

# MÉTAUX ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE AU QUÉBEC

## Rapport de l'étape 3.1 :

### Analyse des freins et leviers liés aux stratégies de circularité pour le cuivre, le fer et le lithium

Projet réalisé par l'Institut EDDEC et ses partenaires institutionnels  
et financé par le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles

31 mai 2017

## Équipe de réalisation

### Auteure :

- Hélène Gervais, chargée de projets et associée de recherche, Institut EDDEC

### Direction :

- Normand Mousseau, professeur, département de physique, Université de Montréal

### Révision :

- Olivier Bahn, professeur, département de sciences de la décision, HEC Montréal
- Manuele Margni, professeur, CIRAIG, génie industriel et mathématique, Polytechnique Montréal
- Daniel Normandin, directeur exécutif, Institut EDDEC
- Oumarou Savadogo, professeur, génie métallurgique, Polytechnique Montréal

## SOMMAIRE

### Contexte

Le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) du Québec a mandaté l'Institut EDDEC pour réaliser un projet de recherche en économie circulaire visant à évaluer le potentiel de circularité de trois métaux stratégiques pour le Québec, soit le fer, le cuivre et le lithium, de même qu'à documenter les impacts de l'industrie minière québécoise sur l'environnement. L'objectif de ce rapport d'étape est d'identifier les freins et les leviers de changement des acteurs au regard des différentes stratégies de circularité retenues pour les métaux à l'étude.

Dans une étape précédente du projet, une revue de littérature des meilleures pratiques en matière de circularité a été effectuée, en fonction de chacune des étapes du cycle de vie des métaux. Cela a permis d'identifier 41 stratégies de circularité, à l'échelle locale ou internationale, en lien avec les trois métaux étudiés (Institut EDDEC, 2016b)<sup>1</sup>. De ce nombre, 13 stratégies ont été retenues en vue d'une analyse sur les freins et les leviers, de concert avec l'équipe de recherche et les partenaires du projet.

### Méthodologie

Afin d'identifier les freins et les leviers liés aux stratégies de circularité sélectionnées, il a été convenu de réaliser des entrevues semi-dirigées avec des acteurs clés. Il s'agit soit d'experts, soit de représentants d'organisations susceptibles de mettre en œuvre les stratégies ou d'organisations qui les ont déjà implantées. La très grande majorité des personnes interrogées occupent des postes de direction au sein de leur organisation et possèdent une vision stratégique. Au total, 23 entrevues semi-dirigées, principalement téléphoniques, ont été réalisées. Le nombre d'intervenants interrogés par stratégie varie de un à cinq.

### Mise en garde :

Les informations présentées ci-dessous ont principalement pour objectif de rapporter les propos recueillis lors des entrevues avec les acteurs clés et ne reflètent pas nécessairement le point de vue de l'auteure et de ses collaborateurs. Les propositions formulées n'engagent pas non plus les acteurs gouvernementaux partenaires du projet. De plus, les informations fournies par les personnes interrogées n'ont pas, majoritairement, fait l'objet d'une validation. Compte tenu de l'échantillonnage relativement restreint de personnes interrogées, les informations ne peuvent, par ailleurs, être qualifiées d'exhaustives ou de statistiquement représentatives. Elles sont donc à interpréter avec discernement.

### Analyse des freins et des leviers liés aux stratégies de circularité

Pour chacune des 13 stratégies de circularité qui ont fait l'objet d'entrevues avec des acteurs clés, on présente typiquement les enjeux du secteur d'activités, la pertinence et la faisabilité de la stratégie, le degré d'avancement des acteurs au regard de cette stratégie de même que les mécanismes de mise en œuvre contextualisés au Québec. Par la suite, sont exposés les freins et les leviers associés à la mise en œuvre actuelle ou potentielle de la stratégie. Pour ce qui est des freins, on cherche à comprendre les risques, les

<sup>1</sup> Pour consulter le rapport « Synthèse des stratégies de circularité pour le cuivre, le fer et le lithium » de l'Institut EDDEC : <http://mern.gouv.qc.ca/publications/mines/metaux-economie-circulaire-quebec.pdf>

difficultés ou les blocages à anticiper dans le déploiement de la stratégie. Quant aux leviers, l'accent est mis sur les incitatifs pouvant stimuler la mise en œuvre de la stratégie, qu'ils soient financiers, réglementaires, sociaux ou autres. Enfin, des acteurs à impliquer dans le déploiement de la stratégie sont ciblés. Lorsque possible, des leaders, de même que des acteurs potentiellement intéressés ou réticents, sont identifiés.

Voici, dans le tableau suivant, une synthèse des freins et des leviers relevés pour chacune des stratégies de circularité retenues, en fonction des étapes de cycle de vie ou bien des produits contenant les métaux à l'étude.

Stratégie	Freins	Leviers
<b>EXTRACTION</b>		
<b>Développement technologique pour extraire les minerais de façon plus efficace</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Délocalisation et perte d'emplois, disponibilité limitée d'une main-d'œuvre qualifiée</li> <li>• Changement de culture organisationnelle et résistances aux changements</li> <li>• Sécurité des travailleurs en jeu, en présence d'équipements automatisés</li> <li>• Manque d'interopérabilité des systèmes de traitement de données</li> <li>• Disponibilité des données à accroître</li> <li>• Enjeu de cybersécurité</li> <li>• Automatisation plus difficile et dispendieuse dans les mines existantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Économie d'énergie et de temps, réduction des GES, réduction des risques d'accidents et meilleure rentabilité</li> <li>• Prolongation de la durée de vie des mines souterraines</li> <li>• Réouverture d'anciennes mines</li> <li>• Normes et réglementations environnementales</li> <li>• Formation de la relève et du personnel en fonction</li> <li>• Maintien et renforcement des rabais sur les tarifs d'électricité et des programmes gouvernementaux d'efficacité énergétique et de conversion</li> <li>• Recherche et développement</li> <li>• Adoption d'un code de gestion de risques (ex. : Australie)</li> <li>• Perspective globale d'amélioration des procédés et de génie industriel en faisant appel à des firmes de consultants</li> </ul>

EXTRACTION (suite)		
<p><b>Entreposage adéquat des résidus miniers en vue d'une extraction ultérieure suivant le développement technologique et la valeur du minerai (pensée à long terme)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obstacle financier : investissements importants en restauration, coûts de traitement des résidus vs valeur du minerai</li> <li>• Stabilité géotechnique et chimique des aires d'accumulation de résidus en contradiction avec l'entreposage pour un traitement ultérieur</li> <li>• Défis techniques pour récupérer le minerai ainsi que pour classer et déplacer les résidus</li> <li>• Perception des résidus miniers comme des déchets</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Déductions à la valorisation pour l'entreposage des résidus miniers en vue d'une extraction future</li> <li>• Coordination interministérielle pour l'arrimage des réglementations sur la gestion des résidus miniers</li> <li>• Ententes de partenariat pour le traitement des résidus miniers dans les sites miniers abandonnés</li> <li>• Ajout d'une section portant sur la valorisation des résidus miniers dans le guide de restauration<sup>2</sup></li> <li>• Information, sensibilisation et éducation des sociétés minières</li> <li>• Incitatifs économiques (ex. : fiscaux, crédits, subventions, tarifs réduits de transport)</li> <li>• Normes plus strictes sur les effluents miniers</li> <li>• Développement technologique pour la traçabilité, le déplacement et le traitement des résidus miniers; programmes d'aide en innovation</li> <li>• Pression sociale et image corporative</li> </ul>
<p><b>Mines urbaines (urban mining) : récupération des métaux disponibles en milieu urbain</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caractérisation difficile des gisements : quantités mises en marché, composition et durée de vie</li> <li>• Acier, cuivre et lithium principalement en usage</li> <li>• Propriété et considérations légales</li> <li>• Coûts</li> <li>• Évolution des produits vs retour sur l'investissement des recycleurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soutien à la recherche pour documenter les gisements et les modèles économiques</li> <li>• Internet des objets pour une meilleure traçabilité des produits et leurs métaux</li> <li>• Proximité des entreprises de recyclage avec leurs sources de matières secondaires</li> <li>• Modification aux lois et règlements pour permettre la récupération de produits ou d'infrastructures abandonnés</li> <li>• Subventions aux entreprises de recyclage</li> <li>• Étude prospective sur les besoins en métaux</li> </ul>

<sup>2</sup> Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec : [https://www.mern.gouv.qc.ca/mines/restauration/documents/Guide-restauration-sites-miniers\\_VF.pdf](https://www.mern.gouv.qc.ca/mines/restauration/documents/Guide-restauration-sites-miniers_VF.pdf)

**MÉTALLURGIE PRIMAIRE**
**Recyclage et symbiose industrielle pour les laitiers (scories) et les boues anodiques**
**Laitiers**

- Perception négative par rapport à la matière recyclée
- Définition de « matière résiduelle » qui limite la valorisation et l'innovation
- Défis techniques pour trouver des débouchés
- Rentabilité de la symbiose et concurrence avec la matière vierge

**Boues anodiques**

- Normes de transport contraignantes (matières dangereuses)
- Procédés d'électro-affinage et de traitement des boues soumis à des défis à cause de la variabilité des anodes et des boues importées

**Laitiers**

- Aciéries : compétition, rentabilité, acceptabilité sociale, GES, débouchés pour les rejets
- Démarchage pour attirer des entreprises près des aciéries
- Liens de confiance et collaboration entre les entreprises
- Investissement dans la R&D
- Directives pour l'achat de produits à contenu recyclé par les donneurs d'ordre
- Sensibilisation des entreprises pour leur faire valoir les sous-produits
- Médiateur externe pour convaincre les aciéries
- Formation des jeunes
- Programme de recrutement de stagiaires dans les aciéries pour travailler sur les résidus

**Boues anodiques**

- Rentabilité souhaitable, liée à la conversion des procédés au gaz naturel par l'hydroélectricité (crédits de carbone)
- Avenues réglementaires pour faciliter le transport des boues anodiques et l'obtention de permis d'importation
- Investissement dans la R&D

**TRANSFORMATION MÉTALLIQUE ET FABRICATION**
**Fabrication additive (impression 3D)**

- Normalisation et certification
- Coût élevé des équipements d'impression
- Difficulté pour les entreprises d'obtenir du financement
- Pas adaptée à toutes les applications et à la production de masse
- Limites de répétabilité
- Manque de main-d'œuvre spécialisée
- Ignorance des entreprises sur l'impression 3D de métaux
- Inertie dans le secteur manufacturier
- Pertes d'emplois

- Formation académique (ex. : bacc. en mécatronique) et continue, incitatifs aux entreprises pour la formation
- Programmes de financement ou incitatifs fiscaux pour l'achat d'imprimantes 3D
- Incitatifs pour les entreprises : pièces complexes et personnalisées, réduction du cycle de développement d'un produit, réduction de matières et de rejets, pas d'assemblage, allègement des pièces, etc.
- Choix de matériaux imprimables à accroître
- Diminution du coût des équipements
- Adaptation des normes
- Mobilisation par secteur d'activités s'appuyant sur des cas appliqués

FIN DE VIE		
Recyclage du fer	<p><b>Démantèlement des véhicules et réemploi des pièces</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Manipulation risquée des véhicules accidentés (sang) ou électriques (électrocution)</li> <li>• Normes strictes qui nuisent à la rentabilité</li> <li>• Démantèlement difficile d'alliage d'acier de haute densité et d'aluminium</li> <li>• Dépôts sauvages</li> </ul> <p><b>Tri et conditionnement</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mélanges de métaux qui se trient difficilement</li> <li>• Coût de transport en région éloignée</li> </ul> <p><b>Recyclage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Manque de ferraille (une question de prix)</li> <li>• Coût de transport de la ferraille</li> <li>• Exportation de résidus (ex. : oxyde de fer)</li> </ul>	<p><b>Démantèlement des véhicules et réemploi des pièces</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Décret en France obligeant les commerçants d'entretien ou de réparation à offrir des pièces de véhicules usagées</li> <li>• Inspection obligatoire des véhicules de 8 ans et plus et des véhicules usagés revendus</li> <li>• Obligation ou incitatif financier aux propriétaires pour la gestion écologique des véhicules en fin de vie et leur mise en rancart (meilleure traçabilité)</li> <li>• Réflexe à développer chez le citoyen pour le recours à des pièces usagées, changement des perceptions</li> </ul> <p><b>Tri et conditionnement</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• N/A</li> </ul> <p><b>Recyclage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Exportation de ferraille à éviter</li> <li>• Approvisionnement en ferraille de plusieurs sources, de meilleure qualité et dans un rayon acceptable</li> <li>• Redevances à l'élimination aux aciéries pour reconnaître leur contribution au recyclage</li> </ul>
Recyclage du cuivre	<p><i>L'absence de participation des acteurs clés n'a pas permis de faire l'analyse des freins et des leviers</i></p>	
Recyclage du lithium	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cinq différents matériaux de cathodes aux chimies distinctes</li> <li>• Lithium seul ne justifie pas le recyclage des batteries pour l'instant</li> <li>• Absence de filière de récupération des batteries lithium-ion des véhicules hybrides et électriques</li> <li>• Coût du recyclage et nécessité d'importantes quantités pour rentabiliser l'opération, concurrence avec Retriev Technologies</li> <li>• Quantité actuellement faible de batteries de véhicules</li> <li>• Polymère fluoré parfois problématique pour le recyclage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Présence de mines de lithium, d'expertise dans la batterie et faible coût de l'énergie hydroélectrique : Québec en bonne position</li> <li>• Transport de batteries (matières dangereuses) pouvant favoriser le recyclage local</li> <li>• Législation et incitatifs pour la récupération, le conditionnement et le recyclage des batteries lithium-ion de véhicules</li> <li>• Législation pour l'approvisionnement local de batteries de véhicules</li> <li>• Concertation avec les parties prenantes (symposium)</li> <li>• Appel de projets avec les universités et l'industrie pour le développement de procédés de recyclage</li> <li>• Phase pilote d'un procédé, soutenue par un programme de financement</li> <li>• Recyclage pour tous les types de batteries, pour une meilleure rentabilité</li> <li>• Batteries de véhicules rarement endommagées lorsque localisées à l'arrière du véhicule, facilitant le démantèlement en fin de vie</li> </ul>

PRODUITS		
<p><b>Modularité des équipements mécaniques et industriels facilitant leur réemploi</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effondrement d'un secteur industriel</li> <li>• Miniaturisation qui rend désuets des équipements</li> <li>• Équipements spécialisés et dédiés</li> <li>• Normes et spécifications</li> <li>• Carence de formation en écoconception</li> <li>• Financement insuffisant pour l'achat de produits de qualité par les usagers</li> </ul>	<p>Fabricants et fournisseurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rétention de la clientèle, argument de vente</li> <li>• Meilleure qualité du produit modulable</li> <li>• Appropriation des parts de marché des concurrents</li> <li>• Meilleure rentabilité par l'écoconception</li> <li>• Réduction du temps nécessaire à l'obtention des approbations en fonction des normes, pour un équipement modulable</li> </ul> <p>Industries :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût de l'équipement qui incite à l'allongement de la durée de vie, diminution du cycle commercial des produits, ateliers en usine</li> </ul> <p>Autres :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Courtiers d'équipements usagés</li> <li>• Formation en écoconception</li> <li>• Services d'écoconception offerts aux entreprises (surtout les PME) par le gouvernement (équipe experte dédiée), services d'écoconception de proximité (ex. : CLD)</li> <li>• Incitatifs fiscaux encourageant l'adaptation, la réparation ou la remise à neuf</li> </ul>
<p><b>Écoconception des poutres en acier permettant leur réemploi</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Règle du plus bas soumissionnaire limitant l'innovation et la qualité</li> <li>• Augmentation possible du coût de l'acier par rapport à d'autres matériaux sans exigence de réemploi</li> <li>• Temps et main-d'œuvre pour le démontage nuisant à la rentabilité</li> <li>• Normes du Code du bâtiment : intégrité de la poutre et coefficient de sécurité</li> <li>• Faible disponibilité des poutres d'acier usagées</li> <li>• Fin de vie des poutres n'étant pas une préoccupation pour les fabricants</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projet de loi en cours d'adoption pour les paiements plus rapides des travaux de construction : entrepreneurs en meilleure position pour investir dans l'écoconception</li> <li>• Développement de standards de concert avec tous les acteurs</li> <li>• Crédits à la déconstruction</li> <li>• Qualité à mettre davantage à l'avant dans les critères d'évaluation des soumissions</li> <li>• Rareté de l'acier pouvant entraîner les fabricants à garder la mainmise de leurs poutres</li> <li>• Conditions ambiantes propices à l'intégrité des poutres</li> <li>• Poutres conçues pour durer et pour être démontées (ex. : systèmes d'attaches)</li> </ul>

**PRODUITS (suite)**

<b>Déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réglementation et décret de la construction : seuils salariaux élevés</li> <li>• Marché des matériaux usagés : dimensions non standards</li> <li>• Marché de réemploi des matériaux peu structuré, mise en marché déficiente, jonction offre/demande aléatoire et peu conviviale</li> <li>• Statut de « matières résiduelles » aux matériaux récupérés sur chantiers, même à des fins de réemploi</li> <li>• Bas tarifs à l'élimination</li> <li>• Réticences des entrepreneurs à modifier leurs habitudes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Allègement de la réglementation pour la déconstruction (ex. : nouvelles catégories de corps de métiers)</li> <li>• Création d'emplois et réinsertion sociale</li> <li>• Volonté des entrepreneurs de faire les choses autrement, logistique de ségrégation des matériaux avec des conteneurs</li> <li>• Bannissement des métaux des lieux d'élimination</li> <li>• Programme de financement pour le démarrage d'entreprises de déconstruction</li> <li>• Mission entrepreneuriale en déconstruction</li> <li>• États généraux sur la déconstruction</li> <li>• Modèle caritatif pour les entreprises de déconstruction (reçu de charité déductible d'impôts pour les propriétaires donnant leurs matériaux)</li> <li>• Incitatifs municipaux : crédits d'impôts, rabais, gratuité à l'enfouissement des résidus; délivrance rapide de permis de déconstruction</li> <li>• Réseau structuré de réemploi des matériaux : inventaire, entreposage (intérieur), commercialisation, plateformes</li> </ul>
<b>Écoconception des véhicules</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Constructeurs se limitant à leurs obligations</li> <li>• Pas d'effet de levier pour le Québec qui est un petit marché</li> <li>• Constructeurs peu motivés à construire des véhicules électriques : pas assez de revenus, modification des procédés, dépendance pour la batterie</li> <li>• Concessionnaires qui encouragent les véhicules à essence pour le service après-vente (revenus)</li> <li>• Contraintes sur l'écoconception pas assez agressives dans les appels d'offres (ex. : autobus et camions)</li> <li>• Résistances, pressions et menaces des constructeurs en cas d'ingérence de l'État</li> <li>• Lobby pétrolier</li> <li>• Résistances aux changements par les consommateurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incitatifs gouvernementaux (municipal, provincial, fédéral) pour encourager les véhicules électriques (financement, voies réservées, stationnements gratuits)</li> <li>• Loi VZE du Gouvernement du Québec qui obligera les constructeurs automobiles à respecter une cible annuelle de vente de VZE</li> <li>• Directive européenne rendant les constructeurs responsables de la fin de vie de leurs véhicules et qui fixe des règles d'écoconception</li> <li>• Compétitivité chez les constructeurs</li> <li>• Programmes d'aide du MTMDET favorisant la durabilité des autobus publics et l'électrification des autobus scolaires</li> <li>• Augmentation du coût de l'essence</li> <li>• Écart important entre le prix de l'essence et le prix de l'électricité (faible en émissions GES) au Québec</li> <li>• Information, sensibilisation et éducation des consommateurs</li> </ul>

**PRODUITS (suite)**
**Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées provenant de véhicules hybrides et électriques**

- Transport des batteries usagées : coût et normes
- Réglementation pouvant limiter l'emploi de batteries usagées
- Système informatique (logiciel) complexe à développer avec des batteries variables
- Normes de sécurité différentes pour le bâtiment et le réseau de distribution
- Sécurité (incendie)
- Froid

**Projet ELSA (Europe) :**

- Subventions gouvernementales
- Réponse au manque de débouchés pour les batteries usagées (difficulté de recycler)
- Marché suffisant de batteries usagées
- Évolution de la réglementation pour permettre ce type d'application
- Exigences de stockage dans les appels d'offres de certains pays européens
- Financement pour le stockage (ex. : Allemagne)
- Prix compétitif par rapport à un système de stockage avec des batteries neuves
- Subventions des gouvernements et des villes pour la R&D sur le stockage
- Électrification des transports
- Économies d'électricité, énergies renouvelables favorisées, coupures d'électricité évitées, création d'emplois

**Québec :**

- Communautés isolées et entreprises minières en régions éloignées, étant propices à des applications de stockage
- Énergie solaire et éolienne en développement
- Études de faisabilité économique, de vieillissement des batteries, de modélisation, de simulation, analyse technico-économique
- Économie de fonctionnalité chez les fabricants de batteries pour un meilleur suivi des batteries
- Intégration des surplus d'énergie au réseau d'Hydro-Québec et intégration de systèmes de stockage de grande capacité dans son réseau

Grâce à cette analyse des freins et leviers, il est possible d'anticiper les stratégies de circularité pour le cuivre, le fer et le lithium qui sont les plus susceptibles d'être mises en œuvre au Québec ou celles pour lesquelles il y aurait lieu d'approfondir l'analyse. D'ailleurs, dans le cadre du projet, une analyse technico-économique des stratégies retenues, de même qu'une analyse de cycle de vie conséquente, sont prévues. Cela devrait concourir à la recommandation de stratégies de circularité à privilégier au Québec, pour les trois métaux étudiés.

## TABLE DES MATIÈRES

Sommaire.....	ii
Table des matières.....	x
Liste des figures.....	xiv
Liste des tableaux.....	xv
1 Introduction.....	1
2 Méthodologie.....	2
2.1 Sélection des stratégies.....	2
2.2 Entrevues.....	5
3 Analyse des freins et des leviers liés aux stratégies de circularité.....	8
3.1 Développement technologique pour extraire les minerais de façon plus efficace.....	8
3.1.1 Pertinence et faisabilité.....	8
3.1.2 Mise en œuvre.....	9
3.1.3 Degré d'avancement.....	10
3.1.4 Freins.....	10
3.1.5 Leviers.....	11
3.1.6 Acteurs.....	13
3.2 Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure suivant le développement technologique et la valeur du minerai (pensée à long terme).....	14
3.2.1 Enjeux du secteur.....	14
3.2.2 Pertinence et faisabilité.....	14
3.2.3 Mise en œuvre.....	14
3.2.4 Degré d'avancement.....	15
3.2.5 Freins.....	15
3.2.6 Leviers.....	16
3.2.7 Acteurs.....	18
3.3 Mines urbaines ( <i>urban mining</i> ) : récupération des métaux disponibles en milieu urbain.....	19
3.3.1 Pertinence et faisabilité.....	19
3.3.2 Mise en œuvre.....	19
3.3.3 Degré d'avancement.....	20

3.3.4	Freins .....	20
3.3.5	Leviers .....	20
3.3.6	Acteurs .....	21
3.4	Recyclage et symbiose industrielle pour les laitiers (scories) et les boues anodiques .....	22
3.4.1	Enjeux du secteur .....	22
3.4.2	Pertinence et faisabilité .....	22
3.4.3	Mise en œuvre .....	23
3.4.4	Degré d'avancement .....	23
3.4.5	Freins .....	23
3.4.6	Leviers .....	24
3.4.7	Acteurs .....	26
3.5	Fabrication additive (impression 3D) : fabrication de pièces métalliques optimisant le processus de fabrication et stimulant la réparation .....	27
3.5.1	Pertinence et faisabilité .....	27
3.5.2	Mise en œuvre .....	27
3.5.3	Degré d'avancement .....	28
3.5.4	Freins .....	29
3.5.5	Leviers .....	30
3.5.6	Acteurs .....	31
3.6	Recyclage du fer .....	32
3.6.1	Enjeux du secteur .....	32
3.6.2	Pertinence et faisabilité .....	32
3.6.3	Mise en œuvre .....	32
3.6.4	Degré d'avancement .....	33
3.6.5	Freins .....	33
3.6.6	Leviers .....	34
3.6.7	Acteurs .....	35
3.7	Recyclage du cuivre .....	36
3.8	Recyclage du lithium .....	36
3.8.1	Pertinence et faisabilité .....	37
3.8.2	Mise en œuvre et degré d'avancement .....	37

3.8.3	Freins .....	37
3.8.4	Leviers .....	38
3.8.5	Acteurs .....	39
3.9	Modularités des équipements mécaniques et industriels, facilitant leur réemploi .....	40
3.9.1	Pertinence et faisabilité .....	40
3.9.2	Mise en œuvre .....	40
3.9.3	Degré d'avancement .....	41
3.9.4	Freins .....	42
3.9.5	Leviers .....	42
3.9.6	Acteurs .....	44
3.10	Écoconception des poutres en acier permettant leur réemploi .....	45
3.10.1	Enjeux du secteur .....	45
3.10.2	Pertinence et faisabilité .....	45
3.10.3	Mise en œuvre .....	45
3.10.4	Degré d'avancement .....	46
3.10.5	Freins .....	46
3.10.6	Leviers .....	46
3.10.7	Acteurs .....	47
3.11	Déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures .....	48
3.11.1	Enjeux du secteur .....	48
3.11.2	Pertinence et faisabilité .....	48
3.11.3	Mise en œuvre .....	48
3.11.4	Degré d'avancement .....	49
3.11.5	Freins .....	49
3.11.6	Leviers .....	50
3.11.7	Acteurs .....	51
3.12	Écoconception des véhicules .....	52
3.12.1	Enjeux du secteur .....	52
3.12.2	Pertinence et faisabilité .....	53
3.12.3	Mise en œuvre .....	53
3.12.4	Degré d'avancement .....	54

3.12.5	Freins .....	54
3.12.6	Leviers .....	55
3.12.7	Acteurs .....	57
3.13	Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées provenant de véhicules hybrides et électriques .....	58
3.13.1	Pertinence et faisabilité .....	58
3.13.2	Mise en œuvre .....	58
3.13.3	Degré d'avancement .....	60
3.13.4	Freins .....	60
3.13.5	Leviers .....	61
3.13.6	Acteurs .....	63
4	Conclusion .....	65
5	Références .....	67
Annexe 1	.....	69

## LISTE DES FIGURES

Figure 3-1	Tracteur articulé pour le nettoyage des trottoirs (Ville de Longueuil, 2017).....	41
Figure 3-2	Système de stockage ELSA – projet pilote dans un district allemand (ELSA, 2017).....	59

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1	Stratégies de circularité sélectionnées pour l'analyse des freins et leviers.....	3
Tableau 2-2	Nombre d'intervenants interrogés par stratégie.....	5
Tableau 3-1	Développement technologique pour extraire les minerais de façon plus efficace : freins et leviers.....	13
Tableau 3-2	Entreposage adéquat des résidus miniers en vue d'une extraction ultérieure suivant le développement technologique et la valeur du minerai (pensée à long terme) : freins et leviers.....	18
Tableau 3-3	Mines urbaines (urban mining) – récupération des métaux disponibles en milieu urbain : freins et leviers.....	21
Tableau 3-4	Recyclage et symbiose industrielle pour les laitiers (scories) et les boues anodiques : freins et leviers.....	26
Tableau 3-5	Fabrication additive (impression 3D) : fabrication de pièces métalliques optimisant le processus de fabrication et stimulant la réparation : freins et leviers.....	31
Tableau 3-6	Recyclage du fer : freins et leviers.....	35
Tableau 3-7	Recyclage du lithium : freins et leviers.....	39
Tableau 3-8	Modularité des équipements mécaniques et industriels, facilitant leur réemploi.....	44
Tableau 3-9	Écoconception des poutres d'acier permettant leur réemploi : freins et leviers.....	47
Tableau 3-10	Déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures : freins et leviers.....	51
Tableau 3-11	Écoconception des véhicules : freins et leviers.....	57
Tableau 3-12	Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées provenant de véhicules hybrides et électriques : freins et leviers.....	63

## 1 INTRODUCTION

L'économie circulaire, qui s'oppose à l'économie linéaire, est un système de production, d'échange et de consommation visant à optimiser l'utilisation des ressources à toutes les étapes du cycle de vie d'un bien ou d'un service, dans une logique circulaire, tout en réduisant l'empreinte environnementale et en contribuant au bien-être des individus et des collectivités (Institut EDDEC, 2016a).

Le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) a mandaté l'Institut EDDEC pour réaliser un projet de recherche en économie circulaire visant à évaluer le potentiel de circularité de trois métaux stratégiques pour le Québec, soit le fer, le cuivre et le lithium de même qu'à documenter les impacts de l'industrie minière québécoise sur l'environnement.

Dans une étape précédente du projet, une revue de littérature des meilleures pratiques en matière de circularité a été effectuée, en fonction de chacune des étapes du cycle de vie des métaux. Cela a permis d'identifier 41 stratégies de circularité, à l'échelle locale ou internationale, en lien avec les trois métaux étudiés (Institut EDDEC, 2016b)<sup>3</sup>.

L'objectif de ce rapport d'étape est d'identifier les freins et les leviers de changement des acteurs au regard des différentes stratégies de circularité pour les métaux à l'étude. Cette analyse est effectuée sur la base d'une sélection de 13 stratégies jugées comme étant les plus prometteuses.

Des entrevues avec des acteurs clés ont été réalisées afin de recueillir leur perception sur la pertinence et la faisabilité de ces stratégies, de même que de relever les freins et leviers liés à leur mise en œuvre. Ces entrevues ont également permis de mieux comprendre les mécanismes de déploiement de ces stratégies, particulièrement dans le contexte québécois.

La première partie de ce rapport expose la démarche méthodologique qui a conduit à la sélection des stratégies, de même que celle privilégiée pour les entrevues. La seconde partie rend compte des informations recueillies lors des entrevues, et ce, pour chacune des stratégies de circularité. On y présente d'abord les enjeux du secteur, la pertinence et la faisabilité de la stratégie, ses mécanismes de mise en œuvre, le degré d'avancement des acteurs au regard de la stratégie, puis les freins et les leviers associés à son application et enfin, les acteurs à impliquer dans son déploiement.

Cette analyse des freins et leviers de changement auprès des acteurs du milieu susceptibles de les mettre en œuvre permet de mieux ancrer les stratégies dans leur contexte réel, et ce, particulièrement au Québec. Par la suite seront effectuées une analyse technico-économique ainsi qu'une analyse de cycle de vie (ACV) conséquente des stratégies jugées les plus pertinentes en regard de l'analyse des freins et des leviers. Cette démarche conduira à la formulation de recommandations quant aux stratégies de circularité à privilégier pour le Québec.

---

<sup>3</sup> Pour consulter le rapport « Synthèse des stratégies de circularité pour le cuivre, le fer et le lithium » de l'Institut EDDEC : <http://mern.gouv.qc.ca/publications/mines/metaux-economie-circulaire-quebec.pdf>

## 2 MÉTHODOLOGIE

Avant de présenter les résultats relativement aux freins et leviers liés aux stratégies de circularité, il convient d'exposer la démarche méthodologique qui a été utilisée pour la sélection des stratégies, de même que celle employée pour les entrevues auprès des acteurs du milieu.

### 2.1 Sélection des stratégies

La revue de littérature, réalisée à l'étape précédente du projet, a permis de relever 41 stratégies de circularité en lien avec les trois métaux étudiés. Une analyse des freins et leviers sur un nombre aussi élevé de stratégies s'avérait difficile eu égard à l'échéancier et aux ressources disponibles dans le cadre du projet. Bien que ces stratégies présentent toutes un intérêt dans une perspective d'économie circulaire, une sélection s'imposait pour la poursuite de l'analyse.

L'équipe de recherche a donc procédé à une sélection préliminaire de stratégies à l'aide d'une grille multicritères pondérée. Les critères suivants ont été considérés :

- potentiel de mise en œuvre au Québec;
- faisabilité technique et opérationnelle;
- pertinence générale;
- quantité de métal ciblée;
- préservation de la valeur de la ressource;
- retombées environnementales, économiques et sociales potentielles.

L'équipe du MERN, pour sa part, a également effectué une sélection préliminaire de stratégies à l'aide d'une grille pour laquelle les critères de faisabilité technique et de pertinence étaient pris en considération. Dans sa sélection, le MERN a pris soin de sélectionner des stratégies dans chacune des étapes de cycle de vie des métaux et correspondant à la majorité des produits visés.

Une rencontre en mars 2017 a réuni l'équipe de recherche de l'Institut EDDEC, des représentants du MERN de même que des représentants de ministères et organismes gouvernementaux nouvellement impliqués dans le projet. Il s'agit du ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation (MESI), du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) ainsi que de la société d'État RECYC-QUÉBEC. Le MERN et ces ministères et organismes forment le Groupe de travail interministériel sur les métaux et l'économie circulaire, qui a pour mandat de donner des orientations à l'Institut EDDEC et de commenter les divers livrables dans le cadre du projet.

Cette rencontre avait pour objectif de procéder à la sélection finale des stratégies, par une mise en commun des sélections réalisées préalablement ainsi que par un échange de points de vue sur la pertinence et le potentiel des différentes stratégies. Au terme de cette rencontre, 13 stratégies ont été retenues en vue d'une analyse sur les freins et les leviers.

Par ailleurs, toutes les stratégies portant sur le recyclage des métaux ou des produits contenant les métaux ont été regroupées en trois stratégies, soit : le recyclage du fer, le recyclage du cuivre et le recyclage du lithium. De plus, la stratégie sur la modularité des procédés industriels a été reformulée par la modularité

des équipements mécaniques et industriels, laquelle présentait un plus grand intérêt du point de vue des partenaires.

Le tableau 2-1 présente la liste des stratégies de circularité retenues pour l'analyse des freins et leviers, en fonction des étapes de cycle de vie ou bien des produits contenant les métaux à l'étude. Le type de stratégie ou d'outil de circularité y est également présenté.

*Tableau 2-1 Stratégies de circularité sélectionnées pour l'analyse des freins et leviers*

Étape / produit	Stratégie	Type(s) de stratégie(s) / outil(s)
Extraction	Développement technologique (logiciels, robotique) pour extraire les minerais de façon plus efficace	Extraction efficace
	Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure suivant le développement technologique et la valeur du minerai (pensée à long terme)	Extraction efficace
	Mines urbaines ( <i>urban mining</i> ) : récupération des métaux disponibles en milieu urbain	Extraction efficace, recyclage
Métallurgie primaire	Recyclage et symbiose industrielle pour les laitiers (scories) et les boues anodiques <u>Exemples :</u> - Laitiers utilisés pour routes, remblais, béton, amendements agricoles (ex. : ArcelorMittal, Contrecœur) - Utilisation des laitiers comme amendement agricole et agrégat (ex. : Les Minéraux Harsco, Contrecœur) - Séquestration de CO2 avec les sous-produits de l'industrie métallurgique (ex. : CTTÉI, Sorel-Tracy) - Céramiques de stockage d'énergie thermique à partir des laitiers (ex. : Eco-Tech Ceram, France) - Récupération des métaux (précieux) dans les boues anodiques (ex. : Affinerie CCR, Montréal-Est)	Recyclage et symbiose industrielle
Transformation métallique et fabrication	Fabrication additive (impression 3D) : fabrication de pièces métalliques optimisant le processus de fabrication et stimulant la réparation	Écoconception et réparation

Étape / produit	Stratégie	Type(s) de stratégie(s) / outil(s)
Fin de vie	Recyclage du fer <u>Exemples :</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Recyclage par AIM, Arcelor Mittal, etc.</li> <li>- Recyclage des alliages : organiser des filières de récupération et des applications dans lesquelles les alliages conservent leur fonction, R&amp;D pour défaire les alliages</li> <li>- Programme de reprise des véhicules (ex. : Renault, France)</li> <li>- Démantèlement et recyclage de trains (ex. : Véolia, France)</li> <li>- Recyclage des automobiles (ex. : Total Métal Récupération, Laval)</li> </ul>	Recyclage
	Recyclage du cuivre <u>Exemples :</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Recyclage de câbles et fils (ex. : Nexans et Recycâbles, France)</li> <li>- Recyclage des téléphones mobiles et ordinateurs portables</li> </ul>	Recyclage
	Recyclage du lithium (des batteries lithium-ion) <u>Exemples :</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Recyclage par Retriev Technologies (Colombie-Britannique)</li> <li>- Recyclage par Xtrata – Glencore (Ontario)</li> <li>- Recyclage par Recupyl (Singapour)</li> <li>- Recyclage par Umicore (Belgique)</li> </ul>	Recyclage
Équipements mécaniques et industriels	Modularité des équipements mécaniques et industriels, facilitant leur réemploi	Maintenance, réparation, réemploi
Bâti (bâtiments et infrastructures)	Écoconception des poutres en acier permettant leur réemploi	Écoconception, réemploi
	Déconstruction sélective <u>Exemples :</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Déconstruction des édifices (Japon)</li> <li>- Échangeur Turcot (Montréal)</li> <li>- Recyclage de fenêtres par Saint-Gobain (France)</li> </ul>	Réemploi, recyclage
Véhicules (voitures, camions, autobus, trains, bateaux, avions)	Écoconception des véhicules <u>Exemples :</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Véhicules plus légers et résistants, ArcelorMittal</li> <li>- Voiture modulaire eMOC (Barcelone)</li> </ul>	Écoconception pour réduction et réemploi
Batteries Li-ion	Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées provenant de véhicules hybrides et électriques	Reconditionnement, réusinage

## 2.2 Entrevues

Afin d'identifier les freins et les leviers liés aux stratégies de circularité sélectionnées, il a été convenu de réaliser des entrevues semi-dirigées avec des acteurs clés.

Pour chacune des 13 stratégies de circularité retenues, des intervenants potentiels ont été ciblés pour participer à ces entrevues. Certains d'entre eux ont été suggérés par le Groupe de travail interministériel sur les métaux et l'économie circulaire; d'autres ont été recommandés par des personnes interrogées lors des entrevues ou encore, ont été ciblés au gré des communications et des recherches sur Internet.

Les acteurs interrogés sont soit des experts (ex. : professeurs, consultants), soit des représentants d'organisations susceptibles de mettre en œuvre les stratégies ou d'organisations qui les ont déjà implantées. Dans la mesure du possible, à la fois des experts et des représentants du secteur industriel ont été interrogés pour une même stratégie, afin de recueillir une variété et une complémentarité de points de vue. De plus, lorsque possible, des représentants d'association regroupant plusieurs membres ou ayant une vision globale de la situation québécoise ont été privilégiés par rapport à ceux issus d'une seule organisation. La très grande majorité des personnes interrogées occupent des postes de direction au sein de leur organisation (ex. : président, directeur général) et par conséquent, avaient une vision stratégique des enjeux associés à la mise en œuvre des stratégies.

Les entrevues ont eu lieu du 29 mars au 11 mai 2017. Au total, 23 entrevues semi-dirigées ont été réalisées et 24 personnes ont été interrogées, car une des entrevues a réuni deux experts. Sur les 23 entrevues réalisées, quatre se sont effectuées en personne et 19 ont été réalisées au téléphone. Le tableau 2-2 présente le nombre d'intervenants interrogés par stratégie, lequel varie de un à cinq. Les intervenants ont été interrogés sur une à trois stratégies, selon leurs champs de compétences.

*Tableau 2-2 Nombre d'intervenants interrogés par stratégie*

Étape / produit	Stratégie	Nombre d'intervenants interrogés
Extraction	Développement technologique (logiciels, robotique) pour extraire les minerais de façon plus efficace	2
	Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure suivant le développement technologique et la valeur du minerai (pensée à long terme)	2
	Mines urbaines ( <i>urban mining</i> ) : récupération des métaux disponibles en milieu urbain	1
Métallurgie primaire	Recyclage et symbiose industrielle pour les laitiers (scories) et les boues anodiques	3
Transformation métallique et fabrication	Fabrication additive (impression 3D) : fabrication de pièces métalliques optimisant le processus de fabrication et stimulant la réparation	2
Fin de vie	Recyclage du fer	3
	Recyclage du cuivre	0
	Recyclage du lithium (des batteries lithium-ion)	4

Étape / produit	Stratégie	Nombre d'intervenants interrogés
Équipements mécaniques et industriels	Modularité des équipements mécaniques et industriels, facilitant leur réemploi	2
Bâti (bâtiments et infrastructures)	Écoconception des poutres en acier permettant leur réemploi	2
	Déconstruction sélective	2
Véhicules (voitures, camions, autobus, trains, bateaux, avions)	Écoconception des véhicules	3
Batteries Li-ion	Stockage d'énergie avec des batteries Lithium-ion usagées provenant de véhicules hybrides et électriques	5

On remarque dans le tableau que pour la stratégie sur les mines urbaines, il n'y a qu'un seul participant interrogé. Ce faible nombre s'explique principalement par le caractère émergent de la stratégie ainsi que par l'absence d'expertise locale dans ce domaine. L'intervenant qui a été interrogé est d'ailleurs situé en France. Pour cette stratégie, les résultats présentés s'avèrent partiels et doivent donc être interprétés avec prudence. Pour le recyclage du cuivre, bien que certaines informations aient été recueillies, aucun des intervenants contactés n'a accepté de participer à l'entrevue. Cela a donc rendu impossible l'analyse des freins et des leviers.

Pour la stratégie sur l'écoconception des poutres en acier, il convient de mentionner qu'un des intervenants a sondé ses membres par écrit. Ainsi, trois fabricants de poutres d'acier ont répondu aux questions. Si nous les ajoutons au compte, nous obtiendrions alors cinq intervenants interrogés.

On ne peut prétendre à une représentativité statistique des résultats. L'objectif de ces entrevues semi-dirigées était de sonder le terrain, de recueillir des informations de nature principalement qualitative sous la forme d'opinions, de suggestions ou de commentaires.

Les principaux thèmes abordés lors des entrevues étaient les suivants :

- enjeux du secteur d'activité;
- pertinence et faisabilité de la stratégie ;
- freins et leviers à la mise en œuvre de la stratégie;
- acteurs pour la mise en œuvre de la stratégie.

Pour plus de détails, veuillez consulter le guide d'entretien à l'annexe 1. Les entrevues duraient en moyenne une heure et prenaient la forme d'une discussion semi-dirigée articulée autour des thèmes. L'intervieweuse était Hélène Gervais, chargée de projets et associée de recherche à l'Institut EDDEC et auteure du présent rapport. Kathleen Vaillancourt, présidente d'ESMIA Consultants et membre de l'équipe de recherche, a participé comme auditrice à certaines des entrevues, afin de recueillir des informations utiles pour l'analyse technico-économique. Des notes ont été prises au cours des entrevues, car ces dernières n'étaient pas enregistrées, et les informations ont été colligées.

Au niveau de la confidentialité, les personnes interrogées étaient informées, à la fois par écrit et verbalement, que les informations recueillies seraient synthétisées dans un rapport de façon globale, sans compte-rendu nominatif, de façon à préserver leur anonymat.

Subséquentement à certaines entrevues, des intervenants ont transmis de la documentation complémentaire telle que des études, des rapports ou des présentations. Ces documents se sont avérés utiles pour bonifier l'analyse des freins et des leviers ou pourront l'être pour les étapes subséquentes du projet de recherche.

### 3 ANALYSE DES FREINS ET DES LEVIERS LIÉS AUX STRATÉGIES DE CIRCULARITÉ

Pour chacune des 13 stratégies de circularité qui ont fait l'objet d'entrevues avec des acteurs clés, le contexte dans lequel s'inscrit la mise en œuvre des stratégies est d'abord présenté. Ce contexte inclut typiquement les enjeux du secteur d'activités, la pertinence et la faisabilité de la stratégie, le degré d'avancement des acteurs au regard de cette stratégie de même que des informations sur les mécanismes de mise en œuvre. Ces informations se trouvent davantage ancrées dans la réalité québécoise et s'avèrent complémentaires à la description des stratégies comprise dans le précédent rapport d'étape.

Par la suite, sont exposés les freins et les leviers associés à la mise en œuvre actuelle ou potentielle de la stratégie. Pour ce qui est des freins, on cherche à comprendre les risques, les difficultés ou les blocages à anticiper dans le déploiement de la stratégie. Quant aux leviers, l'accent est mis sur les incitatifs pouvant stimuler l'implantation de la stratégie, qu'ils soient financiers, réglementaires, sociaux ou autres. Enfin, des acteurs à impliquer dans le déploiement de la stratégie sont ciblés. Lorsque possible, des leaders, de même des acteurs potentiellement intéressés ou réticents, sont identifiés.

#### **Mise en garde :**

Les informations présentées ci-dessous ont principalement pour objectif de rapporter les propos recueillis lors des entrevues avec les acteurs clés et ne reflètent pas nécessairement le point de vue de l'auteure et de ses collaborateurs. Les propositions formulées n'engagent pas non plus les acteurs gouvernementaux partenaires du projet. De plus, les informations fournies par les personnes interrogées n'ont pas, majoritairement, fait l'objet d'une validation. Compte tenu de l'échantillonnage relativement restreint de personnes interrogées, les informations ne peuvent, par ailleurs, être qualifiées d'exhaustives ou de statistiquement représentatives. Elles sont donc à interpréter avec discernement.

#### 3.1 Développement technologique pour extraire les minerais de façon plus efficace

Avec l'arrivée de l'ère numérique, l'automatisation dans les opérations d'extraction minière prend de plus en plus d'importance. Dans une optique d'économie circulaire, même si cette stratégie ne vise pas directement la circularité de la matière, elle permet une optimisation de l'extraction afin de minimiser autant que possible les impacts sur l'environnement, tout en contribuant à la rentabilité des entreprises.

##### 3.1.1 Pertinence et faisabilité

Les fournisseurs développent des outils d'automatisation depuis une vingtaine d'années au Québec et les technologies s'appliquent à tout type de minerai. L'appétit et l'intérêt des entreprises minières pour l'implantation des diverses technologies sont de plus en plus importants, car cette démarche est souvent synonyme d'une meilleure rentabilité. L'automatisation, qu'elle soit pour des applications fixes ou mobiles, progresse donc rapidement à l'heure actuelle.

Dans une perspective d'optimisation de l'extraction minière et de diminution des impacts environnementaux, les technologies peuvent permettre d'exploiter d'anciennes mines ou encore, de prolonger la vie de mines existantes, comme nous le verrons plus loin.

### 3.1.2 Mise en œuvre

Lorsqu'on fait référence aux nouvelles technologies dans le secteur minier, les termes « industrie 4.0 » ou encore « *mining of the future* » sont présents dans le discours. L'objectif visé par l'adoption de ces technologies est essentiellement de réduire les coûts d'opération. Une automatisation des opérations peut réduire d'environ 15 % les coûts d'opération, selon les technologies et les activités minières. Ce gain au niveau de la rentabilité est rendu possible principalement grâce aux économies d'énergie et de carburant.

De façon générale, ces technologies vont d'abord s'implanter dans les mines à ciel ouvert, puis se déployer dans les mines souterraines, où les conditions sont plus hostiles. Voici une brève description de certaines d'entre elles.

#### Camions automatisés

Il existe sur le marché des camions automatisés, sans cabine et sans conducteur, qui sont contrôlés à distance par un employé devant un écran, plutôt qu'au volant. Sur ces camions sont placés des senseurs à l'avant ainsi que sur chacune des roues, qui permettent de calculer les vibrations et de faire de la maintenance préventive. On retrouve également des équipements automatisés dans les mines souterraines, comme des chargeuses-navettes, par exemple.

Il est possible d'automatiser jusqu'à un certain point les véhicules conventionnels. Si le véhicule a moins d'une dizaine d'années environ, des équipements de contrôle à distance peuvent y être installés. À la différence d'un véhicule entièrement automatisé, dans ce cas-ci, un opérateur demeure nécessaire.

#### Foreuses

Dans les opérations minières, il faut faire des forages systématiques verticaux, puis on procède au sautage (explosions). Il est possible d'instrumenter les foreuses par l'installation d'un système qui analyse la composition du minerai. Les données sont traitées rapidement, en temps réel. Après avoir fait une grille de forage, on peut alors déterminer la composition et la teneur en minerais et vérifier par ailleurs si certains minerais pourraient éventuellement générer du drainage minier acide (DMA). Il existe aussi des foreuses automatisées contrôlées à distance, qui offrent une précision accrue et une meilleure reproductibilité. Le sautage, quant à lui, peut même être effectué à distance à partir d'une salle de contrôle, ce qui accroît le niveau de sécurité de l'opération.

#### Capteurs

Sur le marché, il existe divers capteurs qui peuvent être placés sur les équipements afin de détecter par exemple les mouvements, la température, le niveau d'huile ou les signaux électriques. L'installation de ces capteurs facilite la maintenance préventive, entraînant ainsi des gains de productivité et une réduction de la consommation d'énergie. Ces capteurs nécessitent un système de traitement de données et des ingénieurs pour en faire l'analyse.

#### Simulateurs

La réalité virtuelle est de plus en plus utilisée pour la formation des travailleurs. Cet apprentissage par simulation est notamment utilisé pour les activités de forage ou pour la conduite d'équipements lourds. La formation immersive accroît les habiletés des employés et les prépare à la mise en application des opérations sur le terrain.

### Ventilation sur demande

Dans les mines souterraines, la ventilation représente un élément-clé aux opérations. Dans certaines mines, cette opération est entièrement instrumentée et connectée par le biais d'un réseau de traitement de données. L'entreprise peut ainsi adapter la ventilation en fonction des activités souterraines, sur demande. Ce système génère donc des économies d'énergie substantielles, notamment attribuables à la diminution de la consommation d'électricité pour atteindre les débits et les vitesses d'air requis ou encore, à la réduction de l'utilisation de propane pour le chauffage de l'air.

#### 3.1.3 Degré d'avancement

Le développement technologique progresse plus rapidement que l'implantation des technologies sur le terrain, mais le secteur minier se dirige vers l'automatisation. L'industrie minière se situerait à environ 30 à 40 % de l'atteinte complète de cette vision de l'automatisation. Un plus haut degré d'automatisation est observé dans les usines de traitement de minerais. Au Québec, c'est la mine d'or Éléonore, de la société Goldcorp, qui serait la plus avancée d'un point de vue technologique. Cette mine étant récente, elle a pu automatiser ses opérations dès le début. Il s'agirait de la seule mine à avoir installé des systèmes de localisation GPS sur chacun de ses équipements et de ses employés afin de suivre leur position en temps réel. Au Québec, les dirigeants des sociétés minières connaissent les technologies et plusieurs en font usage pour des cas précis, par exemple pour les opérations de dynamitage où l'automatisation est favorisée pour des raisons de sécurité.

Au plan international, l'Australie et la Scandinavie sont jugées comme étant les plus avancées dans le déploiement des diverses technologies. À titre d'exemple, la compagnie RioTinto s'est dotée d'environ 70 camions entièrement automatisés dans une mine qu'elle exploite en Australie. Il y a également eu des avancées en Russie et en Afrique du Sud.

#### 3.1.4 Freins

Voici divers éléments pouvant freiner l'adoption de nouvelles technologies dans le secteur minier, qu'il s'agisse de défis à surmonter ou de risques à considérer.

- Le fait de pouvoir contrôler à distance des équipements devrait conduire à une délocalisation de la main-d'œuvre. Cela pourrait entraîner des problèmes sociaux et une baisse d'emplois dans les régions minières. La création d'emplois est souvent un critère contribuant à l'acceptabilité sociale des projets. De plus, ces emplois requièrent une spécialisation accrue (ex. : techniciens, ingénieurs). Qui plus est, les entreprises minières sont déjà en compétition pour embaucher de la main-d'œuvre qualifiée. La disponibilité de la main-d'œuvre représente un défi important à l'heure actuelle.
- L'adoption des nouvelles technologies commande un changement de culture dans l'entreprise et une capacité à mobiliser les équipes. Certains gestionnaires et employés se montrent très réceptifs alors que d'autres résistent à modifier leurs façons d'opérer. Dans certains cas, cela peut se traduire par des conflits entre la partie patronale et syndicale.
- Il y a des contraintes liées à la sécurité des travailleurs. Il faut donc éviter les véhicules automatisés dans des sections de la mine où se trouvent des employés.
- Force est de constater qu'il y a un manque d'interopérabilité entre les multiples systèmes informatiques mis sur le marché. Les systèmes ne communiquent pas entre eux et il est donc difficile de mettre en

commun toutes les données pour obtenir une vue d'ensemble. De plus, les géologues et les ingénieurs n'utilisent pas les mêmes systèmes de données. Des pressions sont faites par les entreprises minières auprès des fournisseurs afin que ces derniers travaillent ensemble en vue d'atteindre cette interopérabilité des systèmes.

- La disponibilité des données demeure un défi à surmonter, même s'il y a de la progression à ce niveau. Il faut continuer à travailler sur l'intégration et l'interprétation des données ainsi que sur la traduction des données en décisions de gestion. Des logiciels d'intégration de données et de répartition des ressources sont donc en voie d'implantation.
- Avec les systèmes de données qui régissent la flotte de véhicules et les divers équipements, il y a un enjeu de cybersécurité. Un individu malveillant pourrait prendre le contrôle des systèmes. L'installation de pare-feu et de mécanismes autorisant l'arrêt des opérations s'avère donc essentielle.
- Il est plus difficile d'automatiser des installations existantes que des nouvelles mines, particulièrement dans les mines souterraines où il n'y a pas d'accès à un réseau informatique. L'investissement peut alors grimper en flèche. Dans le cas d'une nouvelle mine, la mise en route est plus aisée, car elle peut dès lors s'effectuer avec les technologies disponibles et la planification se fait dans une perspective d'innovation.

### 3.1.5 Leviers

Plusieurs incitatifs, qu'ils soient internes ou externes à l'organisation, peuvent contribuer au déploiement des nouvelles technologies et à une extraction plus efficace des minerais.

- L'automatisation engendre plusieurs bénéfices pour les entreprises minières. Elle permet des économies d'énergie et de temps et cela se traduit généralement par une meilleure rentabilité. Elle peut également contribuer à réduire les gaz à effet de serre et à améliorer le bilan environnemental des entreprises. Le fait de pouvoir contrôler les équipements à distance minimise les déplacements des employés. Dans les mines souterraines, en ventilant aux endroits nécessaires, on économise de l'électricité et du diesel (ou du propane). Les systèmes de localisation GPS sur les équipements et les employés entraînent une meilleure productivité. Les risques d'accidents sont réduits par l'automatisation de certaines opérations jugées plus dangereuses. Les systèmes de traitement de données permettent de faire de la maintenance préventive et d'améliorer l'analyse et le suivi des opérations. Ce ne sont là que quelques exemples pour illustrer les retombées positives pour les entreprises qui adoptent ce virage numérique.
- Les nouvelles technologies peuvent prolonger la durée de vie des mines souterraines. En effet, pour les mines souterraines qui ont atteint une profondeur maximale avec les pratiques conventionnelles, soit environ 3 km de profondeur au Québec, les véhicules entièrement automatisés sont moins sensibles à la ventilation et peuvent donc se rendre plus en profondeur (ex. : 5 km). En plus, il faut du temps pour envoyer les véhicules à une telle profondeur, mais s'il n'y a plus d'opérateur à bord, cela ne représente plus un enjeu.
- L'automatisation pourrait également permettre de retourner extraire du minerai dans des mines souterraines qui avaient cessé leurs opérations plutôt que d'exploiter de nouvelles mines, dans la mesure où cela respecte les normes et réglementations en vigueur. La roche étant fracturée et la zone inondée, il est impossible d'y envoyer des personnes. Toutefois, avec des drones et d'autres équipements automatisés, il serait possible de cartographier les galeries et ultimement, d'aller extraire le minerai. En

plus, cela constituerait un incitatif économique pour l'entreprise, car la réouverture d'une ancienne mine requiert généralement moins de temps que l'exploitation d'une nouvelle.

- Les normes et réglementations environnementales plus strictes peuvent également inciter les sociétés minières à se moderniser.
- La formation de la relève et du personnel en fonction est primordiale pour assurer une appropriation optimale des nouvelles technologies. Il faut continuer à soutenir le travail des cégeps et des universités qui forment la relève et favoriser un meilleur arrimage avec les besoins évolutifs des entreprises minières. Le développement des compétences numériques et la formation immersive par la simulation doivent être encouragés, dans le cadre de la formation académique et de la formation continue. Afin de contribuer à la création ou au maintien des emplois en région, des centres de formation pourraient être mis en place, notamment pour les travailleurs ayant perdu leur emploi en raison de l'industrie 4.0 ou encore, pour les communautés autochtones.
- Au niveau des incitatifs financiers, un des intervenants interrogés est d'avis que des rabais sur les tarifs d'électricité ou des programmes comme celui de Transition Énergétique Québec, qui finance des projets d'efficacité énergétique et de conversion, doivent être maintenus et renforcés.
- Le soutien à la recherche et au développement des nouvelles technologies dans le secteur minier pourrait entre autres contribuer à une meilleure interopérabilité des systèmes.
- Pour assurer une cohabitation harmonieuse entre les équipements automatisés et les employés qui travaillent sur le site, des représentants des associations minières et du gouvernement australien ont développé et cosigné un code de gestion des risques. Cela a permis au gouvernement australien de se positionner et d'assumer sa responsabilité au regard d'une gestion sécuritaire des opérations minières.
- Une avenue à exploiter serait de faire appel à des consultants en gestion qui possèdent une perspective globale sur le plan de l'amélioration des procédés et du génie industriel. Dans une démarche vers l'automatisation, il est nécessaire pour les sociétés minières d'avoir une vue d'ensemble afin de prioriser les éléments pour lesquels l'accès à des données est nécessaire. Cela permet d'opter pour des stratégies d'automatisation qui répondent à leurs besoins réels et d'éviter le piège de choisir une technologie simplement pour son côté attractif.

Le tableau 3-1 résume les freins et les leviers liés au développement technologique dans le secteur minier.

*Tableau 3-1 Développement technologique pour extraire les minerais de façon plus efficace : freins et leviers*

Stratégie	Freins	Leviers
Développement technologique pour extraire les minerais de façon plus efficace	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Délocalisation et perte d'emplois, disponibilité limitée d'une main-d'œuvre qualifiée</li> <li>• Changement de culture organisationnelle et résistances aux changements</li> <li>• Sécurité des travailleurs en jeu, en présence d'équipements automatisés</li> <li>• Manque d'interopérabilité des systèmes de traitement de données</li> <li>• Disponibilité des données à accroître</li> <li>• Enjeu de cybersécurité</li> <li>• Automatisation plus difficile et dispendieuse dans les mines existantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Économie d'énergie et de temps, réduction des GES, réduction des risques d'accidents, meilleure rentabilité</li> <li>• Prolongation de la durée de vie des mines souterraines</li> <li>• Réouverture d'anciennes mines</li> <li>• Normes et réglementations environnementales</li> <li>• Formation de la relève et du personnel en fonction</li> <li>• Maintien et renforcement des rabais sur les tarifs d'électricité et des programmes gouvernementaux d'efficacité énergétique et de conversion</li> <li>• Recherche et développement</li> <li>• Adoption d'un code de gestion de risques (ex. : Australie)</li> <li>• Perspective globale d'amélioration des procédés et de génie industriel en faisant appel à des firmes de consultants</li> </ul>

### 3.1.6 Acteurs

Voici divers acteurs à impliquer pour le développement technologique dans le secteur minier :

- les entreprises minières;
- les cégeps, les universités et les centres de recherche;
- les fournisseurs d'équipements;
- les firmes de consultants.

Les acteurs au Québec qui pourraient agir comme leaders dans le déploiement de la stratégie sont principalement les grandes entreprises minières de même que les fournisseurs d'équipements et les firmes de consultants. À l'opposé, les plus réticentes sont généralement les entreprises minières qui ont moins de ressources financières. Elles sont donc moins enclines à assumer les risques d'implantation et à investir les capitaux requis.

En résumé, le développement technologique, en plus d'apporter des gains tangibles pour les entreprises minières, peut contribuer à minimiser les impacts associés à l'exploitation de nouvelles mines, soit en permettant la réouverture d'anciennes mines, soit en rendant possible l'accès à une plus grande profondeur dans les mines souterraines existantes.

### 3.2 Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure suivant le développement technologique et la valeur du minerai (pensée à long terme)

Les résidus miniers<sup>4</sup> peuvent contenir des métaux pour lesquels l'extraction pourrait s'avérer viable dans le futur, selon le développement technologique et la valeur du minerai. Cela implique un entreposage des résidus et une vision à long terme.

#### 3.2.1 Enjeux du secteur

Le secteur minier fait face à divers enjeux au regard de ses résidus miniers. L'exploitation de nouvelles mines au Québec au cours des dernières années a coïncidé avec une quantité importante de résidus miniers à gérer. Il faut les entreposer de façon à éliminer toute forme d'entretien et de suivi. Au cœur des préoccupations figure également la gestion des risques géotechniques et géochimiques. Certains bris de digues ont d'ailleurs fait les manchettes dans les dernières années. Par ailleurs, il y a plusieurs sites miniers abandonnés au Québec pour lesquels la restauration est à envisager. Ces sites pourraient faire l'objet d'extraction ultérieure suivant le développement technologique. Par contre, la présence de résidus miniers acidogènes limite le potentiel d'extraction et nécessite des travaux de restauration à court terme afin de limiter les impacts environnementaux. Les sociétés minières cherchent également à réduire leur empreinte environnementale et à favoriser l'acceptabilité sociale de leurs projets miniers.

#### 3.2.2 Pertinence et faisabilité

Concernant la pertinence d'entreposer les résidus miniers en vue d'une extraction ultérieure, il faut tenir compte de la teneur en minerais dans les résidus ainsi que des efforts technologiques nécessaires pour les récupérer, efforts qui peuvent s'avérer plus dispendieux que la valeur des minerais résiduels visés. Techniquement, tout est valorisable dans la roche, mais la rentabilité doit être au rendez-vous. L'énergie requise pour effectuer l'opération est également un facteur à considérer. Il existe des résidus avec des teneurs équivalentes à ce qui est aujourd'hui considéré comme étant du minerai exploitable. Il peut s'agir d'une option envisageable pour une entreprise minière, mais cela implique un changement de stratégie, une modification de ses procédés. De plus, il apparaît difficile de classer les résidus miniers et de faire des choix d'entreposage sans connaître la nature des minerais que les entreprises voudront extraire dans le futur.

Quant à la faisabilité, l'extraction de minerai dans des aires d'accumulation de résidus miniers existe déjà. Par contre, des problèmes de rentabilité financière ont limité la mise en place de projets dans les dernières années. De plus, exploiter les résidus miniers dans des aires d'accumulation déjà restaurées représente un défi supplémentaire étant donné les obligations de remettre le site dans un état satisfaisant à la fin de l'exploitation ainsi que les garanties financières exigées.

#### 3.2.3 Mise en œuvre

Pour les mines en opération, puisque les technologies de traitement n'évoluent pas suffisamment rapidement, l'option à préconiser serait celle d'extraire dans les résidus miniers un minerai autre que celui à l'origine des activités de l'entreprise minière. Par exemple, extraire le zinc dans les résidus des mines de cuivre.

<sup>4</sup> Le sens accordé ici aux résidus miniers comprend à la fois les rejets de concentrateurs (les résidus miniers) ainsi que les stériles miniers (roches à faible teneur).

Dans les anciennes mines, ce serait pensable de traiter les résidus miniers, mais puisqu'il n'y a plus d'installations de traitement sur place, il faudrait excaver et transporter les résidus miniers dans une usine existante ou encore, se doter d'une usine mobile de traitement.

Le MERN encourage la restauration progressive des sites miniers. Lorsqu'une parcelle de résidus miniers est complétée, elle est restaurée et donc recouverte de diverses couches comme du gravier, de l'argile, du sable et des végétaux. Il devient alors inconciliable d'extraire les résidus miniers une fois que la restauration est complétée. Par conséquent, la stratégie doit être bien réfléchi en amont pour rendre possible le traitement des résidus miniers. Un niveau de difficulté supplémentaire se présente lorsque les résidus miniers sont acidogènes. En effet, il faut en outre réfléchir à l'aspect manutention. Les résidus miniers provenant de concentrateurs sont généralement entreposés en surface et gardés saturés afin d'éviter le drainage minier acide (DMA). Pour les traiter, il faudra d'abord leur laisser le temps de se drainer et cela peut prendre quelques années, à moins de les laisser sécher à l'aide de filtres, au risque d'amorcer la réaction de DMA. Les stériles miniers, quant à eux, sont souvent réutilisés comme remblai ou comme digues pour l'entreposage des résidus miniers, dépendamment de leur composition géochimique. La manutention est donc possiblement plus facile dans ce cas, mais la quantité de minerai à extraire dans les stériles miniers est généralement moindre.

Une méthode à envisager pour faciliter une extraction future de minerais dans les résidus miniers serait de caractériser le matériel entreposé de façon à avoir une chaîne de traçabilité. Cela permettrait de cartographier la zone d'entreposage en termes de ressources. Une forme de traçabilité existe déjà, car il y a des puces électroniques en fonction de la zone exploitée qui passent par tout le processus en usine et qui sont détectées jusqu'à l'entrée du broyeur. Les entreprises pourraient caractériser davantage en vue d'une extraction future, en ayant soin de suivre ce qui a été déposé et à quel moment dans les aires d'accumulation de résidus miniers.

#### 3.2.4 Degré d'avancement

Selon un des intervenants interrogés, des entreprises en Amérique du Sud auraient exploité des résidus miniers d'anciennes mines. À sa mine Kittila, en Finlande, Agnico Eagle a entreposé à part ses résidus miniers contenant de l'or. Au Québec, des sociétés minières auraient fait des tentatives, mais la plupart n'ont pas abouti. Rio Tinto Fer et Titane considère ses stériles comme son second gisement exploitable à la mine Tio, située à Havre Saint-Pierre. À la mine Éléonore de Goldcorp, on a séparé le matériel riche en sulfures du matériel pauvre en sulfures dans deux cellules séparées.

#### 3.2.5 Freins

Plusieurs défis et obstacles se posent, relativement à l'entreposage des résidus miniers dans une optique d'extraction future.

- Le principal obstacle est financier. Les entreprises minières investissent des millions de dollars en restauration minière, alors elles n'auront sans doute pas d'intérêt à retourner excaver ces dépôts. Quant aux stériles, ils sont plus faciles à classer selon leur teneur en minerai, mais l'exploitation peut être difficilement rentable si la teneur est trop faible. De plus, déplacer du matériel et le traiter implique des coûts qui doivent se justifier par la valeur du minerai à extraire.
- Les entreprises sont encouragées à faire de la restauration progressive et cette stratégie, paradoxalement, viserait à faire l'entreposage en vue d'une extraction prochaine. Les techniques

actuelles visent la restauration pérenne des sites miniers. La stabilité géotechnique et géochimique des ouvrages est primordiale. Dans le cas des résidus miniers acidogènes, la présence d'eau ou d'oxygène est à éviter afin de limiter le DMA. Si l'entreposage devient plus flexible pour permettre l'extraction, on s'expose à davantage de perturbations et de risques environnementaux.

- Le défi est également technique. Il est difficile d'aller récupérer le minerai que l'entreprise n'a pas réussi à capter la première fois, à moins de récupérer un autre minerai. Il faudrait des bonds technologiques importants dans les procédés de traitement et ce n'est pas vraiment le cas à l'heure actuelle. En plus de caractériser et de mettre en place un système de traçabilité, il faut déplacer la matière entreposée. Les résidus de concentrateurs sont acheminés à l'aide de tuyaux et se retrouvent dans les aires d'accumulation dédiées. Il peut alors être difficile de les séparer en fonction de leur teneur. Pour les stériles miniers, c'est normalement plus aisé, selon leur composition géochimique.
- Enfin, les entreprises du secteur minier ont tendance à percevoir un résidu minier comme un déchet et non pas comme un sous-produit ou une ressource. Un changement dans la philosophie de gestion serait donc nécessaire pour favoriser ce type d'initiative et pour innover.

### 3.2.6 Leviers

Malgré les défis techniques, économiques et environnementaux associés à la mise en œuvre de cette stratégie, plusieurs actions en sa faveur méritent d'être examinées.

- Dans le cadre du Règlement sur les attestations d'assainissement en milieu industriel, le MDDELCC applique des droits annuels variables aux résidus miniers entreposés dans des aires d'accumulation. Sont déduits de cette tarification les résidus miniers valorisés. Afin de créer un incitatif économique, le ministère pourrait considérer l'entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction future de minerais comme étant de la valorisation afin de donner des déductions. La stratégie peut toutefois être ardue à reconnaître puisque tous les résidus miniers doivent être entreposés et que la différence peut être mince entre les normes d'entreposage pour une extraction future et celles pour la restauration complète du site.
- D'un point de vue réglementaire, s'il était souhaité de favoriser l'entreposage des résidus miniers en vue d'une extraction future, il y aurait un exercice à faire avec les différents ministères pour arrimer les réglementations qui s'appliquent à la gestion des résidus miniers. Une coordination interministérielle accrue serait donc souhaitable.
- Le gouvernement pourrait mettre en place des ententes de partenariat pour le traitement des résidus miniers dans les sites miniers abandonnés, afin de garantir la restauration de ces sites miniers à la fin de l'opération.
- Dans le *Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec*<sup>5</sup>, il pourrait y avoir une section portant sur la valorisation et le potentiel de traitement des résidus miniers.
- Un travail d'information, de sensibilisation et d'éducation pourrait être fait auprès des sociétés minières afin de leur présenter les bénéfices qui pourraient découler du traitement de leurs résidus miniers.

<sup>5</sup> Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec : [https://www.mern.gouv.qc.ca/mines/restauration/documents/Guide-restauration-sites-miniers\\_VF.pdf](https://www.mern.gouv.qc.ca/mines/restauration/documents/Guide-restauration-sites-miniers_VF.pdf)

- Des incitatifs économiques tels que des réductions d'impôts, des crédits ou des programmes de subventions pourraient être mis en place dans le but de reconnaître les entreprises qui font des efforts en vue de traiter leurs résidus miniers pour en extraire les minerais de valeur. Des incitatifs économiques pourraient également s'appliquer au transport, dans le cas par exemple d'une société minière qui produit une ressource utile pour une autre entreprise et que cette dernière est située loin de la mine.
- Au niveau réglementaire, plus les normes pour les effluents miniers seront strictes, plus les entreprises seront incitées à changer leurs pratiques pour que les résidus miniers entreposés soient plus propres, ce qui devrait faciliter leur mobilisation et leur réutilisation.
- Le développement de solutions technologiques est à favoriser, pour accroître la traçabilité des résidus miniers de même que pour déplacer (ex. : pomper les rejets de concentrateurs) et traiter les résidus miniers au meilleur coût. Le gouvernement pourrait mettre en place des programmes d'aide, notamment en innovation.
- Enfin, la pression sociale peut amener les sociétés minières à bouger dans une direction. Si une entreprise fait mauvaise figure auprès de la population, il en sera de même auprès de ses investisseurs. Elle a donc tout intérêt à maintenir une bonne image.

Le tableau 3-2 présente sommairement les freins et les leviers reliés à l'entreposage des résidus miniers en vue d'une extraction ultérieure.

Tableau 3-2 *Entreposage adéquat des résidus miniers en vue d'une extraction ultérieure suivant le développement technologique et la valeur du minerai (pensée à long terme) : freins et leviers*

Stratégie	Freins	Leviers
<p><b>Entreposage adéquat des résidus miniers en vue d'une extraction ultérieure suivant le développement technologique et la valeur du minerai (pensée à long terme)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obstacle financier : investissements importants en restauration, coûts de traitement des résidus miniers vs valeur du minerai</li> <li>• Stabilité géotechnique et géochimique des aires d'accumulation de résidus miniers en contradiction avec l'entreposage pour un traitement ultérieur</li> <li>• Défis techniques pour récupérer le minerai ainsi que pour classer et déplacer les résidus miniers</li> <li>• Perception des résidus miniers comme des déchets</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Déductions à la valorisation pour l'entreposage des résidus miniers en vue d'une extraction future</li> <li>• Coordination interministérielle pour l'arrimage des réglementations sur la gestion des résidus miniers</li> <li>• Ententes de partenariat pour le traitement des résidus miniers dans les sites miniers abandonnés</li> <li>• Ajout d'une section portant sur la valorisation des résidus miniers dans le guide de restauration</li> <li>• Information, sensibilisation et éducation des sociétés minières</li> <li>• Incitatifs économiques (ex. : fiscaux, crédits, subventions, tarifs réduits de transport)</li> <li>• Normes plus strictes sur les effluents miniers</li> <li>• Développement technologique pour la traçabilité, le déplacement et le traitement des résidus miniers; programmes d'aide en innovation</li> <li>• Pression sociale et image corporative</li> </ul>

### 3.2.7 Acteurs

Voici différents acteurs à impliquer pour le développement de cette stratégie :

- le MERN;
- le MDDELCC;
- Écotech Québec;
- les entreprises minières;
- les firmes de consultants qui conçoivent les aires d'accumulation;
- les fournisseurs de technologies;
- les universités et les centres de recherche (ex. : Centre technologique des résidus industriels).

Les petites et moyennes entreprises (PME) sont plus susceptibles de tenter de nouvelles pratiques. Une fois que les tests s'avèrent concluants, les grandes entreprises suivent généralement. Au niveau de l'innovation, il y a beaucoup de leadership en Australie et en Amérique du Sud. En Amérique du Nord, on préfère généralement s'inspirer des succès testés et éprouvés ailleurs.

En somme, l'entreposage des résidus miniers pour une extraction ultérieure pose des défis techniques, économiques et environnementaux et commande une démarche en amont de la restauration, car une fois l'aire d'accumulation de résidus miniers restaurée, il devient difficile économiquement d'extraire des minerais de valeur.

### 3.3 Mines urbaines (*urban mining*) : récupération des métaux disponibles en milieu urbain

Une large part de métaux se retrouvent en milieu urbain, que ce soit dans les produits ou les diverses structures (ex. : chemins de fer, bâtiments, ponts). Les « minerais urbains » anthropogéniques peuvent constituer une alternative à l'extraction conventionnelle des minerais sous terre.

Étant donné qu'un seul expert, localisé en France, a été interrogé en regard de cette stratégie, les informations présentées ci-dessous sont à interpréter avec réserve. Des références complémentaires ont également été consultées.

#### 3.3.1 Pertinence et faisabilité

Pour être pertinente, cette stratégie doit être concurrentielle avec l'extraction minière conventionnelle. Si les métaux à récupérer sont très dispersés sur le territoire, le coût de collecte et de recyclage peut vite grimper.

En France, la notion de mines urbaines ne se pose pas de la même manière qu'ici. À cause du lourd passé minier, ce terme n'est pas vraiment employé. L'expression « mine urbaine » a fait son apparition à la fin des années 2000, en lien avec les discussions sur le bien-fondé du terme « matières secondaires » utilisé dans le secteur du recyclage (Geldron, 2016). En employant le terme « mines urbaines », on donnait ses lettres de noblesse au recyclage, en présentant les matières résiduelles comme des ressources, des nouveaux gisements de matières premières.

#### 3.3.2 Mise en œuvre

La mine urbaine possède trois caractéristiques principales qui la distinguent d'une mine conventionnelle (Geldron, 2016) :

- Elle est disséminée sur l'ensemble du territoire.
- Sa composition physico-chimique en matières ou en substances peut être assez simple pour les résidus postindustriels, mais beaucoup plus complexe pour les résidus postconsommation, notamment pour les composantes électroniques qui peuvent contenir plusieurs métaux stratégiques, dont le lithium.
- Les gisements évoluent en quantité et en qualité dans le temps. Contrairement aux mines traditionnelles dont les gisements sont stables dans le temps, les mines urbaines évoluent au gré du cycle commercial des produits pour lesquels l'obsolescence peut parfois être très rapide. L'extraction urbaine doit donc s'adapter à ces changements.

Les informations nécessaires pour la prise de décision concernant les mines urbaines doivent considérer tous les flux et stocks d'une substance particulière, dans toute la chaîne de valeur. Les données sur la durée de vie des produits sont particulièrement importantes (Brunner, 2011). Dans ce contexte, l'analyse de flux de matières (AFM) est un outil pertinent pour documenter les gisements de métaux (emplacement, flux et stocks, densité, etc.).

En France, les efforts portant sur ce qu'on désigne comme étant les mines urbaines visent principalement les métaux rares, critiques ou stratégiques. Sur la base des études disponibles, les gisements urbains qui apparaissent comme étant les plus intéressants en France au niveau des métaux stratégiques sont : les équipements industriels volumineux comprenant des alliages, les systèmes d'éclairage, les équipements électriques et électroniques (incluant les batteries lithium-ion), les véhicules automobiles ainsi que les équipements producteurs d'énergie électrique, éolienne ou solaire (Geldron, 2016). Au niveau des infrastructures et des bâtiments, la durée de vie est assez longue, mais les quantités de matériaux sont élevées.

### 3.3.3 Degré d'avancement

Contrairement au recyclage, la mine urbaine et sa place dans l'approvisionnement en métaux stratégiques relèvent de pratiques relativement récentes (Geldron, 2016). Des travaux de recherche sont en cours par The Urban Mining Innovation Centre (UMIC), mis en place récemment à la University of British Columbia, à Vancouver.

En France, l'accent est davantage mis sur les flux de métaux que sur les stocks de métaux, entre autres parce que l'information sur les flux est davantage accessible. Il n'y a pas réellement eu de travaux dans le sens des mines urbaines en France pour déterminer les gisements de métaux. Ce sont surtout les matières résiduelles et leur recyclage qui suscitent des initiatives gouvernementales ou industrielles.

### 3.3.4 Freins

Le concept de mines urbaines étant relativement récent, des défis subsistent.

- Il est difficile de caractériser les gisements. On fait face à un manque de connaissances sur les quantités mises sur le marché, leur composition et leur durée de vie. Les fabricants et les importateurs ne connaissent pas nécessairement la composition détaillée de leurs produits. Seuls les fournisseurs de composants élémentaires possèdent cette connaissance (Geldron, 2016). Qui plus est, il est laborieux de documenter la composition de produits anciens.
- Il est possible de prendre le gisement s'il n'est plus utilisé. Toutefois, l'acier, le cuivre et le lithium sont principalement en usage.
- Il faut considérer la question réglementaire. En général, il reste un propriétaire aux métaux abandonnés en milieu urbain (ex. : bâtiments, véhicules).
- Les matières résiduelles métalliques ne sont pas systématiquement récupérables et recyclables à un coût acceptable.
- Les entreprises de recyclage doivent avoir un retour sur l'investissement sur une période relativement courte, tout en composant avec des produits qui évoluent en composition et en quantité et qui peuvent aussi disparaître du marché.

### 3.3.5 Leviers

Diverses initiatives et incitatifs sont à entrevoir pour concrétiser le concept de mines urbaines.

- Le soutien à des travaux de recherche visant à mieux documenter et suivre l'évolution des gisements de métaux disponibles en milieu urbain ainsi qu'à déterminer les modèles économiques appropriés de

récupération et de recyclage en fonction de chaque métal, pourrait contribuer à susciter l'intérêt pour ces mines alternatives.

- L'Internet des objets pourrait contribuer à assurer une meilleure traçabilité des produits et des métaux qui les composent.
- Afin de réduire le transport et la consommation d'énergie y étant associée, il serait souhaitable que les entreprises de recyclage des métaux soient situées près de leur source de matières secondaires, en milieu urbain (Brunner, 2011). Du même coup, cela réduirait la dépendance des villes à l'importation de métaux.
- Selon le contexte, les lois et règlements pourraient être modifiés de façon à permettre la récupération de produits ou d'infrastructures abandonnés.
- Des subventions pourraient être accordées aux organismes de récupération et de recyclage afin de soutenir les marchés. D'ailleurs, RECYC-QUÉBEC et le MDDELCC sont actifs à ce niveau.
- Une étude prospective sur les besoins futurs en métaux pourrait être réalisée. D'ailleurs, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) en France a évalué les besoins de la France en matières premières sur l'horizon 2035-2050.

Le tableau 3-3 présente de façon sommaire les freins et les leviers liés aux mines urbaines.

*Tableau 3-3 Mines urbaines (urban mining) – récupération des métaux disponibles en milieu urbain : freins et leviers*

Stratégie	Freins	Leviers
Mines urbaines ( <i>urban mining</i> ) : récupération des métaux disponibles en milieu urbain	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caractérisation difficile des gisements : quantités mises en marché, composition et durée de vie</li> <li>• Acier, cuivre et lithium principalement en usage</li> <li>• Propriété et considérations légales</li> <li>• Coûts</li> <li>• Évolution des produits vs retour sur l'investissement des recycleurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soutien à la recherche pour documenter les gisements et les modèles économiques</li> <li>• Internet des objets pour une meilleure traçabilité des produits et des métaux qui les composent</li> <li>• Proximité des entreprises de recyclage avec leurs sources de matières secondaires</li> <li>• Modification aux lois et règlements pour permettre la récupération de produits ou d'infrastructures abandonnés</li> <li>• Subventions aux entreprises de recyclage</li> <li>• Étude prospective sur les besoins en métaux</li> </ul>

### 3.3.6 Acteurs

S'inspirant du cas français, voici quelques acteurs qu'il serait opportun d'impliquer dans les initiatives portant sur les mines urbaines :

- MDDELCC;
- RECYC-QUÉBEC;
- Associations de récupérateurs et recycleurs;
- Fabricants et concepteurs de produits contenant des métaux;

- Universités et centres de recherche.

En résumé, on remarque que, jusqu'à maintenant, la notion de mines urbaines s'est davantage traduite par le recyclage des flux de matières que par celui des stocks de métaux présents en milieu urbain. Des études sont à envisager pour mieux documenter les gisements urbains actuels et potentiels, la dynamique de leur disponibilité dans le temps (quelles quantités seront disponibles à quel horizon de temps) ainsi que la pertinence économique relativement aux types et à la valeur des métaux.

### 3.4 Recyclage et symbiose industrielle pour les laitiers (scories) et les boues anodiques

La métallurgie primaire du fer et de l'acier produit des laitiers, aussi appelés des scories, alors que la métallurgie primaire du cuivre produit des boues anodiques. Le recyclage et les symbioses industrielles avec ces deux sous-produits sont déjà en place au Québec. Les entrevues réalisées ont permis d'identifier divers enjeux et de quelle façon ces pratiques peuvent être renforcées. Les informations ci-dessous sont segmentées pour faire ressortir la situation propre à chacun des sous-produits.

#### 3.4.1 Enjeux du secteur

Un enjeu commun pour les affineries de cuivre et les aciéries réside dans la difficulté à recruter une main-d'œuvre qualifiée. D'autres enjeux sont propres à chacun des secteurs.

##### 3.4.1.1 Laitiers

Pour les laitiers, l'enjeu au niveau des symbioses industrielles est principalement économique. En effet, il faut que le produit fabriqué à partir de la transformation des laitiers soit concurrentiel avec le coût de l'enfouissement ou encore, avec les équivalents vierges (neufs) qui sont parfois à faible coût. Il faut également donner une valeur ajoutée au produit.

##### 3.4.1.2 Boues anodiques

Le secteur de l'affinage fait face à la compétition mondiale, telle la Chine ou l'Inde. Par ailleurs, les boues anodiques sont considérées comme des matières dangereuses, alors leur transport peut être dispendieux et requiert des permis variant selon les législations de chaque pays. Enfin, avec la mise en place du marché du carbone au Québec et les cibles pour 2030, l'industrie de l'affinage du cuivre a des défis à relever.

#### 3.4.2 Pertinence et faisabilité

Puisque cette stratégie est déjà bien implantée, les aspects de pertinence et de faisabilité n'ont pas été abordés lors des entrevues. Il convient toutefois de souligner le fait que bien que cette stratégie ne contribue pas directement à la circularité du fer ou du cuivre, elle y participe indirectement. En effet, le recyclage et les symbioses industrielles des laitiers ou des boues anodiques favorisent généralement un meilleur rendement de la métallurgie primaire du fer ou du cuivre.

### 3.4.3 Mise en œuvre

#### 3.4.3.1 Laitiers

Les aciéries génèrent d'importantes quantités de laitiers, qui sont des matières dangereuses, et ne peuvent entreposer le tout sur leur terrain. Elles doivent donc trouver des débouchés, idéalement à proximité pour limiter les coûts de transport. Dans la région de Contrecoeur et de Sorel-Tracy où sont situées les principales aciéries, plusieurs projets de symbioses industrielles pour les laitiers ont été mis en place, notamment à l'aide du Centre de transfert technologique en écologie industrielle (CTTÉI) de Sorel-Tracy et de quelques entreprises comme Les Minéraux Harsco. En plus d'un projet de séquestration de CO<sub>2</sub> à partir des laitiers, le CTTÉI développe un déglaçant avec les laitiers, lequel n'est pas encore commercialisé. Une partie des laitiers sert aussi comme agrégat. L'important est de trouver des usages à haute valeur ajoutée. Les agrégats sont considérés comme du recyclage de faible valeur (*downcycling*), contrairement à des applications de haute valeur comme la séquestration ou le déglaçage. Il faut également tenter de développer des débouchés variés et dans des secteurs non usuels aux aciéries.

#### 3.4.3.2 Boues anodiques

L'affinerie CCR, située à Montréal-Est, reçoit des anodes de cuivre qui contiennent des impuretés et des métaux précieux. Les boues issues du procédé d'électro-affinage sont dirigées vers le circuit des métaux précieux et des sous-produits, où divers procédés de séparation sont utilisés afin de récupérer des produits finis prêts à être vendus sur le marché, tels les métaux précieux suivants : or, argent, platine, palladium (CCR - Une compagnie de Glencore, 2017). L'affinerie reçoit davantage de boues et d'anodes provenant de l'international, avec des compositions diverses, et cela l'amène à adapter ses procédés afin de livrer des produits avec la qualité requise. Les minerais étant différents, les boues le sont tout autant.

### 3.4.4 Degré d'avancement

#### 3.4.4.1 Laitiers

Quant au degré d'avancement, les aciéries adhèrent aux symbioses. Elles y croient, en bénéficient et soutiennent financièrement la recherche et le développement dans ce secteur. Le recyclage serait même un réflexe pour ces compagnies, d'autant plus si la rentabilité est au rendez-vous.

#### 3.4.4.2 Boues anodiques

Il y a environ 40 raffineries de cuivre dans le monde, dont environ 10 font le traitement de leurs boues anodiques. En Amérique du Nord, il y a 5 raffineries : une au Canada (CCR), trois aux États-Unis et une au Mexique. Deux des trois raffineries situées aux États-Unis n'ont pas de système de traitement des boues anodiques. D'autres endroits, comme en Amérique du Sud, ont moins d'or et d'argent dans leur minerai, il est conséquemment moins pertinent pour ces raffineries de traiter leurs boues.

### 3.4.5 Freins

#### 3.4.5.1 Laitiers

Malgré le fait que les symbioses industrielles sont en marche pour les laitiers, des défis persistent.

- Il y a une perception parfois négative des consommateurs par rapport à la matière recyclée, et ce, même si tous les tests de qualité et de performance ont été effectués. Il y a donc un marketing particulier à faire pour changer ces perceptions.
- Au niveau réglementaire, la définition actuelle de « matière résiduelle »<sup>6</sup> limiterait l'innovation et la valorisation des matières résiduelles, dont les laitiers de sidérurgies. Selon la définition de la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE), il faut seulement un cycle pour considérer qu'il s'agit d'une matière résiduelle, alors qu'on pourrait donner plusieurs vies à la matière.
- Il demeure des défis techniques pour trouver des débouchés à certaines composantes des produits issus de la transformation des laitiers.
- Au plan économique, les produits issus du recyclage des laitiers doivent concurrencer avec la matière vierge et le tout doit être rentable pour chacune des entreprises contribuant à cette activité.

#### 3.4.5.2 Boues anodiques

Au niveau des boues anodiques, il y a deux principaux freins au traitement.

- Les normes de transport des boues anodiques sont contraignantes pour les affineries puisqu'elles sont considérées comme des matières dangereuses. En plus, les normes varient d'un pays à l'autre, ce qui complique l'obtention de permis.
- Avec l'importation d'anodes et de boues anodiques provenant de régions variées, les procédés d'électro-affinage et de traitement des boues anodiques peuvent être soumis à de grands défis. Dans certains cas, des investissements s'avèrent indispensables pour les moderniser.

#### 3.4.6 Leviers

##### 3.4.6.1 Laitiers

De nombreux leviers peuvent être mis en place pour encourager le développement de symbioses industrielles pour les laitiers.

- Pour les aciéries, plusieurs éléments les conduisent à s'intéresser aux symbioses. La compétition mondiale, la recherche de rentabilité, l'acceptabilité sociale, la reddition de compte au niveau des gaz à effet de serre (GES) et bien sûr, la recherche de débouchés pour leurs rejets, ne sont là que quelques exemples.
- Il est profitable de faire du démarchage en vue d'attirer près des aciéries, des entreprises qui sont susceptibles de faire des symbioses. Cela vient du même coup diversifier le tissu industriel et stimuler le développement économique d'une région.
- Dans les symbioses, le facteur humain est important et il faut donc créer des liens de confiance. D'ailleurs, ArcelorMittal et Rio Tinto Fer et Titane travaillent ensemble dans un projet de symbiose avec le CTTÉI. Elles ont créé des liens d'affaires pour aborder des enjeux communs. Une solution pour l'une peut

<sup>6</sup> Définition – matière résiduelle (LQE) : « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau ou produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que le détenteur destine à l'abandon. »

fonctionner pour l'autre. Cela demande de l'ouverture et le partage de données, mais les entreprises jugent que le bénéfice est plus grand que le risque encouru.

- Il serait opportun de continuer d'investir dans la recherche et le développement pour aller au-devant des besoins technologiques et avoir des bénéfices encore plus importants que ceux obtenus jusqu'à maintenant.
- Les donneurs d'ordre (dont le Gouvernement) pourraient adopter des directives favorisant l'achat de produits à contenu recyclé (ex. : agrégats). L'éco-étiquetage ou les certifications environnementales pourraient potentiellement faciliter ces pratiques.
- La sensibilisation des entreprises est importante, afin de leur démontrer les retombées et l'intérêt de s'approvisionner avec des sous-produits plutôt qu'avec des matières vierges.
- Au niveau de l'approche auprès des aciéries, un médiateur externe est parfois de mise pour les convaincre de participer à un projet de symbiose.
- La formation des jeunes sur la préservation des ressources est essentielle pour que ceux-ci changent les pratiques une fois parvenus sur le marché du travail.
- Il pourrait y avoir un programme permettant aux aciéries d'engager des stagiaires qui veilleraient à mieux ségréguer les matières résiduelles en usine et trouver des débouchés à valeur ajoutée.

#### 3.4.6.2 Boues anodiques

En ce qui a trait aux boues anodiques, trois principaux leviers ont été relevés.

- Au niveau de l'énergie, si la conversion des procédés au gaz naturel par l'hydroélectricité pouvait être rentabilisée rapidement, cela permettrait de réduire les GES et d'obtenir des crédits de carbone.
- Des avenues réglementaires pourraient être explorées pour faciliter le transport des boues anodiques destinées au recyclage ainsi que pour l'obtention de permis d'importation, avec l'aide d'Environnement Canada et des ministères des Transports fédéral et du Québec.
- Il serait intéressant de soutenir la recherche et le développement pour évaluer l'impact que peuvent avoir certains métaux dans le procédé d'électro-affinage du cuivre.

Une synthèse des freins et des leviers applicables aux laitiers et aux boues anodiques est présentée au tableau 3-4.

Tableau 3-4 *Recyclage et symbiose industrielle pour les laitiers (scories) et les boues anodiques : freins et leviers*

Stratégie	Freins	Leviers
<b>Recyclage et symbiose industrielle pour les laitiers (scories)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Perception négative par rapport à la matière recyclée</li> <li>Définition de « matière résiduelle » qui limite la valorisation et l'innovation</li> <li>Défis techniques pour trouver des débouchés</li> <li>Rentabilité de la symbiose et concurrence avec la matière vierge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aciéries : compétition, rentabilité, acceptabilité sociale, GES, débouchés pour les rejets</li> <li>Démarchage pour attirer des entreprises près des aciéries</li> <li>Liens de confiance et collaboration entre les entreprises</li> <li>Investissement dans la R&amp;D</li> <li>Directives pour l'achat de produits à contenu recyclé par les donneurs d'ordre</li> <li>Sensibilisation des entreprises pour leur faire valoir les sous-produits</li> <li>Médiateur externe pour convaincre les aciéries</li> <li>Formation des jeunes</li> <li>Programme de recrutement de stagiaires dans les aciéries pour travailler sur les résidus</li> </ul>
<b>Recyclage des boues anodiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Normes de transport contraignantes (matières dangereuses)</li> <li>Procédés d'électro-affinage et de traitement des boues soumis à des défis à cause de la variabilité des anodes et des boues importées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rentabilité souhaitable, liée à la conversion des procédés au gaz naturel par l'hydroélectricité (crédits de carbone)</li> <li>Avenues réglementaires pour faciliter le transport des boues anodiques et l'obtention de permis d'importation</li> <li>Investissement dans la R&amp;D</li> </ul>

### 3.4.7 Acteurs

#### 3.4.7.1 Laitiers

Les principaux acteurs à impliquer dans les symbioses pour les laitiers sont les suivants :

- les aciéries;
- les centres de recherche;
- le CTTÉI;
- les acteurs de la chaîne de valeur qui sont au fait des marchés;
- les médiateurs externes;
- les organisations œuvrant au développement économique;
- les bailleurs de fonds (banques);
- les ministères (ex. : MDDELCC) pour les normes et les certificats d'autorisation.

#### 3.4.7.2 Boues anodiques

Au niveau des boues anodiques, voici les acteurs principaux à faire intervenir :

- l'Affinerie CCR;
- la Fonderie Horne;
- les entrepreneurs qui font l'entretien des équipements;

- les fournisseurs d'équipements spécialisés;
- les universités et les centres de recherche;
- Environnement Canada;
- les ministères des Transports fédéral et du Québec.

Comme on peut le remarquer, les symbioses industrielles sont bien implantées dans le secteur des aciéries au Québec et plusieurs incitatifs peuvent être mis en place pour encourager davantage ces pratiques. Quant aux boues anodiques, celles-ci sont traitées au Québec. Les principaux défis résident dans le transport des boues anodiques de même que dans les procédés d'électro-affinage du cuivre et de traitement des boues anodiques qui doivent s'adapter à la nature variable des anodes et des boues importées. Ces pratiques de recyclage des laitiers et des boues anodiques contribuent indirectement à une meilleure circularité du fer et du cuivre.

### 3.5 Fabrication additive (impression 3D) : fabrication de pièces métalliques optimisant le processus de fabrication et stimulant la réparation

La fabrication additive, aussi connue sous le nom d'impression 3D, devrait entraîner de profonds bouleversements dans le secteur manufacturier. Elle est appelée à jouer un rôle dans l'économie circulaire, comme nous le verrons dans les éléments présentés ci-dessous.

#### 3.5.1 Pertinence et faisabilité

La fabrication additive est pertinente au regard de l'économie circulaire. Elle permet d'utiliser uniquement le matériel dont on a besoin. Dans l'aéronautique, le « *buy-to-fly ratio* »<sup>7</sup> peut être par exemple de 26 pour 1. La fabrication additive permettrait d'abaisser considérablement ce ratio. Elle permet également d'imprimer des pièces complexes sans avoir à recourir à toute la machinerie caractéristique des procédés manufacturiers conventionnels. De plus, elle facilite la réparation de pièces métalliques par fusion au laser (*direct energy deposition*) ou par une poudre métallique qui s'écrase à vitesse supersonique (*cold spray*). Malgré les bénéfices de l'impression 3D, il subsistera toujours des applications pour lesquelles il sera plus difficile d'être concurrentiel.

Au niveau de la faisabilité pour les métaux à l'étude, les matériaux disponibles pour l'impression 3D à l'heure actuelle sont : l'acier outil, l'acier inoxydable, l'inconel (alliage fer-nickel) et le cuivre. Le procédé ne serait pas encore adapté au lithium. Le titane, par ailleurs, est beaucoup utilisé dans l'impression 3D.

#### 3.5.2 Mise en œuvre

Selon l'organisme de normalisation ASTM, la fabrication additive est un « procédé qui permet d'assembler des matériaux à partir de modèles 3D, habituellement couche après couche et ceci, en opposition avec la fabrication soustractive, telle que l'usinage et le découpage » (Centre de métallurgie du Québec, 2017). La fabrication additive, c'est aussi la liberté de la complexité. Elle permet de consolider le nombre de composantes en une seule, éliminant ainsi les soudures, les vis, les joints et réduisant du même coup le

<sup>7</sup> Le ratio *buy-to-fly* en aéronautique est le rapport entre la masse de matière nécessaire pour produire une pièce et la masse de cette pièce qui volera réellement.

pois des pièces et le stress thermique. En plus, en contrôlant la densité et la porosité de la pièce, soit en utilisant de la poudre métallique uniquement aux endroits où c'est nécessaire dans la pièce, le poids de la pièce s'en trouve réduit. Cela contribue ainsi à réduire la consommation de carburant et par le fait même, les émissions de GES (ex. : dans l'aéronautique). Il devrait également y avoir une convergence entre les mégadonnées (*big data*) et l'impression 3D. L'Internet des objets suppose que les objets soient intelligents et la fabrication additive se prête bien à l'intégration d'un capteur dans une pièce pour, entre autres, en faciliter la traçabilité.

La fabrication additive devrait contribuer à réduire le transport lui-même. En effet, il ne sera possiblement plus nécessaire d'avoir de grandes entreprises manufacturières à des endroits précis pour produire un grand nombre de pièces ou de produits transportés sur de grandes distances. La production pourrait alors être délocalisée et située près des endroits où les ventes sont effectuées. C'est tout le modèle d'affaires des entreprises qui serait donc appelé à changer et les chefs d'entreprises devraient s'y préparer. Les entreprises ne vendraient possiblement plus la pièce, mais le fichier numérique du design de la pièce. Elles pourraient ainsi inviter leurs clients, ayant acheté le fichier numérique d'origine (il y aura inévitablement des copies), à se diriger vers des centres de services d'impression certifiés afin de garantir la qualité de la pièce.

### 3.5.3 Degré d'avancement

Le marché de l'impression 3D représenterait actuellement 5 milliards \$ au niveau mondial et il évolue de façon exponentielle. Un jour, certaines entreprises n'auront pas le choix d'y adhérer, car ce sera une question de survie.

Au Québec en 2014, 1,7 % des entreprises de la fabrication utilisaient la fabrication additive, y compris pour le prototypage rapide et l'impression 3D pour les métaux, tandis que dans l'ensemble des entreprises, cette proportion était de 0,7 % (Institut de la statistique du Québec, 2016). Il n'y a pas encore de grand écosystème d'impression 3D au Québec. Il s'agit d'un secteur encore émergent au Québec. La technologie est toutefois prometteuse et présente des avantages compétitifs dans certains secteurs au Québec.

En 2014, le Réseau Québec-3D a été créé, coordonné par le Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ). Ce réseau vise à combiner l'expertise des intervenants de l'impression 3D afin d'offrir des services complémentaires et diversifiés, allant de l'exécution de contrats à la formation de personnel hautement qualifié (Réseau Québec-3D, 2015).

Le CRIQ a mis sur pied un laboratoire en fabrication additive doté d'imprimantes EOS qui permettent l'impression métallique. L'objectif est d'accompagner les entreprises souhaitant faire des tests et du prototypage. Elles peuvent évaluer les coûts et l'avantage d'aller dans cette direction. Le CRIQ offre ainsi des services de production à petite échelle.

Canada Makes est un réseau d'organismes privés, publics, académiques et sans but lucratif qui se consacre à promouvoir l'adoption et le développement de la fabrication additive au Canada. Le réseau a notamment mis en place un programme de financement pour l'impression 3D métallique qui permet à des entreprises de faire du design, des impressions ou de produire des échantillons pour faire des tests de performance. Le réseau a financé 150 projets en deux ans.

Le Centre de métallurgie du Québec, intégré au Cégep de Trois-Rivières, s'est doté d'imprimantes 3D et offre divers services de recherche et développement et de tests en laboratoire pour les entreprises. D'autres institutions, comme l'Université McGill et l'École de technologie supérieure (ÉTS), sont également actives sur ce plan.

Les secteurs les plus avancés en termes d'impression 3D métallique de pièces finies sont l'aéronautique, l'outillage (ex. : moules pour le moulage par injection) et le médical (ex. : implants sur mesure). FusiA, spécialiste de l'impression 3D métallique, est d'ailleurs venue s'établir à Montréal pour desservir le secteur aéronautique. Le prototypage est également un secteur qui fait appel à la fabrication additive (ex. : pièces de luminaires, véhicules récréatifs, aérospatial).

#### 3.5.4 Freins

La fabrication additive est une technologie prometteuse, mais divers éléments peuvent freiner son expansion.

- La normalisation et la certification, pas toujours adaptées à cette nouvelle réalité, peuvent constituer un frein à l'utilisation de la fabrication additive, particulièrement dans le secteur aéronautique.
- Le coût des équipements est très élevé, soit entre 500 000 \$ et 1 million \$ en moyenne. Pendant une vingtaine d'années, il y a eu un oligopole des imprimantes 3D à cause des brevets, alors les entreprises devaient acheter des équipements à fort prix même si elles souhaitaient simplement faire du prototypage. Maintenant que les brevets sont expirés, il commence à y avoir des machines plus adaptées et moins dispendieuses pour le prototypage.
- Les entreprises peuvent avoir de la difficulté à obtenir du financement auprès des prêteurs pour l'achat d'imprimantes 3D, car elles doivent en démontrer la rentabilité, alors que les données à l'appui sont parfois manquantes.
- Au niveau technique, la fabrication additive n'est pas adaptée à toutes les applications et elle ne s'applique pas non plus à la production de masse. Elle présente un maximum de valeur ajoutée lorsque la cadence de production est moins rapide (*small batch manufacturing*).
- Les imprimantes 3D ne sont pas encore à leur pleine maturité et elles présentent des limites au niveau de la répétabilité. En effet, il est difficile d'imprimer toutes les pièces de façon identique. Il y a des différences d'une machine à l'autre et même pour une même machine. Il y a plusieurs paramètres à configurer et cela peut entraîner des disparités d'une pièce à l'autre.
- Devant la rareté des formations techniques offertes en fabrication additive, il y a un manque de main-d'œuvre spécialisée pour exploiter tout le potentiel des équipements d'impression. L'apprentissage se fait donc par expérimentation. Les universités tardent à modifier leurs curriculums pour inclure ces nouveaux apprentissages. Le secteur manufacturier devrait exiger de plus en plus des formations techniques (mathématiques et technologies de l'information), alors la relève devrait s'y préparer.
- Plusieurs entreprises ne sont pas au fait qu'il est possible d'imprimer en 3D des pièces métalliques. Il y aurait donc de l'éducation à faire à ce niveau.
- Il y a une certaine inertie dans le secteur manufacturier. Certains dirigeants n'ont pas connu d'autres modèles d'affaires depuis la révolution industrielle et ont le réflexe de penser en termes de production de masse et de grandes usines.
- La fabrication additive entraînera des pertes d'emplois, mais en créera par ailleurs.

### 3.5.5 Leviers

Voici divers points qui méritent qu'on s'y attarde pour favoriser le déploiement de la fabrication additive.

- Il serait souhaitable d'intégrer ces nouvelles technologies dans les formations, et ce, dès le niveau secondaire. Le gouvernement pourrait jouer un rôle au niveau de l'éducation. Les curriculums universitaires pourraient être adaptés afin de créer un baccalauréat interdisciplinaire en mécanique qui intégrerait le génie mécanique, le génie électrique et les technologies de l'information. L'Allemagne a d'ailleurs mis sur pied une telle formation. Des partenariats pourraient également être développés avec les institutions d'enseignement pour donner de la formation continue aux travailleurs. Il pourrait d'ailleurs y avoir des incitatifs (ex. : Emploi Québec) pour les entreprises, principalement les PME, afin qu'elles puissent permettre à leurs employés de suivre des formations, évitant ainsi des pertes d'emplois éventuelles.
- Il pourrait y avoir des programmes de financement pour l'achat des imprimantes 3D, un peu à l'image de celui mis en place par Canada Makes (Manufacturiers et Exportateurs du Canada), ou encore, la mise en place d'incitatifs fiscaux (crédits d'impôts) pour favoriser l'achat de ces équipements.
- Pour les entreprises, plusieurs incitatifs les amènent à s'intéresser à la fabrication additive : production de pièces complexes et personnalisées, diminution du cycle de développement de produits, réduction de matières premières et de rejets, élimination des opérations d'assemblage, allègement des pièces, réduction des GES, etc.
- Il faudrait travailler à accroître le choix de matériaux imprimables. C'est encore assez limité à l'heure actuelle.
- Les fournisseurs devraient tendre vers une diminution du coût des équipements afin de les rendre plus accessibles.
- L'adaptation de normes encadrant certains procédés est à prévoir. D'ailleurs, un comité ISO se penche actuellement sur la fabrication additive. Le Bureau de normalisation du Québec (BNQ) patronnera le comité miroir pour l'impression 3D, analysera les projets de normes et émettra des recommandations au Conseil canadien des normes.
- Le modèle d'affaires du secteur manufacturier deviendra de plus en plus numérique et c'est à chaque compagnie d'analyser de quelle façon elle pourra adapter son procédé. À cet effet, il serait intéressant de s'appuyer sur des cas d'application dans différents secteurs et de communiquer le tout aux pairs. Selon les secteurs d'activités, les impacts qu'aura la fabrication additive pourraient être évalués, qu'il s'agisse de la formation nécessaire, des emplois qui seront affectés, etc.

Le tableau 3-5 présente sommairement les incitatifs et les freins associés à la fabrication additive au Québec.

*Tableau 3-5 Fabrication additive (impression 3D) : fabrication de pièces métalliques optimisant le processus de fabrication et stimulant la réparation : freins et leviers*

Stratégie	Freins	Leviers
Fabrication additive (impression 3D)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalisation et certification</li> <li>• Coût élevé des équipements d'impression</li> <li>• Difficulté pour les entreprises d'obtenir du financement</li> <li>• Pas adaptée à toutes les applications et à la production de masse</li> <li>• Limites de répétabilité</li> <li>• Manque de main-d'œuvre spécialisée</li> <li>• Ignorance des entreprises sur l'impression 3D de métaux</li> <li>• Inertie dans le secteur manufacturier</li> <li>• Pertes d'emplois</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formation académique (ex. : bacc. en mécatronique) et continue, incitatifs aux entreprises pour la formation</li> <li>• Programmes de financement ou incitatifs fiscaux pour l'achat d'imprimantes 3D</li> <li>• Incitatifs pour les entreprises : pièces complexes et personnalisées, réduction du cycle de développement d'un produit, réduction de matières et de rejets, pas d'assemblage, allègement des pièces, etc.</li> <li>• Choix de matériaux imprimables à accroître</li> <li>• Diminution du coût des équipements</li> <li>• Adaptation des normes</li> <li>• Mobilisation par secteur d'activités s'appuyant sur des cas appliqués</li> </ul>

### 3.5.6 Acteurs

Voici les différents acteurs à impliquer dans le déploiement de la fabrication additive au Québec :

- les universités et centres de recherche;
- les centres collégiaux de transfert de technologie;
- les grandes entreprises du secteur manufacturier;
- les fournisseurs de pièces;
- les fournisseurs de poudres métalliques;
- les syndicats;
- le BNQ.

Dans le secteur manufacturier, le secteur aéronautique est à l'avant-garde au niveau de la fabrication additive, avec des entreprises comme Pratt & Whiney, Héroux-Devtek, Bombardier, General Electric et Bell Helicopter. Par ailleurs, avec l'abondance des entreprises minières, le Québec fait bonne figure dans la fabrication de poudres métalliques pour la fabrication additive. Il y a plusieurs entreprises en démarrage dans ce secteur.

Les syndicats, pour leur part, pourraient exprimer certaines réserves au déploiement de l'impression 3D, par crainte de perdre des emplois. La clé pour contrer cette perte serait que les syndicats soient investis dans la formation du personnel vers de nouveaux emplois.

Donc, on constate que la fabrication additive devrait changer le visage du modèle manufacturier qu'on connaît depuis la révolution industrielle et qu'elle est appelée à s'inscrire dans l'économie circulaire.

### 3.6 Recyclage du fer

Le recyclage du fer est une stratégie située en aval dans une logique d'économie circulaire, mais il convient de s'y attarder, car cette activité demeure incontournable. Au Québec, les produits de fer sont récupérés, triés et conditionnés par des entreprises comme AIM, puis envoyés dans les aciéries pour être fondus. Les véhicules automobiles représentant une part non négligeable de l'acier récupéré, cette filière sera examinée plus en détail, notamment celle du réemploi des pièces usagées qui se situe en amont du recyclage. Cela permettra de mieux comprendre l'ensemble de la chaîne de valeur. Par ailleurs, l'idée d'organiser des filières de récupération et des applications dans lesquelles les alliages conservent leur fonction a également été abordée lors des entrevues et l'intérêt de cette mesure a été évalué.

#### 3.6.1 Enjeux du secteur

La filière du recyclage du fer au Québec doit composer avec les fluctuations du marché international du prix des métaux. Parfois, le prix du fer peut descendre, ce qui réduit la récupération par les petits ferrailleurs qui alimentent les entreprises de tri et de conditionnement. Néanmoins, même si le prix du fer est bas, les compagnies qui génèrent des rebuts métalliques devraient continuer à les acheminer au recyclage.

Quant au secteur du réemploi des pièces de véhicules usagés, il y a de la concurrence avec la vente de pièces neuves. De plus, la dimension des véhicules augmente et leurs composantes varient, complexifiant ainsi les opérations de démantèlement et affectant la rentabilité des opérations.

#### 3.6.2 Pertinence et faisabilité

Le recyclage du fer (et de l'acier) est bien établi au Québec depuis un bon nombre d'années, alors la faisabilité n'est pas remise en doute.

Quant à l'idée d'organiser des filières de récupération et des applications dans lesquelles les alliages de fer conserveraient leur fonction une fois recyclés, cette activité n'est pas suffisamment lucrative pour les ferrailleurs. Il n'y a donc généralement pas de valeur ajoutée pour eux de faire le tri des alliages ferreux. Cette activité est toutefois pertinente et implantée pour certains alliages de métaux non ferreux tels l'aluminium, l'acier inoxydable et le titane. Il n'en demeure pas moins que les aciéries connaissent la composition des alliages selon leur catégorie et peuvent donc ajuster leurs recettes en conséquence.

#### 3.6.3 Mise en œuvre

##### 3.6.3.1 Démantèlement des véhicules et réemploi des pièces

Il existe au Québec 490 entreprises qui font le démantèlement de pièces d'automobiles et de camions, qui entreposent les pièces et qui en font la vente. Toutes les pièces sont inventoriées dans une base de données. Une pièce usagée se vend généralement 50 à 75 % moins cher qu'une pièce neuve. Ces entreprises enlèvent également le compresseur, l'alternateur et le climatiseur pour la vente à des courtiers. Les carcasses sont pour leur part entreposées ou directement expédiées chez les entreprises de tri et de conditionnement (ferrailleurs). Cela représenterait annuellement 200 000 carcasses de véhicules au Québec.

### 3.6.3.2 Tri et conditionnement du fer (acier)

Plusieurs entreprises sont actives dans le tri et le conditionnement des métaux au Québec. La plus importante, AIM, qui a son siège social à Montréal-Est, opère 60 installations réparties à travers le monde, dont 25 au Québec. Lorsque le métal est reçu chez le ferrailleur, il est nettoyé à l'aide d'une machinerie lourde qui retire les contaminants, puis il est densifié, c'est-à-dire coupé en morceaux de maximum 5 pieds de longueur pour les aciéries ou bien mis en ballots. Le métal léger, comme celui des véhicules et des électroménagers, est déchiqueté. Pour les véhicules, les métaux ferreux et non ferreux sont triés à l'aide de séparateurs magnétiques et de divers trieurs optiques (ex. : rayon infrarouge). Les résidus de déchiquetage automobile (*fluff*) sont également triés pour en retirer tout ce qui est métallique, dont le cuivre. Quant aux alliages, si leur valeur le justifie, ils peuvent être triés à la source par les clients, comme ceux du secteur de l'aéronautique. Toutefois, il s'agit principalement d'alliages non ferreux. Moins les ferrailleurs ont à manipuler les métaux, plus ils vont payer leurs clients. Chez certains ferrailleurs, des détecteurs à rayons X permettent d'identifier les types d'alliages. Contrairement aux alliages non ferreux, les alliages ferreux ne sont pas caractérisés avant d'être envoyés aux fonderies. La gestion de ces alliages ferreux revient donc aux aciéries.

### 3.6.3.3 Recyclage du fer (acier)

Les aciéries achètent de la ferraille et en font le tri. Certaines font également du déchiquetage de véhicules et d'électroménagers. La ferraille achetée provient principalement du Québec, mais aussi de l'Ontario, du nord-est américain et des provinces maritimes. Le prix varie selon la qualité de la ferraille et le prix du marché. Un mélange de boulettes de fer et de ferrailles est mis directement dans le four pour être fondu. Les aciéries suivent des recettes pour obtenir le grade d'acier souhaité. Les impuretés et la densité influencent le grade. Par exemple, certains alliages peuvent contenir des impuretés. La granulométrie est également importante. Pour ce qui est des carcasses d'automobiles, le plomb et le cuivre sont des impuretés qu'il faut éviter. Les boîtes de conserve sont moins denses et contiennent de l'étain, donc il s'agit d'une ferraille de moindre qualité. Selon les grades à produire, les aciéries doivent ajouter certains additifs. L'ajout d'alliages provenant de la ferraille, qui contiennent les composantes recherchées, remplace parfois l'achat d'additifs.

### 3.6.4 Degré d'avancement

Depuis les débuts de l'humanité, le recyclage des métaux est l'une des premières formes de recyclage qui a existé. Le recyclage du fer est une activité bien implantée au Québec, de même que celle du démantèlement des véhicules en vue du réemploi des pièces. Au niveau industriel, la récupération du fer fait maintenant partie des pratiques des entreprises et de leurs revenus. Au niveau résidentiel, la collecte sélective est en place et des particuliers amassent aussi les métaux en bordure de rue. Quant au secteur de la construction, rénovation, démolition (CRD), les centres de tri CRD trient et vendent le métal, dont les métaux ferreux.

### 3.6.5 Freins

Les freins ou les risques dans la filière du recyclage du fer sont assez minimes. En voici néanmoins quelques-uns qui ont été identifiés selon chaque maillon de la chaîne de valeur.

### 3.6.5.1 Démantèlement des véhicules et réemploi des pièces

- La manipulation des véhicules accidentés nécessite des précautions particulières à cause de la présence de sang alors que celle des véhicules électriques comporte des risques d'électrocution dus à la batterie.
- Les entreprises de démantèlement des véhicules et d'entreposage des pièces doivent se conformer à des normes de plus en plus strictes et cela peut parfois nuire à leur rentabilité.
- La section avant des véhicules est parfois constituée d'un alliage d'acier de haute densité et d'aluminium, ceci, afin d'accroître la sécurité lors des collisions. Ce type d'alliage ne se démantèle pas facilement.
- Il existe des dépôts sauvages de véhicules qui créent des impacts environnementaux. En plus, un acier ainsi détérioré (rouillé) par le climat perd sa valeur sur le marché du recyclage.

### 3.6.5.2 Tri et conditionnement du fer (acier)

- Certains mélanges de métaux se trient difficilement. Ils sont donc vendus tels quels suite à un échantillonnage. Le ferrailleur doit évaluer le gain à trier ces mélanges selon la valeur du métal.
- Le transport de l'acier récupéré peut affecter la rentabilité de son envoi chez les ferrailleurs. Par exemple, les sociétés minières dans le Nord-du-Québec peuvent vouloir se départir de métaux ferreux. Certaines compagnies environnementales œuvrant dans cette région ont bénéficié de subventions gouvernementales pour acheminer ces métaux aux ferrailleurs.

### 3.6.5.3 Recyclage du fer (acier)

- Les aciéries manquent parfois de matières. C'est souvent une question de prix. Elles doivent offrir un prix concurrentiel avec les autres acheteurs.
- Plus la source de ferraille est distante de l'aciérie, plus les coûts de transport sont élevés.
- Certains résidus des aciéries (ex. : oxyde de fer) sont vendus à l'exportation.

## 3.6.6 Leviers

Voici quelques leviers à envisager pour encourager le recyclage du fer au Québec, selon les trois maillons de la chaîne de valeur considérés.

### 3.6.6.1 Démantèlement des véhicules et réemploi des pièces

- En France, le 1er janvier 2017 est entré en vigueur un décret selon lequel les professionnels commercialisant des prestations d'entretien ou de réparation de véhicules (voitures et camionnettes) doivent mettre les consommateurs à même d'opter pour l'utilisation, pour certaines catégories de pièces de rechange, de pièces issues de l'économie circulaire (ex. : pièces de carrosserie amovibles, pièces mécaniques ou électroniques), à la place de pièces neuves (Ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer en charge des relations internationales sur le climat, 2016).
- Le gouvernement pourrait envisager de rendre obligatoire l'inspection des véhicules de huit années et plus, de même que les véhicules usagés revendus, pour des raisons de sécurité notamment.

- Le gouvernement pourrait également obliger, ou bien inciter par une taxe ou un rabais à l'achat d'un véhicule neuf, les propriétaires à se départir de leur véhicule de façon écologique et à le mettre au rancart (annuler l'immatriculation), contribuant ainsi à une meilleure traçabilité des véhicules en fin de vie.
- Il faudrait développer, chez le consommateur, le réflexe de faire appel à des pièces de véhicule usagées et modifier sa perception négative qui associe encore parfois les entreprises de démantèlement à des « cours à scrap ». L'industrie est beaucoup mieux structurée aujourd'hui qu'elle ne l'était autrefois.

### 3.6.6.2 Tri et conditionnement du fer (acier)

- Aucun incitatif n'a été jugé utile dans ce secteur. La récupération, le tri et le conditionnement sont bien implantés au Québec.

### 3.6.6.3 Recyclage du fer (acier)

- Il faudrait éviter autant que possible l'exportation de ferraille afin d'alimenter les aciéries québécoises.
- Il faudrait travailler à fournir plusieurs sources de ferraille, de meilleure qualité (moins d'impuretés, plus de densité) et dans un rayon géographique acceptable pour les aciéries.
- Les aciéries représentent des joueurs-clés dans le recyclage du fer au Québec. Certaines souhaiteraient donc obtenir une partie de la redevance à l'élimination pour reconnaître cette contribution.

Un résumé des freins et leviers liés au recyclage du fer est présenté au tableau 3-6.

Tableau 3-6 Recyclage du fer : freins et leviers

Stratégie	Freins	Leviers
Démantèlement des véhicules et réemploi des pièces	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manipulation risquée des véhicules accidentés (sang) ou électriques (électrocution)</li> <li>• Normes strictes qui nuisent à la rentabilité</li> <li>• Démantèlement difficile d'alliage d'acier de haute densité et d'aluminium</li> <li>• Dépôts sauvages</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Décret en France obligeant les commerçants d'entretien ou de réparation à offrir des pièces de véhicules usagées</li> <li>• Inspection obligatoire des véhicules de 8 ans et plus et des véhicules usagés revendus</li> <li>• Obligation ou incitatif financier aux propriétaires pour la gestion écologique des véhicules en fin de vie et leur mise en rancart (meilleure traçabilité)</li> <li>• Réflexe à développer chez le citoyen pour le recours à des pièces usagées, changement des perceptions</li> </ul>
Tri et conditionnement du fer (acier)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mélanges de métaux qui se trient difficilement</li> <li>• Coût de transport en région éloignée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• N/A</li> </ul>
Recyclage du fer (acier)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manque de ferraille (une question de prix)</li> <li>• Coût de transport de la ferraille</li> <li>• Exportation de résidus (ex. : oxyde de fer)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exportation de ferraille à éviter</li> <li>• Approvisionnement en ferraille de plusieurs sources, de meilleure qualité et dans un rayon acceptable</li> <li>• Redevances à l'élimination aux aciéries pour reconnaître leur contribution au recyclage</li> </ul>

### 3.6.7 Acteurs

Tous les intervenants de la chaîne de valeur sont mis à contribution pour le recyclage du fer :

- les fournisseurs de métaux (industriel, commercial, institutionnel, résidentiel, CRD);
- les récupérateurs (collecteurs), dont les entreprises de démantèlement de véhicules;
- les entreprises de tri et de conditionnement (ferrailleurs);
- les courtiers de métaux;
- les aciéries;
- les clients des aciéries (fabricants).

En conclusion, on remarque qu'il n'y a pas beaucoup d'intervention à faire pour favoriser le recyclage du fer au Québec. Pour ce qui est de la filière de démantèlement des véhicules usagés, divers incitatifs ont toutefois été relevés, qui méritent une attention particulière. Les aciéries, pour leur part, ont quelques enjeux au niveau de l'approvisionnement en ferraille de qualité et de quantité suffisantes, à un prix convenable.

### 3.7 Recyclage du cuivre

Malgré les nombreuses démarches effectuées, aucun des intervenants contactés n'a accepté de faire une entrevue au sujet du recyclage du cuivre au Québec. Devant le manque d'information manifeste, l'évaluation des freins et des leviers liés à cette stratégie n'a malheureusement pas pu se réaliser.

Néanmoins, quelques intervenants interrogés sur d'autres stratégies ont fourni des informations et des idées sur le recyclage du cuivre que voici :

- Le cuivre se vend actuellement à environ 3 \$ la livre. Il s'agit d'une matière secondaire de très grande valeur dont la récupération, le tri et le conditionnement sont bien implantés au Québec.
- Le cuivre présent dans les véhicules est bien récupéré au Québec. Un conditionneur de métaux québécois a fait d'importants investissements en ce sens et il parvient à extraire le cuivre dans les résidus de déchetage automobile (*fluff*).
- Le constructeur automobile français Renault a conçu une architecture de véhicule favorisant le retrait des moteurs de véhicules électriques avant leur broyage. La bobine de cuivre se trouve sur une pièce en plastique facile à écraser, permettant ainsi une meilleure séparation des matériaux.
- Une avenue à explorer serait le traitement des sols contaminés par le cuivre (et autres métaux) afin d'en faire un intrant pour une fonderie.

### 3.8 Recyclage du lithium

Le recyclage du lithium fait surtout référence à celui présent dans les batteries lithium-ion. Avec les quatre projets d'extraction au Québec, avec Johnson Matthey Matériaux pour Batteries, situé à Candiac, qui fabrique des cathodes de batteries en phosphate de fer lithié ( $\text{LiFePO}_4$ ), ainsi qu'avec la compagnie Solutions Bleues Canada (Blue Solutions) du Groupe Bolloré, située à Boucherville, qui fabrique des batteries Lithium-Métal-Polymère (LMP), le Québec a un bon potentiel pour se positionner dans la filière du lithium, particulièrement dans le contexte d'électrification des transports.

### 3.8.1 Pertinence et faisabilité

Le recyclage du lithium est pertinent. Toutefois, le lithium ne peut justifier à lui seul le recyclage des batteries lithium-ion, car sa valeur ne peut rentabiliser la filière. D'autres métaux de plus grande valeur, comme le cobalt, intéressent davantage les recycleurs de batteries. Le recyclage est également faisable, car de rares compagnies, comme Retriev Technologies (anciennement Toxco) en Colombie-Britannique, parviennent à recycler le lithium contenu dans les batteries.

### 3.8.2 Mise en œuvre et degré d'avancement

Le recyclage du lithium implique d'abord la récupération des batteries lithium-ion. Au Québec, un programme de responsabilité élargie des producteurs (REP) s'applique aux piles et aux batteries rechargeables et non rechargeables ainsi qu'aux produits électroniques (dont certains contiennent des piles lithium-ion), mais la REP ne s'applique pas aux batteries des véhicules hybrides ou électriques. D'ailleurs, cette filière de reprise des batteries lithium-ion des véhicules demeure à développer. Ces batteries sont pour la plupart accumulées en attente de trouver des débouchés. Le programme de REP pour les piles au Québec est pris en charge par l'organisme Appel à Recycler, qui reprend également les téléphones cellulaires. Glencore, situé à Sudbury en Ontario et Retriev Technologies, situé à Trail en Colombie-Britannique, sont les deux seules compagnies au Canada qui recyclent les piles et batteries lithium-ion.

Retriev Technologies recycle le lithium des batteries et reçoit aussi des batteries lithium-ion provenant de véhicules hybrides et électriques. Chez cette entreprise, un procédé de broyage, de séparation par flottaison et de dissolution dans un solvant permet la séparation des différentes composantes (ex. : aluminium, cuivre, polymère, lithium, cobalt). Les batteries de véhicules hybrides et électriques passent d'abord par un processus de désassemblage manuel fait avec la plus grande précaution (Retriev Technologies, 2017). Le lithium est régénéré sous forme de carbonate de lithium de grade industriel qui pourrait servir dans les batteries s'il était davantage raffiné. D'ailleurs, l'entreprise Johnson Matthey a besoin de carbonate de lithium pour la fabrication de ses cathodes.

Le marché du recyclage des batteries lithium-ion de véhicules hybrides et électriques est encore petit, car il y a encore peu de quantité en circulation. Toutefois, avec l'électrification des transports, ce marché est appelé à croître, alors il serait pertinent de s'y intéresser maintenant. Le coût de transport pour acheminer les batteries chez Retriev Technologies est assez élevé, sans compter les risques pour la sécurité et l'environnement. Le développement d'une filière québécoise de recyclage du lithium serait envisageable et souhaitable, en autant que les quantités récupérées justifient l'investissement.

Par ailleurs, les technologies de recyclage étant pour certaines similaires à celles utilisées dans le secteur minier, le recyclage du lithium pourrait constituer une branche additionnelle aux activités des entreprises minières de lithium. Par exemple, la durée de vie du site Whabouchi de Nemaska Lithium est de 30 ans. Si cette entreprise voulait demeurer un acteur dans la filière du lithium pour plus longtemps, elle pourrait se tourner vers le recyclage du lithium, intérêt qui semble d'ailleurs présent. En amont du recyclage du lithium, la présence d'entreprises de démantèlement des batteries sera par ailleurs nécessaire.

### 3.8.3 Freins

Voici les principaux obstacles qui se dressent devant l'implantation du recyclage du lithium au Québec, dont quelques-uns ont déjà été relevés précédemment :

- Il y a cinq matériaux différents de cathodes dans les batteries actuellement sur le marché, aux chimies distinctes, ce qui complexifie leur recyclage : LFP (lithium fer phosphate), LCO (lithium cobalt oxyde), NCA (oxyde de lithium nickel cobalt aluminium), LMO (lithium manganèse oxyde), NMC (nickel manganèse cobalt).
- La valeur du lithium n'est pas suffisante à l'heure actuelle pour justifier à elle seule le recyclage des piles ou des batteries. Il est nécessaire de recycler les autres composantes pour aspirer rentabiliser l'opération.
- Il n'existe pas encore au Québec de filière de récupération des batteries lithium-ion provenant des véhicules hybrides et électriques. Ces batteries sont pour la plupart entreposées en inventaire chez les entreprises de démantèlement de véhicules usagés, qui sont à la recherche de débouchés.
- La sophistication du procédé de traitement des batteries coûte cher et commande la réception de quantités assez importantes. Si un recycleur de batteries lithium-ion des véhicules se mettait en place au Québec, il concurrencerait avec Retriev. Il serait alors peut-être difficile de rentabiliser l'opération.
- Actuellement, la quantité de batteries lithium-ion provenant de véhicules est assez faible, mais c'est l'occasion d'anticiper et de se préparer pour être en meilleure position lorsque la quantité sera plus importante.
- La présence de polymère fluoré dans certains types de batteries peut s'avérer problématique dans quelques procédés de recyclage.

#### 3.8.4 Leviers

Malgré les obstacles potentiels, plusieurs initiatives, leviers et incitatifs peuvent d'ores et déjà être considérés, en faveur du recyclage du lithium au Québec.

- Au Québec se trouvent des mines de phosphate, de fer et de lithium. En plus, il y a présence d'une expertise dans la batterie et le coût de l'énergie hydroélectrique est bas. Cela constitue des éléments favorables au positionnement du Québec dans la filière du lithium, incluant le recyclage.
- Le transport des batteries, qui sont considérées comme des matières dangereuses, est dispendieux et doit répondre aux normes. Cela peut donc favoriser le recyclage à proximité.
- Le gouvernement pourrait entrevoir de légiférer et de créer des incitatifs (ex. : REP, écofrais) pour les activités de récupération, de conditionnement et de recyclage des batteries lithium-ion provenant des véhicules hybrides et électriques.
- Une législation pourrait également être envisagée pour favoriser l'approvisionnement en batteries fabriquées localement (ex. : barrière tarifaire sur les batteries étrangères), entre autres, pour des questions de transport, de sécurité et de coût.
- Il serait intéressant de mettre sur pied une démarche concertée pour le recyclage des batteries lithium-ion au Québec, réunissant notamment les organisations québécoises actives dans ce secteur, de même que les centres de recherche et les acteurs gouvernementaux. Cela pourrait notamment prendre la forme d'un symposium, au cours duquel il serait souhaitable d'obtenir l'engagement du secteur minier et industriel envers le recyclage.
- Le gouvernement pourrait envisager de faire un appel de projets pour la recherche universitaire sur les procédés de recyclage des batteries lithium-ion, tout en demandant aux centres de recherche de créer

des ponts avec le secteur industriel. La recherche universitaire contribuerait à développer des procédés de recyclage innovants, à faire la preuve de concept (POC) et à demander les brevets applicables.

- Il pourrait ensuite y avoir une phase de pilotage sur un premier procédé, qui serait soutenue par un programme de financement. Les investisseurs ne sont pas toujours prêts à prendre ce genre de risques, alors une aide financière gouvernementale serait souhaitable pour les usines en démonstration. Cette étape pourrait également contribuer à repenser la conception de la batterie en vue de son recyclage.
- L'entreprise de recyclage devrait idéalement à terme, mettre en place des procédés compatibles avec tous les types de batteries pour penser recevoir des volumes suffisants et rentabiliser ses opérations.
- Dans un autre ordre d'idées, lorsque la batterie est localisée à l'arrière du véhicule hybride ou électrique, elle est rarement endommagée quand le véhicule est parvenu en fin de vie, ce qui favorise le démantèlement en vue du recyclage. Pièces d'autos M.S., à Sainte-Anne-des-Lacs, a développé une formation sur le démantèlement des batteries présentes dans les véhicules accidentés.

Voici en résumé les freins et les leviers associés au recyclage du lithium au Québec.

*Tableau 3-7 Recyclage du lithium : freins et leviers*

Stratégie	Freins	Leviers
<b>Recyclage du lithium</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cinq différents matériaux de cathodes aux chimies distinctes</li> <li>• Lithium seul ne justifie pas le recyclage des batteries pour l'instant</li> <li>• Absence de filière de récupération des batteries lithium-ion des véhicules hybrides et électriques</li> <li>• Coût du recyclage et nécessité d'importantes quantités pour rentabiliser l'opération, concurrence avec Retriev Technologies</li> <li>• Quantité actuellement faible de batteries de véhicules</li> <li>• Polymère fluoré parfois problématique pour le recyclage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Présence de mines de lithium, d'expertise dans la batterie et faible coût de l'énergie hydroélectrique : Québec en bonne position</li> <li>• Transport de batteries (matières dangereuses) pouvant favoriser le recyclage local</li> <li>• Législation et incitatifs pour la récupération, le conditionnement et le recyclage des batteries lithium-ion de véhicules</li> <li>• Législation pour l'approvisionnement local de batteries de véhicules</li> <li>• Concertation avec les parties prenantes (symposium)</li> <li>• Appel de projets avec les universités et l'industrie pour le développement de procédés de recyclage</li> <li>• Phase pilote d'un procédé, soutenue par un programme de financement</li> <li>• Recyclage pour tous les types de batteries, pour une meilleure rentabilité</li> <li>• Batteries de véhicules rarement endommagées lorsque localisées à l'arrière du véhicule, facilitant le démantèlement en fin de vie</li> </ul>

### 3.8.5 Acteurs

Pour parvenir à une démarche concertée dans le recyclage des piles et des batteries lithium-ion au Québec, voici divers acteurs qui pourraient être impliqués :

- les récupérateurs tels les membres de l'Association des recycleurs de pièces d'autos et de camions au Québec (ARPAC), les membres d'Appel à Recycler et Veolia;
- les recycleurs actuels, tel Retriev Technologies;

- les entreprises minières de lithium, telle Nemaska Lithium;
- les entreprises dans le secteur de la batterie, comme Johnson Matthey et Solutions Bleues;
- les centres de recherche et les universités;
- les acteurs gouvernementaux.

Comme on peut le constater, le Québec semble bien positionné pour mettre en place une filière de recyclage du lithium contenu dans les piles et batteries. Pour le moment, les quantités en circulation sont relativement faibles, mais c'est l'occasion de réfléchir maintenant au système à mettre en place, qui apportera le plus de gains aux plans économique, social et environnemental.

### 3.9 Modularités des équipements mécaniques et industriels, facilitant leur réemploi

Les équipements mécaniques et industriels, contenant pour la plupart du fer et du cuivre, représentent une quantité non négligeable de produits finis importés au Québec. Il s'agit par exemple de machines et appareils pour la production du froid, pour l'emballage ainsi que pour le levage, le chargement/déchargement et la manutention ou encore, des chasse-neiges non autopropulsés. La modularité de ces machines et appareils, visant à remplir plus d'une fonction ou à allonger leur durée de vie, optimise l'utilisation des métaux qu'ils contiennent.

#### 3.9.1 Pertinence et faisabilité

Généralement, la modularité des machines et appareils est pertinente puisqu'elle présente autant un intérêt économique, qu'environnemental. Dans certains cas toutefois, l'approche peut avoir des limites. Par exemple, si on conçoit un équipement modulable afin de pouvoir doubler sa capacité dans bon nombre d'années, il n'est pas garanti qu'il y ait un gain économique ou environnemental à utiliser un équipement disproportionné pour ses besoins pendant les premières années. Par ailleurs, la modularité est également faisable, car comme nous le verrons, il y a plusieurs exemples à l'appui.

#### 3.9.2 Mise en œuvre

Le processus de design des produits fonctionne souvent par le développement de blocs ou sections qui seront assemblées au final, par des équipes parfois différentes. Les interfaces entre ces blocs ou sections doivent être conçues avec soin. La modularité implique donc le travail collaboratif des équipes sur les interfaces communes. À l'heure actuelle, les sections développées sont surtout conçues pour faciliter l'assemblage et l'utilisation de l'appareil, tout en réduisant les coûts. Elles ne sont pas nécessairement adaptées pour être évolutives. Il y aurait donc de l'amélioration à apporter sur ce plan.

Concernant les machines et appareils pour la production du froid, cela fait surtout référence à des équipements de réfrigération et de climatisation. Ces équipements ne sont souvent pas conçus pour permettre le remplacement des compresseurs ou des moteurs. Il faudrait donc concevoir ces équipements dans une optique de remise à niveau, soit de rendre possible l'enlèvement ou l'ajout des compresseurs ou moteurs. Dans d'autres cas, il est parfois plus judicieux de remplacer l'équipement pour avoir une meilleure efficacité énergétique.

Quant aux équipements de manutention, la flexibilité représente un critère de base. Par exemple, si une entreprise investit dans un bras robotisé, elle veut s'assurer de pouvoir adapter cet équipement pendant plusieurs années (ex. : 20 ans), en fonction des prochaines générations de produits à développer.

Pour ce qui est des équipements industriels, plusieurs entreprises ont leur propre atelier mécanique et transforment les équipements existants pour allonger leur durée de vie ou pour améliorer leur performance. Les entreprises ont parfois aussi des ateliers pour mettre à jour les technologies de l'information associées aux équipements. Ce sont donc des équipes multidisciplinaires qui travaillent à l'adaptation des équipements. Il n'est souvent pas nécessaire de remplacer les équipements. Il est en effet possible d'automatiser les équipements existants en ajoutant des capteurs de contrôle et des automates programmables. Cela permet de les mettre au goût du jour et d'allonger ainsi leur durée de vie. En outre, les industries préfèrent de plus en plus se doter d'équipements petits et modulables que d'équipements volumineux, afin d'avoir une plus grande polyvalence dans la production. D'ailleurs, les fournisseurs d'équipements mettent parfois en valeur la flexibilité comme un argument de vente.

En ce qui a trait aux chasse-neiges, des municipalités avaient l'habitude d'utiliser des chenillettes pour le déneigement des trottoirs. Ces équipements sont donc entreposés le reste de l'année. Certaines commencent à faire graduellement l'acquisition de petits tracteurs dotés d'un bras articulé sur lequel une pelle peut être mise l'hiver pour déneiger les trottoirs alors qu'un système de lavage des trottoirs (balai hydraulique ou mécanique) peut être installé pour les autres saisons, optimisant ainsi l'utilisation des métaux contenus dans le tracteur. Un exemple de ce type d'équipement est présenté à la figure 3-1.



Figure 3-1 Tracteur articulé pour le nettoyage des trottoirs (Ville de Longueuil, 2017)

Dans la même veine, les tracteurs agricoles constituent aussi un bel exemple de modularité. Tous les équipements peuvent être branchés au même axe de moteur situé à l'arrière du tracteur. Le tracteur est donc très polyvalent. Il en est de même pour des petits appareils électroménagers où, par exemple, la compagnie vend un batteur (moteur) sur socle sur lequel peuvent se brancher divers accessoires aux fonctions différentes (mélangeur, hachoir, coupe-légumes, machine à pâtes, robot culinaire, etc.).

### 3.9.3 Degré d'avancement

Bien qu'il y ait encore de grands pas à franchir dans l'écoconception des machines et appareils, il n'en demeure pas moins qu'une fois parvenus aux industries, la tendance est de les adapter dans les ateliers mécanique et informatique, comme on l'a vu précédemment. L'autre tendance observée est la diminution du

cycle commercial des produits, ce qui amène les entreprises à modifier leurs équipements pour les adapter aux besoins du marché. Bref, les industries sont pour la plupart déjà dans cette logique.

#### 3.9.4 Freins

Quelques freins se dessinent lorsqu'il est question de modularité des équipements mécaniques et industriels.

- S'il se produit une grande transformation dans un secteur industriel qui conduit à son effondrement, cela constitue un frein au maintien des équipements dans le circuit de la production.
- Avec la miniaturisation, certains équipements ne répondent plus aux besoins actuels de l'industrie. Leur adaptation et leur modularité ne sont donc pas justifiées.
- Certains équipements sont très spécialisés et dédiés en termes de fonctionnalité, ce qui limite les possibilités d'adaptation et de modularité.
- Des normes et spécifications auxquelles les équipements doivent se conformer peuvent limiter la modularité dans certains cas.
- Il n'y a pas suffisamment de formations en écoconception, notamment au niveau universitaire. Les écoles de design ne font presque pas d'écoconception et les universités demeurent assez conservatrices dans leurs curriculums.
- Un frein important au plan économique, qui s'applique pour plusieurs produits, est le manque de financement de produits de qualité par les usagers. Bien souvent, les usagers moins fortunés dépensent davantage au final, car ils achètent plus fréquemment des produits de moindre qualité. Ce constat peut, entre autres, s'appliquer pour les petits électroménagers modulables.

#### 3.9.5 Leviers

Divers leviers contribuent à une plus grande modularité des équipements mécaniques et industriels.

- Pour le fabricant, la modularité lui permet de retenir et de rejoindre une clientèle variée. La flexibilité peut constituer un argument vente.
- La modularité invite généralement le fabricant à une plus grande qualité dans la conception de son produit.
- Pour le fabricant et/ou le fournisseur d'équipements, la modularité peut aider à l'appropriation des parts de marché des concurrents qui offrent des équipements non adaptables.
- L'écoconception est souvent synonyme d'une meilleure rentabilité.
- Les approbations en fonction des normes sont possiblement plus rapides à obtenir pour un support électrique doté de plusieurs accessoires modulables que s'il fallait faire approuver de multiples appareils.
- Pour les industriels qui achètent des équipements, le coût de l'équipement peut être un incitatif à l'adapter pour allonger sa durée de vie. Le cycle commercial de plus en plus court des produits est également un incitatif à la modularité des équipements de production. Les ateliers présents dans plusieurs industries rendent possibles les adaptations (ex. : automatisation).

- Les courtiers d'équipements usagers stimulent le réemploi des équipements et indirectement, leur adaptation.
- Il y aurait lieu d'accroître la formation en écoconception.
- Le gouvernement pourrait envisager la mise en place d'une équipe experte en écoconception qui offrirait des services aux entreprises, particulièrement les PME qui n'ont souvent pas les ressources pour entreprendre une telle démarche. Il s'agirait d'un bureau par lequel les cas seraient analysés et les plus pertinents se verraient offrir de l'accompagnement pour le développement, la fabrication et la commercialisation d'un produit écoconçu. Les PME pourraient également avoir accès à des expertises de proximité en écoconception (ex. : centre local de développement).
- Des incitatifs fiscaux pourraient encourager les activités d'adaptation, de réparation ou de remise à neuf. À titre d'exemple, le gouvernement suédois a adopté de nouvelles mesures visant à encourager la réparation des objets. D'une part, la taxe sur la valeur ajoutée applicable sur les produits et services est passée de 25 % à 12 % pour les services de réparation de biens. D'autre part, les Suédois pourront aussi déduire de leurs impôts 50 % du coût de main-d'œuvre des réparations effectuées sur leurs objets. La loi, entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2017, introduit également de nouvelles taxes sur les produits difficilement recyclables ou réparables. Selon le gouvernement suédois, cette initiative devrait contribuer à créer des emplois locaux dans le secteur de la réparation (Bérubé, 2016).

Une synthèse des freins et leviers portant sur la modularité des équipements mécaniques et industriels est présentée au tableau 3-8.

Tableau 3-8 *Modularité des équipements mécaniques et industriels, facilitant leur réemploi*

Stratégie	Freins	Leviers
Modularité des équipements mécaniques et industriels facilitant leur réemploi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effondrement d'un secteur industriel</li> <li>• Miniaturisation qui rend désuets des équipements</li> <li>• Équipements spécialisés et dédiés</li> <li>• Normes et spécifications</li> <li>• Carence de formation en écoconception</li> <li>• Financement insuffisant pour l'achat de produits de qualité par les usagers</li> </ul>	<p>Fabricants et fournisseurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rétention de la clientèle, argument de vente</li> <li>• Meilleure qualité du produit modulable</li> <li>• Appropriation des parts de marché des concurrents</li> <li>• Meilleure rentabilité par l'écoconception</li> <li>• Réduction du temps nécessaire à l'obtention des approbations en fonction des normes, pour un équipement modulable</li> </ul> <p>Industries :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût de l'équipement qui incite à l'allongement de la durée de vie, diminution du cycle commercial des produits, ateliers en usine</li> </ul> <p>Autres :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Courtiers d'équipements usagés</li> <li>• Formation en écoconception</li> <li>• Services d'écoconception offerts aux entreprises (surtout les PME) par le Gouvernement (équipe experte dédiée), services d'écoconception de proximité (ex. : CLD)</li> <li>• Incitatifs fiscaux encourageant l'adaptation, la réparation ou la remise à neuf</li> </ul>

### 3.9.6 Acteurs

Les principaux joueurs clés appelés à travailler sur la modularité des équipements mécaniques et industriels sont :

- les fabricants et fournisseurs d'équipements;
- les consultants spécialisés en génie industriel;
- les industries;
- les courtiers d'achat et de vente d'équipements;
- les organismes de normalisation;
- les designers et spécialistes en écoconception (dont l'Institut de développement de produits);
- EnviroCompétences.

Bref, plusieurs options de modularité s'offrent aux principaux équipements mécaniques et industriels importés au Québec, qui contiennent pour la plupart du fer et du cuivre. Plusieurs entreprises ont déjà intégré des pratiques favorisant l'adaptation et la modularité de leurs équipements. Elles souhaitent ainsi allonger leur durée de vie pour rentabiliser leurs investissements, d'autant plus qu'elles doivent composer avec un cycle commercial réduit des produits. Pour les fournisseurs d'équipements, la modularité devient un argument de vente. Il reste toutefois encore beaucoup de chemin à parcourir pour intégrer l'écoconception dans les formations de même que dans le processus de design des produits.

### 3.10 Écoconception des poutres en acier permettant leur réemploi

Au Canada, 45 % du fer (acier) est utilisé dans la construction des bâtiments ou des infrastructures (Müller, Wang, & Duval, 2010). Puisque la durée de vie des bâtiments et des infrastructures est longue (environ 50 ans), une des stratégies avancées est l'écoconception des poutres en acier dans une optique de réemploi. Cela implique, sans s'y limiter, d'utiliser des raccords vissés plutôt que soudés pour permettre le démontage, d'utiliser des connexions standards, de ne pas avoir de revêtements et d'avoir si possible des poutres de longue portée pour permettre la coupe ultérieure.

#### 3.10.1 Enjeux du secteur

Le marché des structures métalliques est très compétitif. Les fabricants québécois doivent composer d'une part, avec le *Buy American Act*, qui limite la participation à certains projets et d'autre part, à des concurrents internationaux comme la Chine et l'Inde qui soumissionnent sur des projets. Il n'y a pas pour le moment d'incitatifs favorisant le contenu local qui les protégeraient d'une certaine façon. De plus, les appels d'offres qui privilégient les plus bas soumissionnaires limitent les possibilités d'offrir des projets de meilleure qualité ou intégrant des considérations environnementales. Par ailleurs, l'Institut canadien de la construction en acier (ICCA), qui représente la très grande majorité des fabricants de poutres d'acier au Québec (et au Canada), milite en faveur d'une certification et de standards applicables pour tous, afin de susciter l'amélioration continue de cette industrie.

#### 3.10.2 Pertinence et faisabilité

L'idée de l'écoconception des poutres pour leur réemploi semble apparaître intéressante pour les fabricants interrogés et possible d'un point de vue logistique, mais tout est une question de prix. Avec la compétitivité du secteur, il est difficile, voire impossible pour le moment, d'ajouter une nouvelle variable environnementale dans les projets. Il faudrait idéalement avoir les mêmes règles pour tous afin de rester compétitifs. La stratégie est donc difficilement réalisable dans le contexte économique actuel.

Au niveau de la faisabilité, certains sont d'avis que les clients et les prêteurs ne seraient peut-être pas prêts à payer la prime requise pour de telles conceptions. Aussi, même avec des assemblages boulonnés, le tout se révélerait beaucoup plus cher que de fabriquer une nouvelle structure. Un des fabricants a d'ailleurs déposé des soumissions pour des clients qui voulaient déplacer un bâtiment sur de nouvelles fondations. Cette alternative était toujours moins économique que de construire une nouvelle structure métallique, car il faut prévoir un chantier supplémentaire pour le démontage et cette étape coûte généralement plus cher que le prix de l'acier. Un client pourrait peut-être le faire pour ses propres ouvrages, mais le réemploi des structures d'acier d'un client à l'autre apparaît moins probable.

Quant à l'idée de privilégier des poutres de longue portée afin de mieux pouvoir les couper pour le réemploi, aux yeux d'un des intervenants, cela n'est pas pertinent, car la poutre supporterait trop pour ce qui est réellement nécessaire. Il serait donc préférable de faire fondre l'acier et de fabriquer des poutres aux dimensions requises pour la performance désirée.

#### 3.10.3 Mise en œuvre

Les poutres d'acier sont conçues en fonction d'une portée et d'une capacité de charge. Généralement, plus la portée est longue, plus l'âme est haute. Pour permettre le démontage des poutres, il faudrait des systèmes d'attache (ex. : boulons) extrêmement durables afin qu'ils restent intacts (ex. : pas de rouille) et qu'il soit

alors possible de les détacher. Une des idées proposées serait d'avoir des poutres modules, de formats standards, un peu comme des Lego pouvant être réutilisés d'un bâtiment à l'autre. D'ailleurs, au niveau des standards, il faudrait développer des standards très précis, de concert avec tous les acteurs, pour permettre le démontage des poutres.

Il faudrait également réaliser divers tests pour certifier la résistance des poutres. Il y a des chances que l'acier soit réemployé dans des applications pour lesquelles la performance mécanique n'est pas un enjeu, par exemple, pour la décoration des bâtiments. Le Code du bâtiment définit les nouvelles exigences à rencontrer pour les aciers et il est révisé environ aux cinq ans. Le propriétaire de l'ouvrage, s'il veut utiliser d'anciennes poutres, devra alors prévoir un coefficient de sécurité.

#### 3.10.4 Degré d'avancement

Il existe des fabricants de poutres d'acier au Québec, représentés pour la plupart par l'ICCA. Aucun n'a entrepris ce type de démarche et il n'y a pas eu de quelconque avancement sur cette question. Ce serait possible d'un point de vue logistique, mais les obstacles sont importants d'un point de vue économique.

#### 3.10.5 Freins

Voici les principaux éléments qui freinent les initiatives en faveur du réemploi des poutres d'acier.

- La règle du plus bas soumissionnaire dans les appels d'offres limiterait l'amélioration de la qualité et l'innovation.
- L'écoconception en vue du réemploi pourrait augmenter le coût de l'acier par rapport à d'autres matériaux pour lesquels cette stratégie ne peut pas s'appliquer.
- Le démontage des structures d'acier demande du temps et de la main-d'œuvre au coût assez élevé, ce qui nuit à la rentabilité de l'opération par rapport à la construction d'une nouvelle structure.
- L'intégrité de la poutre doit être maintenue et le temps peut l'avoir endommagée. En plus, les normes du Code du bâtiment évoluent et les ingénieurs doivent approuver l'état des composantes et leur résistance. Il faudrait donc avoir un coefficient de sécurité et le tout pourrait s'avérer dispendieux.
- Les poutres d'acier usagées doivent être suffisamment disponibles pour rendre possible cette stratégie.
- D'ordinaire, les fabricants se sentent peu concernés par la fin de vie de leurs poutres, l'horizon de temps étant bien loin.

#### 3.10.6 Leviers

Certaines conditions seraient propices à l'écoconception des poutres d'acier en vue de leur réemploi.

- Le projet de loi S-224 sur les paiements effectués dans le cadre de contrats de construction, soumis à Ottawa et en cours d'adoption, devrait permettre le paiement plus rapide des travaux de construction. Les entrepreneurs, avec ces rentrées d'argent plus rapides, seront possiblement en meilleure position pour investir par exemple dans la recherche et l'écoconception.
- Il faudrait amener tous les acteurs du domaine, soit les donneurs d'ouvrage, les professionnels et les fabricants d'acier, à développer des standards très précis. Il faudrait par exemple standardiser les portées des baies de bâtiments.

- Des crédits pourraient être accordés pour ceux qui optent pour la déconstruction des structures métalliques.
- Les donneurs d’ouvrage pourraient tenir compte davantage de la qualité de la fabrication dans leurs critères d’évaluation des soumissions.
- Advenant une rareté de la ressource d’acier, les fabricants auront tout intérêt à garder la mainmise sur leurs poutres usagées afin de demeurer dans le marché.
- Il faudrait veiller à maintenir les conditions ambiantes propices à la conservation de l’intégrité des poutres (ex. : humidité).
- Il faudrait que les poutres, et particulièrement les systèmes d’attaches, soient conçus pour durer afin d’être plus facilement démontables.

Le tableau 3-9 présente une synthèse des freins et leviers applicables à l’écoconception des poutres d’acier en vue de leur réemploi.

*Tableau 3-9 Écoconception des poutres d’acier permettant leur réemploi : freins et leviers*

Stratégie	Freins	Leviers
Écoconception des poutres en acier permettant leur réemploi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Règle du plus bas soumissionnaire limitant l’innovation et la qualité</li> <li>• Augmentation possible du coût de l’acier par rapport à d’autres matériaux sans exigence de réemploi</li> <li>• Temps et main-d’œuvre pour le démontage nuisant à la rentabilité</li> <li>• Normes du Code du bâtiment : intégrité de la poutre et coefficient de sécurité</li> <li>• Faible disponibilité des poutres d’acier usagées</li> <li>• Fin de vie des poutres n’étant pas une préoccupation pour les fabricants</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projet de loi en cours d’adoption pour les paiements plus rapides des travaux de construction : entrepreneurs en meilleure position pour investir dans l’écoconception</li> <li>• Développement de standards de concert avec tous les acteurs</li> <li>• Crédits à la déconstruction</li> <li>• Qualité à mettre davantage de l’avant dans les critères d’évaluation des soumissions</li> <li>• Rareté de l’acier pouvant entraîner les fabricants à garder la mainmise de leurs poutres</li> <li>• Conditions ambiantes propices à l’intégrité des poutres</li> <li>• Poutres conçues pour durer et pour être démontées (ex. : systèmes d’attaches)</li> </ul>

### 3.10.7 Acteurs

Voici les divers acteurs à impliquer dans une telle démarche d’écoconception des poutres d’acier en faveur du réemploi :

- les donneurs d’ouvrage;
- les firmes d’ingénierie;
- les fabricants de poutres d’acier;
- les designers;
- l’ICCA;
- le Conseil national de recherches du Canada (Code national du bâtiment);
- le Conseil du bâtiment durable du Canada (certification LEED).

Des acteurs identifiés dans la stratégie suivante portant sur la déconstruction pourraient également être mis à contribution. Les plus susceptibles d'adhérer à l'écoconception des poutres pour le réemploi seraient peut-être les gouvernements et les municipalités avec pour objectif de montrer l'exemple.

Bref, l'écoconception des poutres en acier permettant leur réemploi apparaît techniquement faisable, mais les règles commerciales actuelles rendent très difficile son adoption par les fabricants et les donneurs d'ouvrage et l'effet ne se ferait sentir que sur le long terme.

### 3.11 Déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures

Les bâtiments et infrastructures représentent un secteur d'utilisation important pour le fer (ex. structure) et le cuivre (ex. : fils électriques). La déconstruction sélective, par opposition à la démolition traditionnelle encore largement répandue, consiste à retirer successivement les composantes d'un bâtiment ou d'une infrastructure afin d'en récupérer un maximum d'éléments réutilisables et recyclables pour d'autres chantiers (RECYC-QUÉBEC, 2016b). Elle contribue à la préservation des composantes et à leur valeur structurale.

#### 3.11.1 Enjeux du secteur

Dans le secteur de la construction, rénovation, démolition (CRD), les métaux sont généralement assez bien récupérés. Les matières les plus problématiques à l'heure actuelle sont le gypse et les bardeaux d'asphalte pour lesquels les débouchés sont limités, particulièrement lorsqu'ils se retrouvent dans les particules fines des centres de tri CRD.

#### 3.11.2 Pertinence et faisabilité

D'une part, d'après un des intervenants interrogés, la déconstruction est pertinente pour des bâtiments ou infrastructures avec une certaine ampleur, afin de légitimer le travail associé à une planification de déconstruction. Selon cette logique, la déconstruction d'une maison serait de moindre intérêt. D'autre part, la déconstruction est de mise lorsqu'on veut préserver la structure d'un bâtiment ou d'une infrastructure.

La déconstruction est faisable techniquement, mais cette pratique est encore peu répandue, pour des raisons principalement économiques, comme nous le verrons.

#### 3.11.3 Mise en œuvre

Dans un bâtiment industriel, commercial ou institutionnel, le noyau est habituellement en béton et l'enveloppe en acier. L'intérieur peut être déconstruit, mais le noyau et l'enveloppe sont généralement démolis et recyclés. Par exemple, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada a coordonné la déconstruction de la Gare Maritime Champlain dans le port de Québec. Pour ce faire, les ouvriers ont d'abord regroupé l'ameublement pour en effectuer la vente, puis tous les matériaux récupérables ou recyclables ont été retirés et triés en vue de leur disposition (ex. : extincteurs, dispositifs de chauffage, éclairage). Ensuite, ils ont procédé au dégarnissage de toutes les surfaces et ouvertures (ex. : plafonds suspendus, portes, fenêtres) et ont fait des travaux de décontamination (ex. : désamiantage). En dernier lieu, les poutres, colonnes et dalles ont été découpées et cisailées à l'aide d'une machinerie spécialisée. Les barres

d'armature (acier) ont été triées pour être recyclées alors que le béton a été broyé et granulé pour être utilisé comme matériel de remblayage sur le site (Demers, 2016).

Dans une maison, la déconstruction se traduit généralement par le démantèlement des composantes qui ont de la valeur. Typiquement seront récupérés les portes, les fenêtres, les armoires, la quincaillerie, les planchers de bois franc, les articles de plomberie, les systèmes de chauffage et de ventilation, etc.

Dans tous les cas, les métaux, puisqu'ils ont une grande valeur, vont être récupérés pour le réemploi, mais dans la plupart du temps, pour le recyclage. Mis à part les bâtiments de ferme, une partie du secteur résidentiel non soumis au décret de la construction et d'autres sources de matériaux (ex. : décors de cinéma, cabanons) qui ne sont pas sous le décret de la construction, la législation du milieu syndiqué de la construction fixe des seuils salariaux élevés qui limite l'accès aux chantiers à certains corps de métiers et qui nuit donc à la rentabilité de la déconstruction (RénoCyclage, 2013). Par conséquent, il est rare qu'une structure de métal soit déconstruite compte tenu des coûts de main-d'œuvre. L'acier est donc généralement mis dans un conteneur et acheminé dans les divers centres de tri CRD du Québec où il est trié mécaniquement (séparateurs magnétiques) ou manuellement en un seul grade pour être vendu aux recycleurs de ferraille. Quant au cuivre, du fait de sa grande valeur, que ce soit une déconstruction ou une démolition, il sera récupéré pour être recyclé, mais rarement réemployé. Pour ce qui est des infrastructures comme l'échangeur Turcot, on cisaille et on fait tomber les dalles de béton alors que les armatures d'acier sont récupérées et envoyées au recyclage.

#### 3.11.4 Degré d'avancement

Contrairement à d'autres pays, on peut qualifier le degré d'avancement de très faible en déconstruction au Québec, spécialement attribuable au manque d'incitatifs en la matière. Quelques projets, surtout des projets de démonstration, ont été réalisés, dont quelques-uns ont permis de faire l'évaluation économique de la déconstruction comparativement à la démolition.

#### 3.11.5 Freins

Plusieurs facteurs sont à l'origine du fait que la déconstruction soit une pratique encore très peu implantée au Québec.

- Pour les constructions régies par les conventions collectives de la Commission de la construction du Québec (CCQ), les seuils salariaux prescrits étant élevés et la déconstruction nécessitant du temps de main-d'œuvre, cela décourage les initiatives de déconstruction, faute de pouvoir rentabiliser l'opération. Puisqu'il n'y a pas d'incitatifs pour les entrepreneurs ou de règles distinctes leur permettant de payer des salaires plus bas, ils n'ont pas d'intérêt à soumissionner pour déconstruire.
- Le marché des matériaux usagés est bien différent de celui des matériaux neufs. Par exemple, les dimensions ne sont pas standards et cela peut donc constituer un frein au réemploi.
- Le marché québécois des matériaux usagés est peu développé et structuré à l'heure actuelle. En prime, les matériaux de réemploi ne sont pas mis en marché de façon optimale et sont souvent traités comme des résidus (RénoCyclage, 2013). Ainsi, la jonction entre l'offre et la demande est assez aléatoire et peu conviviale pour le consommateur.

- Les matériaux générés sur des chantiers de CRD ont un statut de matières résiduelles. Dès lors, cette interprétation de la définition de matière résiduelle et les règles qui y sont associées en termes de gestion peuvent entraver les possibilités de réemploi des matériaux.
- Les tarifs à l'élimination, s'ils sont bas, enlèvent de l'attrait pour les activités de réemploi, de récupération et de recyclage.
- Les entrepreneurs en construction peuvent être réticents à modifier leurs habitudes.

### 3.11.6 Leviers

En dépit des défis qui se présentent, de multiples initiatives sont possibles de manière à encourager les pratiques de déconstruction pour les bâtiments et infrastructures.

- Un allègement de la réglementation sur les projets de déconstruction sélective pourrait être exploré, afin que l'équation économique liée à la main-d'œuvre soit plus favorable. Cela pourrait entre autres se traduire par de nouvelles catégories de corps de métiers.
- Contrairement à la démolition, la déconstruction peut contribuer à la création d'emplois puisqu'elle fait moins appel à la mécanisation. Chez nos voisins américains, plusieurs entreprises de déconstruction sont à caractère charitable et donnent une seconde chance à des chômeurs, des décrocheurs ou d'anciens détenus, en leur offrant la possibilité de réinsérer le marché du travail (RénoCyclage, 2013).
- Pour les entrepreneurs, ça prend une volonté de faire les choses autrement. Au point de vue logistique, la déconstruction peut requérir une superficie pour l'entreposage des conteneurs dédiés. Les matières peuvent également être ségréguées à l'aide de compartiments dans les conteneurs.
- Le bannissement à l'élimination de matériaux, tels les métaux, peut encourager les pratiques de déconstruction et de ségrégation.
- Un programme de financement au démarrage d'entreprises spécialisées en déconstruction constituerait un incitatif intéressant. D'ailleurs, RECYC-QUÉBEC a lancé en 2016 un appel de propositions sur l'écogestion de chantiers de construction, de rénovation et de démolition ayant pour objectif de financer des projets permettant de réduire à la source la quantité de matériaux de construction, notamment les projets de déconstruction sélective pour maximiser le réemploi (RECYC-QUÉBEC, 2016a).
- Afin de susciter l'attrait pour la déconstruction, une mission entrepreneuriale pourrait être organisée, faisant intervenir des entrepreneurs intéressés par la déconstruction, des représentants gouvernementaux et d'autres organisations impliquées dans ce secteur.
- Des états généraux sur la déconstruction seraient l'occasion de réunir divers acteurs impliqués et de partager les meilleures pratiques.
- Le modèle caritatif est à considérer pour les entreprises du secteur de la déconstruction. Aux États-Unis, un incitatif qui fonctionne est celui de remettre un reçu de charité déductible d'impôts aux propriétaires pour les matériaux donnés. D'ailleurs, des entrepreneurs privés s'associent parfois avec des organismes de charité en déconstruction pour offrir cette alternative à leur client. Si le propriétaire opte pour la déconstruction, il obtient un reçu de charité de l'OBNL partenaire.
- Toujours aux États-Unis, des municipalités ont développé diverses politiques et règlements en faveur de la déconstruction. Par exemple, elles offrent aux propriétaires qui déconstruisent des crédits d'impôts sur

les frais d'enfouissement ou des rabais à l'enfouissement des résidus, voire une gratuité. Dans d'autres cas, elles délivrent plus rapidement les permis de déconstruction (contrairement à la démolition) afin que les propriétaires puissent débiter leur projet de construction plus tôt.

- La déconstruction est vaine si on ne met pas en place un réseau structuré de réemploi des matériaux. Cela requiert des bons outils d'inventaire, d'entreposage et de commercialisation de même que des mécanismes efficaces pour créer le pont entre l'offre et la demande (ex. : plateforme Internet<sup>8</sup>). L'entreposage intérieur est à privilégier pour préserver la qualité des matériaux et rendre plus agréable l'expérience client.

Au tableau 3-10 se trouvent en abrégé les freins et leviers rattachés à la déconstruction des bâtiments et infrastructures au Québec.

*Tableau 3-10 Déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures : freins et leviers*

Stratégie	Freins	Leviers
Déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réglementation et décret de la construction : seuils salariaux élevés</li> <li>• Marché des matériaux usagés : dimensions non standards</li> <li>• Marché de réemploi des matériaux peu structuré, mise en marché déficiente, jonction offre/demande aléatoire et peu conviviale</li> <li>• Statut de « matières résiduelles » aux matériaux récupérés sur chantiers, même à des fins de réemploi</li> <li>• Bas tarifs à l'élimination</li> <li>• Réticences des entrepreneurs à modifier leurs habitudes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Allègement de la réglementation pour la déconstruction (ex. : nouvelles catégories de corps de métiers)</li> <li>• Création d'emplois et réinsertion sociale</li> <li>• Volonté des entrepreneurs de faire les choses autrement, logistique de ségrégation des matériaux avec des conteneurs</li> <li>• Bannissement des métaux des lieux d'élimination</li> <li>• Programme de financement pour le démarrage d'entreprises de déconstruction</li> <li>• Mission entrepreneuriale en déconstruction</li> <li>• États généraux sur la déconstruction</li> <li>• Modèle caritatif pour les entreprises de déconstruction (reçu de charité déductible d'impôts pour les propriétaires donnant leurs matériaux)</li> <li>• Incitatifs municipaux : crédits d'impôts, rabais, gratuité à l'enfouissement des résidus; délivrance rapide de permis de déconstruction</li> <li>• Réseau structuré de réemploi des matériaux : inventaire, entreposage (intérieur), commercialisation, plateformes</li> </ul>

### 3.11.7 Acteurs

De multiples acteurs de tous horizons peuvent être interpellés par des initiatives en faveur de la déconstruction au Québec :

- le Regroupement des Récupérateurs et des Recycleurs de Matériaux de Construction et de Démolition du Québec (3RMCDQ);
- RECYC-QUÉBEC;
- le Conseil du bâtiment durable du Canada - Québec;
- Écohabitation;
- Écobâtiment;

<sup>8</sup> Exemples de plateformes Internet pour le réemploi des matériaux : [Planet Reuse](#), [Second Use](#)

- l'Ordre des architectes du Québec;
- RénoCyclage;
- l'Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec (APCHQ);
- l'Association de la construction du Québec (ACQ);
- la Corporation des entrepreneurs généraux du Québec (CEGQ);
- la Commission de la construction du Québec (CCQ);
- les syndicats;
- les entrepreneurs en déconstruction (ex. : Pomerleau, Panzini);
- EnviroCompétences;
- le MDDELCC;
- le MESI;
- les entreprises de réemploi de matériaux;
- les municipalités;
- les gestionnaires d'écocentres (municipalités).

En somme, nonobstant les défis principalement législatifs et économiques, le Québec peut sans aucun doute bâtir une filière de déconstruction en s'inspirant des meilleures pratiques et en s'appuyant sur le réseau d'acteurs potentiellement intéressés par celles-ci. Dans tous les cas, on constate que les métaux sont largement récupérés, même dans les pratiques de démolition, et que leur réemploi demeure techniquement limité à l'heure actuelle.

### 3.12 Écoconception des véhicules

On entend ici par véhicules les voitures, les camions, les autobus, les trains, les bateaux et les avions. Les véhicules contiennent pour la plupart à la fois du fer (carrosserie en acier), du cuivre (moteur, filage) et dans le cas des véhicules électriques, du lithium (batterie). L'écoconception peut comprendre, sans s'y limiter, les éléments suivants : légèreté et résistance, démontabilité, modularité, recyclabilité et faible consommation énergétique.

#### 3.12.1 Enjeux du secteur

Dans la conception des véhicules, la résistance et la légèreté sont au cœur des préoccupations. Toutefois, résistance et légèreté sont souvent antagonistes, tout autant que sécurité et légèreté. De surcroît, les normes de sécurité sont toujours de plus en plus strictes. En général, le véhicule s'alourdit pour respecter les nouvelles normes de sécurité, puis s'allège avec l'évolution technologique.

En 2015, pour la première fois, le nombre de camions légers (minifourgonnettes, véhicules utilitaires sport, camionnettes) vendus au Québec a dépassé le nombre de voitures vendues, soit 232 898 nouveaux camions contre 218 456 nouvelles voitures (Whitmore & Pineau, 2016). Cette tendance de la consommation accroît la pression sur les ressources métalliques.

Dans le domaine de la mobilité durable, le discours ambiant porte principalement sur l'électrification des transports ainsi que sur les formes de partage des véhicules, incluant le transport en commun, le covoiturage

et l'autopartage. À ce titre, des secteurs sont encore mal desservis par le transport en commun et il y aurait de l'éducation à faire pour rendre attrayantes ces formes de mobilité auprès de la population.

### 3.12.2 Pertinence et faisabilité

L'écoconception en soi ne serait pas un terme fortement utilisé dans le langage des constructeurs de véhicules au Québec. Il n'en demeure pas moins que le virage vers l'écoconception demeure pertinent en regard de l'économie circulaire et que plusieurs exemples à l'appui témoignent de la faisabilité de cette mesure.

### 3.12.3 Mise en œuvre

Les constructeurs de véhicules établis au Québec se répartissent en deux groupes, soit de petites unités industrielles indépendantes (ex. : Campagna Motors, La Compagnie Électrique Lion, Cambli, Demers Ambulances) ou de grands constructeurs (ex. : Bombardier Transport, BRP, Paccar). On y construit principalement des véhicules lourds comme des camions, des autobus, des ambulances et des trains, mais également des véhicules récréatifs. Depuis 2002, il n'y a plus de constructeurs automobiles au Québec. Beaucoup de véhicules construits au Québec sont destinés vers les marchés de l'exportation.

Dans le secteur automobile, les centres de recherche analysent l'utilisation de matériaux plus légers (ex. : aluminium, plastique) afin d'accroître l'autonomie des véhicules électriques. Avec la légèreté, la sécurité demeure un élément indispensable. Grâce à l'automatisation des transports, plusieurs constructeurs automobiles visent pour 2020-2021 l'introduction de flotte de véhicules électriques partagés pouvant desservir des clientèles en milieu urbain. Avec des vitesses maximales de 40 à 45 km/h, cela favorise l'emploi de matériaux plus légers, car les collisions à ces vitesses sont de moindre gravité.

Le développement de nouveaux matériaux et l'innovation devraient d'ailleurs être surtout portés par l'implantation des véhicules de partage et non pas individuels. Dans les véhicules de partage, la finition n'a pas vraiment d'importance. Puisque les véhicules sont utilisés plus fréquemment, cela requiert des matériaux résistants, faciles à nettoyer et à remplacer. Si une partie du véhicule a besoin d'être changée, il n'est alors pas nécessaire de remplacer le véhicule au complet. On devrait également voir apparaître des clubs de partage : certains avec des véhicules de base, d'autres avec des véhicules de luxe ciblant une clientèle encline à payer, mais sensible à l'économie de partage.

Il faut reconnaître que dans le secteur de la construction automobile, Tesla a littéralement bouleversé l'industrie. Certains constructeurs se tournent également vers des véhicules utilisant des piles à combustible consommant de l'hydrogène. Pour les véhicules lourds, l'hydrogène peut constituer une avenue puisque les stations de recharge à installer sont moins nombreuses, alors que pour l'automobile, la structure de recharge peut s'avérer complexe à implanter.

En ce qui a trait au secteur de la construction de véhicules lourds, particulièrement présent au Québec, les considérations au niveau de la conception diffèrent de celles des véhicules légers. Pour les camions et les autobus, les constructeurs veillent à ce qu'ils soient bien réparables et démontables. Étant donné que plusieurs camions sont utilisés en régions éloignées, dans le secteur minier ou forestier par exemple, il faut en effet être en mesure de les réparer facilement et dans toutes conditions. La robustesse est également de mise et les pièces doivent être faciles à remplacer. Par ailleurs, lorsque sont mélangés certains métaux comme l'acier et l'aluminium, il peut se créer de la corrosion galvanique. Il devient alors difficile de démonter

les véhicules et de ce fait, de les recycler. Les constructeurs de véhicules lourds essaient donc d'éviter ce type de mélanges.

Qu'ils soient lourds ou légers, la modularité des véhicules fait son apparition très timidement, mais elle devrait être une tendance avec le temps. Elle requiert un châssis ultra durable, afin de permettre de garder la structure du véhicule et de pouvoir y changer des composantes au gré de l'évolution technologique, de l'usure ou des bris, comme des besoins des usagers. On vise ainsi l'allongement de la durée de vie du véhicule par son aptitude à l'évolution. L'ajout de modules, comme dans la voiture eMOC de Barcelone, fait également partie de cette notion de modularité. Puisque les tests de sécurité sont très rigoureux, cela peut constituer un défi important à relever pour les véhicules modulaires.

#### 3.12.4 Degré d'avancement

En général, les constructeurs québécois font peu référence à l'écoconception dans leur discours, mais ils travaillent tout de même à la démontabilité de leurs véhicules lourds. Quant aux constructeurs de véhicules automobiles, à l'exception de Tesla, peu sont enclins à écoconcevoir leurs véhicules, sauf s'ils en ont l'obligation. Tel qu'indiqué précédemment, plusieurs constructeurs automobiles travaillent à intégrer des flottes de véhicules électriques partagés.

#### 3.12.5 Freins

Plusieurs barrières entravent le déploiement de l'écoconception des véhicules. Plusieurs des freins ci-après identifiés concernent les véhicules électriques, mais il convient de rappeler que l'écoconception ne se limite pas à la motorisation.

- Les constructeurs automobiles remplissent leurs obligations en vendant le nombre de véhicules électriques nécessaires pour éviter les pénalités et si les pénalités ne sont pas suffisamment élevées, ils préfèrent parfois les payer.
- Les constructeurs automobiles se sont toujours montrés réticents à augmenter le parc de véhicules électriques à la vitesse souhaitée par le gouvernement. Contrairement, par exemple, à la Californie, le Québec représente un petit marché et n'a donc pas l'effet de levier. Cette situation est possiblement appelée à changer avec le nouveau projet de loi décrit dans la section sur les leviers.
- Les constructeurs automobiles investissent des milliards dans l'innovation des véhicules à essence. Pour eux, un véhicule électrique ne leur rapporte pas suffisamment de revenus, tout en leur demandant de modifier drastiquement leurs façons de faire. En somme, la majorité ne souhaite pas construire de véhicules électriques, même si la demande est bien présente. Qui plus est, cette fabrication exige des batteries pour lesquelles les constructeurs ne sont généralement pas propriétaires et de ce fait, dépendants.
- Les concessionnaires, pour leur part, encouragent la vente de véhicules à essence plutôt que de véhicules électriques, car contrairement aux véhicules électriques, les véhicules à essence nécessitent davantage de service après-vente qui apporte des revenus aux concessionnaires.
- L'achat d'autobus et de camions passe souvent par les politiques d'acquisition. Les contraintes sur l'écoconception ne sont parfois pas assez agressives dans les appels d'offres, selon l'avis de certains. Par exemple, il n'y a généralement pas de seuil établi pour la consommation de carburant ni de mention sur la gestion en fin de vie de ces véhicules.

- Les constructeurs de véhicules accueillent très froidement toute ingérence de la part des gouvernements, percevant le tout comme un casse-tête et des coûts supplémentaires à assumer. Ils peuvent faire des pressions et faire valoir les emplois en jeu et même menacer de fermer.
- Le lobby pétrolier, bien présent au Canada, ralentit le progrès en matière d'électrification des transports. La Norvège, qui est un producteur de pétrole, a pourtant entrepris le virage vers l'électrification des transports. C'est donc du domaine du possible.
- Les consommateurs peuvent avoir des réticences à modifier leurs comportements. Ils sont habitués à une certaine performance des véhicules. Les véhicules électriques, tels qu'ils sont conçus, comportent encore des limitations par rapport aux véhicules thermiques (ex. : recharge, autonomie).

### 3.12.6 Leviers

Plusieurs incitatifs peuvent être mis de l'avant pour encourager l'écoconception des véhicules, certains ayant été adoptés dans d'autres juridictions, desquels le Québec pourrait s'inspirer.

- Plusieurs administrations municipales, provinciales et fédérales à travers le monde ont mis en place des incitatifs visant à encourager la production, l'achat ou l'utilisation de véhicules électriques. Par exemple, la mairie de Paris encourage la mobilité électrique par divers incitatifs comme un financement à l'achat de véhicules électriques, des stationnements gratuits ou l'accès à des voies réservées. On observe également ce type d'initiatives au Québec. Londres, pour sa part, a décidé que ses taxis devaient désormais être électriques.
- Les constructeurs de véhicules étant réticents à changer leurs pratiques, force est d'admettre que les changements viennent surtout de l'extérieur de l'industrie et non de l'intérieur. Le gouvernement est donc appelé à jouer un rôle important pour provoquer ce changement. À l'instar de dix États américains dont la Californie et plusieurs États du nord-est, le Gouvernement du Québec a d'ailleurs adopté le 26 octobre 2016 un projet de loi VZE (véhicule zéro émission) visant l'augmentation du nombre de véhicules automobiles zéro émission au Québec afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et autres polluants. Une fois le règlement adopté, le constructeur automobile, à partir de l'année modèle 2018, aura à respecter une cible annuelle de vente de VZE déterminée par le gouvernement, et transposée sous forme de crédits. Cette cible sera calculée en appliquant un pourcentage au nombre total de véhicules légers que chaque constructeur vend au Québec (MDDELCC, 2017).
- Afin d'amener les constructeurs à mieux concevoir leurs véhicules, le Québec pourrait s'inspirer de la Directive 2000/53/CE du Parlement européen relative aux véhicules hors d'usage (VHU). Cette directive rend les constructeurs responsables de la fin de vie de leurs véhicules. Ils doivent prendre en compte le démontage, la réutilisation et la valorisation des véhicules dans la conception et la production. Ils doivent s'assurer que les véhicules neufs sont réutilisables et/ou recyclables à hauteur de 85 % minimum de la masse du véhicule et réutilisables et/ou valorisables à 95 % minimum de la masse du véhicule. Ils doivent de plus intégrer une part croissante de matériaux recyclés dans les véhicules et doivent éviter l'utilisation de substances dangereuses. Les fabricants, importateurs et distributeurs doivent mettre en place les systèmes de collectes des VHU (Parlement européen & Conseil de l'Union européenne, 2000).
- En plus des exigences réglementaires et de la rentabilité recherchée, ce qui peut également amener les constructeurs à modifier leurs pratiques, c'est la compétitivité. Si un constructeur le fait, les autres auront tendance à suivre. Il faudrait donc attiser cette compétition.

- Le MTMDET a mis en place divers programmes d'aide encourageant notamment le transport collectif et/ou électrique et favorisant, dans une certaine mesure, l'écoconception des véhicules. Les modalités d'application du Programme d'aide gouvernementale au transport collectif des personnes, ainsi que celles du Programme d'aide aux immobilisations en transport en commun de la Société de financement des infrastructures locales du Québec (SOFIL), stipulent que les autobus subventionnés par le MTMDET doivent être maintenus en service commercial pendant 16 ans, soit leur durée de vie utile estimée. Il est possible de se départir, sans pénalité, d'autobus qui ont moins de 16 ans, mais plus de 11 ans. Toutefois, annuellement, l'âge moyen des autobus mis au rancart doit être d'au moins 16 ans. Pour les autobus scolaires, le carburant est remboursé par le ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieur. Ce programme de compensation a été modifié en 2015-2016, avec des remboursements moins élevés, de façon à encourager les transporteurs scolaires à opter pour des autobus électriques. Pour sa part, le MTMDET a mis sur pied le Programme de soutien au déploiement des autobus scolaires électriques, doté d'un budget total de 30 millions \$, et accordant un rabais unique à l'achat d'un autobus électrique (MTMDET, 2017).
- Augmenter le coût de l'essence inciterait les constructeurs à s'attarder davantage à la masse du véhicule et à sa consommation.
- Au Québec, on observe l'un des plus importants écarts entre le prix de l'essence et le prix de l'électricité, d'autant plus que cette électricité n'émet presque pas de GES. Il s'agit d'un incitatif important à opter pour les véhicules électriques.
- Tous ces incitatifs sont vains s'il n'y a pas de financement accordé à l'information, la sensibilisation et l'éducation des consommateurs afin qu'ils optent pour des véhicules écoconçus et des pratiques de mobilité plus durable.

Le tableau 3-11 offre une vue d'ensemble des freins et des leviers qu'on peut associer à l'écoconception des véhicules.

Tableau 3-11 Écoconception des véhicules : freins et leviers

Stratégie	Freins	Leviers
Écoconception des véhicules	<ul style="list-style-type: none"> <li>Constructeurs qui se limitent à leurs obligations</li> <li>Pas d'effet de levier pour le Québec qui est un petit marché</li> <li>Constructeurs peu motivés à construire des véhicules électriques : pas assez de revenus, modification des procédés, dépendance pour la batterie</li> <li>Concessionnaires qui encouragent les véhicules à essence pour le service après-vente (revenus)</li> <li>Contraintes sur l'écoconception pas assez agressives dans les appels d'offres (ex. : autobus et camions)</li> <li>Résistances, pressions et menaces des constructeurs en cas d'ingérence de l'État</li> <li>Lobby pétrolier</li> <li>Résistances aux changements par les consommateurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incitatifs gouvernementaux (municipal, provincial, fédéral) pour encourager les véhicules électriques (financement, voies réservées, stationnements gratuits)</li> <li>Loi VZE du Gouvernement du Québec qui obligera les constructeurs automobiles à respecter une cible annuelle de vente de VZE</li> <li>Directive européenne rendant les constructeurs responsables de la fin de vie de leurs véhicules et qui fixe des règles d'écoconception</li> <li>Compétitivité chez les constructeurs</li> <li>Programmes d'aide du MTMDET favorisant la durabilité des autobus publics et l'électrification des autobus scolaires</li> <li>Augmentation du coût de l'essence</li> <li>Écart important entre le prix de l'essence et le prix de l'électricité (faible en émissions GES) au Québec</li> <li>Information, sensibilisation et éducation des consommateurs</li> </ul>

### 3.12.7 Acteurs

Voici divers acteurs à impliquer dans une démarche aspirant à une écoconception des véhicules :

- les gouvernements fédéral, provincial et municipal;
- les constructeurs de véhicules québécois;
- les sociétés publiques de transport;
- les concessionnaires;
- l'industrie du démantèlement et du recyclage des véhicules;
- les organisations spécialisées en écoconception (ex. : Institut du véhicule innovant, Centre de technologies avancées BRP – Université de Sherbrooke).

Au nombre des leaders potentiels au Québec, il y a notamment l'Association des Véhicules Électriques du Québec (AVÉQ), la grappe industrielle des véhicules électriques et intelligents ou encore, certaines sociétés de transport comme celles de Montréal et de Laval.

La construction de véhicules est une industrie centenaire, qui présente des résistances à changer ses façons de faire. Avec les pressions sociales, gouvernementales et environnementales qui s'exercent sur cette industrie, on peut espérer des horizons plus favorables à l'écoconception. On constate par ailleurs que les initiatives d'écoconception portent principalement sur l'électrification des transports, sans pour autant viser la préservation des métaux à l'étude.

### 3.13 Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées provenant de véhicules hybrides et électriques

Quand les batteries de véhicules hybrides et électriques parviendront à la fin de leur vie pour une application mobile, soit lorsqu'elles auront atteint entre 70 et 80 % de leur capacité de stockage initial, il est envisageable de leur donner une seconde vie en les utilisant pour une application stationnaire, soit le stockage d'énergie. Le stockage permet d'accroître la fiabilité du réseau de distribution d'électricité en accumulant l'énergie en surplus et en la libérant lors des périodes de forte demande.

#### 3.13.1 Pertinence et faisabilité

Le stockage d'énergie à l'aide de batteries usagées est certainement pertinent. Dans une logique circulaire, le réemploi est d'ailleurs à privilégier avant le recyclage. Ce n'est pas une idée nouvelle et plusieurs constructeurs automobiles disent y travailler. Il y a du potentiel et cette application devrait se développer. Un des intervenants interrogés a fait une remarque qui était la suivante : « *Tesla doit prendre le contrôle des batteries usagées pour faire ses Powerwall. Sinon, d'autres le feront à sa place et Tesla deviendra son propre compétiteur avec les batteries qu'il fabrique.* »<sup>9</sup>

D'autres intervenants interrogés ont exprimé un certain scepticisme relativement à cette idée, principalement pour des raisons de sécurité. Ainsi, ils voyaient davantage la faisabilité d'une telle mesure dans une application individuelle de stockage (ex. : chalet) pour laquelle l'individu connaît et contrôle mieux l'historique et la qualité de ses batteries.

En dépit des craintes exprimées, le projet ELSA, qui est en cours en Europe, démontre très clairement la faisabilité et la pertinence de cette stratégie.

#### 3.13.2 Mise en œuvre

Pour la mise en œuvre possible de cette stratégie, il convient de partir d'un cas concret qui est en cours en Europe et qui serait le seul en son genre, soit celui de ELSA pour *Energy Local Storage Advanced system*.

Le projet du consortium ELSA a pour particularité d'utiliser des batteries usagées de véhicules hybrides et électriques pour des applications de stockage stationnaire d'énergie, tout en visant un prix concurrentiel par rapport aux solutions de stockage faisant appel à des batteries neuves. Le consortium ELSA fait intervenir dix partenaires provenant de cinq pays européens qui sont la France, l'Allemagne, l'Irlande, l'Italie et le Royaume-Uni. C'est Bouygues Energies & Services en France qui en assure la coordination. Renault et Nissan sont parmi les partenaires. ELSA a d'abord réalisé en 2013 un projet pilote pour valider la faisabilité. Ce projet pilote s'étant avéré concluant, un financement de l'Union européenne a été obtenu pour aller de l'avant avec le projet d'industrialisation. Le projet a débuté en 2015 et la fin est prévue pour le milieu de l'année 2018. La phase de commercialisation est donc anticipée pour le début de l'année 2018.

Le consortium a travaillé sur plusieurs éléments tels la durée de vie des batteries usagées, les cycles de charge et de décharge, le développement de convertisseurs de courants, la conception de l'architecture du système, etc. De plus, il a analysé les lois et règlements en vigueur dans six pays européens (les cinq pays partenaires et l'Espagne), afin d'identifier les obstacles et lacunes possibles, de même que les modifications

---

<sup>9</sup> Les Powerwall (résidentiel) et Powerpack (commercial) sont les systèmes de stockage d'énergie stationnaire mis en marché par Tesla.

qu'il serait souhaitable d'apporter aux cadres normatifs. Une étude d'impact économique et une étude d'impact environnemental ont aussi été réalisées. La plus grande partie de la recherche étant terminée, les partenaires travaillent actuellement au développement d'un système informatique intégré à un prix concurrentiel. Le projet ELSA est maintenant rendu à sa phase industrielle, à son application.

Concernant les applications, le consortium a travaillé sur les bâtiments en premier lieu, puis a élargi aux réseaux de distribution. Les normes sont différentes d'une application à l'autre. Six projets de démonstration ont été réalisés : trois systèmes ont été installés dans un bâtiment à Paris, à Barcelone et à Sunderland (Royaume-Uni) ; un autre a été testé dans un district de plusieurs bâtiments situés en Allemagne et deux autres systèmes ont été installés dans des réseaux de distribution électrique en Allemagne et en Italie (ELSA, 2017). Pour l'instant, des installations sont prévues en France, en Allemagne, au Royaume-Uni et en Italie. Les applications principales sont donc les suivantes :

- les bâtiments ;
- les réseaux de distribution ou de transport d'électricité (pour stabiliser la tension et la fréquence, lisser les variations) ;
- les usines de production d'énergie renouvelable (éolienne, solaire).

La figure 3-2 montre le système qui a été testé dans un district à Kempten, en Allemagne. Cette station comprend six batteries de véhicules électriques Kangoo de Renault. Ensemble, les batteries ont une capacité allant jusqu'à 95 kWh. Les packs de batteries sont connectés au système photovoltaïque sur le toit. Ce système permet notamment d'atténuer la différence de fluctuation de la puissance photovoltaïque et de la demande d'électricité.



*Figure 3-2 Système de stockage ELSA – projet pilote dans un district allemand (ELSA, 2017)*

Les batteries récupérées par ELSA pour la production de ses systèmes proviennent des concessionnaires. Soit la batterie est vendue et le vendeur de voitures a l'obligation de la reprendre en fin de vie ; soit elle est louée et elle lui appartient. Les batteries sont utilisées telles quelles pour les applications de stockage, sans modification. Quelques tests sont quand même effectués pour vérifier qu'elles sont en bon état. Un mécanisme a également été mis au point pour permettre le chargement et le déchargement, à l'aide d'un

convertisseur qui permet de passer du courant continu au courant alternatif, et qui peut communiquer avec l'intelligence de la batterie (le système informatique intégré). Le système est aussi en mesure de s'adapter en fonction de la batterie et de son état de vieillissement. Puisqu'il faut assurer une capacité constante pour toute la durée de vie du système, estimée entre 5 et 10 ans, une marge de sécurité a été prévue. Le système peut être adapté selon différentes puissances et capacités, allant de 24 kWh à 1 MWh.

Les batteries utilisées dans les voitures ont des niveaux de sécurité supérieurs à ce qui est utilisé dans les bâtiments. Qui plus est, elles ne sont pas sollicitées de la même façon dans des applications stationnaires. Les niveaux de puissance étant stables et réguliers, le risque est faible. Advenant une hausse de température, le système est coupé automatiquement grâce au système informatique. Des discussions ont eu cours avec les services de sécurité incendie concernant l'utilisation du système ELSA à l'intérieur des bâtiments. Les pompiers ont fait des études et divers essais. Leur logique a été la suivante : si les véhicules électriques dans un stationnement sont permis, pourquoi avoir davantage d'exigences pour les bâtiments ? Un bouton d'arrêt d'urgence doit être accessible à l'extérieur du bâtiment en cas d'incendie.

### 3.13.3 Degré d'avancement

Le projet ELSA serait une première en son genre. Plusieurs constructeurs automobiles effectuent des tests de réutilisation des batteries, ce qui pourrait éventuellement amener d'autres concurrents dans ce secteur. Au Québec, aucun projet de ce type n'a été réalisé à ce jour.

Au parc national de Yellowstone aux États-Unis, un système de distribution d'énergie a été mis au point en 2014, combinant l'énergie solaire et des batteries lithium-ion usagées de Toyota Camry récupérées par des concessionnaires. L'énergie solaire a été stockée dans les 208 batteries utilisées. Chaque batterie a été testée et de nouvelles composantes ont été ajoutées, entre autres pour maximiser la durée de vie et collecter des données (Toyota, 2015). 4R Energy au Japon se spécialise, pour sa part, dans des applications de stockage stationnaire domiciliaire à partir de batteries usagées de Nissan Leaf.

### 3.13.4 Freins

Voici quelques freins qui ont été soulevés, relativement au stockage stationnaire d'énergie à partir de batteries lithium-ion usagées.

- Le Canada étant un vaste pays, pour avoir un marché suffisant de batteries usagées, cela nécessite beaucoup de transport. En plus des coûts associés, le transport des batteries lithium-ion doit répondre à des normes sur le transport des matières dangereuses.
- La réglementation peut limiter certaines applications de stockage stationnaire à partir de batteries usagées.
- Dans le cadre du projet ELSA, le développement du système informatique a été complexe parce que chaque batterie voit ses caractéristiques changer avec son vieillissement et l'informatique intégré dans la batterie aussi. Cela nécessite donc un logiciel qui peut évoluer selon chaque type de batterie. Les systèmes informatiques dans chacune des batteries doivent aussi communiquer. En outre, le langage de communication entre la batterie de véhicule et l'application en réseau de distribution suppose une certaine difficulté d'adaptation.
- Les normes de sécurité pour l'application en bâtiment diffèrent de celles sur réseau de distribution.

- La sécurité est un facteur. Chaque batterie a son histoire et son taux de vieillissement, rendant complexe le contrôle sur la qualité de l’approvisionnement. Le stockage est très dépendant des chimies des batteries et il est difficile de prévoir comment chacune évoluera. Dans un système de grande taille, un incendie pourrait être lourd de conséquences.
- Le froid diminue possiblement la performance des batteries. Toutefois, dans le cadre du projet ELSA, les systèmes de stockage sont en général installés à l’abri et dégagent de la chaleur, limitant ainsi la baisse de performance.

### 3.13.5 Leviers

Les leviers pour initier des projets de stockage stationnaire d’énergie sont présentés en deux sections : les leviers propres au projet ELSA et ceux spécifiques au Québec.

#### 3.13.5.1 Leviers – ELSA

- Deux principaux leviers ont favorisé le projet : les subventions de l’Union européenne et des gouvernements ainsi que les constructeurs automobiles qui éprouvaient des difficultés à recycler leurs batteries.
- Il faut un marché de batteries usagées suffisant, soit la matière première pour produire les systèmes de stockage.
- Chaque pays ayant des réglementations différentes, il faut soit s’adapter à législation ou la faire évoluer. Des suggestions ont été émises pour faire évoluer la réglementation afin d’autoriser l’introduction de batteries usagées dans les systèmes de stockage et de permettre aussi le stockage sur les réseaux de distribution à partir de batteries usagées.
- Certains pays européens exigent le stockage pour éliminer les fluctuations et stabiliser la tension et la fréquence. Ces exigences sont incluses dans les appels d’offres et s’appliquent particulièrement aux systèmes de production photovoltaïque.
- L’Allemagne a subventionné des systèmes photovoltaïques et des systèmes de production d’énergie éolienne. Compte tenu des problèmes de variabilité, elle finance maintenant le stockage. Il s’agit d’un atout important pour le développement.
- Le prix du système de stockage avec des batteries usagées est comparable à un système de stockage fait à partir de batteries neuves, voire légèrement inférieur. Le système électronique est plus dispendieux avec des batteries usagées, mais cela est compensé par le coût plus bas de la batterie usagée comparativement à la neuve.
- Les gouvernements subventionnent la recherche dans le domaine du stockage d’énergie. Les villes le font également puisque plusieurs d’entre elles ont adopté des politiques en faveur des véhicules électriques et cela a une incidence importante sur leurs réseaux de distribution d’électricité.
- L’électrification des transports contribue à la consommation d’électricité. Ce virage requiert donc des systèmes de stockage stationnaire d’énergie pour délivrer de fortes puissances la nuit afin de permettre le chargement des véhicules.

- Tous ces leviers s'ajoutent au fait que le système de stockage stationnaire permet des économies sur la facture d'électricité, favorise la production d'énergie renouvelable et la création d'emplois, tout en évitant les coupures d'électricité.

### 3.13.5.2 Leviers - Québec

- Il y a présence de communautés isolées au Québec et dans le reste du Canada de même que des entreprises minières actives dans des régions éloignées. Les batteries de stockage pourraient être bénéfiques dans ces régions.
- Les énergies solaire et éolienne s'implantent progressivement et peuvent contribuer à l'implantation d'installations de stockage stationnaire.
- Une étude de faisabilité économique des systèmes de stockage permettrait de mieux évaluer le potentiel de la stratégie pour le Québec. Des études de vieillissement des batteries, de modélisation et de simulation pourraient également être effectuées avec des centres de recherche universitaires. L'analyse technico-économique prévue dans le cadre du présent projet devrait pour sa part apporter un éclairage.
- Les fabricants de batteries pourraient vendre le service de batterie plutôt que la batterie elle-même, sous le modèle de l'économie de fonctionnalité. Cela leur permettrait de surveiller leurs batteries (*monitoring*) et d'assurer un meilleur suivi de leur vieillissement.
- Dans le cas d'une application individuelle de stockage stationnaire (ex. : chalet), qui serait couplée avec un système d'énergie solaire ou autre, il faudrait idéalement qu'Hydro-Québec accepte de reprendre le surplus dans le réseau de distribution. Hydro-Québec pourrait même faire la promotion de ce type d'initiatives. Hydro-Québec pourrait aussi intégrer des systèmes de stockage de grande capacité dans son réseau pour en améliorer l'efficacité. Il reste à valider l'intérêt de la société d'État en regard de l'utilisation de batteries usagées, dans le contexte où Hydro-Québec s'est associée avec Sony Corporation en 2014 pour former la coentreprise de recherche et développement Technologies Esstalion, qui développe des systèmes de stockage d'énergie de grande capacité à partir de batteries neuves LFP (lithium fer phosphate).

Un sommaire des freins et leviers liés au stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées provenant de véhicules hybrides et électriques est présenté au tableau 3-12.

Tableau 3-12 Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées provenant de véhicules hybrides et électriques : freins et leviers

Stratégie	Freins	Leviers
<p><b>Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées provenant de véhicules hybrides et électriques</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transport des batteries usagées : coût et normes</li> <li>• Réglementation pouvant limiter l'emploi de batteries usagées</li> <li>• Système informatique (logiciel) complexe à développer avec des batteries variables</li> <li>• Normes de sécurité différentes pour le bâtiment et le réseau de distribution</li> <li>• Sécurité (incendie)</li> <li>• Froid</li> </ul>	<p><b>Projet ELSA (Europe) :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Subventions gouvernementales</li> <li>• Réponse au manque de débouchés pour les batteries usagées (difficulté de recycler)</li> <li>• Marché suffisant de batteries usagées</li> <li>• Évolution de la réglementation pour permettre ce type d'application</li> <li>• Exigences de stockage dans les appels d'offres de certains pays européens</li> <li>• Financement pour le stockage (ex. : Allemagne)</li> <li>• Prix compétitif par rapport à un système de stockage avec des batteries neuves</li> <li>• Subventions des gouvernements et des villes pour la R&amp;D sur le stockage</li> <li>• Électrification des transports</li> <li>• Économies d'électricité, énergies renouvelables favorisées, coupures d'électricité évitées, création d'emplois</li> </ul> <p><b>Québec :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Communautés isolées et entreprises minières en régions éloignées, étant propices à des applications de stockage</li> <li>• Énergie solaire et éolienne en développement</li> <li>• Études de faisabilité économique, de vieillissement des batteries, de modélisation, de simulation, analyse technico-économique</li> <li>• Économie de fonctionnalité chez les fabricants de batteries pour un meilleur suivi des batteries</li> <li>• Intégration des surplus d'énergie par Hydro-Québec et intégration de systèmes de stockage de grande capacité dans son réseau</li> </ul>

### 3.13.6 Acteurs

Voici des acteurs à entrevoir dans le développement des applications de stockage stationnaire d'énergie à partir de batteries lithium-ion usagées :

- les fournisseurs de batteries usagées (ex. : ARPAC);
- les centres de recherche universitaires;
- les fabricants de batteries (ex. : Solutions Bleues);
- les entreprises actives dans le stockage d'énergie;
- les entreprises de systèmes de production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables ;
- Hydro-Québec;
- Écotech Québec;
- le MERN;
- le MTMDET;

- le MESI.

En somme, avec la voie d'électrification des transports qu'emprunte le Québec, donner une deuxième vie aux batteries lithium-ion usagées pourrait s'avérer une avenue prometteuse et il y a lieu de s'inspirer de l'expérience du projet ELSA.

## 4 CONCLUSION

Sur les 41 stratégies de circularité relevées par le biais d'une revue de littérature réalisée à une étape précédente du projet, 13 ont été sélectionnées pour faire l'objet d'une analyse sur les freins et les leviers liés à leur mise en œuvre. Des entrevues semi-dirigées auprès d'acteurs clés ont réellement permis de mieux comprendre l'environnement dans lequel s'inscrit l'implantation des stratégies de circularité au Québec. Elles ont également permis d'apporter un plus grand éclairage sur les mécanismes de mise en œuvre de ces stratégies, particulièrement dans le contexte québécois. Mais surtout, elles ont rendu possible l'identification d'éléments qui peuvent bloquer ou, au contraire, encourager l'implantation, la poursuite ou le déploiement de ces stratégies au Québec. Cette analyse des freins et des leviers met en relief la diversité des outils à déployer pour concourir à une meilleure circularité des métaux, qu'ils soient légaux, financiers, techniques, sociaux ou environnementaux.

Au niveau de l'extraction, les nouvelles technologies apportent des bénéfices pour les entreprises minières et peuvent contribuer à la réouverture d'anciennes mines ou à accéder à une plus grande profondeur dans les mines souterraines, optimisant ainsi l'activité extractive tout en minimisant les impacts environnementaux associés à l'exploitation de nouvelles mines. L'entreposage des résidus miniers pour une extraction ultérieure nécessite de penser en amont de la restauration et il y a de nombreux défis techniques, économiques et environnementaux à surmonter. Quant aux mines urbaines, les démarches encourues à ce jour portent davantage sur le recyclage des flux de matières en circulation que sur les stocks. Des études seraient alors à prévoir pour mieux comprendre les gisements urbains de métaux et leur potentiel.

En ce qui a trait à la métallurgie primaire, le recyclage des laitiers et des boues anodiques contribuent indirectement à une meilleure circularité du fer et du cuivre. On remarque que les symbioses industrielles pour les laitiers des aciéries sont pratiques courantes et divers incitatifs peuvent contribuer à les soutenir. Les boues anodiques, quant à elles, sont traitées à l'Affinerie CCR au Québec. L'amélioration continue des procédés d'électro-affinage du cuivre et de traitement des boues anodiques ainsi que l'évaluation de nouvelles avenues réglementaires pour le transport de ces boues demeurent des éléments à considérer.

Dans le secteur de la transformation métallique et de la fabrication, force est de constater que la fabrication additive, qui s'applique au fer et au cuivre, est pertinente au regard de l'économie circulaire et qu'elle devrait modifier l'industrie manufacturière.

Quand on parvient à la fin de vie des métaux, le recyclage demeure une option. Pour le fer, il y a peu d'incitatifs à mettre en place puisque la filière est bien implantée au Québec. Des actions peuvent toutefois être entreprises pour favoriser le démantèlement et le réemploi des pièces de véhicules, de même que pour les aciéries qui recherchent un approvisionnement suffisant de ferraille de qualité, à un prix abordable. Pour le cuivre, l'analyse des freins et des leviers n'a pas été rendue possible, mais il semble que le recyclage du cuivre est également bien établi au Québec, principalement dû à sa valeur élevée. Quant au lithium, le Québec apparaît bien positionné pour mettre en place une filière de recyclage. Ce serait le moment opportun pour la planifier, en vue de l'arrivée progressive de batteries lithium-ion usagées provenant des véhicules hybrides et électriques.

Des stratégies applicables à des produits contenant les métaux à l'étude ont également fait l'objet d'une analyse sur les freins et leviers. Bien qu'il reste encore beaucoup à faire sur le plan de l'écoconception, on constate que plusieurs entreprises ont intégré l'adaptation et la modularité des équipements mécaniques et industriels dans leurs pratiques. Plusieurs options de modularité s'appliquent aux principaux équipements

importés au Québec, qui contiennent surtout du fer et du cuivre. Pour ce qui est des poutres en acier, leur écoconception en vue de leur réemploi semble techniquement faisable, mais l'intérêt des fabricants est faible, compte tenu des règles économiques actuelles qui caractérisent ce marché. Les bâtiments et les infrastructures, qui contiennent souvent du fer et du cuivre, sont principalement démolis à l'heure actuelle, particulièrement pour des raisons économiques et réglementaires. Heureusement, les métaux sont en général récupérés, mais il y aurait lieu de travailler à la mise en place d'une filière de déconstruction pour favoriser le réemploi des matériaux avant leur recyclage. Au niveau de l'écoconception des véhicules, plusieurs constructeurs se montrent réticents à modifier leurs façons de faire et les changements sont alors surtout provoqués par les gouvernements. Enfin, en ce qui a trait au réemploi des batteries lithium-ion usagées pour des applications de stockage stationnaire d'énergie, le projet mis en place par ELSA en Europe démontre le potentiel de cette stratégie. Il reste à savoir si l'on peut s'inspirer de ce modèle en tout ou en partie au Québec.

De ces constats, il est possible d'anticiper les stratégies de circularité pour le cuivre, le fer et le lithium, qui sont les plus susceptibles d'être mises en œuvre au Québec ou celles pour lesquelles il y aurait lieu d'approfondir l'analyse. D'ailleurs, dans le cadre du projet, une analyse technico-économique des stratégies retenues, de même qu'une analyse de cycle de vie conséquente sont prévues. Cela devrait concourir à la recommandation de stratégies de circularité à privilégier au Québec, pour les trois métaux étudiés.

## 5 RÉFÉRENCES

- Bérubé, N. (2016). Une baisse de taxe pour combattre la "culture des objets jetables". *La Presse+*. Disponible: [http://plus.lapresse.ca/screens/7909a8ce-a7dd-4991-a72a-e454565bf87f%7C\\_0.html](http://plus.lapresse.ca/screens/7909a8ce-a7dd-4991-a72a-e454565bf87f%7C_0.html)
- Brunner, P. H. (2011). Urban mining. *J Ind Ecol*, 15(3), 339-341.
- CCR - Une compagnie de Glencore. (2017). Affinerie CCR - Chef de file dans l'industrie de l'affinage du cuivre et du traitement des métaux précieux (brochure corporative).
- Centre de métallurgie du Québec. (2017). Liste de nos équipements - fabrication additive. Disponible: <http://cmqtr.qc.ca/liste-de-nos-equipements/>
- Demers, S. (2016). *Projet de déconstruction verte de l'édifice fédéral dans le port de Québec - Gare Maritime Champlain*. Paper presented at the 19e Congrès annuel du 3RMCDQ, Drummondville.
- ELSA. (2017). Energy Local Storage Advanced system. Disponible: <http://elsa-h2020.eu/>
- Geldron, A. (2016). Métaux stratégiques : la mine urbaine française. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 82(2), 73.
- Institut de la statistique du Québec. (2016). *L'utilisation des technologies de pointe dans les entreprises au Québec - Rapport d'enquête*. Disponible: <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/science-technologie-innovation/technologie-pointe/technologies-pointe.pdf>
- Institut EDDEC. (2016a). Économie circulaire. Disponible: <http://instituteddec.org/themes/economie-circulaire/>
- Institut EDDEC. (2016b). *Métaux et économie circulaire au Québec - Rapport de l'étape 2: Synthèse des stratégies de circularité pour le cuivre, le fer et le lithium*. Disponible: <http://mern.gouv.qc.ca/publications/mines/metaux-economie-circulaire-quebec.pdf>
- MDDELCC. (2017). Loi visant l'augmentation du nombre de véhicules automobiles zéro émission au Québec afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et autres polluants. Disponible: <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/vze/>
- Ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer en charge des relations internationales sur le climat. (2016). *Décret no 2016-703 du 30 mai 2016 relatif à l'utilisation de pièces de rechange automobiles issues de l'économie circulaire*. Journal officiel de la République française Disponible: [http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2016-05-31\\_Decret\\_utilisato\\_pieces\\_de\\_rechange\\_automobiles-2.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2016-05-31_Decret_utilisato_pieces_de_rechange_automobiles-2.pdf)
- MTMDET. (2017). Soutien au déploiement des autobus scolaires électriques. Disponible: <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/aide-finan/electrification/soutien-deploiement-autobus-scolaires/Pages/autobus-scolaires.aspx>
- Müller, D. B., Wang, T., & Duval, B. (2010). Patterns of Iron Use in Societal Evolution - Supporting Information. *Environmental science & technology*, 45(1), 182-188.
- Directive 2000/53/CE du Parlement européen et du Conseil du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage - Déclarations de la Commission, (2000).

- RECYC-QUÉBEC. (2016a). Appel de propositions sur l'écogestion de chantiers de construction, de rénovation et de démolition. Disponible: <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/entreprises-organismes/mieux-gerer/appels-propositions/crd>
- RECYC-QUÉBEC. (2016b). *Plan d'action 2016-2017 - Comité mixte sur la réduction à la source*. Disponible: <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/plan-action-comite-mixte-2016-2017.pdf>
- RénoCyclage. (2013). Rapport d'activités 2011-2013. Disponible: [http://media.wix.com/ugd/c3ba22\\_c40b113d40e0292aa6a69e2f526d6feb.pdf](http://media.wix.com/ugd/c3ba22_c40b113d40e0292aa6a69e2f526d6feb.pdf)
- Réseau Québec-3D. (2015). À propos du Réseau Québec-3D. Disponible: <http://www.reseauquebec3d.com/fr/a-propos-du-reseau-quebec-3d>
- Retriev Technologies. (2017). Recycling Technology - Lithium Ion. Disponible: <http://www.retrievtech.com/recycling/lithium-ion>
- Toyota. (2015). Toyota Flips the Switch to Sustainable Power at Yellowstone National Park. Disponible: <http://corporatenews.pressroom.toyota.com/releases/toyota+sustainable+power+yellowstone+may12.htm>
- Ville de Longueuil. (2017). Grand nettoyage du printemps. Disponible: <https://www.longueuil.quebec/fr/grand-nettoyage-du-printemps>
- Whitmore, J., & Pineau, P.-O. (2016). *État de l'énergie au Québec 2017*. Disponible: <http://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2016/12/EEQ2017.pdf>

## ANNEXE 1

# GUIDE D'ENTRETIEN ANALYSE DES FREINS ET LEVIERS LIES AUX STRATEGIES DE CIRCULARITE PROJET MÉTAUX ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE AU QUÉBEC

## Introduction

- Présentation de l'Institut EDDEC ; Hélène Gervais, chargée de projets
- Présentation du projet :
  - Mandat du MERN confié à l'Institut EDDEC, 6 professeurs de Poly, UdeM, HEC.
  - 3 ans, 900 000 \$
  - Projet de recherche en économie circulaire qui a pour objet d'évaluer le potentiel de circularité de trois métaux stratégiques pour le Québec, soit le cuivre, le fer et le lithium
  - Expliquer sommairement l'économie circulaire
- Rappel des objectifs de l'entretien :
  - Mieux comprendre le fonctionnement et la dynamique de votre secteur d'activités ;
  - Identifier les barrières et les incitatifs à la mise en œuvre des stratégies de circularité vous concernant ;
  - Bonifier, le cas échéant, les stratégies de circularité envisagées ;
  - S'assurer que les recommandations que nous formulerons au MERN reflètent les besoins et les attentes de votre secteur.
- Confidentialité :
  - Les informations recueillies seront synthétisées de façon globale (pas de compte-rendu nominatif) dans un rapport qui sera remis au MERN au mois de mai 2017, lequel pourrait être rendu public, à la convenance du MERN. Un groupe interministériel consultatif, formé du MESI, du MDDELCC, du MTMDET et de RECYC-QUÉBEC, prendra également connaissance de ce rapport.
- Durée de l'entretien : environ une heure
- Présentation de la (des) stratégie(s) faisant l'objet de l'entretien

## Questions

### Profil de l'interviewé

- Quelle est votre fonction dans l'organisation ? Vos principales responsabilités/expertise ?
- Quelle est la mission et les activités (sommaires) de votre organisation ?
- Quels sont les principaux enjeux de votre secteur d'activités, particulièrement en termes de ressources ?

### Pertinence et faisabilité de la (des) stratégie(s)

- Comment voyez-vous la mise en œuvre d'une telle stratégie dans votre organisation ou votre secteur d'activité ? Que faut-il faire au plan opérationnel, au plan technique ?
- Cette stratégie est-elle pertinente selon vous ?
- Est-elle faisable ? Pourquoi ? Sinon, comment pourrait-elle l'être ?
- La stratégie devrait-elle être modifiée/bonifiée ? Si oui, comment ?
- Quels objectifs devraient être visés par la mise en œuvre de cette stratégie ? Quelles sont les attentes ? Les gains attendus ?
- Comment décririez-vous le degré d'avancement (ou d'engagement) de votre secteur d'activité par rapport à cette stratégie ?

### Freins et leviers à la mise en œuvre

- Quels incitatifs/leviers pourraient stimuler le déploiement de cette stratégie (ex. : économique, réglementaire, humain, formation, recherche, sensibilisation, communication) ?
- Quels sont les risques, les difficultés ou les blocages à anticiper dans le déploiement de cette stratégie (ex. : technique, économique, humain, réglementaire) ?

### Acteurs pour la mise en œuvre

- Quels sont les acteurs au Québec à impliquer dans la mise en œuvre de cette stratégie ?
- Quels sont ceux qui sont les plus susceptibles d'être intéressés par la mise en œuvre de cette stratégie ? Pourquoi le feraient-ils ?
- Connaissez-vous un leader dans votre secteur qui pourrait éventuellement être porteur de cette stratégie ?
- Quels sont ceux qui sont les plus susceptibles d'être réticents par la mise en œuvre de cette stratégie ? Pourquoi ?
- Seriez-vous intéressé à mettre en œuvre cette stratégie ?

### Conclusion

- Expliquer les prochaines étapes : synthèse sous forme de rapport qui sera remis au MERN
- Demander à l'interviewé s'il serait disponible pour fournir au besoin certaines informations de nature technique ou économique, en lien avec son secteur, pour l'analyse technico-économique des stratégies de circularité
- L'inviter à transmettre toute autre information qui pourrait s'avérer utile pour les suites de la recherche