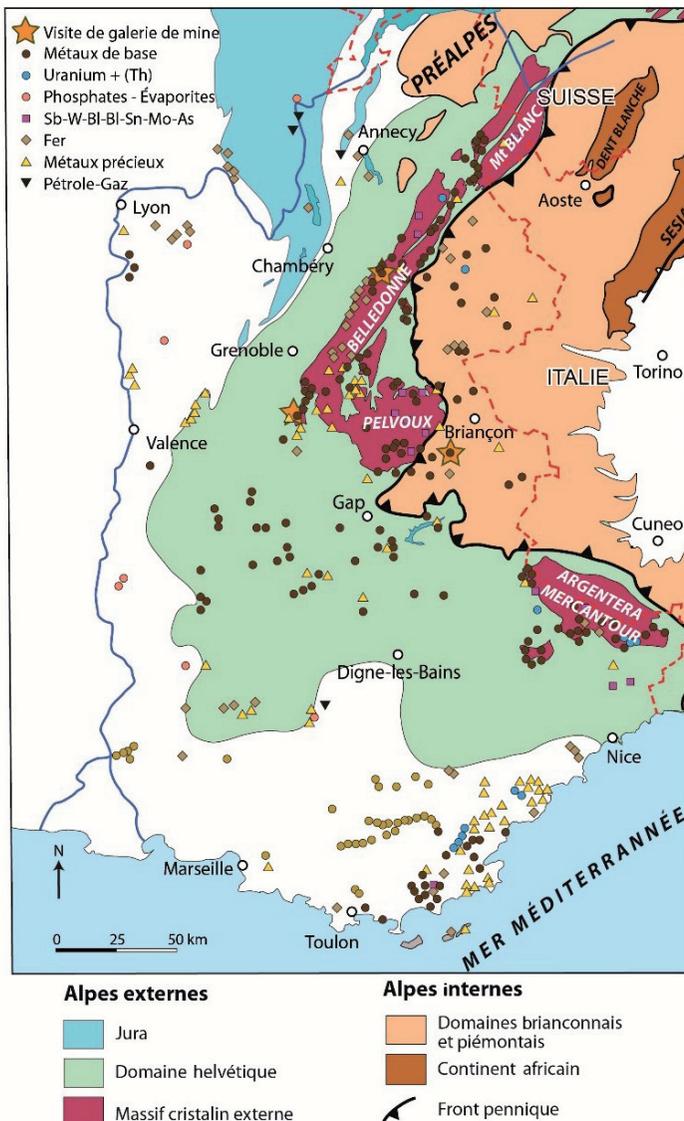


Figure 1: Carte géologique simplifiée des Alpes françaises, avec la localisation des gisements métallifères et d'hydrocarbures inventoriés par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) (<http://sigminesfrance.brgm.fr>), ainsi que celle des trois galeries ouvertes aux touristes (étoiles orange). Notons que cet inventaire n'est pas exhaustif : le BRGM recense 250 gisements métallifères alpins, alors que Durand (2005, 2010) en recense plusieurs centaines rien que dans le département de la Savoie.

3. Histoire et acteurs de l'après-mine en France

L'activité minière alpine a décliné au cours du XX^e siècle pour cesser totalement dans les années 1970. Après la fermeture des mines, les propriétaires des titres miniers demeuraient responsables des anciens sites d'extraction et de traitement. La plupart des sites ayant été laissés à l'abandon, voire étant tombés dans l'oubli, il n'y avait pour ainsi dire aucune gestion globale des anciens sites miniers alpins. Par ailleurs, la plupart des compagnies exploitantes ayant disparu, la majorité des mines alpines sont devenues orphelines, étant abandonnées à la charge des collectivités ou de l'État.

En 1996, l'État est amené à institutionnaliser la gestion des mines abandonnées après une série d'effondrements et d'affaissements des anciennes mines de fer de Lorraine, ayant causé de nombreux dégâts matériels, allant de la fissuration à l'effondrement de bâtiments. Dans un premier temps, le BRGM et l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) créent GEODERIS en 1998 (figure 2). Il s'agit d'une structure d'expertise en risques miniers qui avait pour mission initiale d'aider la région Lorraine à gérer et prévenir les risques miniers. Sa mission va s'étendre en 2001 à l'ensemble du territoire français lorsque GEODERIS est chargé d'établir une cartographie nationale des aléas et des risques miniers, d'analyser ces risques et de proposer des solutions d'intervention pour les réduire et les limiter. À la suite de la réforme du code minier en 1999 (loi n° 99-245¹ du 30 mars 1999), l'État devient l'unique responsable du suivi (prévention, intervention, information) des exploitations minières en cas de renonciation du titre minier, de défaillance ou de disparition de l'exploitant. Le pilotage de la gestion de l'après-mine s'effectue au niveau régional, par les DREAL (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement), sous l'égide du Bureau du sol et du sous-sol de la Direction générale de la prévention des risques du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Les DREAL s'appuient sur l'expertise de GEODERIS pour évaluer les types d'intervention à mener en fonction du type de risque identifié : le risque est-il acceptable, faut-il effectuer une intervention de prévention ou de protection sur le site, ou faut-il procéder à une expropriation ? La gestion opérationnelle, en cas d'intervention sur site, est alors réalisée par le Département de prévention et de sécurité minière (DPSM), créé en 2007 au sein du BRGM (le décret n° 2006-402² du 4 avril 2006 instaure le BRGM en tant qu'opérateur de l'après-mine).

1. Loi relative à la responsabilité en matière de dommages consécutifs à l'exploitation minière et à la prévention des risques miniers après la fin de l'exploitation ; <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000759770>

2. Décret n° 2006-402 modifiant le décret n° 59-1205 du 23 octobre 1959 relatif à l'organisation administrative et financière du BRGM et portant dispositions transitoires relatives à Charbonnages de France. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000607316&dateTexte=>

Enfin, l'élaboration de Plans de prévention des risques miniers (PPRM) est décrétée en 2000 (décret n° 2000-547³ du 16 juin 2000) afin (i) de définir différentes zones exposées aux risques miniers, et (ii) de contraindre le développement urbain de chaque zone, en fonction de la nature et de l'intensité du risque encouru.

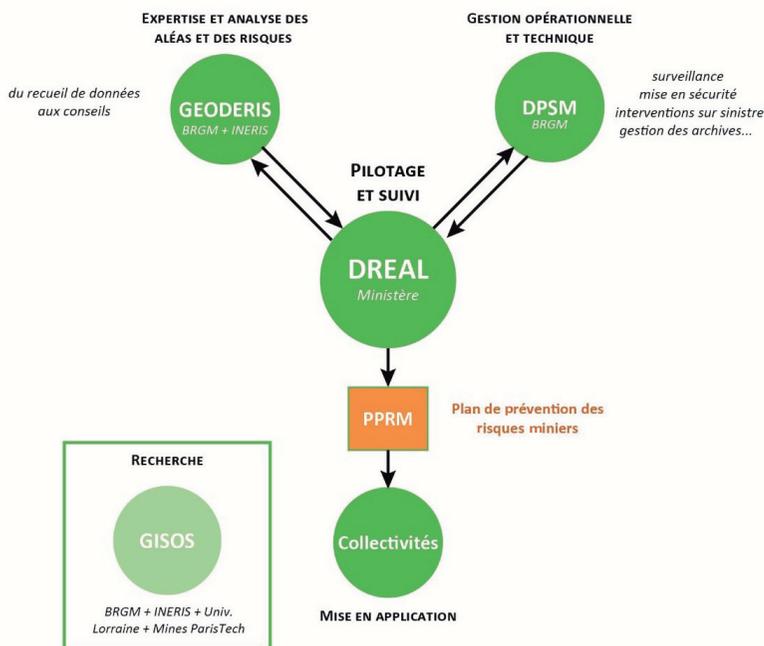


Figure 2: Schéma présentant les principaux acteurs de l'après-mine en France. DREAL, BRGM, DPSM : acronymes définis plus haut.

4. Prévention des risques et des aléas

Il existe plusieurs types d'aléas miniers : (i) les mouvements de masse généralisés ou localisés, tels que les effondrements, les affaissements ou les tassements, (ii) la pollution des eaux et des sols, (iii) les inondations dues à la rupture de bassins de rétention, (iv) des émanations de gaz ou des émissions de rayonnements ionisants, (v) les mouvements de masse et/ou l'échauffement de terrils. Compte tenu de la nature des minerais et du caractère filonien des gisements, les principaux aléas miniers présents dans les Alpes sont les risques d'effondrements localisés et de pollution de l'environnement (ce dernier point sera traité dans un paragraphe spécifique).

3. Décret n° 2000-547 relatif à l'application des articles 94 et 95 du code minier <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000765577&dateTexte=20161023>

4.1 La mise en sécurité des sites miniers alpins

Afin d'interdire l'accès et de se prémunir contre les risques d'accident dans les galeries souterraines, une des premières actions des DREAL fut de condamner les entrées des mines, en y scellant des portes verrouillées, ou tout simplement en les bouchant par des pierres ou en les faisant s'effondrer. Toutefois, chacun des 250 gisements miniers identifiés par le BRGM dans les Alpes françaises possède de nombreuses entrées de galeries (plus de 60 entrées ont été répertoriées pour le seul district de Saint-Georges d'Hurtières - Cu-Fe). Compte tenu du nombre important de galeries, seules les entrées principales sont obturées, les autres étant actuellement laissées en l'état, faisant alors le bonheur des spéléologues amateurs lorsqu'elles ne sont pas tombées dans l'oubli. Cependant, malgré la mise en place de murs de pierres sèches soutenant les toits des salles excavées, ou la mise en place de boisements d'étagage, on observe localement un affaissement des toits et parements des galeries ainsi que des chutes de blocs (figure 3). Le risque d'effondrement ou d'affaissement n'est donc pas à négliger, en particulier lorsque la nature de l'encaissant est stratifié ou peu compétent, et que les galeries ou les salles sont de tailles importantes.

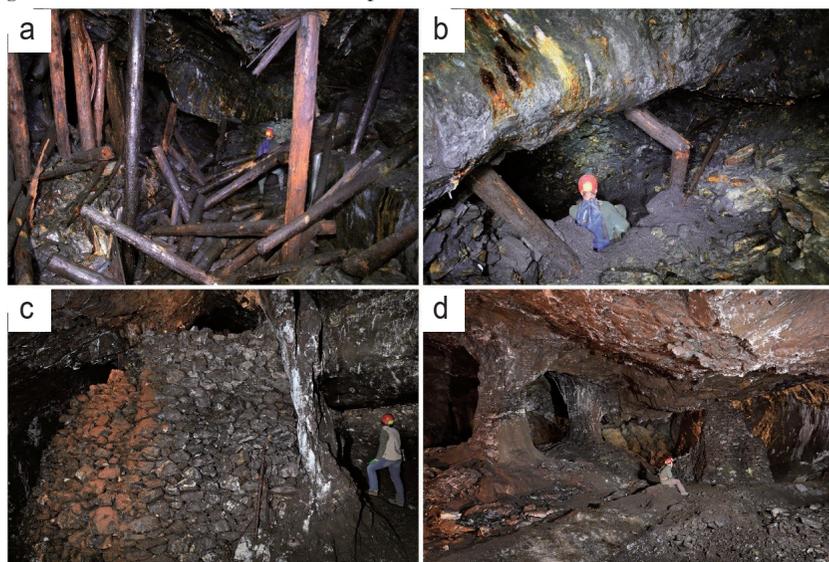


Figure 3: Planche photographique montrant des exemples d'effondrement/affaissement de toit de galerie souterraine, ainsi que des murs de soutènement mis en place pour prévenir les mouvements de masse. a) Bois d'étagage en «mikado» dans la mine d'Arêches-Beaufort mettant en évidence la subsidence du toit de la salle. b) Bois d'étagage fendu sous l'effet de l'affaissement du toit de la galerie (mine d'Arêches-Beaufort). c) et d) Murs de soutènement du toit des salles en partie défilées (mine de Saint-Georges d'Hurtières).

S'ils deviennent trop importants, les mouvements de masse visibles dans les galeries peuvent se répercuter à la surface, entraînant alors des affaissements voire des effondrements localisés. Lorsque le risque devient important, le DPSM, qui est chargé de la surveillance de certains sites, peut être amené à agir de manière technique. Ainsi,

le DPSM a été amené à combler, en 2012, une partie des galeries d'une ancienne mine de charbon à la Motte d'Aveillans (Isère). Cette partie de la mine étant localisée à moins de 25 m de profondeur sous une école, elle présentait un aléa important, associé à une très forte vulnérabilité des infrastructures, et par conséquent un risque élevé pour la population (figure 4). Les galeries qui présentaient un fort potentiel d'effondrement ont alors été comblées par 600 m³ de béton liquide injectés *via* des forages, et confinés dans la zone à risque par 5 murs obturant les galeries. Sur la figure 4, les galeries souterraines sont représentées en rouge, avec les sections à traiter en jaune. Le béton a été injecté par des puits de forage (points rouges et verts) et est bloqué par les murs obstruant les galeries (points bleus). Les documents relatifs aux interventions du DPSM sont disponibles en ligne sur leur site : (<http://dpsm.brgm.fr/travaux/FichesPubliques/Forms/AllItems.aspx>). La fiche des travaux réalisés à la Motte d'Aveillans correspond au point I040296.

Outre l'aspect préventif, le DPSM est également en charge du suivi environnemental des anciens sites miniers (sites d'exploitation et de traitement) et de leur réhabilitation. Toutefois, les travaux réalisés et la surveillance des sites, débutés en 2007, se concentrent sur cinq anciennes concessions et un ancien site de traitement du minerai, qui appartiennent pour partie à un même district. Compte tenu du nombre important de gisements et d'exploitations dans les Alpes, seuls les sites présentant un risque très élevé et à court terme sont actuellement traités ou sous surveillance. Il s'agit donc d'une gestion de l'urgence. Les sites éloignés d'habitations, qui sont les plus nombreux, ne font actuellement l'objet d'aucun suivi environnemental ni de surveillance particulière.

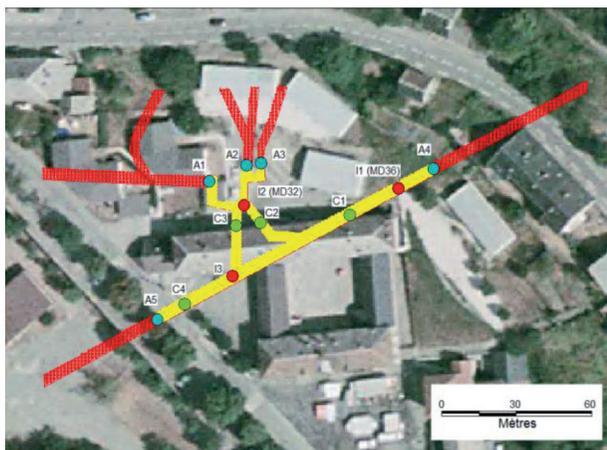


Figure 4: Exemple de travaux réalisés par le DPSM à la Motte d'Aveillans (Isère) afin de prévenir des effondrements en surface (voir explications dans le texte).

4.2 Les PPRM

Les PPRM sont des outils de gestion des risques miniers, ayant pour but d'assurer la sécurité des biens et des personnes, en réglementant l'aménagement d'un territoire, à travers notamment le développement urbain et l'utilisation des sols. Ils sont élaborés par les DREAL, en concertation avec GEODERIS et le DPSM, et mis en œuvre par les communes. Les PPRM ont été instaurés par la loi n° 99-245 du 30 mars 1999, dite loi de l'Après-Mine, et mis en application par le décret n° 2000-547 du 16 juin 2000 précisant les modalités d'application et la nature des risques à prendre en compte. Comme les autres Plans de prévention des risques, les PPRM sont constitués d'une note de présentation et d'un règlement qui accompagnent une cartographie délimitant les zones à risque. Trois types de zone sont représentés : les zones inconstructibles, les zones constructibles sous certaines conditions, et les zones constructibles sans condition. L'élaboration d'un PPRM est un processus long, effectué en concertation avec la population, les décideurs administratifs, les experts de GEODERIS et les opérateurs du DPSM. Elle débute par l'acquisition d'informations et de données afin d'évaluer et de cartographier les aléas. Elle se poursuit par l'appréciation des enjeux et de la vulnérabilité, pour aboutir à la construction de zonages réglementaires et l'élaboration du règlement.

Tableau 1: Les six PPRM approuvés et en cours de finalisation dans les Alpes du Nord (MVT: mouvement de terrain)

Nom du PPRM	Département	Type de concession	Nature des aléas	Avancement
Saint-Didier-de-la-Tour	Isère	mines de charbon	MVT + gaz de mine	en cours
Plateau matheysin	Isère	mines de charbon	MVT + gaz de mine + échauffement + inondation	approuvé en août 2013
Voglans	Savoie	mines de lignite	MVT	approuvé le 15/11/2013
Macôt-La Plagne	Savoie	mines de Pb-Ag	MVT	approuvé le 18/12/2014
Les Chapelles	Savoie	mines d'anthracite	MVT	en cours de finalisation
Lovagny	Haute-Savoie	carrière souterraine de calcaires asphaltiques	MVT	début - cartographie des aléas, réunions publiques en cours

Dans les Alpes françaises, seuls six PPRM ont été approuvés ou sont en cours d'élaboration (tableau 1), tous situés dans les Alpes du Nord. Parmi ceux-ci, seul le PPRM de Macôt-La Plagne concerne d'anciennes mines métalliques. Environ 126 600 t Pb et 350 t Ag ont été extraites des différentes galeries de Macôt-La Plagne entre 1810 et 1973. Il s'agissait alors de la plus importante mine de Pb-Ag des Alpes françaises. L'exploitation

a été réalisée par chambres et piliers (100 x 50 m) et par tranches montantes remblayées sur 600 x 300 m. À l'arrêt de l'exploitation, l'ensemble des travaux miniers a été ennoyé, le régime hydrologique demeurant stable. Toutefois, de nombreuses galeries étant situées à moins de 50 m sous la surface (parfois < 20 m), il existe un risque de fontis au cœur de la station de ski de La Plagne. Aucun fontis n'ayant été observé depuis l'arrêt de l'exploitation, le risque est considéré comme moyen. Toutefois, si l'aléa demeure plutôt faible, la vulnérabilité est assez importante, si bien que le PPRM a délimité des zones non constructibles (à risque maximal) et des zones constructibles sous certaines conditions (figure 5). Ce zonage contraint donc fortement le développement urbain de la station de ski.

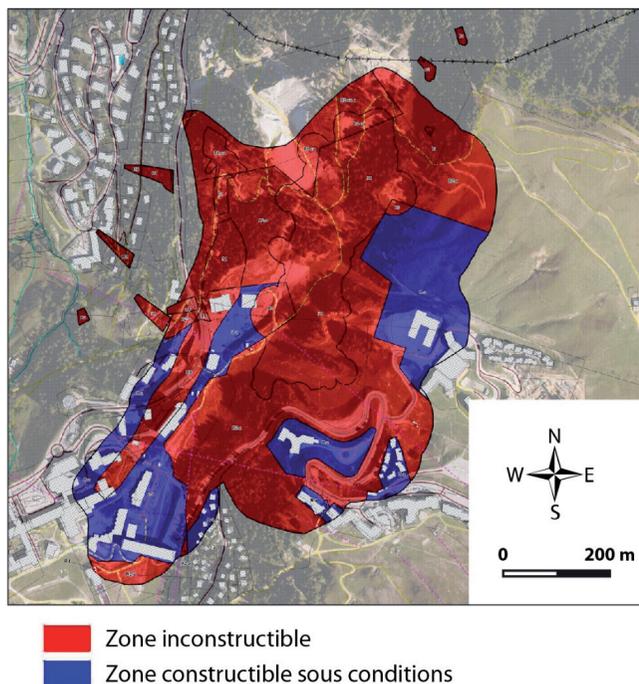


Figure 5 : Extrait du PPRM de Mâcot-La Plagne en Savoie, distinguant les zones inconstructibles (en rouge) et les zones constructibles sous certaines conditions (en bleu).

Les PPRM sont des documents publics établis par la DREAL afin de définir un cadre réglementaire d'aménagement des territoires. Tous les documents concernant le PPRM de Mâcot-La Plagne sont disponibles en ligne sur le site Internet du département de la Savoie (<http://www.savoie.gouv.fr/Politiques-publiques/Environnement-risques-naturels-et-technologiques/Risques-naturels-et-technologiques/Les-risques-technologiques/Le-risque-minier/Plan-de-prevention-des-risques-miniers-Aime-Macot-la-Plagne>).

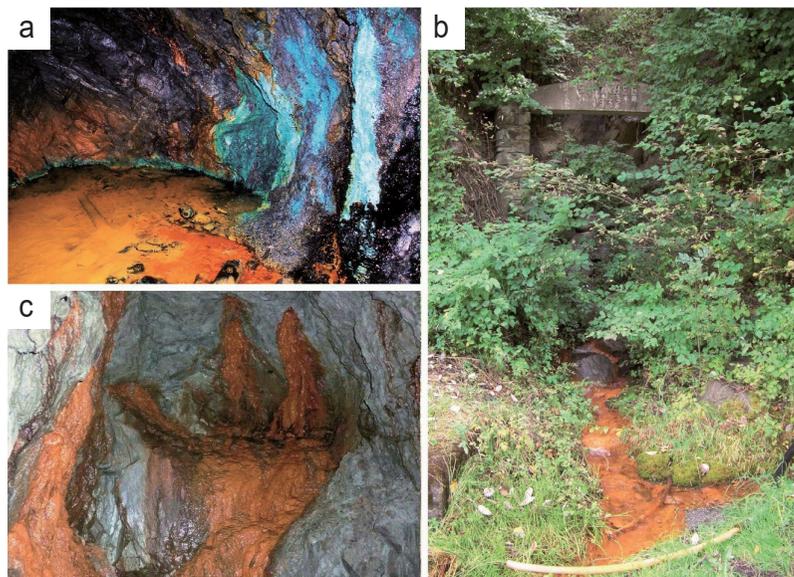
5. Pollution des eaux et des sols

À ce jour, on ne connaît pas l'impact environnemental des gisements et des anciennes exploitations minières sur les eaux et les sols alpins. En effet, aucune étude n'a été spécifiquement menée sur le sujet. Toutefois, plusieurs indices montrent que les métaux peuvent être mobilisés par les eaux de surface et d'infiltration.

La majorité des minerais alpins sont des sulfures de Pb et des oxydes, voire des carbonates, de fer. Ces minerais sont aisément altérés par les eaux météoriques qui circulent à travers les haldes, stockées à l'extérieur à l'entrée des galeries, et qui s'infiltrant en profondeur dans les galeries (figure 6). L'oxydation des sulfures (galène, chalcopryrite) produit des minéraux solubles de la classe des sulfates (brochantite, devilline), oxydes et hydroxydes de fer. Cette réaction s'accompagne de la libération de SO_2 qui acidifie les eaux, augmentant ainsi leur pouvoir de dissolution et donc leur teneur en métaux. Ainsi, les eaux de surface, les eaux d'infiltration, et par conséquent les sols situés en aval de minerais (galerie ou halde) sont plus acides et enrichis en métaux. Dans les Alpes, si les gisements sont de petite taille, ils sont extrêmement nombreux et dispersés sur l'ensemble du territoire. De même pour les haldes, considérées comme stériles lors de l'exploitation, elles contiennent toujours des quantités non négligeables de métaux lourds mobilisables. Du fait de leur stockage à l'extérieur, elles seront beaucoup plus sensibles à l'altération météorique (intempéries, contact de l'air) que le minerai en place en profondeur, et constituent ainsi la principale source de pollution potentielle des eaux et des sols en métaux lourds (Dudka et Adriano 1997, El Amari et al. 2014). Pour le seul district de Saint-Georges d'Hurtières (Cu-Fe; Savoie), 22 km de galeries ont été creusées sur 520 m de dénivelé au cours des 700 ans d'exploitation, pour l'extraction estimée de 1,5 millions de tonnes de sidérite et 11 000 tonnes de chalcopryrite. La concession des Fosses possède 66 entrées de galeries (Durand, 2008), et par conséquent presque autant de haldes dispersées sur le versant. Ainsi, des traces de minerai étant actuellement dispersées sur l'ensemble du versant, les métaux peuvent aisément être remobilisés et transportés plus en aval pour enrichir les eaux et les sols. Par ailleurs, les métaux peuvent être mobilisés et transférés rapidement vers les vallées lors des crues qui sont abondantes en région de montagne. En effet, qu'elles soient annuelles, décennales ou centennales, les crues peuvent transporter dans les torrents et les rivières des blocs issus des haldes, qui seront ensuite altérés dans les cours d'eau. Le contexte hydrologique contribue donc à disperser la pollution métallique dans l'environnement. Ainsi, compte tenu de la multitude de gisements et de mines dispersées dans les Alpes, on peut considérer qu'une partie des territoires alpins est potentiellement polluée par les métaux lourds issus des anciennes activités minières. Cette pollution serait globalement diffuse sur l'ensemble du territoire et concentrée autour des principaux sites miniers (sites d'extraction et sites de traitement), tels que Macôt-La Plagne (Pb-Ag), Saint-Georges d'Hurtières (Cu-Fe), l'Alpe d'Huez (Pb-Ag) et autres. Un suivi environnemental s'impose donc.

Une question scientifique générale concerne le temps de rémanence des métaux dans les sols et dans les eaux, qui peut être très long. Par exemple, les sédiments des rivières Tinto et Odiel, qui traversent la Ceinture ibérique pyriteuse en Espagne, pré-

sentent des traces de pollution en métaux depuis plus de 4 800 ans, soit depuis les premières exploitations préhistoriques de cuivre et de fer (Davis et al. 2000). Il est donc légitime de s'interroger sur l'existence de contaminations anciennes (centenaires, millénaires) liées aux exploitations antiques et médiévales.



© photos de Robert Durand.

Figure 6 : Planche photographique illustrant l'altération du minerai en minéraux secondaires solubles et mobilisables par les eaux d'infiltration, pouvant être source de contaminations de l'environnement. a) Altération riche en Fe, Cu et Pb dans la mine de Fe-Cu de Saint-Georges d'Hurtières. b) Eaux d'écoulement ferrifères à la sortie de la mine d'anthracite d'Aime. c) Écoulement ferrifère dans la mine de talc d'Argentine.

L'une des principales caractéristiques géochimiques des eaux alpines est leur forte teneur en arsenic, en particulier pour les sources ou captages situés dans les massifs cristallins externes (Sonney et al. 2005). Sur 487 sources alpines étudiées par Tisserand et al. (2013), 96 sources présentent une teneur en As supérieur à la limite de potabilité de 10 ppb (World Health Organization 2011, figure 7). La figure 7 montre clairement que le département de la Savoie est le plus concerné par les pollutions en As, avec 57 sources ayant des teneurs en As comprises entre 10 et 50 ppb, 9 sources contiennent entre 50 et 100 ppb d'As, et 5 atteignent des concentrations supérieures à 100 ppb (pour un maximum de 187 ppb). Entre 1998 et 2008, près de 80 captages d'eau potable ont été suspendus en Savoie à cause de teneurs en As trop élevées. La localisation des sources à fortes teneurs en As est globalement très bien corrélée avec celle des mines et indices métallifères d'arsenic, mais aussi de plomb. L'arsenic étant un sous-produit des principaux gisements de sulfures, il est présent dans la plupart des gisements métalliques alpins et est donc aisément mobilisé par les eaux. Les diverses exploitations minières ont donc favorisé la remobilisation de l'arsenic présent dans la plupart des minerais alpins.

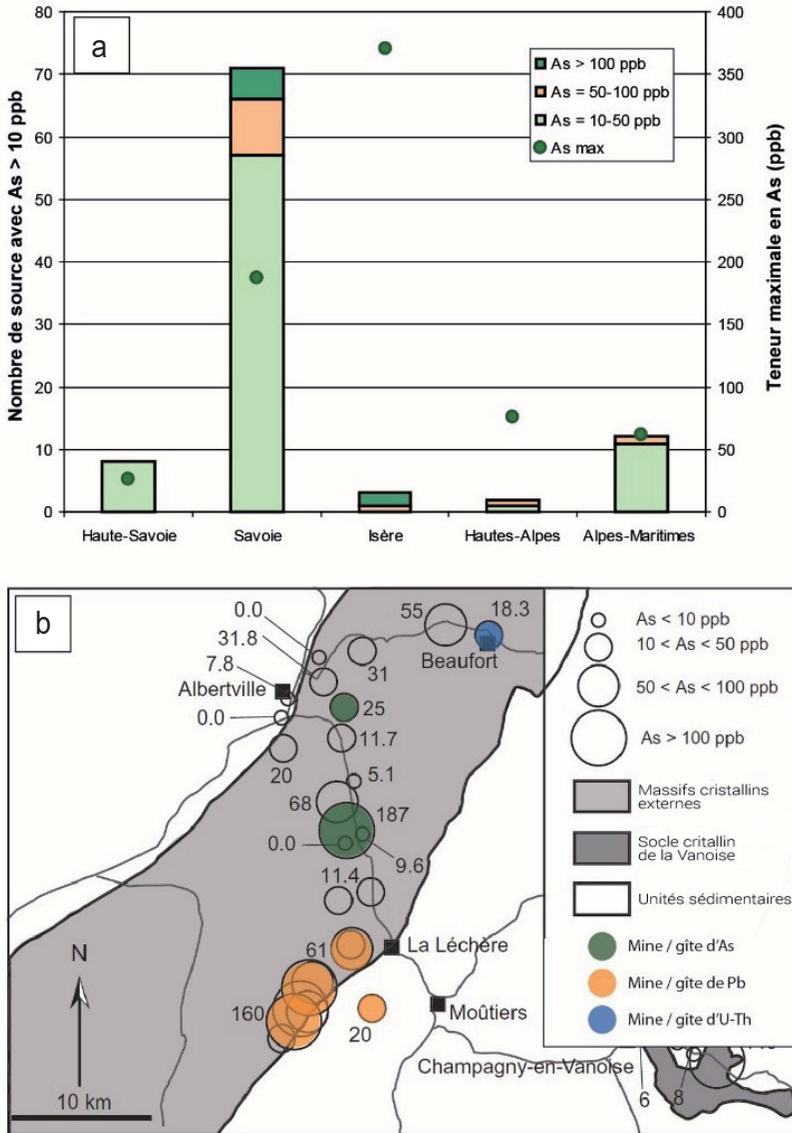


Figure 7: a) Diagramme indiquant les teneurs maximales en As (en ppb) dans les eaux de source ainsi que le nombre de sources dépassant le seuil de potabilité en As (As = 10 ppb) pour les principaux départements alpins (données Tisserand et al. 2014). b) Carte montrant la localisation des sources riches en AS le long de la vallée de l'Isère (Savoie) ainsi que les principaux gisements et gîtes d'As (en vert), de Pb (en orange) et d'U (en bleu), recensés par le BRGM (modifié d'après Tisserand et al. 2014; localisation des gisements disponible en ligne sur le site SIGMines du BRGM : http://sigminesfrance.brgm.fr/sig_gites.asp).

6. Mise en valeur des patrimoines miniers

L'arrêt des exploitations minières a conduit à une destruction partielle du bâti minier et à une obturation des principales entrées de mine. La déforestation ayant cessé, la végétation a repris ses droits en recouvrant les versants ainsi que les haldes abandonnées en surface. Cependant quelques traces de l'histoire minière demeurent, à travers de rares bâtiments (École des mines à Peisey-Nancroix), des ruines de bâtiments et de hauts-fourneaux, ainsi que des restes de voies ferrées et de téléphériques.

Au cours des dernières décennies, le patrimoine minier a été mis en valeur dans le cadre d'une offre touristique. Ainsi, des sentiers thématiques, jalonnés de panneaux explicatifs, ont vu le jour sur certains sites : à la mine de cuivre de Saint-Véran (Hautes-Alpes), située à plus 2 700 m d'altitude, ou encore à Peisey-Nancroix (Savoie) où le sentier passe devant le bâtiment de l'École des mines française, ainsi que devant une galerie de la mine de Pb-Ag, des haldes, des restes de hauts-fourneaux et de divers bâtiments. Par ailleurs, une dizaine de musées «de la mine» sont disséminés sur le territoire. Ceux-ci se concentrent sur divers aspects tels que les minerais, les outils et les techniques d'extraction, le développement social et économique des vallées autour de l'activité minière, etc. Enfin, trois sites proposent, outre un musée, des visites guidées des anciennes galeries souterraines (figures 1 et 8) : (i) le «Musée souterrain de la Mine-Image» à la Motte d'Aveillans (Isère) accueille environ 20 000 visiteurs par an dans l'ancienne mine de charbon, (ii) environ 10 000 personnes visitent les «Mines d'argent du Fournel» chaque année à l'Argentière-La Bessée (Hautes-Alpes), et (iii) «Le Grand Filon» vient d'ouvrir à la visite une partie des 22 km de galeries de la mine de Cu-Fe de Saint-Georges d'Hurtières (Savoie).



Figure 8: Visite de galerie souterraine dans l'ancienne mine de Fe-Cu de Saint-Georges d'Hurtières (Savoie).

7. Conclusion

La gestion de l'après-mine est une problématique nationale récente en France, qui s'est développée à la fin des années 1990 après des accidents survenus dans des mines abandonnées. L'État français s'est donc emparé de la gestion des mines abandonnées : (i) il supervise les études de GEODERIS concernant l'estimation des aléas et des risques miniers sur l'ensemble du territoire ; (ii) il coordonne les travaux de mise en sécurité des sites menés par le DPSM du BRGM ; et (iii) il fournit aux communes des PPRM, afin de contraindre le développement urbain dans les zones à risque.

Les Alpes françaises sont un cas un peu particulier parce que les gisements, dont les mines sont actuellement toutes abandonnées, sont de faible tonnage, extrêmement nombreux (plusieurs centaines) et disséminés sur l'ensemble du territoire. Un suivi environnemental systématique de l'ensemble des mines étant alors irréalisable, seuls quelques rares sites sont actuellement suivis, et six PPRM ont été adoptés ou sont en cours de montage. L'impact environnemental (contamination des eaux et des sols) des mines alpines demeure par conséquent inconnu à ce jour. Il est donc nécessaire de mettre en place un suivi environnemental et d'évaluer les possibles contaminations, au moins sur les sites miniers les plus importants.

Le patrimoine minier n'est toutefois pas totalement tombé dans l'oubli. Depuis une dizaine d'années, celui-ci est valorisé à travers le développement d'une offre touristique variée, allant de sentiers thématiques à des musées de la mine, et même à la possibilité de visites de galeries souterraines sur certains sites.

Références

Arnaud, F., Serralongue, J., Winiarski, T., et Desmet, M. 2010. Une pollution métallique antique en haute vallée de l'Arve [en ligne]. *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie*,(34) : 197–201. doi: 10.4000/archeosciences.2759.

Arnaud, F., Serralongue, J., Winiarski, T., Desmet, M., et Paterne, M. 2005. Pollution au plomb dans la Savoie antique (II^e-III^e s. apr. J.-C.) en relation avec une installation métallurgique de la cité de Vienne [en ligne]. *Comptes rendus Géoscience*, **338**(4) : 244–252. Disponible à <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=17661378>.

Bailly-Maître, M.C., et Gonon, T. 2006. L'exploitation de la chalcopryrite à l'âge du bronze dans le massif des Rousses (Oisans-Isère). *Dans Proceedings of the 131st Congress of the CTHS. "Tradition et innovation"*, Grenoble, France.

Beuchat, S. 1999. Le gisement polymétallique de Saint-Georges d'Hurtières, Savoie, France : le télescope de plusieurs événements hydrothermaux. Diplôme, Université de Genève, Genève, Suisse.

- Borrel, E.L. 1883. Notice historique sur les mines de la Savoie. Recueil des mémoires et documents de l'académie de la vallée de l'Isère, **série I(4)**: 297–364.
- Bour, I. 2010. Histoire thermique des massifs ardennais et bohémien: conséquences sur la dynamique de l'Europe de l'Ouest au méso-cénozoïque [en ligne]. Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud. Faculté des Sciences d'Orsay, Essonne, France. Disponible à <http://www.theses.fr/2010PA112072>.
- Cabrol, B. 1967. Étude géologique et minière du massif des Hurtières-Chaine de Belledonne (Savoie) - Alpes françaises [en ligne]. Thèse de troisième cycle, Faculté des sciences de l'Université de Grenoble, Grenoble, France. Disponible à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00641201/document>.
- Clavel, M. 1963. Contribution à l'étude métallogénique de la région d'Allemont (massif de Belledonne-Isère) - Alpes françaises [en ligne]. Thèse de doctorat, Université de Nancy, Nancy, France. Disponible à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00655735/document>.
- Court, P. 1971. Étude géologique et métallogénique de la Basse-Maurienne. Thèse de troisième cycle, Université de Grenoble, Grenoble, France.
- Davis, R.A., Welty, A.T., Borrego, J., Morales, J.A., Pendon, J.G., et Ryan, J.G. 2000. Rio Tinto Estuary (Spain): 5 000 years of pollution [en ligne]. *Environmental Geology*, **39**(10): 1107–1116. doi: 10.1007/s002549900096.
- Ducrot, J.B. 1974. Étude géologique et gîtologique du massif d'Allevard: chaîne de Belledonne (Savoie). Thèse de troisième cycle, Université de Grenoble, Grenoble, France.
- Dudka, S., et Adriano, D.-C. 1997. Environmental impacts of metal ore mining and processing: A review. *Journal of Environmental Quality*, **26**(3): 590–602.
- Durand, R. 2005. Anciennes mines et carrières souterraines de Savoie. Hier et aujourd'hui. Éditions Cléopas, Évian-les-Bains, France.
- Durand, R. 2010. Un siècle dans les mines de Savoie. Éditions Gap, Challes-les-Eaux, France.
- Duverney, J.Y. 1988. Mines et métallurgie en Savoie du sud aux XVII^e et XVIII^e siècles. Thèse de troisième cycle, Université de Savoie, Chambéry, France.
- El Amari, K., Valera, P., Hibti, M., Pretti, S., Marcello, A., et Essarraj, S. 2014. Impact of mine tailings on surrounding soils and ground water: Case of Kettara old mine, Morocco [en ligne]. *Journal of African Earth Sciences*, **100**: 437–449. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2014.07.017.

- Garçon, M., Chauvel, C., Chapron, E., Faïn, X., Lin, M., Campillo, S., Bureau, S., Desmet, M., Bailly-Maître, M.-C., et Charlet, L. 2012. Silver and lead in high-altitude lake sediments: Proxies for climate changes and human activities [en ligne]. *Applied Geochemistry*, **27**(3): 760–773. doi: 10.1016/j.apgeochem.2011.12.010.
- Gattiglia, A., et Rossi, M. 1995. Les céramiques de la mine préhistorique de Saint-Véran (Hautes-Alpes) [en ligne]. *Bulletin de la Société préhistorique française*, **92**(4): 509–518. doi: 10.3406/bspf.1995.10067.
- Guyard, H., Chapron, E., Saint-Onge, G., Anselmetti, F.S., Arnaud, F., Magand, O., Francus, P., et Mélières, M.-A. 2007. High-altitude varve records of abrupt environmental changes and mining activity over the last 4 000 years in the western French Alps (Lake Bramant, Grandes Rousses Massif) [en ligne]. *Quaternary Science Reviews*, **26**(19–21): 2644–2660. doi:10.1016/j.quascirev.2007.07.007.
- Meloux, J. 1975. Alpes – Nord: Bilan synthétique de dix années de prospection. BRGM. Rapp. 75 RME 023 FE.
- Mollard, C. 1984. Mines et métallurgie en Savoie: 1^{re} moitié du XIX^e siècle. Thèse de troisième cycle, Université de Savoie, Chambéry, France
- Prieur, J., Bocquet, A., Colardelle, M., et Leguay, J.-P. 1983. La Savoie des origines à l’an mil: Histoire et archéologie. Ouest-France, Paris, France.
- Sonney, R., Blum, A., et Chery, L. 2005. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d’eau et les eaux souterraines du bassin du Rhône - Méditerranée et Corse. BRGM. Rapp. BRGM/RP-54031-FR.
- Tisserand, D., Pili, E., Hellman, R., Boullier, A.M., et Charlet, L. 2013. Geogenic arsenic in groundwaters in the Western Alps [en ligne]. *Journal of Hydrology*, **518**: 317-325. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.06.023.
- World Health Organization. 2011. Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. World Health Organization, Genève, Suisse.
- Ypma, J.M. 1963. La reprise des gîtes métalliques de la province métallogénique de Belledonne - Alpes françaises. Thèse de troisième cycle, Université de Grenoble, Grenoble, France.



Le Centre d'études sur les ressources minérales (CERM)

Le Centre d'études sur les ressources minérales a pour mission de développer et de coordonner les activités de recherche dans le domaine des ressources minérales à l'Université du Québec à Chicoutimi.

La recherche au CERM s'articule autour de trois principaux thèmes complémentaires :

- i. l'exploration minérale et les processus métallogéniques (formation des gisements),
- ii. la formation et l'évolution de la croûte continentale,
- iii. les eaux souterraines et l'hydrogéomécanique.

En plus de développer des connaissances sur les ressources minérales et de soutenir la formation de jeunes chercheurs, le CERM agit en tant qu'un acteur socioéconomique important en participant à l'élaboration de différentes stratégies régionales visant le développement minéral, les eaux souterraines et les minéraux industriels.

