

# MÉTAUX ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE AU QUÉBEC

## Rapport de l'étape 4 : Conclusions et recommandations

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

16 mars 2018

## Équipe de projet

### « MÉTAUX ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE AU QUÉBEC »

#### Direction :

- Manuele Margni, professeur, CIRAIG, génie industriel et mathématique, Polytechnique Montréal

#### Coordination :

- Mélanie McDonald, coordonnatrice, Institut EDDEC

#### Réalisation :

- Olivier Bahn, professeur, département de sciences de la décision, HEC Montréal
- Pierre Baptiste, professeur, génie industriel et mathématique, Polytechnique Montréal
- Normand Mousseau, professeur, département de physique, Université de Montréal
- Oumarou Savadogo, professeur, génie métallurgique, Polytechnique Montréal
- Richard Simon, professeur, génies civil, géologique et des mines, Polytechnique Montréal

#### Contribution :

- Hélène Gervais, chargée de projets et associée de recherche, Institut EDDEC
- François Saunier, associé de recherche, CIRAIG, génie chimique, Polytechnique Montréal
- Pablo Tirado, associé de recherche, CIRAIG, génie chimique, Polytechnique Montréal
- Kathleen Vaillancourt, ESMIA Consultants, Montréal

## Équipe de rédaction

### « RAPPORT DE L'ÉTAPE 4 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS »

#### Réalisation :

- Normand Mousseau, professeur, département de physique, Université de Montréal
- Manuele Margni, professeur, CIRAIG, génie industriel et mathématique, Polytechnique Montréal
- Hugues Imbeault-Tétreault, ing., associé de recherche, CIRAIG, génie chimique, Polytechnique Montréal
- François Saunier, associé de recherche, CIRAIG, génie chimique, Polytechnique Montréal
- Mélanie McDonald, coordonnatrice, Institut EDDEC

#### Contribution :

- Geoffrey Lonca, étudiant, CIRAIG, génie industriel et mathématique, Polytechnique Montréal
- Pablo Tirado, associé de recherche, CIRAIG, génie chimique, Polytechnique Montréal

## SOMMAIRE

Les métaux utilisés dans le monde sont exploités à des rythmes alarmants. Par exemple, selon la cadence actuelle d'extraction, les réserves mondiales connues d'or seraient épuisées d'ici environ 40 ans (Bihouix & de Guillebon, 2010). La recherche d'un modèle économique dont la vision est de préserver ces ressources est donc pertinente. Pour plusieurs, l'**économie circulaire** constitue la solution, ce modèle faisant intervenir une panoplie de stratégies permettant une utilisation optimale des ressources disponibles dans une logique de recirculation de la matière dans l'économie.

L'économie circulaire est en plein essor dans les domaines académique et industriel et retient de plus en plus l'attention des décideurs. C'est dans cette mouvance que le **ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN)** désire explorer le potentiel de circularité des métaux extraits du sol québécois, et estimer comment une économie plus circulaire pourrait contribuer à leur préservation et à l'optimisation de leur usage dans un contexte québécois. Pour ce faire, l'**Institut de l'environnement, du développement durable et de l'économie circulaire (Institut EDDEC)** et ses partenaires ont réalisé une étude échelonnée sur trois ans dont les principaux résultats sont présentés dans ce rapport.

L'étude s'est concentrée sur trois métaux : **le fer, le cuivre et le lithium**. Le fer est le métal extrait en plus grande quantité au Québec avec 26 millions de tonnes de concentré en 2015, correspondant à plus de la moitié de la production canadienne. Les gisements les plus importants sont exploités sur la Côte-Nord. Le cuivre est un métal transformé de A à Z dans la province à hauteur de 438 000 tonnes en 2014, bien que la grande majorité provienne de concentré de cuivre importé. Le concentré de cuivre produit au Québec est d'abord extrait comme coproduit des mines d'or, de nickel et de zinc, puis fondu à Rouyn-Noranda où se trouve la seule fonderie de cuivre au Canada. Il est ensuite purifié et transformé en fils et câbles électriques à Montréal. Enfin, le lithium, principalement utilisé dans les batteries, les verres et les céramiques, est un métal dont l'exploitation s'intensifiera dans les prochaines années au Québec. Il a été transformé à hauteur de 181 tonnes en 2014. Son potentiel de développement est cependant important, notamment en raison du marché croissant des voitures électriques, des appareils électroniques et du stockage d'énergie.

L'équipe de recherche a d'abord étudié où étaient les pertes (dans l'environnement, dans les résidus miniers ou exportés hors province) et quelles « boucles de circularité » étaient déjà en place pour ces trois métaux. Les pertes de matière lors de l'extraction (0,1 Mt par an) sont très faibles par rapport à l'immense quantité extraite. Aux deux étapes de métallurgie/transformation et fabrication/assemblage de produits constitués de fer, les pertes s'élèvent à 0,4 Mt par an à chacune de ces étapes, représentant respectivement 14 % du fer sortant de l'étape de métallurgie/transformation et 6 % du fer sortant de l'étape de fabrication/assemblage. Le fer est récupéré à 93 % en fin de vie pour le recyclage local ou à l'étranger. De son côté, le cuivre « recircule » déjà beaucoup, que ce soit au Québec ou ailleurs, grâce aux activités de recyclage et à sa forte valeur économique. Les plus grandes pertes se situent en fait à l'étape de la concentration du minerai (juste après son extraction), où 10 % du cuivre extrait au Québec reste dans les résidus miniers et y est ainsi perdu. La situation est très différente en ce qui concerne le lithium. Les plus grandes pertes ont lieu à la fin de vie (17 t par an) dont environ la moitié est envoyée à l'enfouissement. Quatorze tonnes par an, soit 9 % du lithium utilisé annuellement au Québec, sont perdues à l'étape d'utilisation par des usages dissipatifs (par

ex. médicaments, lubrifiants, verre, etc.). La même quantité de lithium est perdue en phase de fabrication/ assemblage, correspondant à 7 % du lithium importé à cette étape. La circularité du lithium au Québec est encore à développer.

L'équipe de recherche s'est ensuite penchée sur les **stratégies qui permettraient d'augmenter la circularité des trois métaux**. Une revue de littérature mondiale a d'abord été réalisée afin de répertorier des stratégies de circularité appliquées aux métaux. **Quarante et une stratégies ont alors été identifiées**. Ensuite, en collaboration avec un comité interministériel, l'équipe de recherche a procédé à la sélection de 13 d'entre elles sur la base d'une première estimation de la faisabilité, de la pertinence, de la portée, des retombées environnementales, économiques et sociales potentielles, ainsi que du potentiel de mise en œuvre et de préservation de la valeur de la ressource.

En analysant les scénarios associés aux stratégies sélectionnées selon le **potentiel de circularité**, la **faisabilité technico-économique à long terme** et le **risque d'engendrer des impacts négatifs sur l'environnement**, l'équipe a pu identifier des pistes intéressantes :

- Dans la **valorisation des déchets industriels**, la **captation de CO<sub>2</sub> à partir des laitiers** pour le fer pourrait être une avenue intéressante dans le contexte québécois à condition d'intégrer celle-ci dans le marché du carbone.
- Compte tenu des quantités importantes de métal contenues dans les batteries, développer une filière de **recyclage du lithium des batteries au Québec** notamment pour celles utilisées dans les véhicules électriques, semble très intéressant et pertinent.
- La **fabrication additive**, par exemple appliquée aux avions, et l'**écoconception de véhicules avec des matériaux plus légers** devraient permettre d'utiliser moins de métaux lors de la fabrication (en particulier du fer comme il est question dans cette étude) et d'économiser du carburant en phase d'utilisation.
- La **fabrication additive** est également une façon d'étendre la durée de vie des produits en facilitant la fabrication de pièces de rechange. Le potentiel de cette technique est important (en particulier pour le fer), bien qu'il ne soit pas totalement capturé dans cette étude.
- L'**extraction** de métaux à partir de **mines urbaines** est une stratégie à grand potentiel pour les trois métaux étudiés (le fer, le cuivre et le lithium), mais beaucoup de collecte de données et de travaux sont encore nécessaires pour mieux la définir, la concevoir et la mettre en œuvre.
- L'**autopartage** est une stratégie qui démontre clairement un intérêt environnemental (particulièrement dans le cas du fer, et dans une moindre mesure pour le cuivre et le lithium), même si son potentiel de circularité est faible et que certains résultats de la modélisation semblent incertains. Cette stratégie permet surtout de diminuer la demande en métaux par personne en intensifiant l'utilisation des produits, ce qui ralentit la croissance des stocks en utilisation et réduit l'extraction.
- L'utilisation des **batteries usagées pour le stockage d'énergie photovoltaïque** dans un contexte purement québécois (stratégie concernant donc le lithium) devra compter sur des technologies photovoltaïques plus écologiques et composées de matériaux moins impactants. Sinon, cette stratégie de circularité se fera au détriment d'une production d'électricité d'origine hydroélectrique, actuellement moins dommageable pour l'environnement que la production d'électricité photovoltaïque.

Dans une optique de mise en œuvre des stratégies, une analyse des acteurs clés, des freins et des leviers a été réalisée dans le contexte québécois. D'abord, trois principaux **acteurs clés** se démarquent pour l'implantation de stratégies de circularité :

- **Entreprises** : Dans une économie ouverte comme celle du Québec, ce sont les acteurs de premier plan dans la mise en place et l'exécution des stratégies.
- **Gouvernements** : Ils ne sont pas nécessairement au premier plan de l'implantation d'une stratégie, mais possèdent des leviers d'actions puissants (politiques, subventions, etc.).
- **Institutions académiques** (universités, cégeps et centres de recherches) : L'avancement de la science et des technologies est un moteur d'élaboration de stratégies prometteuses.

Ensuite, trois principaux **freins et leviers** pour l'implantation des stratégies sont ressortis des analyses :

- **Défis techniques** : Ils sont notamment dus à l'immaturation des technologies ou des méthodes impliquées. Des investissements en recherche et développement sont alors des leviers à la réalisation de telles stratégies.
- **Inertie des acteurs** : Il s'agit de la résistance au changement, en raison d'un manque de connaissances sur l'existence des technologies disponibles, d'un manque de main-d'œuvre qualifiée, ou encore des perceptions non favorables aux stratégies de circularité. L'instauration d'incitatifs réglementaires pour forcer les changements, la formation de la relève, la formation continue et la sensibilisation des entreprises sont des leviers pertinents.
- **Rentabilité** : Des coûts d'investissement et d'opérations trop élevés ou la concurrence des produits et matériaux neufs sont des causes de manque de rentabilité pour certaines stratégies. Les subventions gouvernementales et la recherche et le développement pour trouver des solutions à faibles coûts sont les principaux leviers qui ressortent de l'analyse.

En dernier lieu, toutes ces analyses ont généré de multiples résultats qui permettent de tirer un certain nombre de recommandations générales :

**Une circularité déjà bien implantée.** Il y aurait lieu de mieux publiciser le succès québécois de la filière du cuivre en matière de circularité, pour renforcer la fierté et démontrer l'intérêt de concevoir des approches de circularité pour d'autres éléments, produits et infrastructures.

**S'appuyer sur les forces du Québec : les stratégies de substitution.** Étant donné la forte circularité ou la possibilité de réduire de manière significative l'impact environnemental des produits exploités ou transformés au Québec, des études devraient être menées sur la possibilité de développer des stratégies de substitution. Ces stratégies visent à remplacer un métal produit hors province par un métal produit ou recyclé au Québec. Les impacts environnementaux sur le cycle de vie complet du métal sont alors réduits, tout en améliorant la circularité globale de sa filière et en favorisant le développement économique du Québec. Ces études doivent inclure des analyses de cycle de vie (ACV) afin d'éviter tout déplacement d'impacts environnementaux.

**Des stratégies prometteuses.** Les résultats de l'étude supportent le développement du recyclage du lithium des batteries et la séquestration du CO<sub>2</sub> à partir de laitiers. De plus, il est recommandé de promouvoir la fabrication additive et d'explorer les mines urbaines.

**Des stratégies très diverses à adapter au Québec.** Les stratégies de circularité devant être adaptées aux conditions locales d'extraction, de transformation, de production, d'utilisation et d'élimination. Il est essentiel de poursuivre les études spécifiquement sur les meilleures stratégies pour le Québec.

**Une étude originale utilisant une approche transversale.** La présente étude adopte une approche longitudinale, ciblant des filières métalliques spécifiques (fer, cuivre, lithium) limitées au Québec. Il serait pertinent que le gouvernement poursuive les efforts déjà entrepris pour développer une approche transversale à l'étude des stratégies de circularité pour le Québec, c'est-à-dire en considérant les industries connexes. Par exemple, dans le cas du lithium, le Québec a l'occasion de développer des activités industrielles circulaires à haute valeur ajoutée dans une chaîne de valeur globalisée de production et de recyclage des batteries, dont les composantes ne se limitent pas au lithium. Dans le cas du fer et du cuivre, le Québec pourrait élargir l'étude en cherchant à voir comment développer des stratégies de circularité pour la part de ces métaux envoyée à l'étranger. Une approche pourrait s'appuyer, par exemple, sur des échanges avec des experts internationaux sur ces sujets.

**Agir sur la réduction de la demande en métaux,** sans quoi les quantités recirculées ne sauront pas satisfaire une demande toujours croissante. Il serait pertinent de développer des cibles globales de consommation pour chaque métal, quantifiant la quantité nécessaire pour un développement durable de la société québécoise. Cette démarche est déjà discutée à différentes échelles d'application pour des cibles de réduction de GES ou de matières résiduelles. L'équité intergénérationnelle dans l'extraction des ressources minières au Québec serait aussi un aspect à inclure dans cette réflexion.

## TABLE DES MATIÈRES

|  |      |
|--|------|
| SOMMAIRE   | ii   |
| LISTE DES FIGURES  | viii |
| LISTE DES TABLEAUX   | ix   |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES   | x    |
| AVANT-PROPOS   | 1    |
| 1 QU'EST-CE QUE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE ?  | 3    |
| 1.1 Comment se définit l'économie circulaire ?   | 3    |
| 1.2 Quelles sont les retombées potentielles de l'économie circulaire ?                         | 5    |
| 1.3 Quelle est la situation de l'économie circulaire dans le monde ?                           | 5    |
| 1.4 Comment estimer la circularité d'un métal ?  | 6    |
| 2 QUEL EST LE PORTRAIT QUÉBÉCOIS DES MÉTAUX À L'ÉTUDE ?  | 7    |
| 2.1 Pourquoi le fer, le cuivre et le lithium ?   | 7    |
| Le fer, le métal le plus commun  | 7    |
| Le cuivre, transformé de A à Z au Québec   | 7    |
| Le lithium, un métal à grand potentiel   | 7    |
| 2.2 Où se trouvent les gisements exploités ou à l'état de projets au Québec ?                  | 9    |
| Fer  | 10   |
| Cuivre   | 10   |
| Lithium  | 10   |
| 2.3 Que fait-on des métaux extraits ?  | 11   |
| Le fer   | 11   |
| Le cuivre  | 14   |
| Le lithium   | 16   |
| 2.4 Quelles conclusions tirer de cette analyse ?   | 19   |
| 3 COMMENT AUGMENTER LA CIRCULARITÉ DES MÉTAUX ÉTUDIÉS ?  | 20   |
| 3.1 Quelles sont les stratégies de circularité du fer, du cuivre et du lithium sélectionnées ? | 20   |
| Utiliser efficacement les ressources   | 21   |
| Intensifier l'utilisation des produits et prolonger leur durée de vie                          | 22   |
| Donner une nouvelle vie aux ressources   | 24   |
| 4 QUELLES STRATÉGIES SONT LES PLUS PROMETTEUSES ?  | 26   |
| 4.1 Quelles stratégies ont le plus grand potentiel de circularité ?                            | 26   |
| 4.2 Sont-elles réalisables sur le plan technique et économique ?                               | 29   |
| 4.3 Y a-t-il un risque de déplacement d'impacts environnementaux ?                             | 33   |
| 4.4 Quelles conclusions tirer de ces analyses ?  | 35   |
| 5 COMMENT DÉPLOYER LES STRATÉGIES ?  | 37   |
| 5.1 Qui sont les acteurs des stratégies de circularité au Québec ?                             | 37   |
| Fabrication additive   | 38   |
| Recyclage de la ferraille  | 38   |
| Recyclage du lithium des batteries   | 39   |

|   |           |
|---|-----------|
| Écoconception des véhicules – Matériaux plus légers                               | 39        |
| Séquestration du CO <sub>2</sub> à partir de laitiers                             | 39        |
| 5.2 Quels sont les freins et leviers pour une adoption au Québec ?                | 40        |
| Fabrication additive  | 41        |
| Recyclage de la ferraille   | 41        |
| Recyclage du lithium des batteries  | 41        |
| Écoconception des véhicules – Matériaux plus légers                               | 42        |
| Séquestration du CO <sub>2</sub> à partir de laitiers                             | 43        |
| 5.3 Quelles conclusions tirer de ces analyses ?                                   | 44        |
| <b>6 AU-DELÀ DES STRATÉGIES DE CIRCULARITÉ, QUE TIRER DE CE PROJET ?</b>          | <b>45</b> |
| 6.1 A-t-on les données nécessaires pour tirer des conclusions fiables ?           | 45        |
| Sélection des métaux  | 45        |
| Freins et leviers   | 45        |
| Analyse de flux de matières (AFM)   | 46        |
| Analyse technico-économique   | 46        |
| ACV conséquentielle   | 47        |
| 6.2 Les résultats peuvent-ils s'appliquer à d'autres métaux ?                     | 47        |
| 6.3 Est-il approprié de penser par métal ?  | 48        |
| 6.4 Avec le recul, aurait-on pu considérer d'autres stratégies ?                  | 48        |
| <b>7 QUELLES SONT LES CONCLUSIONS PRINCIPALES ET RECOMMANDATIONS DE L'ÉTUDE ?</b> | <b>49</b> |
| Une circularité déjà bien implantée   | 49        |
| S'appuyer sur les forces du Québec : les stratégies de substitution               | 49        |
| Des stratégies prometteuses   | 50        |
| Des stratégies très diverses à adapter au Québec                                  | 52        |
| Une étude originale utilisant une approche transversale                           | 52        |
| Agir sur la demande en métaux   | 53        |
| <b>8 RÉFÉRENCES</b>   | <b>55</b> |
| <b>ANNEXE A - LISTE COMPLÈTE DES STRATÉGIES DE CIRCULARITÉ</b>                    | <b>58</b> |
| <b>ANNEXE B – FICHES-RÉSUMÉS DES STRATÉGIES DE CIRCULARITÉ</b>                    | <b>61</b> |
| DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE POUR UNE EXTRACTION PLUS EFFICACE (1)                 | 62        |
| ENTREPOSAGE ADÉQUAT DES RÉSIDUS MINIERES POUR UNE EXTRACTION ULTÉRIEURE (2)       | 63        |
| MINES URBAINES (3)  | 64        |
| FABRICATION ADDITIVE (5)  | 65        |
| MODULARITÉ DES ÉQUIPEMENTS MÉCANIQUES ET INDUSTRIELS (9)                          | 67        |
| ÉCOCONCEPTION DES POUTRES EN ACIER PERMETTANT LEUR RÉEMPLOI (10)                  | 68        |
| DÉCONSTRUCTION SÉLECTIVE DES BÂTIMENTS ET INFRASTRUCTURES (11)                    | 69        |
| AUTOPARTAGE (12A)   | 71        |
| ÉCOCONCEPTION DES VÉHICULES – MATÉRIAUX PLUS LÉGERS (12)                          | 72        |
| STOCKAGE D'ÉNERGIE AVEC DES BATTERIES LITHIUM-ION USAGÉES (13)                    | 74        |
| RÉCUPÉRATION DES MÉTAUX PRÉCIEUX DES BOUES ANODIQUES (4A)                         | 76        |
| RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE DES LAITIERS (4B)                                | 77        |
| SÉQUESTRATION DU CO <sub>2</sub> À PARTIR DE LAITIERS (4C)                        | 79        |
| RECYCLAGE DU FER (6)  | 81        |
| RECYCLAGE DU CUIVRE (7)   | 83        |
| RECYCLAGE DU LITHIUM (8)  | 84        |

## LISTE DES FIGURES

|  |    |
|--|----|
| Figure 0-1 : Étapes de réalisation de l'étude. (ACV : analyse du cycle de vie)   | 2  |
| Figure 1-1 : Représentation de l'économie circulaire selon l'Institut EDDEC.   | 4  |
| Figure 2-1 : Carte de l'activité minière et des projets miniers pour le fer, le cuivre et le lithium au Québec   | 9  |
| Figure 2-2 : Répartition du stock de fer par secteur dans l'étape d'utilisation au Québec en 2014, au total 101 Mt. Calculé à partir de Pauliuk et coll. (2013) et Müller et coll. (2011). | 12 |
| Figure 2-3 : Répartition du flux annuel de fer géré en fin de vie (2,6 Mt/an) par secteur au Québec en 2014  | 13 |
| Figure 2-4 : Principaux stocks, flux et échanges avec l'extérieur du fer au Québec en 2014 en millions de tonnes (Mt ou Mt/an). Les valeurs de moins de 0,1 Mt/an ne sont pas présentées.  | 14 |
| Figure 2-5 : Répartition du stock de cuivre par secteur dans l'étape d'utilisation au Québec en 2014 (adapté de ICSG, 2015).   | 15 |
| Figure 2-6 : Répartition du flux annuel de cuivre géré en fin de vie (78 kt/an) par secteur au Québec en 2014 (exportations exclues).  | 15 |
| Figure 2-7 : Principaux stocks, flux et échanges avec l'extérieur du cuivre au Québec en 2014 en milliers de tonnes (kt ou kt/an). Les valeurs de moins de 1 kt/an ne sont pas présentées. | 16 |
| Figure 2-8 : Répartition du stock du lithium par secteur au Québec en 2014 (au total 400 tonnes, calculées à partir de USGS, 2016b).   | 17 |
| Figure 2-9 : Principaux stocks, flux et échanges avec l'extérieur du lithium au Québec en 2014 en tonnes (t ou t/an). Les valeurs de moins de 1 t/an ne sont pas présentées.               | 18 |

## LISTE DES TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| Tableau 4-1 : Stratégies présentant un fort potentiel de circularité                                   | 27 |
| Tableau 4-2 : Stratégies présentant une forte faisabilité technico-économique                          | 30 |
| Tableau 4-3 : Synthèse des résultats de l'étude  | 34 |
| Tableau 4-4 : Sommaire de l'évaluation du potentiel de circularité et de la faisabilité des stratégies | 35 |
| Tableau A-1 : Stratégies de circularité répertoriées dans la littérature                               | 58 |

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

|                 |  |
|-----------------|--|
| ACQ             | Association de la construction du Québec   |
| ACV             | Analyse de cycle de vie  |
| AFM             | Analyse de flux de matières  |
| APCHQ           | Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec                           |
| ARPAC           | Association des recycleurs de pièces d'autos et de camions au Québec                                     |
| ARPE            | Association pour le recyclage des produits électroniques   |
| BNQ             | Bureau de normalisation du Québec  |
| CBDCa           | Conseil du bâtiment durable du Canada  |
| CCQ             | Commission de la construction du Québec  |
| CEGQ            | Corporation des entrepreneurs généraux du Québec   |
| CNRC            | Conseil national de recherches du Canada   |
| CO <sub>2</sub> | Dioxyde de carbone   |
| CTTÉI           | Centre de transfert technologique en écologie industrielle   |
| ELSA            | Energy Local Storage Advanced system   |
| GES             | Gaz à effet de serre   |
| ICCA            | Institut canadien de la construction en acier  |
| IVI             | Institut du véhicule innovant  |
| kt              | Kilotonne (millier de tonnes)  |
| MDDELCC         | Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques |
| MERN            | Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles  |
| MESI            | Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation  |
| Mt              | Mégatonne (million de tonnes)  |
| MTMDET          | Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports                  |
| NATEM           | North American TIMES Energy Model  |
| PIB             | Produit intérieur brut   |
| t               | Tonne  |
| 3RMCDQ          | Regroupement des Récupérateurs et des Recycleurs de Matériaux de Construction et de Démolition du Québec |

## AVANT-PROPOS

Les métaux possèdent des propriétés physiques et chimiques qui les rendent intéressants pour une multitude d'applications. À travers les âges, leurs usages se sont progressivement multipliés, pour exploser avec l'arrivée de l'ère industrielle. Depuis la Deuxième Guerre mondiale, leur consommation a augmenté de façon fulgurante : celle du minerai de fer est passée de 159 à 2 280 millions de tonnes par année entre 1945 et 2015 (USGS, 2016a). Jusqu'à maintenant, l'**approvisionnement en métaux** a été assuré principalement par l'extraction minière, mais il est attendu que ce ne soit plus suffisant dans le futur, ces **ressources** se retrouvant en **quantité limitée** dans la croûte terrestre. Par exemple, au regard des réserves connues et du rythme actuel d'extraction, l'or serait épuisé d'ici environ 40 ans (Bihouix & de Guillebon, 2010). Bien qu'il ne s'agisse pas d'une échéance ultime, d'autres réserves étant à découvrir, il reste qu'il est de plus en plus difficile et coûteux d'extraire les métaux du sol, entraînant des impacts environnementaux de plus en plus élevés. La recherche d'un modèle économique dont la vision est de préserver ces ressources est donc de plus en plus pertinente. Pour plusieurs, l'**économie circulaire** constitue la **solution**, ce modèle faisant intervenir une panoplie de stratégies pour utiliser les ressources disponibles de manière optimale.

L'économie circulaire est un concept en plein essor, qui s'élabore en étroite collaboration entre les industries, les gouvernements et le monde académique, et qui retient de plus en plus l'attention des décideurs. Plusieurs autorités dans le monde se sont dotées de lois en la matière dont l'Union européenne, la Chine, le Japon et, plus près de nous, l'Ontario, pour ne nommer que quelques exemples. Au **Québec**, des travaux sont en cours pour se doter d'une **feuille de route en économie circulaire**.

C'est dans cette mouvance que le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) désire explorer le potentiel de circularité des métaux extraits du sol québécois, et estimer comment une économie plus circulaire pourrait contribuer à les préserver et à optimiser leurs usages dans un contexte québécois. Pour ce faire, l'**Institut de l'environnement, du développement durable et de l'économie circulaire (Institut EDDEC) et ses partenaires** ont réalisé **une étude** échelonnée sur trois ans dont les résultats sont présentés dans ce rapport. Dans le cadre de ce projet, six rapports techniques axés sur trois métaux, le fer, le cuivre et le lithium, ont déjà été produits, portant sur les différents jalons décrits à la Figure O-1 ci-dessous. Ces rapports sont disponibles à l'adresse <http://mern.gouv.qc.ca/> et listés ci-dessous :

- [Étape 2 : Synthèse des stratégies de circularité pour le cuivre, le fer et le lithium](#)
- [Étape 2.2 : Analyse de flux de matières du cuivre, du fer et du lithium](#)
- [Étape 2.3 : Analyse du cycle de vie](#)
- [Étape 3.1 : Analyse des freins et leviers liés aux stratégies de circularité pour le cuivre, le fer et le lithium](#)
- Étape 3.2 : Analyse technico-économique des stratégies de circularité
- Étape 3.3 : Analyse du cycle de vie conséquentielle des stratégies de circularité



Figure O-1 : Étapes de réalisation de l'étude. (ACV : analyse du cycle de vie)

Les résultats issus de ces différentes recherches et analyses sont résumés dans ce rapport et présentés sous la forme de questions et de réponses. Ainsi, chaque chapitre répond à une question principale, parfois à l'aide de plusieurs sous-questions. Pour s'assurer d'une bonne compréhension des concepts, il a été jugé utile de revenir sur les bases de l'économie circulaire. Le portrait des métaux retenus (fer, cuivre et lithium) est ensuite présenté. Il a été réalisé à l'aide d'une analyse de flux de matières (AFM) propre à chaque métal. Ce type d'analyse permet de dresser un bilan des échanges de matières avec l'extérieur de la province et d'identifier les principales activités impliquées tout au long de la chaîne de valeur de chaque métal au Québec, et ainsi calculer les flux échangés, les stocks et les pertes à chaque étape. Une revue de littérature a aussi permis en parallèle d'identifier un ensemble de 41 stratégies mettant en œuvre le principe de l'économie circulaire et applicables aux métaux à l'étude. Les stratégies considérées comme les plus prometteuses parmi les 41 identifiées initialement sont par la suite détaillées. Une douzaine de stratégies ont été sélectionnées pour une analyse ultérieure de leur potentiel de circularité, de leur faisabilité technico-économique des bénéfiques ou des risques de déplacement d'impact. Cette évaluation a été menée à l'aide d'une analyse technico-économique et d'une analyse de cycle de vie. Enfin, à la lumière des travaux de ce projet, les limites de la méthodologie, les conclusions et les recommandations sont présentées dans une dernière section.

## 1 QU'EST-CE QUE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE ?

Dans le système économique linéaire, il y a peu d'incitatifs à recycler les déchets. En effet, le recyclage ne permet de récupérer qu'une partie de la valeur initiale des matériaux, typiquement de l'ordre de 30 % à 75 % de la valeur économique du métal pour les plus recyclés (Fondation Ellen MacArthur, 2015). Dans cette optique, de nouveaux modèles de conception, de consommation et de propriété doivent être développés pour éviter la perte de matière et de valeur. Présentement, l'économie québécoise, comme celle du reste de la planète, est dépendante de l'extraction de ressources vierges qui sont ensuite transformées et jetées en majeure partie. Cela implique qu'il est possible, si personne n'y prend garde, d'épuiser certaines ressources non renouvelables. Le concept d'économie circulaire suggère de calquer le système économique sur le fonctionnement des écosystèmes où chaque élément nourrit et se nourrit d'autres, et de développer un modèle économique de biens et services minimisant les pertes de matières sur l'ensemble de leur cycle de vie. **L'économie circulaire** propose une **variété de stratégies et de nouveaux modèles d'affaires** dont l'**objectif** est de **respecter les limites de la planète**.

### 1.1 Comment se définit l'économie circulaire ?

Donner une définition de l'économie circulaire n'est pas simple et plusieurs définitions, qui se recoupent, coexistent. Le Pôle de concertation québécois en économie circulaire<sup>1</sup>, animé par l'Institut EDDEC, a proposé la définition suivante :

« 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. »

La Figure 1-1 est une représentation de l'économie circulaire, accompagnée de quatre catégories de stratégies qui contribuent à son opérationnalisation. La première vise à préserver les ressources en repensant les produits et les façons de consommer les ressources afin d'en réduire l'utilisation. Les trois autres sont associées à des boucles de circularité plus ou moins longues. La plus courte représente des stratégies d'intensification d'usage, dont le but est de réduire le temps de non-utilisation, reposant sur des solutions telles que le partage et la location. Lorsqu'un produit ou un composant n'est plus fonctionnel ou n'est plus souhaité par le consommateur, la réparation, le don, la revente et le reconditionnement constituent des stratégies de prolongement de la vie utile. Si ces stratégies ne sont pas possibles, le recyclage et la valorisation permettent de remettre en circulation les ressources composant le produit (matériaux et énergie) dans l'économie, les détournant ainsi de l'élimination (enfouissement ou incinération). Dans une économie circulaire, **les boucles les plus courtes possibles**, nécessitant elles-mêmes moins de ressources, sont à **privilégier**.

<sup>1</sup> Le pôle de concertation québécois en économie circulaire, créé en 2015 et animé par l'Institut EDDEC, rassemble une quinzaine d'influenceurs québécois issus d'organisations variées (gouvernement, entreprises, villes, investisseurs, etc.). En s'appuyant sur des groupes de travail opérationnels, ce comité a pour mission de mobiliser et fédérer les acteurs du Québec, tout en créant les conditions favorables à une transition vers l'économie circulaire.

# L'économie circulaire

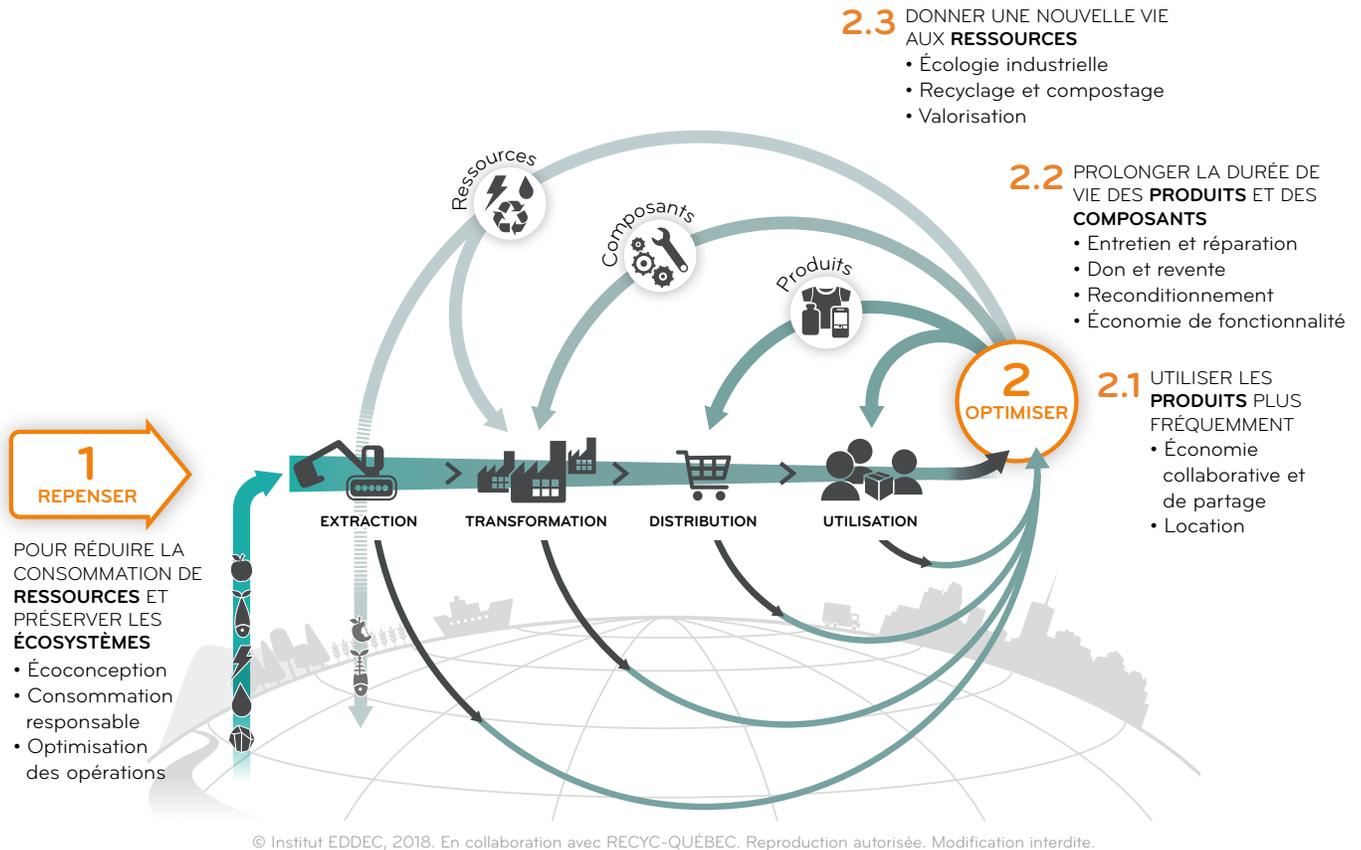


Figure 1-1 : Représentation de l'économie circulaire selon l'Institut EDDEC.

Les domaines d'action de l'économie circulaire sont multiples et se déclinent en plusieurs stratégies interdépendantes: l'économie de fonctionnalité, l'économie de partage, la maintenance et la réparation, le réemploi, le réusinage et le reconditionnement, l'écologie industrielle, le recyclage, l'extraction biochimique, la valorisation énergétique, ainsi que le compostage. Voici la description de deux d'entre elles.

Le concept d'économie de fonctionnalité préfère l'offre de service plutôt que celle de biens. Le propriétaire, qui n'est alors plus l'utilisateur, prend en charge les coûts liés à l'ensemble du cycle de vie d'un produit. Ainsi la durée de vie, la maintenance, la gestion en fin de vie et l'intégration de ces paramètres dès la conception du produit deviennent des éléments stratégiques essentiels au maintien de la compétitivité de tous les acteurs de la chaîne de valeur.

Poursuivant sur le concept d'intensification de l'utilisation des ressources matérielles, l'économie de partage est un modèle économique dans lequel les connexions entre les individus et les communautés sont facilitées et décentralisées. Elle met systématiquement en jeu l'individu soit par le biais de modèles entreprise-à-consommateur (Business to Consumer) ou pair-à-pair (Peer to Peer). Basée sur des communautés de personnes qui partagent ou échangent, l'économie de partage se décline aussi bien dans la production (ex. : les fablabs, wikispeed, wikihouse), la connaissance (ex. : les MOOC, Sésamath, Wikipedia), le financement (crowdfunding ou financement par la foule, ex. : Ulule, Goteo), que la consommation (ex. le covoiturage, le couchsurfing, les AMAP ou Airbnb) (Collporterre, 2014).

## 1.2 Quelles sont les retombées potentielles de l'économie circulaire ?

Plusieurs publications évaluent **les retombées économiques et environnementales potentielles considérables** de l'économie circulaire. Selon une étude de la Commission européenne (2014), une augmentation de la circularité de l'économie pourrait créer deux millions d'emplois en Europe seulement, tandis que la Fondation Ellen MacArthur (2015) évalue sur ce même continent des retombées économiques directes pouvant atteindre 600 milliards d'euros d'ici 2030.

Une première [étude des retombées économiques de l'économie circulaire au Québec](#) a été réalisée en 2018 par l'Institut EDDEC, en collaboration avec le Conseil du patronat du Québec, le Conseil patronal de l'environnement du Québec et Éco Entreprises Québec (Institut EDDEC, 2018). Elle conclue qu'en plus de réduire l'impact environnemental, l'économie circulaire a le potentiel d'accroître le nombre d'emplois, de pousser à la hausse le produit intérieur brut (PIB) et de favoriser le développement de nouveaux marchés. Parmi les secteurs d'activités à fort potentiel de circularisation au Québec, l'étude met en évidence que les secteurs les plus prometteurs sont notamment l'agroalimentaire et l'énergie, qui représentent tous deux une valeur d'utilisation (production et consommation) importante des industries dans le PIB. Les secteurs de la construction et de la production de métaux sont aussi mentionnés comme étant à considérer.

## 1.3 Quelle est la situation de l'économie circulaire dans le monde ?

**L'économie globale** est encore **loin d'être circulaire** puisque seulement 9,1 % des ressources qui entrent dans le processus économique sont recyclées (de Wit et coll., 2018). La transition d'une économie linéaire à une économie circulaire nécessitera une approche multidimensionnelle qui devra immanquablement s'appuyer sur des changements aux lois en vigueur afin de rééquilibrer le coût des externalités environnementales, d'orienter les habitudes de consommation, de favoriser le développement de l'économie sociale et solidaire et de faciliter les initiatives privées. Les initiatives découlant de l'application de l'économie circulaire sont une opportunité d'acquisition de savoir-faire unique au monde.

**L'économie circulaire** peut sembler un concept nouveau en Amérique du Nord, mais il est présent **depuis plus de deux décennies dans certains pays**, comme le Japon, l'Allemagne et la Chine et fait partie des politiques phares de l'Union européenne.

Par exemple, disposant de relativement peu de ressources naturelles sur son territoire, le Japon consacre des efforts considérables à la réduction de ses déchets et à la circularisation de son économie. Il a mis en place une pléiade d'incitatifs pour les entreprises et les particuliers afin d'encourager la gestion responsable des déchets. Les mesures en place incluent des écofrais pour la gestion en fin de vie de différents produits comme les voitures, les électroménagers et les ordinateurs, des écolabels, une politique d'achats verts pour le gouvernement ainsi que des mesures d'éducation, de promotion et d'encouragement. Des indicateurs sont également en place afin de mesurer la progression de la productivité des ressources par industrie et des gaz à effet de serre (GES) liés aux déchets. L'ensemble de ces mesures a permis au Japon d'atteindre des taux de recyclage de plus de 80 % pour les emballages, les appareils électroménagers, les matériaux de construction et les véhicules hors d'usage, en incluant les exportations de déchets.

En ce qui concerne l'Union européenne (UE), un plan d'action, nommé *Boucler la boucle - Un plan d'action de l'Union européenne en faveur de l'économie circulaire* a été adopté en 2015 (UE, 2015). Il vise en partie à améliorer la circularité des flux au sein même de l'UE et préserver les industries de la hausse des prix des ressources importées. Le plan d'action va bien au-delà de la simple gestion des déchets et intègre des mesures qui touchent l'ensemble du cycle de vie des produits. L'Europe a également identifié les déchets alimentaires, les matériaux de construction, la biomasse, les bioproduits et les matières premières évaluées comme critiques, comme les cinq secteurs prioritaires pour la mise en œuvre du plan d'action. Dès lors, la recherche dans les domaines d'application de l'économie circulaire fait l'objet de nombreux investissements.

#### 1.4 Comment estimer la circularité d'un métal ?

En fonction du type de flux (économique ou physique par exemple) et de l'échelle d'analyse (un matériau, un territoire, etc.), différents outils peuvent être employés pour caractériser la « circularité ». Pour évaluer celle d'un métal à l'échelle d'un territoire, l'analyse de flux de matières (AFM) est l'outil le plus largement utilisé. Elle permet de suivre le cheminement d'une ressource donnée dans un système, ainsi que d'identifier les boucles de circularité et les pertes de matières. Les auteurs de cette étude s'en sont servis afin de dresser un portrait des métaux analysés.

## 2 QUEL EST LE PORTRAIT QUÉBÉCOIS DES MÉTAUX À L'ÉTUDE ?

### 2.1 Pourquoi le fer, le cuivre et le lithium ?

Le choix des métaux à l'étude a été fait parmi une liste de douze métaux et matériaux exploités ou potentiellement exploitables au Québec. Une grille de sélection de neuf critères a été développée pour guider ce choix, comme les volumes extraits ou transformés au Québec, l'apport économique significatif pour la province, le potentiel de recyclabilité du métal et la disponibilité des données. L'utilisation de ces critères a mené à la définition de trois grandes familles de métaux et matériaux qui présentent pour le Québec :

1. Soit un volume important de production ;
2. Soit une filière de transformation complète ;
3. Soit un potentiel de développement.

Ensuite, l'équipe a retenu un métal différent pour la présente étude, soit le fer, le cuivre et le lithium, correspondant respectivement à chacun des trois points énoncés ci-dessus.

#### Le fer, le métal le plus commun

Le fer se présente très peu sous sa forme pure en raison de sa sensibilité à la corrosion et de ses faibles propriétés mécaniques. Il se retrouve généralement sous forme d'alliages, dont les plus communs forment la grande classe des aciers. Avec une production mondiale brute de 2,3 milliards de tonnes en 2015 (USGS, 2016a), le minerai de fer est de loin la substance métallique produite en plus grande quantité et la plus utilisée dans le monde (Bihouix & de Guillebon, 2010). Le Québec, pour sa part, a produit près de 26 millions de tonnes de concentré de fer en 2015, ce qui représente plus de la moitié de la production canadienne. Il va sans dire que la valeur économique de cette production est considérable pour la province.

#### Le cuivre, transformé de A à Z au Québec

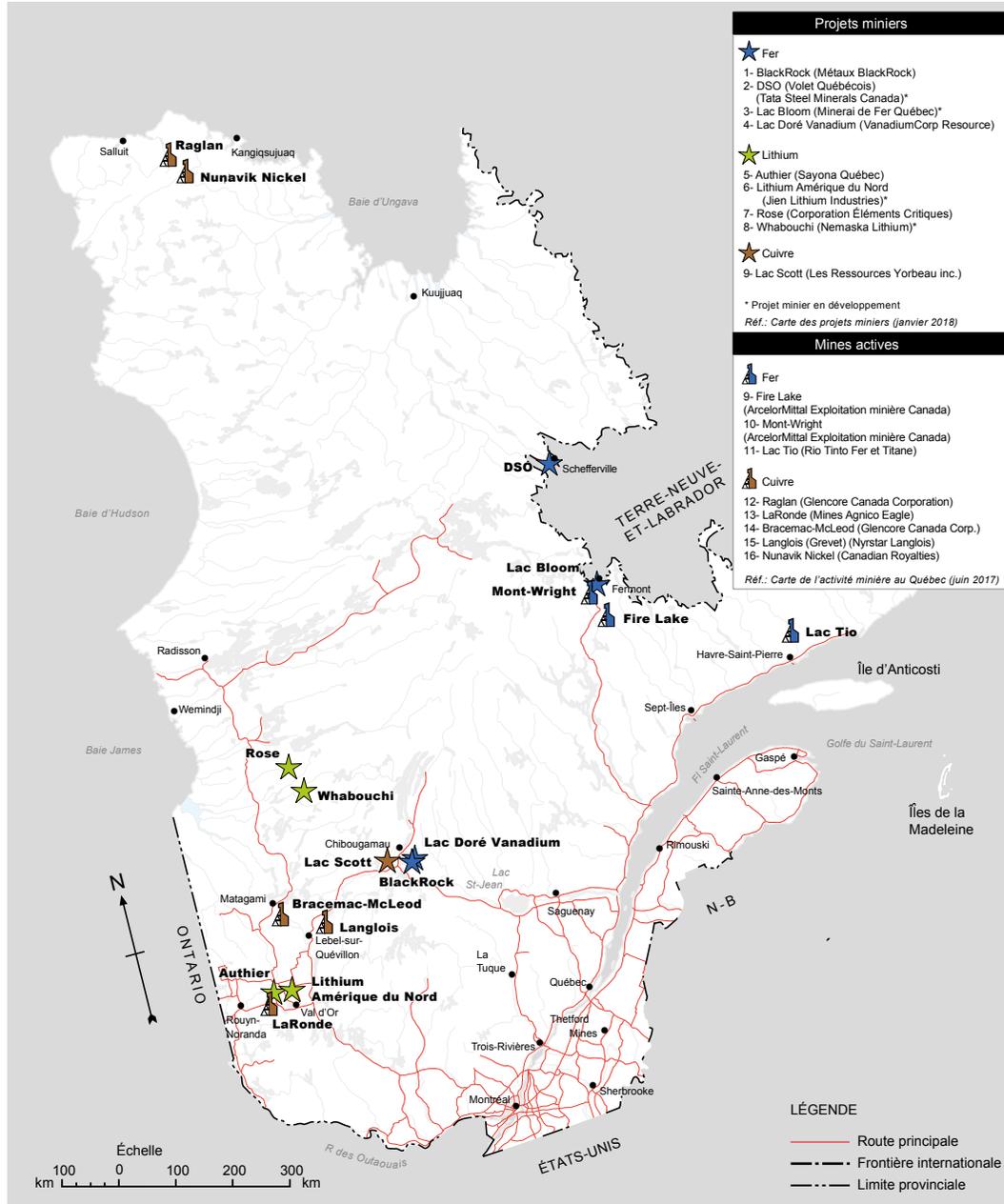
Le cuivre, en plus d'avoir une excellente conductivité thermique et électrique, est résistant à la corrosion, antibactérien, malléable et, en général, facilement recyclable. Il est principalement utilisé sous sa forme pure, mais il se retrouve aussi sous forme d'alliages, les plus connus étant le bronze et le laiton. Au Québec, il s'agit d'un métal relativement peu extrait. Toutefois, sa filière de transformation est complète et bien implantée avec la présence de la seule fonderie de cuivre au Canada, en plus d'importantes entreprises d'affinage et de fabrication de fils et câbles.

#### Le lithium, un métal à grand potentiel

Le lithium est un métal léger, ductile et très réactif au contact de l'air et de l'eau. Il est modérément abondant dans la croûte terrestre, mais difficilement accessible. Avec le développement des batteries au lithium, le cours de ce métal a fortement augmenté dans les dernières années (Legrand, 2017). Aujourd'hui, les principaux pays producteurs sont le Chili, l'Argentine, l'Australie et la Chine. Le Québec présente un bon potentiel de production de lithium. Avec la demande mondiale croissante, il existe une opportunité intéressante de développer cette filière industrielle à caractère énergétique. Le Québec possède tous les matériaux de base nécessaires à la fabrication de batteries au lithium-ion, ainsi qu'une expertise de

pointe reconnue mondialement. La plus grande partie de la production mondiale de batteries se fait en Asie. Seulement une petite partie se fabrique au Québec. En outre, son plan d'action en électrification des transports 2015-2020 a pour cible 100 000 véhicules électriques et hybrides rechargeables immatriculés pour 2020 (Gouvernement du Québec, 2015). La majeure partie des batteries qui équiperont ces véhicules proviendront de l'étranger car le Québec ne compte pas de manufacturier de voitures électriques.

## 2.2 Où se trouvent les gisements exploités ou à l'état de projets au Québec ?



**Sources des données**  
 Topographie : © Sa Majesté la Reine du chef du Canada, Ressources naturelles Canada (2002).  
 Projets miniers : Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Direction de l'information géologique du Québec (janvier 2018).  
 Mines actives : Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Direction de l'information géologique du Québec (juin 2017).

**Figure 2-1 : Carte de l'activité minière et des projets miniers pour le fer, le cuivre et le lithium au Québec**

## Fer

ArcelorMittal Exploitation minière Canada exploite le site du Mont-Wright ainsi que sa mine d'appoint, celle de Fire Lake, toutes deux situées près de Fermont sur la Côte-Nord (MERN, 2017). De son côté, Rio Tinto Fer et Titane exploite l'ilménite, un minerai composé de fer et de titane, à la mine du lac Tio sur la Côte-Nord également, au nord de Havre-Saint-Pierre.

## Cuivre

Le Québec a déjà compté plusieurs mines de cuivre, aujourd'hui épuisées. Ce métal est maintenant plutôt un sous-produit de mines d'or, de nickel et de zinc situées dans les régions de l'Abitibi-Témiscamingue et du Nord-du-Québec (MERN, 2016) :

- Mine Raglan - Glencore (nickel, cuivre, cobalt) ;
- LaRonde - Agnico Eagle (nickel, cuivre, zinc et or) ;
- Bracemac-McLeod - Glencore (zinc et cuivre) ;
- Langlois - Nyrstar (zinc et cuivre) ;
- Nunavik Nickel - Canadian Royalties (nickel et cuivre).

## Lithium

Le Québec possède des réserves de lithium sous forme de spodumène. Aujourd'hui, un projet de mise en service et trois autres projets de mise en valeur ont été recensés, principalement dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue et en Jamésie. Nemaska Lithium prévoit de faire l'extraction et la concentration du spodumène à la mine Whabouchi, située en Jamésie. Elle anticipe une production annuelle d'environ 213 000 tonnes de concentré qui seront transformées en 27 500 tonnes d'hydroxyde de lithium et 3 245 tonnes de carbonate de lithium, pour un usage dans les batteries (Nemaska Lithium, 2016). En 2017, l'ancienne mine Québec Lithium (Énergie RB) a redémarré ses opérations sous le nom de Lithium Amérique du Nord (Normand, 2017). La mine, située à La Corne en Abitibi-Témiscamingue, devrait permettre la production de carbonate de lithium de qualité batterie. Non loin de là, au site Authier, Sayona Mining Limited envisage la production d'un concentré de spodumène (Sayona Mining Limited, 2017). Enfin, Critical Elements Corporation compte extraire du spodumène dans son gisement Rose Tantale-Lithium en Jamésie, afin de le transformer en carbonate de lithium et en un concentré de tantale (Critical Elements Corporation, 2017).

## 2.3 Que fait-on des métaux extraits ?

Une fois extraits de la croûte terrestre, les trois métaux étudiés prennent des chemins différents de transformation et parviennent aux utilisateurs sous de multiples formes avant d'être recyclés ou enfouis en fin de vie. Le métal enfoui ne peut être recirculé dans l'économie que très difficilement. Il est donc considéré comme perdu. Des pertes de métal ont lieu tout au long du cycle de vie, non seulement par enfouissement, mais également par d'autres types d'élimination comme l'entreposage de résidus miniers, ou encore par dispersion dans l'environnement, notamment par usage dissipatif<sup>2</sup>. Une compréhension fine de ces chemins respectifs, fournie par une « analyse de flux de matières », est une première étape essentielle pour identifier le potentiel de circularité et les stratégies les plus pertinentes pour chaque métal, car elle permet de bien comprendre :

- Quelles sont les quantités de métal échangées entre les différentes activités impliquées dans les chaînes de valeur de ces métaux ?
- Est-ce qu'il y a des pertes importantes à certaines étapes du cycle de vie de ces métaux ?
- Quelles sont les stratégies d'économie circulaire déjà en place au Québec (ex. recyclage) ?
- Quels sont les stocks de métaux actuellement en utilisation au Québec ? Considérant la durée de vie des produits dans lesquels ils sont intégrés (ex. bâtiment versus téléphone portable), quelle quantité de métaux pourrait être disponible au cours des prochaines années si ces « mines urbaines » étaient exploitables ?
- À quel point le cycle de vie de ces métaux est-il imbriqué dans une chaîne mondialisée de production-consommation ? Quelles étapes de la chaîne de valeur sont réalisées au Québec et pourraient potentiellement être mises à contribution pour favoriser des initiatives d'économie circulaire sur le territoire ?

Les sections suivantes dressent donc un portrait des stocks et des flux de chacun des trois métaux, tout au long de leur cycle de vie au Québec, tout en identifiant également les échanges avec l'extérieur de la province.

### Le fer

#### Extraction, traitement, métallurgie et transformation

En 2014, 28 millions de tonnes (Mt) de fer ont été extraites des mines québécoises, dont 90 %, ont été exportées sous forme de concentré ou de boulettes.

Le minerai d'une teneur d'environ 30 % de fer est extrait des gisements de la Côte-Nord puis concentré à une teneur de 65 %. Une partie du concentré obtenu est acheminée par voie ferroviaire à Port-Cartier à

<sup>2</sup> Un usage dissipatif est une utilisation en quantité négligeable comme par exemple l'ajout de faibles quantités de métaux à un produit pour lui conférer des propriétés précises, comme dans le cas des médicaments et des lubrifiants. Ces métaux ne sont plus récupérables après l'usage des produits les contenant.

une usine de bouletage produisant annuellement près de 10 millions de tonnes de boulettes d'oxyde de fer (ArcelorMittal, 2016). Le fer non exporté est généralement envoyé par bateau à Contrecœur pour être transformé en acier dans les fours à arc électrique d'ArcelorMittal. Les aciéries québécoises consomment principalement du fer extrait en sol québécois. De l'acier est aussi produit par Rio Tinto Fer et Titane dans leur usine de Sorel-Tracy, comme coproduit du traitement de l'ilménite (en plus de produits titanifères). Le Québec importe du fer sous forme très transformée au rythme de 7,9 Mt par an, principalement des produits semi-finis utilisés pour la fabrication ou l'assemblage d'autres produits. **Moins de 2% du fer extrait reste au Québec** pour la fabrication et l'assemblage de produits.

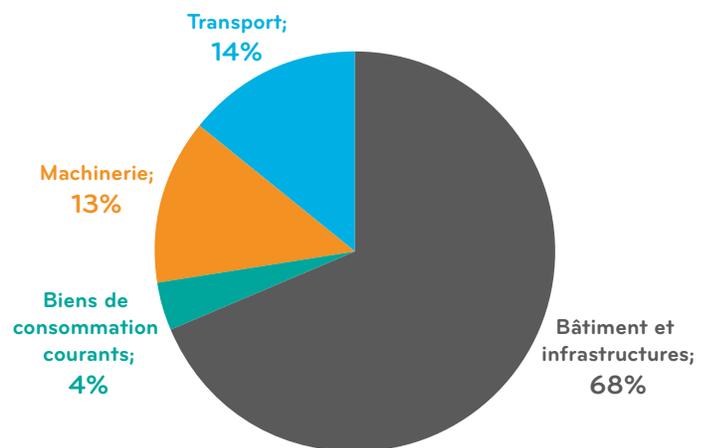
Les pertes par élimination lors de l'extraction, c'est-à-dire le fer contenu dans les résidus miniers, sont très faibles par rapport à l'immense quantité extraite. Cependant, les pertes (émissions à l'environnement ou dans des rejets allant à l'enfouissement) lors de la métallurgie et la transformation, ainsi que lors de la fabrication et l'assemblage de produits faits de fer et d'acier, sont loin d'être négligeables. Elles s'élèvent à 0,4 Mt par an à chacune de ces étapes, représentant respectivement 14 % du fer sortant de l'étape de métallurgie/transformation et 6 % du fer sortant de l'étape de fabrication/assemblage. À cette quantité s'ajoute le fer enfoui en fin de vie (0,2 Mt/an), qui compte pour 8 % du fer atteignant l'étape de fin de vie en 2014. Des stratégies d'économie circulaire ciblant ces étapes sont donc à privilégier.

### Utilisation

**Une très large part du fer mis en marché au Québec provient d'ailleurs.** De plus, le stock de fer en utilisation, c'est-à-dire la quantité contenue dans les produits qui n'ont pas encore atteint leur fin de vie, a été estimé à plus de 101 Mt en 2014. La majeure partie du fer se retrouve dans le secteur du bâtiment et autres infrastructures.

L'analyse a également fait ressortir que **le Québec se construit progressivement un stock de métal** qui pourrait être exploité au cours des prochaines décennies :

- Chaque année, l'augmentation du stock de fer qui demeure en phase d'utilisation (3,4 Mt/an) est plus importante que la quantité contenue dans les produits arrivés en fin de vie (2,6 Mt/an).
- Le stock total de fer en utilisation a augmenté d'environ 3 % en 2014, soit deux fois plus rapidement que le produit intérieur brut (PIB) du Québec (Institut de la statistique du Québec, 2015).



**Figure 2-2 : Répartition du stock de fer par secteur dans l'étape d'utilisation au Québec en 2014, au total 101 Mt. Calculé à partir de Pauliuk et coll. (2013) et Müller et coll. (2011).**

Pour anticiper la disponibilité de nouveaux gisements urbains, il est important de tenir compte de la durée de vie des produits. Dans le cas du fer, cette durée varie grandement selon les catégories de produits, en moyenne (Pauliuk et coll., 2013) :

- 15 ans pour les biens de consommation courante;
- 20 ans pour le transport;
- 30 ans pour la machinerie;
- 50 ans pour la construction.

### Fin de vie

Chaque année, au Québec, des produits et des infrastructures contenant un total d'environ 2,6 Mt de fer atteignent leur fin de vie. La répartition du fer par secteur en fin de vie est présentée à la figure 2-3. Elle a été calculée en considérant le total de fer entrant dans l'étape de fin de vie et la durée de vie moyenne des différents secteurs.

Lorsque ces produits et infrastructures ont atteint leur fin de vie, le fer qu'ils contiennent peut suivre trois voies :

- 38 % sont recyclés dans les fours à arc électrique présents sur le territoire ;
- 54 % sont envoyés à l'étranger ;
- 8 % sont enfouis.

Les stratégies visant le recyclage des produits en fin de vie ont donc un potentiel relativement limité étant donné le pourcentage faible de fer destiné à l'enfouissement chaque année, mais les quantités à l'étude demeurent importantes (jusqu'à 0,2 Mt/an).

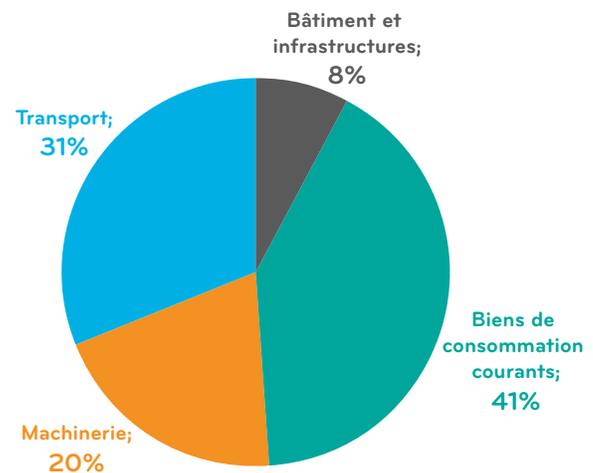


Figure 2-3 : Répartition du flux annuel de fer géré en fin de vie (2,6 Mt/an) par secteur au Québec en 2014

La figure 2-4 synthétise le cycle de vie actuel du fer au Québec :

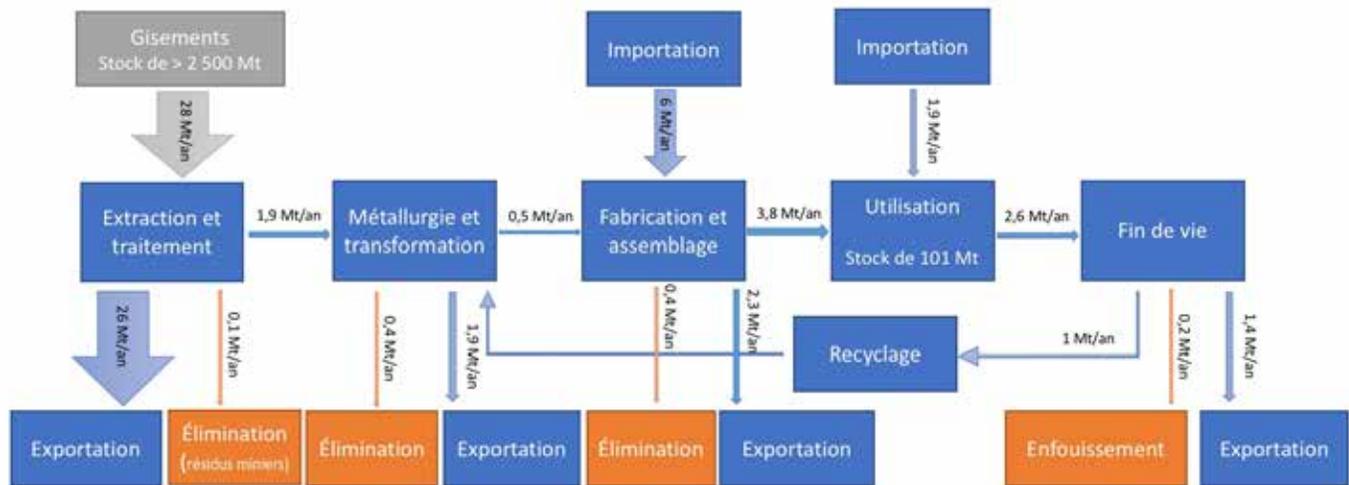


Figure 2-4 : Principaux stocks, flux et échanges avec l'extérieur du fer au Québec en 2014 en millions de tonnes (Mt ou Mt/an). Les valeurs de moins de 0,1 Mt/an ne sont pas présentées.<sup>3</sup>

## Le cuivre

### Extraction, traitement, métallurgie et transformation

Malgré les faibles réserves, une importante filière de transformation du cuivre existe au Québec. La Fonderie Horne, située à Rouyn-Noranda, produit des anodes de cuivre à partir de concentré provenant du Québec, du reste du Canada et de l'étranger. Ces anodes sont expédiées à l'Affinerie CCR à Montréal-Est qui produit, à son tour, des cathodes de cuivre pur à 99,99 % par procédé électrométallurgique. D'autres entreprises procèdent ensuite à la transformation métallique. La plus importante, Nexans Canada à Montréal, fabrique des fils et des câbles de transmission électrique principalement exportés. 95 % du cuivre issu de la métallurgie et de la transformation est exporté.

L'analyse de flux de matières fait ressortir que :

- Les réserves de cuivre prouvées et probables au Québec sont estimées à 189 kt et assurent un horizon d'extraction de 5 ans (43 kt/an en 2014).
- Les plus grandes pertes de cuivre se situent à l'étape de concentration du minerai, et représentent 10 % du cuivre extrait.
- Moins de 5 % de la demande de cuivre pour la métallurgie primaire (production des anodes et des cathodes) est comblée par l'extraction minière au Québec.
- Seulement 4,8 % des 438 kt de cuivre transformé au Québec (21 kt/an) restent dans la province pour des activités de fabrication et d'assemblage. **Le Québec constitue donc un maillon de la chaîne de valeur internationale.**

<sup>3</sup> La somme des quantités entrant dans une étape peut ne pas être égale à la somme des quantités sortant en raison de variations de stocks.

### Utilisation

Au Québec, en 2014, le stock de cuivre en utilisation s'élevait à plus de 2 200 kt avec une augmentation annuelle de 1,6 %, comparable à celle du PIB. La répartition de ce stock est donnée à la figure 2-5.

La durée de vie moyenne du cuivre est estimée à :

- Quelques années pour les appareils électroniques (Bihoux & de Guillebon, 2010) ;
- De 10 à 30 ans pour le transport (UNEP, 2010) ;
- Entre 25 et 40 ans pour le secteur du bâtiment ;
- 50 ans pour les infrastructures.

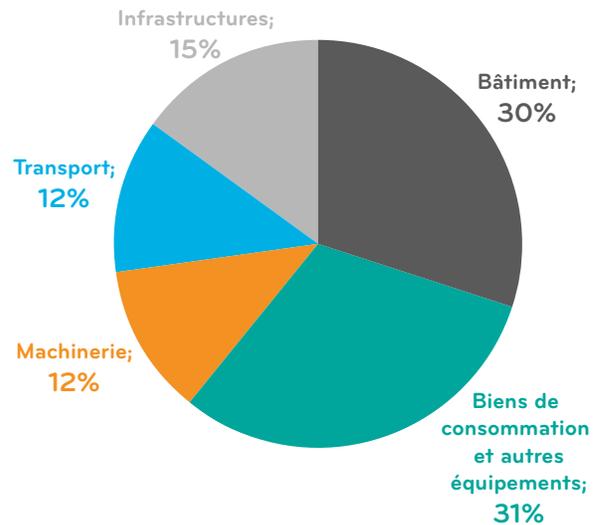


Figure 2-5 : Répartition du stock de cuivre par secteur dans l'étape d'utilisation au Québec en 2014 (adapté de ICSG, 2015).

### Fin de vie

La figure 2-6 présente les secteurs d'où provient le cuivre des produits consommés au Québec arrivés en fin de vie en 2014.

Du cuivre contenu dans les produits arrivant en fin de vie chaque année :

- Environ 50 % sont recyclés dans la province ;
- Les 50 % restants sont exportés pour être recyclés ailleurs ;
- Seule une petite quantité, soit 0,5 %, est acheminée dans les sites d'enfouissement.

Nous pouvons donc en déduire que le cycle de vie du cuivre au Québec est déjà très circulaire, si les exportations ne sont pas considérées. Son prix fait en sorte qu'il est presque entièrement récupéré en fin de vie.

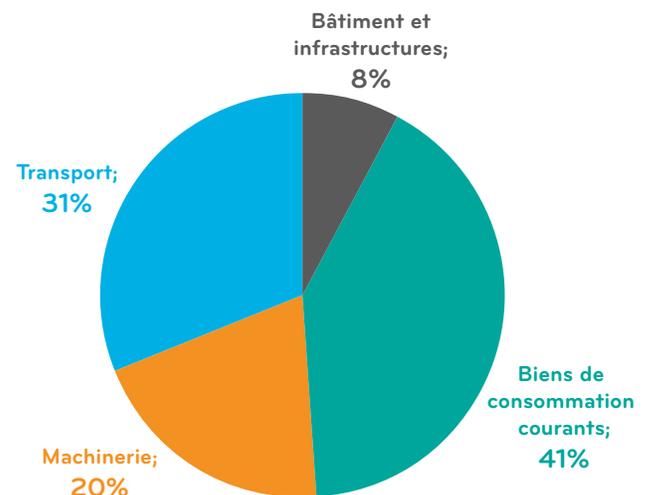
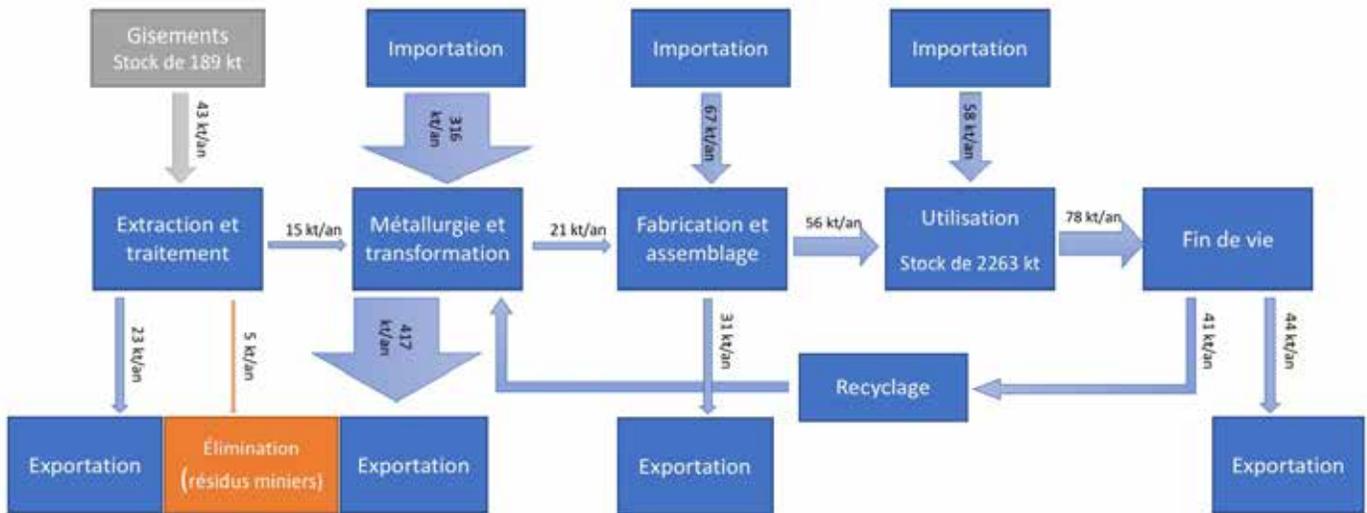


Figure 2-6 : Répartition du flux annuel de cuivre géré en fin de vie (78 kt/an) par secteur au Québec en 2014 (exportations exclues).

La figure 2-7 synthétise le cycle de vie actuel du cuivre au Québec :



**Figure 2-7 : Principaux stocks, flux et échanges avec l'extérieur du cuivre au Québec en 2014 en milliers de tonnes (kt ou kt/an). Les valeurs de moins de 1 kt/an ne sont pas présentées.<sup>4</sup>**

## Le lithium

### Extraction, traitement, métallurgie et transformation

En 2014, le Québec a extrait seulement 20 tonnes de lithium qui, après concentration, ont été exportées sans passer par d'autres étapes de transformation. L'activité extractive fut ensuite interrompue quelque temps pour reprendre en 2017. L'extraction du lithium sous forme de spodumène est d'abord réalisée dans les mines à ciel ouvert, pour des raisons économiques, mais peut également être poursuivie dans des mines souterraines. Après la concentration, un concentré de spodumène est obtenu, pouvant servir à la production de carbonate de lithium ou d'hydroxyde de lithium, pour un usage dans les batteries notamment.

Deux entreprises sont actives au Québec dans le secteur de la fabrication des batteries. Il s'agit de Johnson Matthey Matériaux pour Batteries, située à Candiac, qui fabrique du phosphate de fer lithié, un matériau de cathode de batterie lithium-ion. La compagnie Solutions Bleues Canada, située à Boucherville et appartenant à la société française Groupe Bolloré, fabrique pour sa part depuis 2001 une batterie Lithium-Métal-Polymère.

**Le Québec était un importateur net de lithium en 2014**, tant sous formes peu transformées en produits semi-finis (187 t/an), comme du carbonate de lithium, que sous des formes plus transformées dans des produits finis (136 t/an), comme les batteries.

<sup>4</sup> La somme des quantités entrant dans une étape peut ne pas être égale à la somme des quantités y sortant en raison de variations de stocks.

La majorité du lithium issue de la fabrication et de l'assemblage (environ 83 % des 187 t/an) est exportée dans des produits finis, tandis qu'environ seulement 9 % (16 t/an) se retrouvent dans des produits vendus au Québec. Une quantité relativement importante de lithium (14 t/an) est éliminée lors de la même étape du cycle de vie.

### Utilisation

Les batteries au lithium représentent l'usage le plus important de ce métal, suivi de près par l'utilisation, à faible concentration, de lithium dans les verres et les céramiques pour en abaisser le point de fusion, améliorer la qualité et la résistance aux chocs thermiques. La fibre de verre contient environ 0,5 % de lithium et le verre d'emballage environ 0,15 % (Labbé & Daw, 2012).

En 2014, le **stock de lithium en utilisation atteignait** plus de 400 tonnes et présentait **une croissance rapide**, soit plus de 29 % par rapport à 2013 (selon les valeurs de la figure 2-8).

La **demande actuelle** pour le lithium est **en constante augmentation** du fait du développement des batteries lithium-ion, particulièrement pour les véhicules électriques ou hybrides, mais aussi pour le stockage d'énergie, les téléphones cellulaires et les ordinateurs portables (Goffé et coll., 2012).

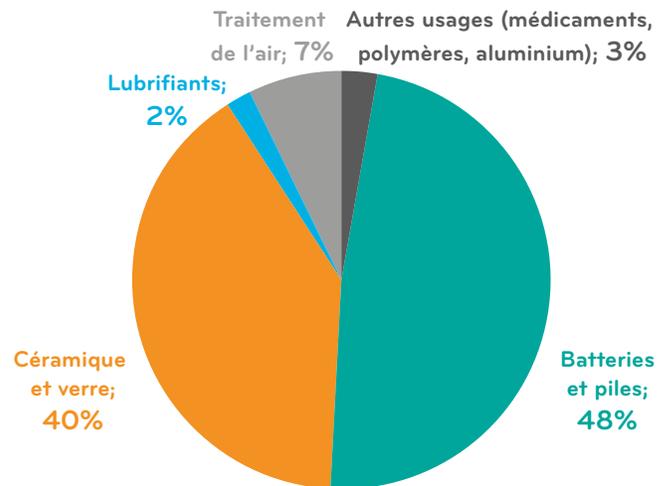


Figure 2-8 : Répartition du stock de lithium par secteur au Québec en 2014 (au total 400 tonnes, calculées à partir de USGS, 2016b).

À l'étape d'utilisation, 14 t par an sont perdues par des usages dissipatifs (par ex. médicaments, lubrifiants, verre, etc.), soit environ 9 % du lithium utilisé annuellement au Québec.

### Fin de vie

Le lithium qui arrive en fin de vie (35 t/an) provient principalement de batteries. À ce jour, la moitié du lithium, sous forme de batteries, est exportée pour être recyclée ailleurs et l'autre moitié est envoyée à l'enfouissement. Le lithium est donc très différent des deux métaux précédents, car seulement la moitié environ de ce qui est géré en fin de vie est recyclée. Le restant (17 kt/an) est enfoui.

La gestion du lithium en fin de vie représente un défi, car les concentrations de lithium contenues dans les verres et céramiques sont si faibles que leur récupération et leur recyclage sont difficiles. De plus, les usages dissipatifs, comme les médicaments et les lubrifiants, le rendent difficilement récupérable. Ils occasionnent des pertes s'élevant à 14 t/an, soit 28 % du total sortant de l'étape d'utilisation. Pour l'instant, seul le lithium dans les batteries est recyclé. Ce lithium se trouve combiné à d'autres éléments chimiques formant le matériau de cathode ce qui rend sa récupération difficile et coûteuse.

La figure 2-9 synthétise le cycle de vie actuel du lithium au Québec :

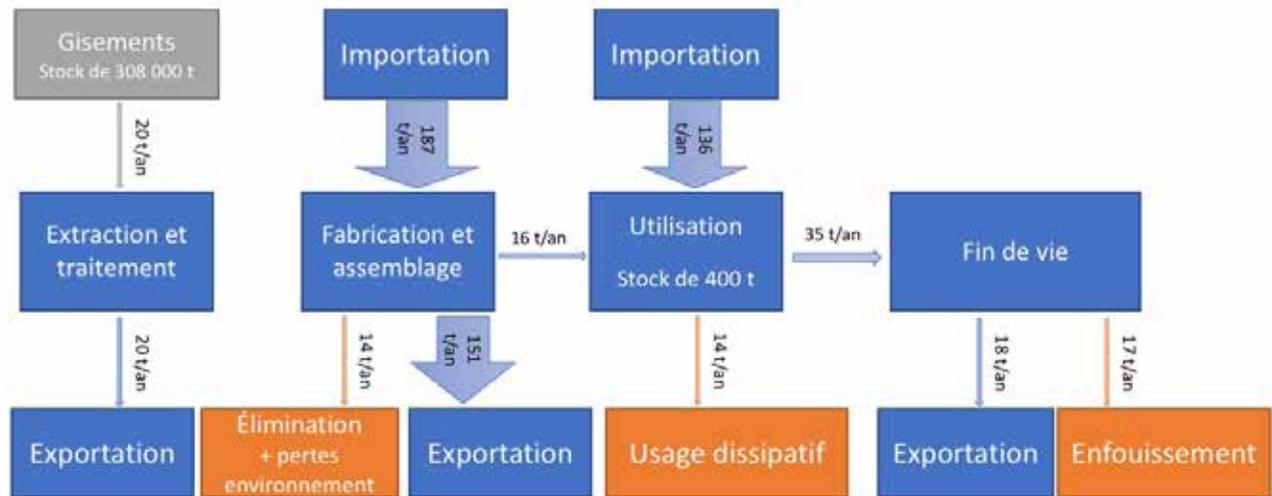


Figure 2-9 : Principaux stocks, flux et échanges avec l'extérieur du lithium au Québec en 2014 en tonnes (t ou t/an). Les valeurs de moins de 1 t/an ne sont pas présentées.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> La somme des quantités entrant dans une étape peut ne pas être égale à la somme des quantités y sortant en raison de variations de stocks.

## 2.4 Quelles conclusions tirer de cette analyse ?

Ce chapitre a permis de dresser un portrait québécois des métaux à l'étude, incluant une description de leur cycle de vie et des différents chemins qu'ils empruntent dans l'économie du Québec. Il montre l'importance de l'analyse de flux de matières pour bien comprendre le potentiel de circularité de chaque métal et sélectionner les stratégies de circularité les plus pertinentes. Pour les trois métaux à l'étude, l'analyse fait notamment ressortir les constats suivants :

- Les quantités de métaux en jeu ne sont pas les mêmes pour les trois métaux. Chaque année, elles sont de l'ordre de millions de tonnes pour le fer, de milliers de tonnes pour le cuivre et de dizaines de tonnes pour le lithium.
- Parmi les trois métaux à l'étude, le lithium est le métal le moins efficient, c'est-à-dire pour lequel il y a le plus de pertes relativement à la quantité totale importée/extraite au Québec. Son usage dissipatif et sa faible concentration dans certains produits réduisent son potentiel de circularité.
- Le cycle de vie du cuivre est déjà bien circulaire, et le fer contenu dans les produits en fin de vie est en bonne partie recyclé, mais il y a encore matière à améliorer le recyclage des trois métaux. Cependant, les boucles de recyclage ne sont pas nécessairement les stratégies de circularité les plus optimales, en particulier pour les produits à faible durée de vie. La mise en place de boucles en amont de l'étape de fin de vie, comme par exemple l'économie de partage ou le reconditionnement, est plutôt à encourager.
- Les étapes qui génèrent le plus de pertes diffèrent d'un métal à l'autre : pour le fer, ce sont la métallurgie et la transformation, la fabrication et l'assemblage, ainsi que la fin de vie; pour le cuivre c'est la concentration du minerai; et pour le lithium, ce sont la fabrication et l'assemblage, l'utilisation et la fin de vie.
- Des mines urbaines composées de fer, de cuivre et de lithium sont en train de croître sur le territoire et pourraient représenter un nouveau gisement de métaux à exploiter au Québec dans le futur. Toutefois, ces stocks ne sont disponibles que sur des horizons de temps très variables en fonction de la durée de vie des différents biens les contenant. Une étude ultérieure pourrait être menée pour mieux comprendre à quel moment ces stocks seront disponibles, en quelles quantités et qualités, et à quels prix. Cette « analyse des flux de matières dynamique » permettrait une meilleure planification des stratégies de circularité à long terme.
- Il est important de tenir compte du fait que les chaînes de valeur sont très mondialisées dans le cas du fer, du cuivre et du lithium, le Québec représentant un maillon de ces chaînes avec une exportation nette de produits peu transformés ou semi-finis de plus de 90 % de ce qui est importé ou extrait.
- Les métaux en phase d'utilisation au Québec sont majoritairement issus de l'importation.

### 3 COMMENT AUGMENTER LA CIRCULARITÉ DES MÉTAUX ÉTUDIÉS ?

Le chapitre précédent a présenté un portrait des métaux à l'étude, ciblant les principales pertes dans le système et donnant un aperçu de la circularité de la chaîne de valeur du fer, du cuivre et du lithium au Québec. Dans ce chapitre, les stratégies retenues afin d'augmenter la circularité de ces métaux au Québec sont présentées.<sup>6</sup>

Dans un premier temps, une revue de littérature a été effectuée sur des stratégies de circularité applicables aux métaux dans le monde. En tout, **41 stratégies** ont été **répertoriées** et sont présentées à l'Annexe A. De concert avec un comité interministériel, un nombre limité d'entre elles a été retenu pour une étude approfondie, sur la base d'une première estimation de la faisabilité, de la pertinence, de la portée, des retombées environnementales, économiques et sociales potentielles, ainsi que du potentiel de mise en œuvre et de préservation de la valeur de la ressource. **Les 13 stratégies retenues** sont **très diverses** et portent non seulement sur le recyclage en fin de vie, mais également sur les étapes d'extraction, de fabrication et d'utilisation. Ces stratégies ont fait l'objet d'une **analyse poussée de leurs acteurs, leurs freins et leviers d'implantation**.<sup>7</sup> Seuls les éléments principaux de cette étude sont présentés ici.

#### 3.1 Quelles sont les stratégies de circularité du fer, du cuivre et du lithium sélectionnées ?

Les 13 stratégies sélectionnées ont été réorganisées en 16 items distincts, certaines étant composées de plusieurs sous-items suffisamment différents pour constituer des stratégies en soi, puis ont été regroupées en trois catégories :

1. Utiliser efficacement les ressources
2. Intensifier l'utilisation des produits et prolonger leur durée de vie
3. Donner une nouvelle vie aux ressources

Elles sont décrites dans les paragraphes suivants. Le numéro attribué à la stratégie dans les rapports d'analyse détaillés est indiqué entre parenthèses à la fin des titres de sous-section.

Les stratégies sélectionnées peuvent s'appliquer à un seul ou à plusieurs des métaux à l'étude. Lorsque le titre de la stratégie n'incluait pas explicitement le ou les métaux concerné(s), l'indication a été ajoutée entre parenthèses.

<sup>6</sup> Voir le rapport de l'étape 2 « Synthèse des stratégies de circularité pour le cuivre, le fer et le lithium » qui traite de l'ensemble des stratégies de circularité considérées pour cette étude.

<sup>7</sup> Ibid.

## Utiliser efficacement les ressources

### Développement technologique pour une extraction plus efficace (fer, cuivre, lithium) (1)

La rentabilité d'une mine est influencée par l'énergie nécessaire à l'extraction du minerai. Plus l'élément qui le compose est diffus, plus il faut d'énergie pour aller le récupérer, augmentant ainsi le coût d'extraction. L'adoption de technologies de pointe permet de réduire ces coûts et d'augmenter la quantité de métal extrait, prolongeant par exemple la vie de mines existantes. Cette stratégie ne vise pas directement la circularité des métaux. Cependant, elle contribue à les préserver par l'optimisation de l'extraction et permet de réduire certains impacts sur l'environnement. Au cours des dernières années, de nombreuses technologies sont apparues sur le marché, dont :

- **Foreuses intelligentes** : Foreuses dotées d'un système permettant l'analyse de la composition du minerai en temps réel dans les mines à ciel ouvert, et ainsi de catégoriser le minerai immédiatement pour concassage ou entreposage.
- **Capteurs** : Capteurs installés sur les équipements pour détecter les bris, la température, le niveau d'huile ou les signaux électriques, facilitant la maintenance préventive et entraînant ainsi des gains de productivité et une réduction de la consommation d'énergie.
- **Systèmes de ventilations** : Systèmes de ventilations instrumentés et connectés par le biais d'un réseau de traitement de données pour adapter la ventilation en fonction des activités souterraines, sur demande, générant ainsi des économies d'énergie (diesel).
- **Camions automatisés** : Camions sans conducteur contrôlés à distance par un employé devant un écran et dotés de capteurs permettant de déterminer les besoins de maintenance préventive. Cette technologie permet principalement de diminuer les coûts d'opération.



### Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure (fer, cuivre, lithium) (2)

Lors de l'extraction et de la concentration du minerai, de grandes quantités de résidus sont générées. Les résidus miniers peuvent contenir des métaux pour lesquels l'extraction pourrait s'avérer viable dans le futur, selon le développement technologique et la valeur du minerai. Dans les bonnes conditions, le coût d'extraction de métaux à partir de résidus miniers peut s'avérer moindre que celui lié à l'extraction de minerais sous terre parce que les résidus ont déjà été extraits du sol et broyés (Lèbre & Corder, 2015). Une vision à long terme de l'activité minière requiert donc d'assurer un entreposage adapté des résidus miniers. Un entreposage favorisant la récupération des métaux permettrait d'allonger la productivité d'un gisement, en fonction de l'évolution des marchés, diminuant d'autant l'impact environnemental et, ultimement, de réduire l'exploitation de nouvelles mines.

Parmi les technologies d'extraction des métaux contenus en faible concentration dans les résidus entreposés de façon adéquate, mentionnons les méthodes de lixiviation avancées telle la biolixiviation du cuivre des résidus d'une mine de fer. Cette approche consiste à extraire des métaux à l'aide d'un réactif liquide qui favorise la décomposition des minéraux et la capture du métal désiré.

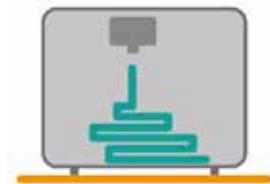
### Mines urbaines (fer, cuivre, lithium) (3)

Tel que révélé par l'analyse de flux de matières du chapitre précédent, une large part de métaux extraits est en cours d'utilisation dans des produits ou des infrastructures. Cependant, une fraction des métaux extraits n'est plus en usage, mais demeure dans le paysage urbain (ex. bâtiments désaffectés, voies ferrées abandonnées), représentant des sources potentielles de métaux à recycler. Les mines urbaines pourraient constituer une solution de remplacement à l'extraction conventionnelle des minerais sous terre.



### Fabrication additive (fer, cuivre) (5)

La fabrication additive est une technologie récente qui devrait révolutionner les façons de concevoir et de manufacturer de nombreux produits ou composants. Des économies considérables de matériaux sont envisagées grâce à elle, car elle permet de fabriquer des pièces complexes, impossibles ou difficiles à réaliser par des techniques conventionnelles. Plutôt que de partir d'un bloc de matière et d'en enlever des parties, cette technologie consiste à former des couches successives de polymère ou de métal. Pour les métaux, les technologies disponibles aujourd'hui incluent la fusion sur lit de poudre, le dépôt de matériaux et fusion par énergie directe et la stratification (Réseau Québec-3D, 2015). La fabrication additive est appropriée pour les produits de faibles volumes, et en particulier ceux à géométrie complexe.



Ces méthodes permettent de réduire la quantité de matière nécessaire par rapport aux approches conventionnelles. Les techniques de fabrication additive en métallurgie permettent d'améliorer les rendements matière jusqu'à 70 %, là où les procédés traditionnels d'usinage sont limités à environ 40 % (Institut Montaigne, 2016). L'implantation de ce qui est aussi appelé l'impression 3D offre donc la possibilité de consommer moins de métal par pièce produite. De plus, dans certains secteurs comme le transport aérien, la réduction de la masse des pièces, conçues différemment, pourrait mener à des économies de carburant importantes, contribuant aux bénéfices que procure cette technologie.

La fabrication additive pourrait également jouer un rôle important dans la réparation de produits. Dans un futur où les imprimantes 3D sont répandues et accessibles, elles faciliteraient la production de pièces de rechange et prolongeraient ainsi la vie des produits.

## Intensifier l'utilisation des produits et prolonger leur durée de vie

### Modularité des équipements mécaniques et industriels (fer, cuivre) (9)

Les équipements mécaniques et industriels, contenant pour la plupart du fer et du cuivre, comprennent notamment les machines et appareils pour la production du froid, l'emballage, le levage, le chargement/déchargement et la manutention. Les machines et appareils modulaires optimisent l'utilisation des métaux qu'ils contiennent en permettant de les utiliser pour plusieurs fonctions ou d'allonger leur durée de vie. Un module est un composant ou un groupe de composants pouvant être retirés du produit sans détruire ni le composant ni le produit. Il peut être facilement réutilisé ou de nouveau fabriqué.

### Écoconception des poutres en acier (10)



Au Canada, 45 % du fer sous forme d'acier est utilisé dans la construction des bâtiments et des infrastructures (Müller et coll., 2011). Une écoconception des poutres en acier pourrait en faciliter le réemploi, particulièrement dans le cas de bâtiments dont l'espérance de vie est relativement courte (20 à 30 ans, par exemple). Cela pourrait impliquer l'utilisation de raccords vissés plutôt que soudés pour permettre le démontage, l'utilisation de connexions standards, l'absence de revêtements et l'utilisation de poutres de longue portée pour permettre la coupe ultérieure.

### Déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures (fer, cuivre, lithium) (11)

La déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures 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. Cette méthode permet principalement d'augmenter le réemploi de pièces de fer. Quant au cuivre, il est plutôt recyclé étant donné son prix élevé, que le bâtiment soit déconstruit ou démoli.

### Autopartage (fer, cuivre, lithium) (12a)

Issu du concept d'économie de partage, le service d'autopartage de véhicules consiste à instaurer au sein d'un territoire une flotte de véhicules qu'il est possible d'emprunter pour de courtes périodes. Ce service est particulièrement écologique, car il donne la possibilité aux membres d'utiliser une voiture ponctuellement, sans en posséder une. Cela permet ainsi de réduire le nombre de véhicules produits et achetés et donc la quantité de métal en stock en phase d'utilisation. Par conséquent, des économies de fer, de cuivre et de lithium sont possibles grâce à cette stratégie.



### Écoconception des véhicules — Matériaux plus légers (fer) (12b)

Les véhicules routiers, ainsi que les trains et les bateaux contiennent pour la plupart du fer. L'utilisation d'autres matériaux plus légers, tel l'aluminium, permet l'utilisation d'une masse moins grande de matériaux, dont le fer, pour la même fonction remplie. Leurs coûts peuvent néanmoins être plus élevés. De plus, les véhicules plus légers consomment moins de carburant, offrant ainsi un avantage environnemental lors de leur phase d'utilisation.

À noter que la stratégie d'écoconception des véhicules peut inclure des actions plus larges que simplement utiliser des matériaux plus légers, telles que la modularité, la facilitation de la réparabilité, l'augmentation de la résistance, etc. Ces aspects n'ont pas cependant été retenus pour l'analyse de la stratégie considérée ici.

### Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées (13)

Quand les batteries de véhicules hybrides et électriques parviendront à la fin de leur vie, il est envisageable de leur donner une seconde vie en les utilisant pour une application stationnaire, soit le stockage d'énergie. Il 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 ou de faible production, notamment dans le contexte d'énergies solaire et éolienne.

## Donner une nouvelle vie aux ressources

### Récupération des métaux précieux des boues anodiques (cuivre) (4a)

Les raffineries de cuivre produisent des boues dites «anodiques» issues de la purification du cuivre et contiennent des métaux de valeur pouvant être récupérés. Par électrolyse, le cuivre non pur, sous forme de grandes plaques appelées anodes, est dissout dans un électrolyte liquide laissant derrière lui les impuretés. Celles-ci sont récupérées sous forme de boues. Elles contiennent des éléments précieux tels que l'or, l'argent, le platine et le palladium, ainsi que du tellure et du sélénium, des éléments qui peuvent être séparés, contribuant à la valorisation des boues.

### Récupération d'énergie thermique des laitiers (fer) (4b)



Les aciéries produisent des laitiers, aussi appelés des scories. Ils sont composés principalement de chaux, de silice et d'oxyde de fer. Il s'agit d'une couche poreuse flottant au-dessus de l'acier en fusion. La température des laitiers est donc très élevée : au-delà de 1500 °C. À leur sortie du procédé, ils peuvent fournir de la chaleur pour la production d'électricité. Cette chaleur est autrement perdue. Cette stratégie peut être jumelée à d'autres stratégies de valorisation des laitiers.

### Séquestration du CO<sub>2</sub> à partir de laitiers (fer) (4c)

Une fois refroidis, broyés et tamisés, les laitiers sous forme d'agrégats sont actuellement utilisés de plusieurs façons, notamment en construction comme remblais ou additifs, et en agriculture comme amendements agricoles. Leur teneur en calcium en fait de bons candidats pour la séquestration de CO<sub>2</sub>, issu de l'aciérie elle-même ou d'une autre industrie comme une cimenterie. Cette méthode consiste à faire réagir les laitiers avec le CO<sub>2</sub> pour former un carbonate solide. Le CO<sub>2</sub> y est ainsi emprisonné et n'est donc pas émis dans l'atmosphère. Le produit de la réaction peut être entreposé ou servir pour la fabrication de matériaux de construction. Un tel projet est à l'étude au Québec au Centre de transfert technologique en écologie industrielle (CTTÉI), situé à Sorel-Tracy.

### Recyclage du fer (6)

Le recyclage du fer en fin de vie est bien organisé au Québec. Dans les aciéries, le fer sous forme de véhicules routiers démantelés et de ferraille triée et conditionnée est fondu. Les voitures automobiles et camions sont pour la majorité recyclés. La ferraille provient des secteurs résidentiel (ex. collecte sélective), industriel, commercial, institutionnel et CRD (construction, rénovation et démolition).

Trois sources potentielles de fer actuellement non recyclé ont été identifiées :

- **Ferraille non collectée** : le gouvernement du Québec cherche à augmenter le taux de récupération de la ferraille, notamment dans le secteur résidentiel avec la collecte sélective.
- **Avions** : 6 500 avions devraient arriver en fin de vie en 2020 dans le monde (Marcaillou, 2005). Leur teneur en fer est estimée à 7 %.
- **Trains** : Le nombre de trains à démanteler au Québec n'est pas connu. Ce chiffre serait de 5 000 en Europe. Les trains ont une plus forte teneur en fer que les avions.

### Recyclage du cuivre (7)

Le cuivre est principalement présent dans l'équipement électrique et électronique. Il s'agit d'un métal relativement bien recyclé puisqu'il se retrouve la plupart du temps sous sa forme pure. Sa filière de recyclage est bien implantée au Québec. Il est reconnu pour avoir une bonne valeur et par conséquent, est convoité. En 2015, la Fonderie Horne aurait recyclé 26 500 tonnes de cuivre (Glencore - Fonderie Horne, 2016).

Les produits suivants sont peu récupérés et constituent des sources potentielles de cuivre en fin de vie :

- **Ordinateurs ;**
- **Téléphones mobiles ;**
- **Câbles et fils ;**
- **Circuits imprimés.**

### Recyclage du lithium (8)

Le lithium est principalement présent dans les batteries, ainsi que dans les verres et céramiques, tel que présenté au chapitre précédent. Deux stratégies de recyclage du lithium ont été étudiées :



- **Batterie lithium-ion :** Les batteries lithium-ion proviennent des véhicules électriques et hybrides, ainsi que des appareils électroniques et des réseaux électriques. D'autres métaux, comme le cobalt, sont présents dans ce genre de batteries et peuvent intéresser les recycleurs. Un procédé de broyage, de séparation par flottaison et de dissolution permet la séparation des différentes composantes (par ex. : aluminium, cuivre, polymère, lithium, cobalt, nickel). Dans le cas des véhicules hybrides et électriques, les batteries 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.
- **Verre :** Le lithium est utilisé dans le verre pour abaisser sa température de fusion lors de sa fabrication (Grahl, 2004). Bien que la quantité contenue dans les verres et céramiques représente une quantité presque aussi importante que celui contenu dans les batteries, il s'y trouve en faibles concentrations, 0,1 % dans le cas du verre. La stratégie de recyclage de ce lithium est donc basée sur le recyclage du verre.

Les stratégies de circularité retenues témoignent de la diversité de leur champ d'action, de la variété des technologies impliquées, et touchent à l'ensemble des étapes de la chaîne de valeur concernée. L'analyse de ces stratégies en matière de potentiel de circularité, de faisabilité à long terme ainsi que des risques de déplacements d'impacts sur l'environnement est présentée dans la prochaine section.

## 4 QUELLES STRATÉGIES SONT LES PLUS PROMETTEUSES ?

Parmi les stratégies de circularité étudiées en profondeur dans le cadre de ce projet, certaines permettent de faire avancer la circularité des métaux de façon plus importante que d'autres. Bien que plusieurs semblent prometteuses, des questions émergent quant à la quantité de métaux potentiellement non extraits, la faisabilité à long terme et les risques de déplacement d'impacts environnementaux découlant d'effets directs ou indirects des stratégies. Afin d'y répondre, deux outils ont été mobilisés : l'analyse technico-économique et l'analyse conséquentielle du cycle de vie (ACV conséquentielle).

Les sections suivantes abordent les résultats de ces analyses, à savoir le potentiel de circularité, la faisabilité et le risque de déplacement d'impacts des stratégies. Il est à noter que ces analyses sont basées sur des données et modèles imparfaits. Par conséquent, les résultats ont certaines limites. Ces dernières sont abordées au chapitre 6.

### 4.1 Quelles stratégies ont le plus grand potentiel de circularité ?

Le potentiel de circularité relatif à chacune des stratégies a été chiffré pour répondre aux questions suivantes :

- Quelle est la quantité de métaux réutilisée, recyclée ou remise en circulation grâce à cette stratégie ?
- Combien de minerai est-il possible de ne pas extraire avec la mise en œuvre de la stratégie ?
- Suivant les réponses à ces questions, un indice de potentiel (fort, moyen, faible) a été attribué à chacune des stratégies. Les stratégies présentant un potentiel de circularité fort sont présentées et commentées dans le Tableau 4-1 ci-dessous.

**Tableau 4-1 : Stratégies présentant un fort potentiel de circularité**

| Stratégie  | Quantité de métal récupéré  | Minerai non extrait  | Commentaire   |
|--|---|--|---|
| Écoconception des véhicules – Matériaux plus légers (fer)                        | Potentiel important, seulement en considérant le remplacement d'une portion d'acier par de l'aluminium.   | L'utilisation de matériaux plus légers permet d'éviter au total un maximum de 1327 t/an d'acier sans autopartage et 1507 t/an avec l'autopartage (ainsi que 8 t/an de cuivre et 0,5 t/an de lithium).<br><br>L'extraction évitée n'est pas nécessairement au Québec.                         | Impact sur la consommation de carburant et la réduction des GES.  |
| Mines urbaines (fer, cuivre, lithium)  | Potentiel important selon la littérature surtout pour le cuivre et encore plus à long terme.<br><br>Grande quantité de cuivre en circulation.<br><br>Difficile à quantifier pour le Québec.   | Le stock mondial de cuivre équivaldrait à 20-25 années de production minière.<br>En 2100, le stock mondial de cuivre en utilisation sera aussi grand que les ressources en cuivre actuellement connues.  | Concept récent et nécessité de quantifier les gisements urbains (stock) de métaux.<br><br>Stratégie analysée conjointement avec celles portant sur le recyclage du fer, cuivre et lithium.  |
| Fabrication additive (fer, cuivre)   | Potentiel très important mais difficile de quantifier les impacts globaux au Québec étant donné la grande variété de secteurs, de pièces et de compositions qu'il est possible de considérer.<br><br>Potentiel d'autant plus élevé que le taux d'utilisation est encore faible. | Pour un seul exemple (avions plus légers): économies annuelles totales de 238 à 435 t/an d'aluminium, de 157 à 188 t/an de titane, de 133 à 168 t/an de nickel et de 19 à 25 t/an d'acier pendant 20 ans (période 2030-2050).<br><br>L'extraction évitée n'est pas nécessairement au Québec. | Avancées technologiques qui devraient révolutionner le domaine de la fabrication et les modèles d'affaires.<br><br>Croissance exponentielle du marché mondial.<br><br>Permet de générer des économies d'énergies importantes et contribue à la diminution des émissions de GES.       |
| Déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures (fer, cuivre, lithium) | Potentiel significatif puisque la déconstruction sélective permet d'augmenter le rapport entre réemploi et recyclage comparativement à la démolition.<br><br>Plusieurs exemples démontrent cette affirmation.   | Impact incertain sur les activités d'extraction.   | Bien que cette stratégie ne contribue pas à changer la quantité de métaux récupérés ultimement (les métaux de construction sont souvent bien recyclés), elle est pertinente d'un point de vue économie circulaire, car elle permet de passer à une boucle de circularité plus courte. |

| Stratégie   | Quantité de métal récupéré  | Minerai non extrait  | Commentaire  |
|---|---|--|--|
| Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées | <p>Potentiel significatif dans un contexte d'électrification des transports.</p> <p>Les besoins de stockage en milieu décentralisés sont limités ; il sera nécessaire de considérer les besoins à grande échelle pour les réseaux électriques.</p>  | <p>La quantité maximale d'électricité stockée dans les systèmes avec batteries usagées pendant l'année 2050 atteint 3326 GWh en hiver, ce qui correspond à 1102 t/an de lithium au total. Dans un scénario plus optimiste sur les coûts de la production d'électricité solaire, ces quantités atteignent 8408 GWh correspondant à 2803 t/an de lithium au total.</p> | <p>Puisque l'électrification des transports entraînera une augmentation des besoins d'extraction du lithium, cette stratégie est d'autant plus pertinente.</p> |
| Recyclage du fer (trains et ferraille)                    | <p><b>Pour les trains :</b><br/>Potentiel important : 17280 t/an.</p> <p>Autres métaux recyclés : 86 t/an de cuivre.</p> <p><b>Pour la ferraille :</b><br/>Potentiel important : 49416 t/an</p>   | <p>Les exemples étudiés permettent d'éviter au maximum l'extraction de 65 kt/an de minerais de fer (contenant 30 % de fer concentré) annuellement entre 2025 et 2050.</p>  | <p>Quantités recyclées qui demeurent cependant marginales par rapport à la demande totale d'acier.</p>   |
| Recyclage du lithium (batteries)                          | <p>Potentiel important : 360 t/an</p> <p>Quantités en croissance avec l'électrification des transports.</p> <p>Autres métaux recyclés :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2161 t/an de cuivre</li> <li>• 727 t/an de cobalt</li> <li>• 718 t/an de nickel</li> <li>• 1675 t/an d'aluminium.</li> </ul> | <p>Les exemples étudiés permettent d'éviter au maximum l'extraction de 16,3 kt/an de minerais (contenant environ 1,5 % de lithium) en 2050.</p>  | <p>Quantités recyclées significatives par rapport à la demande totale de lithium.</p>  |

À la lecture du Tableau 4-1, les stratégies dont le **potentiel de circularité** est le **plus important** sont **l'écoconception de véhicules, les mines urbaines, la fabrication additive, la déconstruction des bâtiments et infrastructures, le stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées et le recyclage en fin de vie du fer et du lithium**. Certaines nuances notables sont également à constater : le potentiel des mines urbaines est important sur papier, mais il n'a pas été possible de le quantifier. Celui de la fabrication additive a été quantifié pour une seule des milliers d'applications possibles, le résultat est donc très approximatif.

Pour ce qui est des stratégies non présentées au Tableau 4-1, leur potentiel de circularité est principalement identifié comme faible ou moyen pour les raisons suivantes :

- La stratégie ne vise pas directement la circularité du métal, mais favorise plutôt un meilleur rendement ou une exploitation des coproduits.
- Les quantités recirculées sont faibles par rapport au niveau actuel de production du métal.
- La stratégie pourrait conduire à une augmentation du minerai extrait.
- Le potentiel est incertain et difficile à quantifier.

Le **résumé de chaque stratégie (description, résultats d'analyse, etc.)** est présenté **sous forme de fiche à l'Annexe B**. Le lecteur peut donc s'y référer pour en savoir plus sur celles qui ne sont pas présentes au Tableau 4-1.

## 4.2 Sont-elles réalisables sur le plan technique et économique ?

La faisabilité technico-économique relative à chacune des stratégies de circularité est déterminée en se posant la question suivante : **est-ce que la stratégie est économiquement optimale pour la société ?** La discussion entourant la faisabilité technico-économique de circularité réfère donc ici à la rentabilité (pour une entreprise) ou à l'optimalité économique (pour la société) de mettre en place une stratégie en fonction des connaissances existantes au sujet des technologies ou des options disponibles. Suivant les réponses à cette question, un potentiel de faisabilité a été attribué à chacune des stratégies (fort, moyen, faible).

Lorsque les données nécessaires étaient disponibles, une évaluation de cette faisabilité a été effectuée à l'aide du modèle d'optimisation technico-économique nommé *North American TIMES Energy Model* (NATEM)<sup>8</sup>. Cette méthodologie reconnue est principalement utilisée pour analyser les enjeux énergétiques et les politiques climatiques. Elle a été adaptée ici pour inclure des commodités comme les matériaux et les métaux. Les stratégies modélisées ont chacune été comparées au même scénario de référence, soit un scénario de maintien du statu quo (*business as usual*), afin de bien discerner les impacts d'implanter telle ou telle stratégie sur la chaîne de valeur d'un métal et d'autres secteurs de l'économie.

Les stratégies présentant une faisabilité forte sur le plan technique et économique sont présentées dans le Tableau 4-2 ci-dessous.

<sup>8</sup> Voir rapport de l'étape 3.2 « Analyse technico-économique des stratégies de circularité » pour plus de détails sur le modèle.

**Tableau 4-2 : Stratégies présentant une forte faisabilité technico-économique**

| Stratégie  | Potentiel technico-économique de circularité   | Commentaire  |
|--|--|--|
| Écoconception des véhicules – Matériaux plus légers (fer)                            | Économiquement optimal.  | Rentabilité en lien avec les économies d'énergies.   |
| Développement technologique pour une extraction plus efficace (fer, cuivre, lithium) | <p>Objectif visant la réduction des coûts d'opération.</p> <p>Malgré des coûts d'investissement plus élevés, cette stratégie est optimale économiquement.</p> <p>Chaque mesure d'automatisation (ventilation, systèmes de géolocalisation) peut réduire les coûts d'opération d'en moyenne 15 % par année, par rapport à la référence sans automatisation, selon les technologies et les activités minières.</p> <p>Gain additionnel de 15 % par année avec une automatisation complète.</p> | L'investissement initial peut s'avérer dissuasif pour les plus petites entreprises qui démarrent ou pour celles dont les camions conventionnels sont encore bons.                            |
| Séquestration du CO <sub>2</sub> à partir de laitiers (fer)                          | <p>Potentiel économique intéressant.</p> <p>Avantage lié au fait que les laitiers sont disponibles à proximité de la source émettrice de CO<sub>2</sub>, ce qui minimise les coûts d'exploitation.</p> <p>Le Québec dispose de source d'électricité à faibles coûts et d'un prix sur le carbone.</p> <p>Études de cas documentées confirmant que certains projets sont rentables.</p>  | Potentiel d'autant plus intéressant dans un contexte avec cible ambitieuse sur les GES et contribuant à faire augmenter le prix de la tonne de GES.  |
| Récupération des métaux précieux des boues anodiques (cuivre)                        | <p>Reconnue comme ayant un potentiel économique intéressant et confirmé par l'analyse.</p> <p>Les prix de l'or et de l'argent font en sorte qu'un revenu important peut être obtenu avec la vente des quantités récupérées.</p>  | L'analyse ignore cependant les investissements initiaux qui ont été nécessaires pour mettre en place toute l'infrastructure de traitement des boues anodiques et de récupération des métaux. |

| Stratégie                          | Potentiel technico-économique de circularité   | Commentaire  |
|------------------------------------|--|--|
| Fabrication additive (fer, cuivre) | Optimale pour l'ensemble de la société.<br>Gains potentiels sur les coûts de production de 50 %-80 % dans certains cas ; les gains sont d'autant plus importants que la complexité de la pièce est grande.                             | Les coûts d'investissement importants sont dissuasifs pour les plus petites entreprises.<br>Technologie non adaptée à la production de masse.<br>Avec la diffusion des technologies sur le marché, les coûts sont amenés à diminuer.   |
| Recyclage du fer (voitures)        | Analyse insuffisante pour commenter.   | Activité déjà en place donc supposément rentable.  |
| Recyclage du fer (ferraille)       | Activité rentable et d'ailleurs déjà bien implantée au Québec.   |  |
| Recyclage du lithium (batteries)   | Intérêt de développer toute la chaîne au Québec, plutôt que d'envoyer les batteries en Colombie-Britannique.<br>Quantité de batteries en augmentation, améliorant les perspectives de rentabilité.<br>Coût d'investissement important. | Rentabilité incertaine dans un scénario de référence, avec évolution marginale du nombre de véhicules électriques et hybrides rechargeables au Québec.<br>À long terme, la distribution des différentes technologies de batteries aura évolué : il est possible que la valeur qui peut être tirée d'une tonne de batteries ne compense plus les coûts. |

Le Tableau 4-2 montre que **l'écoconception de véhicules, le développement technologique pour une extraction plus efficace, la séquestration du CO<sub>2</sub> à partir de laitiers, la récupération des métaux précieux des boues anodiques, la fabrication additive et le recyclage en fin de vie du fer et du lithium** sont les stratégies dont la **faisabilité technico-économique est la plus élevée**.

Les stratégies non présentées au Tableau 4-2 possèdent une faisabilité technico-économique faible ou moyenne en raison des enjeux suivants :

- Les activités ne sont pas rentables ou la pertinence économique n'est pas démontrable avec les données disponibles ;
- La généralisation est difficile, même si quelques données montrent que la stratégie pourrait être prometteuse ;
- La stratégie n'est pas pertinente dans les conditions actuelles, mais pourrait l'être si la situation technico-économique évolue (coûts des métaux, instauration de cibles GES plus restrictives, etc.).

Le résumé de chaque stratégie (description, résultats d'analyse, etc.) est présenté à l'Annexe B sous forme de fiche. Le lecteur peut donc s'y référer pour en savoir plus sur celles qui ne sont pas présentées au Tableau 4-2.

En combinant les résultats du Tableau 4-2 sur la faisabilité technico-économique avec ceux du Tableau 4-1 sur le potentiel de circularité, il est possible de faire ressortir les stratégies se démarquant sur les deux aspects :

- **Fabrication additive;**
- **Recyclage en fin de vie;**
  - **Recyclage de la ferraille;**
  - **Recyclage du lithium des batteries;**
- **Écoconception des véhicules – Matériaux plus légers.**

De plus, les stratégies se démarquant sur un des deux aspects, mais ayant un potentiel moyen ou une faisabilité moyenne sont :

- **Réemploi – Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées**
- **Valorisation des déchets industriels – Séquestration du CO<sub>2</sub> à partir de laitiers**
- **Extraction – Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure**
- **Recyclage du cuivre des câbles**

Cette première sélection des stratégies les plus prometteuses, parmi celles étudiées en détail, est un résultat important. Au-delà du potentiel de circularité et de la faisabilité, à la section suivante, il est évalué si certaines stratégies représentent un risque d'impacts négatifs sur l'environnement, amenant des nuances aux résultats des analyses technico-économiques.

Enfin, voici d'autres constats importants que les analyses précédentes ont permis :

- La pertinence de certaines stratégies est influencée par leurs contributions aux économies d'énergie et à la réduction des émissions de GES ;
- Pour certaines stratégies, le potentiel de circularité ne peut être appliqué au Québec directement, mais permet de réduire des quantités de métaux extraits ailleurs sur la planète ;
- Il est essentiel d'utiliser une approche intégrée, car certaines stratégies de circularité contribuant à améliorer la circularité d'un métal contribuent en retour à augmenter l'extraction d'autres métaux. Par exemple :
  - Toute mesure visant à favoriser l'électrification des transports augmente les besoins en lithium. Les stratégies de circularité du lithium doivent être envisagées parallèlement.
  - L'allègement de véhicules par le remplacement de l'acier amène une plus grande utilisation de l'aluminium.

#### 4.3 Y a-t-il un risque de déplacement d'impacts environnementaux ?

**Une stratégie** présentant **un potentiel de circularité et une faisabilité importants** peut néanmoins conduire à **des impacts environnementaux directs ou indirects** qui rendraient sa **mise en œuvre non souhaitable**.

Une analyse des conséquences environnementales occasionnées par l'implantation des stratégies de circularité sélectionnées a donc été effectuée, dans l'objectif de mettre en perspective le potentiel de circularité avec une évaluation du risque de déplacement d'impact. Des réponses ont été apportées à cette question en comparant, à l'aide de l'analyse du cycle de vie, le profil environnemental des stratégies telles que modélisées avec NATEM.<sup>9</sup> Le différentiel entre les scénarios d'implantation de la stratégie de circularité et le scénario de référence (statu quo) est calculé et évalué à l'aide d'une ACV. Les résultats ont été calculés pour quatre horizons de temps (2020, 2030, 2040 et 2050) et cinq indicateurs environnementaux : *Changement climatique, Santé humaine, Qualité des écosystèmes, Épuisement des ressources minérales et Épuisement des ressources énergétiques*.

**Six des stratégies de circularité** ont été **analysées** dans cette optique : le recyclage du fer, celui du cuivre et celui du lithium, l'autopartage, l'écoconception des véhicules, c'est-à-dire l'utilisation de matériaux plus légers, et le réemploi, en ciblant plus particulièrement l'exemple du stockage d'énergie dans des batteries lithium-ion usagées. Les autres stratégies présentaient un changement trop faible ou une quantité insuffisante d'informations pour être traitées par cette approche. Les résultats de cette analyse ne doivent pas être interprétés comme des valeurs absolues, mais comme des **risques potentiels de déplacements d'impacts issus de l'implantation des stratégies**.

Le Tableau 4-3 montre les conclusions relatives aux différentes stratégies étudiées.

<sup>9</sup> Pour plus de détails sur la méthodologie, voir le rapport de l'étape 3.2 « Analyse technico-économique des stratégies de circularité », ainsi que celui de l'étape 3.3 « Analyse du cycle de vie des stratégies de circularité ».

**Tableau 4-3 : Synthèse des résultats de l'étude**

| Stratégie  | Risque de déplacement d'impact                |
|--|---|
| <b>Recyclage du fer</b>                                    | Risque non significatif                       |
| <b>Recyclage du cuivre</b>                                 | Risque non significatif                       |
| <b>Recyclage du lithium</b>                                | Risque non significatif                       |
| <b>Autopartage</b>   | Bénéfice environnemental attendu              |
| <b>Écoconception des véhicules – Matériaux plus légers</b> | Bénéfice environnemental attendu à long terme |
| <b>Réemploi – Stockage d'énergie avec des batteries</b>    | Risque de déplacement d'impact à long terme   |

En général, les stratégies basées sur le recyclage en fin de vie, qui possèdent un potentiel de circularité intéressant, ne montrent pas de risque de déplacement d'impacts significatif.

Les stratégies autour du secteur des transports (autopartage et écoconception de véhicules – matériaux plus légers) engendrent des bénéfices environnementaux importants par l'augmentation de l'efficacité d'utilisation des véhicules et la diminution de la consommation d'énergie.

La stratégie de stockage d'énergie avec des batteries usagées possède un potentiel de circularité et une faisabilité intéressants. Il permet d'améliorer la fiabilité de sources d'énergie décentralisées intermittentes, comme l'énergie solaire, en emmagasinant une quantité d'énergie en prévision des périodes de faible production ou de grande demande. Cependant, un risque de déplacement d'impacts est observé si cette stratégie devait être accomplie puisqu'elle dépend du développement de la production décentralisée d'électricité solaire dans les prochaines décennies. Or actuellement, selon les résultats de l'ACV, la production d'électricité à l'aide de panneaux photovoltaïques engendre des impacts potentiels environnementaux supérieurs à l'hydroélectricité au Québec. Par conséquent, les conditions nécessaires à la faisabilité de cette stratégie, c'est-à-dire la pénétration à grande échelle des panneaux photovoltaïques sur les marchés résidentiel et commercial québécois, impliquent qu'une part importante d'hydroélectricité soit remplacée par cette source d'énergie. Un risque de déplacement d'impacts est donc présent dans un contexte uniquement québécois où l'hydroélectricité est plus propre.<sup>10</sup> Ce résultat a été obtenu en considérant la filière solaire, dont une réduction importante des coûts est attendue à long terme. Le risque environnemental serait différent avec des scénarios considérant une autre filière de production décentralisée (éolien par exemple) ou une autre application de stockage d'énergie avec des batteries usagées, tel que le stockage à grande échelle dans un contexte de production d'électricité centralisée et de gestion du réseau de distribution. Dans une telle application, le stockage d'électricité peut éviter la consommation de combustibles fossiles pour répondre à la demande en période de pointe dans un contexte québécois. Ces scénarios n'ont cependant pas été évalués.

<sup>10</sup> Cela résultat est cohérent avec les résultats d'une étude ACV antérieure sur la production d'électricité québécoise (CIRAIG, 2014) qui compare plusieurs filières de production.

#### 4.4 Quelles conclusions tirer de ces analyses ?

Le Tableau 4-4 résume les résultats des analyses technico-économiques. Il met en relation les trois analyses présentées dans ce chapitre, et ce, pour chaque stratégie évaluée, à savoir le potentiel de circularité, la faisabilité, ainsi que le risque d'impacts négatifs sur l'environnement.

**Tableau 4-4 : Sommaire de l'évaluation du potentiel de circularité et de la faisabilité des stratégies**

|                                     |        | Faisabilité technico-économique (coût)   |   |   |
|-------------------------------------|--------|--|---|---|
|                                     |        | Fort   | Moyen   | Faible  |
| Potentiel de circularité (quantité) | Fort   | Fabrication additive<br><b>Recyclage de la ferraille</b><br><b>Recyclage du lithium des batteries</b><br>Écoconception des véhicules – Matériaux plus légers | <b>Stockage d'énergie photovoltaïque avec des batteries lithium-ion usagées</b>   | Mines urbaines<br><b>Recyclage du fer des trains</b><br>Déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures<br>Récupération des métaux précieux des boues anodiques |
|                                     | Moyen  | Séquestration du CO <sub>2</sub> à partir de laitiers  | Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure<br><b>Recyclage du cuivre des câbles</b>   | Écoconception des poutres en acier  |
|                                     | Faible | Développement technologique pour une extraction plus efficace<br><b>Recyclage du fer des voitures</b>  | Récupération d'énergie thermique des laitiers<br><b>Recyclage du cuivre des circuits imprimés</b><br>Autopartage<br><b>Modularité des équipements mécaniques et industriels</b> | <b>Recyclage du fer des avions</b><br><b>Recyclage du cuivre des ordinateurs</b><br><b>Recyclage du cuivre des cellulaires</b><br>Recyclage du lithium du verre           |

Légende aspect « Risque d'impacts négatifs sur l'environnement » :

**Bénéfice environnemental attendu**

**Risque de déplacement non significatif**

**Risque de déplacement d'impacts environnementaux**

Risque non évalué

Voici les principales conclusions qui en découlent :

- Bien que le recyclage de la ferraille performe bien sur les trois critères, le potentiel de circularité de cette stratégie est faible en comparaison de la quantité totale de fer produite et réutilisée annuellement.
- La captation de CO<sub>2</sub> à partir des laitiers pourrait être une avenue intéressante dans le contexte québécois à condition d'intégrer celle-ci dans le marché du carbone.
- La fabrication additive, par exemple appliquée aux avions, et l'écoconception de véhicules avec des matériaux plus légers devraient permettre l'utilisation de moins de métaux lors de la fabrication et l'économie de carburant lors de l'utilisation.
- La fabrication additive est également une façon d'étendre la vie des produits en facilitant la fabrication de pièces de rechange ainsi que la réparation. Cette technique présente un important potentiel qui n'est pas totalement évalué par cette étude.
- Le recyclage du cuivre est déjà largement implanté. Il importe toutefois de s'assurer de continuer à travailler à l'augmentation du recyclage, particulièrement pour les usages plus diffus.
- Compte tenu du potentiel de l'utilisation de métal dans les batteries pour, par exemple, le véhicule électrique, il paraît très intéressant et important de développer une filière de recyclage des batteries lithium-ion.
- Le stockage d'énergie avec des batteries usagées dans un contexte purement québécois devra compter sur des technologies de production énergétique plus écologiques et composées de matériaux plus communs. Sinon, cette stratégie de circularité se fera au détriment de l'environnement.
- L'entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure affiche un potentiel de circularité et une faisabilité technico-économique moyens.
- L'extraction de métaux à partir de mines urbaines est une stratégie qui pourrait présenter un grand potentiel, mais beaucoup de collecte de données et de travaux sont encore nécessaires pour mieux la définir, la concevoir et la mettre en œuvre.
- Dans la valorisation des déchets industriels, la récupération des métaux précieux des boues anodiques est intéressante, mais cette approche est déjà intégrée dans les procédés existants au Québec; il reste donc peu de place à une amélioration.
- L'autopartage est une stratégie qui démontre clairement un intérêt environnemental, même si son potentiel de circularité est faible et que certains résultats de la modélisation semblent incertains.

## 5 COMMENT DÉPLOYER LES STRATÉGIES ?

Les analyses poussées des stratégies de circularité retenues ont permis de faire ressortir les plus prometteuses d'entre elles. Ces analyses ont évalué à la fois le potentiel de circularité, c'est-à-dire la quantité de minerai qu'il est possible d'éviter d'extraire, et la faisabilité technico-économique à long terme, en lien avec la rentabilité. L'ACV a également apporté des nuances quant aux bénéfices attendus des stratégies sur le plan environnemental. Dans l'optique de leur réalisation, elles ont aussi fait l'objet d'une analyse poussée auprès des acteurs concernés, permettant d'identifier les freins et leviers impliqués, c'est-à-dire les obstacles à leur mise en place et les mesures pour aider à les surmonter.<sup>11</sup> Elle s'est basée sur des entrevues semi-dirigées réalisées avec des personnes clés des filières industrielles impliquées. Ce chapitre effectue un survol global des résultats, d'abord sur les acteurs, puis sur les freins et leviers. De plus, il s'attarde sur les stratégies les plus intéressantes à la lumière des résultats des analyses précédentes, c'est-à-dire :

- La fabrication additive ;
- Le recyclage de la ferraille ;
- Le recyclage des batteries lithium-ion ;
- L'écoconception des véhicules – matériaux légers ;
- La séquestration de CO<sub>2</sub> à partir de laitiers.

L'entière des acteurs, freins et leviers de chaque stratégie ayant fait l'objet d'une **analyse détaillée** est présente à l'**Annexe B**. Par ailleurs, il est à noter que, compte tenu du nombre d'entrevues réalisées pour cette analyse (23 au total), les informations qu'elles ont permis de collecter, et présentées dans ce rapport, ne peuvent être qualifiées d'exhaustives.

### 5.1 Qui sont les acteurs des stratégies de circularité au Québec ?

Les stratégies retenues touchent des secteurs très différents de l'économie : minier, métallurgique, manufacturier, de la construction, du transport, de la distribution d'électricité, du recyclage, etc. Les acteurs pressentis pour contribuer à l'implantation de stratégies de circularité peuvent donc grandement varier d'une stratégie à l'autre. Cependant, il est possible d'identifier des acteurs récurrents par catégories : les **entreprises**, les **institutions académiques** (universités, centres de recherche, etc.) et les **gouvernements**.

Dans la plupart des cas, les **entreprises** sont identifiées comme étant des acteurs clés de l'implantation de stratégies de circularité. Pour commencer, les stratégies d'extraction (à l'exception des mines urbaines) concernent les pratiques des entreprises minières. Celles-ci sont donc au cœur de leur implantation. Puis, la valorisation des déchets industriels nécessite que les industries génératrices de ces déchets ajoutent de l'équipement de traitement à leurs installations ou établissent des partenariats avec d'autres entreprises afin de diminuer ou de donner une nouvelle vie à ces rejets. L'écoconception, quant à elle, est effectuée par les entreprises conceptrices de produits finis, dans le cas présent les constructeurs de véhicules, de poutres d'acier et d'équipements mécaniques et industriels. Ensuite, la fabrication additive profiterait aux concepteurs de pièces métalliques dans différents secteurs comme l'aéronautique. Le réemploi de matériaux de construction issus de la déconstruction et le stockage d'énergie avec des batteries usagées requièrent

<sup>11</sup> Voir le rapport de l'étape 3.1 « Analyse des freins et leviers liés aux stratégies de circularité pour le cuivre, le fer et le lithium » pour plus de détails.

des entrepreneurs spécialisés en la matière. Enfin, pour les stratégies de recyclage, les récupérateurs, trieurs et conditionneurs seraient mobilisés.

Bien que les entreprises soient centrales à l'application des stratégies de circularité, d'autres acteurs contribuent à réunir les conditions qui y sont propices. Les institutions académiques et les gouvernements semblent pouvoir jouer ce rôle. Beaucoup de stratégies de circularité requièrent des développements technologiques, des avancées scientifiques, de l'innovation ou la génération de nouvelles connaissances et compétences. Ces activités peuvent nécessiter des investissements trop importants pour avoir lieu uniquement en entreprises. Les **universités, cégeps et centres de recherche** ont donc un rôle très important à jouer, d'autant plus qu'ils favorisent l'acquisition de compétences et la diffusion des nouvelles connaissances. Ce sont des acteurs presque systématiquement identifiés pour l'implantation des stratégies. Les stratégies pour lesquelles ils semblent être particulièrement importants sont l'entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure (ex. technologies d'extraction à faible concentration), les mines urbaines (ex. caractérisation des gisements), la séquestration du CO<sub>2</sub> à partir de laitiers et la fabrication additive.

Les **gouvernements**, quant à eux, peuvent intervenir de différentes façons pour concrétiser des stratégies de circularité. D'abord, par l'entremise de politiques, les gouvernements peuvent mobiliser et financer les différents acteurs nécessaires pour l'implantation d'une stratégie (centres de recherche, entreprises, etc.). De plus, les gouvernements ont le pouvoir de renforcer ou alléger des réglementations pouvant favoriser la mise en place de stratégies de circularité.

### Fabrication additive

La fabrication additive devrait changer le visage du modèle manufacturier tel qu'il est connu aujourd'hui. Elle fait graduellement son apparition dans l'industrie. Les **grandes entreprises** du secteur manufacturier, ainsi que les **fournisseurs de pièces**, seraient au premier plan de ces changements. Par la nouveauté de la technologie, **les universités, les centres de recherche et les centres collégiaux de transfert de technologie** devraient être mobilisés à des fins de formation ainsi que pour le développement de la technologie. Aussi, le **Bureau de normalisation du Québec (BNQ)** pourrait faire avancer le développement des normes régissant cette technologie. Des **fournisseurs de poudres métalliques**, la matière première de l'impression 3D de pièces de métal, sont en démarrage au Québec et seraient évidemment des acteurs dans l'implantation de la fabrication additive. Finalement, afin d'anticiper de possibles réductions d'emplois en lien avec l'implantation de la technologie, les **syndicats** du secteur manufacturier devraient être impliqués.

### Recyclage de la ferraille

Afin d'augmenter le recyclage de fer au Québec, les **utilisateurs de métaux** des secteurs industriel, commercial, institutionnel, résidentiel et de la construction, rénovation et démolition (CRD) doivent d'abord être sensibilisés à la nécessité de détourner le fer allant présentement à l'enfouissement. Ensuite, les **récupérateurs** (collecteurs), notamment les entreprises de démantèlement de véhicules, ainsi que les **entreprises de tri et de conditionnement** (ferrailleurs) s'occuperaient de traiter une quantité supplémentaire de ferraille et de la vendre à des preneurs. Parmi ces derniers, les **aciéries** joueraient un rôle clé dans le recyclage du fer au Québec.

### Recyclage du lithium des batteries

Contrairement au fer et au cuivre, le recyclage du lithium est très peu développé au Québec. Pour parvenir à une démarche concertée dans le recyclage des batteries lithium-ion, les acteurs pouvant être impliqués sont :

- 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 (pour les appareils électroniques) et Veolia;
- Les recycleurs actuels, tel Retrieval 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.

### Écoconception des véhicules – Matériaux plus légers

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). Ce sont principalement des véhicules lourds qui sont construits au Québec, comme des camions, des autobus, des ambulances et des trains, mais également des véhicules récréatifs. En tant que concepteurs, ils doivent être impliqués pour l'implantation de cette stratégie. Pour leur part, les constructeurs automobiles étant réticents à changer leurs pratiques, les **gouvernements** pourraient être appelés à intervenir. Les **organisations spécialisées en écoconception** (ex. : Institut du véhicule innovant, Centre de technologies avancées BRP – Université de Sherbrooke) peuvent contribuer à l'implantation de cette stratégie en stimulant l'innovation. Enfin, les **sociétés publiques de transport** peuvent jouer un rôle en tant que clients à grand pouvoir d'achat en imposant des exigences en lien avec l'écoconception.

### Séquestration du CO<sub>2</sub> à partir de laitiers

Les acteurs de premier plan de cette stratégie sont ceux produisant les laitiers, c'est-à-dire les **aciéries**. Dans le cadre de symbioses industrielles, elles n'agissent cependant pas seules. D'abord, les **centres de recherche**, ainsi que les **centres de transferts** comme le Centre de transfert technologique en écologie industrielle (CTTÉI) peuvent contribuer à surmonter les obstacles techniques et réglementaires inhérents à la séquestration de CO<sub>2</sub>. D'autres acteurs pouvant être impliqués dans ce genre de projets sont :

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

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.

## 5.2 Quels sont les freins et leviers pour une adoption au Québec ?

L'analyse des freins et leviers des stratégies de circularité a permis d'apporter des précisions sur les mécanismes de mise en œuvre, particulièrement dans le contexte québécois. Mais surtout, elle a 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, qu'ils soient réglementaires, financiers, techniques, sociaux ou environnementaux.

**Trois principaux freins**, ainsi que les **leviers** y étant rattachés, ont été identifiés dans l'analyse.

D'abord, le frein lié aux **défis techniques** est souvent une barrière à l'implantation de stratégies, en raison de l'immaturation des technologies ou des méthodes impliquées. Des investissements en recherche et développement sont alors des leviers à la réalisation de telles stratégies, que ce soit de la part des entreprises ou du gouvernement.

On note également pour de nombreuses stratégies la présence d'une **inertie des acteurs clés**, comme les entreprises, qui rend difficile le changement. Elle peut provenir d'un manque de connaissances sur l'existence des technologies disponibles (ex. fabrication additive), le manque de main-d'œuvre qualifiée (ex. en écoconception), ou encore la présence de perceptions non favorables aux stratégies de circularité (ex. résidu perçu comme un déchet plutôt qu'une matière à valoriser). À cet égard, plusieurs mesures peuvent aider à pallier ces freins : l'instauration d'incitatifs réglementaires pour forcer les changements, la formation de la relève, la formation continue et la sensibilisation des entreprises aux gains potentiels qu'elles peuvent faire.

Le deuxième frein à la mise en place de ces stratégies est souvent lié à des raisons économiques. Dans ce cas, la **rentabilité** n'est tout simplement pas au rendez-vous en raison des coûts d'investissement, des coûts d'exploitation ou de la concurrence des produits neufs ou de la matière vierge pour le réemploi et le recyclage. Les subventions gouvernementales et la recherche et le développement pour trouver des solutions à faibles coûts sont des leviers qui ressortent de l'analyse. Quant aux **distances de transport**, elles sont parfois considérées comme un frein, par exemple à la rentabilité, parfois comme un levier, dans le cas de l'implantation de stratégies locales.

Finalement, le **manque de normalisation** et de **réglementations contraignantes** est un autre frein fréquent à l'implantation de stratégies, tandis que le **marché du carbone** agit comme un levier.

Les paragraphes suivants décrivent en détail les freins et leviers des stratégies les plus prometteuses en raison de leur potentiel de circularité et de leur faisabilité intéressants, ainsi que l'absence de risque environnemental à long terme révélé.

### Fabrication additive

Pour les entreprises manufacturières, 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.

En contrepartie, **plusieurs freins retardent son arrivée dans l'industrie**. En premier lieu, le prix de l'équipement est très élevé, soit entre 500 000 \$ et 1 million \$ en moyenne. Il serait de plus difficile d'obtenir un prêt pour se le procurer. À cet effet, la baisse graduelle des prix due notamment à l'expiration de brevets de la technologie, jumelée avec des programmes de financement d'imprimantes 3D, palliera ce frein.

Du point de vue 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. Ensuite, la répétabilité entre les pièces produites ne serait pas encore à maturité, et l'éventail des matériaux imprimables est actuellement limité. Des investissements en recherche et développement peuvent aider à trouver des solutions à ces problèmes.

Pour ce qui est du facteur humain, **l'inertie des entreprises manufacturières qui les encourage** à suivre les plans d'affaires conventionnels n'inciterait pas à profiter des nouvelles possibilités qu'offre la fabrication additive. L'impression 3D métallique serait d'ailleurs **mal connue** des entreprises. Enfin, le **manque de formation technique** causerait un manque de main-d'œuvre qualifiée. La mise en place de formation continue en fabrication additive et son inclusion dans les curriculums universitaires seraient donc des leviers favorisant cette technologie. Il pourrait d'ailleurs y avoir des incitatifs (ex. : Emploi Québec) pour les entreprises, principalement les PME, afin qu'elles permettent à leurs employés de suivre des formations.

Finalement, **les normes et les certifications** en vigueur ne seraient pas toujours adaptées à la nouvelle réalité qu'offre la fabrication additive, et peuvent constituer un frein à son utilisation, particulièrement dans le secteur aéronautique. L'adaptation des normes et certifications est en cours de considération à l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et le BNQ en suit le développement.

### Recyclage de la ferraille

La filière de recyclage du fer au Québec est bien établie. Les freins à son recyclage local sont essentiellement liés au **tri des alliages**, aux **distances de transport** de la ferraille et à son **prix de vente**.

### Recyclage du lithium des batteries

Les batteries lithium-ion sont des produits **complexes à recycler**. Plusieurs technologies de cathodes existent et utilisent des matériaux aux chimies différentes. La présence de polymère fluoré dans certains types de batteries peut s'avérer problématique pour le recyclage.

Économiquement, les **revenus du lithium** ne rentabilisent pas à eux seuls le recyclage des batteries. **L'absence de filière locale** de recyclage et les **coûts de transport** font en sorte que les batteries de voitures électriques et hybrides s'empilent parfois chez les entreprises de démantèlement, en attente de débouchés. Pour le

moment, le **volume de batteries à recycler** ne serait pas suffisant, mais cela est amené à changer selon les analyses technico-économiques.

Puisque les conditions économiques ne semblent actuellement pas réunies, plusieurs mesures gouvernementales pourraient être instaurées afin de stimuler le recyclage de batteries lithium-ion. Un **incitatif économique** pourrait être mis en place, par exemple sous forme d'écofrais imposés à l'achat de batteries, dans le but de créer une source de financement pour la filière de recyclage.

Le **financement de la recherche** sur les procédés de recyclage des batteries pourrait générer des procédés innovants permettant un recyclage à faibles coûts.

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 industriel envers le recyclage.

### Écoconception des véhicules – Matériaux plus légers

L'utilisation de matériaux plus légers dans les véhicules serait limitée notamment par l'**inertie des constructeurs de véhicules automobiles** en matière d'écoconception. À cet effet, les gouvernements pourraient mettre en place des **exigences réglementaires**, par exemple sur la masse des véhicules, afin de provoquer des changements, comme c'est le cas actuellement pour favoriser l'offre de voitures électriques. Cependant, les constructeurs de véhicules automobiles sont réticents face à une ingérence gouvernementale, ce qui pourrait constituer un frein. De plus, le Québec à lui seul ne possède pas un marché suffisant afin de convaincre les grands constructeurs étrangers de changer leurs pratiques ou d'adapter leurs produits.

Le gouvernement peut également agir en tant que client avec des **politiques d'acquisition**, notamment chez les sociétés de transport, équipées de critères suffisamment agressifs en lien avec l'écoconception. De plus, des programmes de **subventions** peuvent aussi servir de levier, par exemple en octroyant des remboursements plus faibles pour la consommation d'essence, favorisant ainsi l'utilisation de véhicules à faible consommation, comme c'est le cas pour des programmes du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET).

Enfin, la **hausse des prix de l'essence**, ainsi que la **sensibilisation du consommateur** sont d'autres leviers disponibles.

### Séquestration du CO<sub>2</sub> à partir de laitiers

Cette valorisation non conventionnelle des laitiers a été étudiée dans le contexte des **sybioses industrielles**, les laitiers étant produits par les aciéries et pouvant servir à un autre grand émetteur afin de séquestrer ses émissions de CO<sub>2</sub>. En raison de la nécessité d'établir des partenariats entre les entreprises d'une symbiose, le facteur humain serait important puisque des **liens de confiance** doivent être établis. La présence actuelle de liens d'affaires entre les aciéries québécoises pourrait favoriser la mise en place de nouveaux partenariats comme pour la valorisation des laitiers par la séquestration de CO<sub>2</sub>.

La reddition de compte à l'égard des **gaz à effet de serre (GES)** favoriserait cette stratégie dont le but est de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Il faudrait alors que ce genre de projet puisse être comptabilisé dans le marché du carbone québécois, le Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre du Québec (SPEDE), ce qui n'est pas le cas aujourd'hui.

À plus long terme, la **formation de la relève** sur la préservation des ressources est essentielle pour que les travailleurs puissent devenir des leviers d'implantation de stratégies de valorisation des rejets industriels en général.

Concernant les freins à la présente stratégie, plusieurs **défis techniques** liés à la séquestration de CO<sub>2</sub> persistent.

De façon plus générale, dans les **réglementations**, la définition actuelle de « matière résiduelle » 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 que plusieurs vies pourraient être données à la matière.

### 5.3 Quelles conclusions tirer de ces analyses ?

Le présent chapitre a exposé les résultats principaux de l'analyse des acteurs, des freins et des leviers des stratégies considérées comme les plus intéressantes du point de vue de leur potentiel de circularité, de leur faisabilité et de l'absence de risque environnemental révélé. Ces résultats se résument comme suit :

D'abord, trois principaux acteurs contribuant à l'implantation de stratégies de circularité ont été identifiés à travers les analyses :

- **Entreprises** : Dans une économie ouverte comme celle du Québec, ce sont les acteurs de premier plan dans la mise en place et l'exécution des stratégies.
- **Institutions académiques** (universités, cégeps et centres de recherches) : L'avancement de la science et des technologies est un moteur d'élaboration de stratégies prometteuses.
- **Gouvernements** : Ils ne sont pas nécessairement au premier plan de l'implantation d'une stratégie, mais peuvent posséder des leviers d'actions puissants (politiques, subventions, etc.).

Ensuite, trois principaux **freins** à l'implantation des stratégies, ainsi que les leviers y étant rattachés, sont ressortis des analyses :

- **Défis techniques** : Ils sont notamment dus à l'immaturation des technologies ou des méthodes impliquées. Des investissements en recherche et développement sont alors des leviers à la réalisation de telles stratégies.
- **Inertie des acteurs** : Il s'agit de la résistance au changement, en raison d'un manque de connaissances sur l'existence des technologies disponibles, d'un manque de main-d'œuvre qualifiée, ou encore des perceptions non favorables aux stratégies de circularité. L'instauration d'incitatifs réglementaires pour forcer les changements, la formation de la relève, la formation continue et la sensibilisation des entreprises sont des leviers pertinents.
- **Rentabilité** : Des coûts d'investissement, d'opérations trop élevés ou la concurrence des produits et matériaux neufs sont des causes. Les subventions gouvernementales et la recherche et le développement pour trouver des solutions à faibles coûts sont des leviers qui ressortent de l'analyse.

Avec l'ensemble des résultats, il est maintenant possible de se tourner vers une discussion plus intégrée du projet.

## 6 AU-DELÀ DES STRATÉGIES DE CIRCULARITÉ, QUE TIRER DE CE PROJET ?

### 6.1 A-t-on les données nécessaires pour tirer des conclusions fiables ?

Les résultats obtenus aux différentes étapes du projet dépendent grandement de la qualité des informations et des données utilisées.

Or, il est apparu très tôt dans le projet que l'accès aux données et leur qualité posaient un problème important. L'équipe n'ayant pas accès à certaines informations détaillées et confidentielles dont dispose le gouvernement, il a fallu mettre beaucoup d'efforts dans la collecte de données auprès des entreprises québécoises, avec des résultats généralement satisfaisants, mais présentant certaines lacunes notables. Du côté des statistiques officielles, un certain nombre d'incompatibilités entre les différentes sources d'informations a également été noté, particulièrement en ce qui concerne la fin de vie des produits et des matières métalliques.

À cet effet, le projet a permis d'identifier des sources d'information et des stratégies de collecte de données fiables, ainsi que de développer des aspects méthodologiques, ce qui pourrait servir pour des projets de la même nature.

#### Sélection des métaux

Pour le choix des métaux, une grille de critères a été développée. Elle inclut, entre autres, le volume de production au Québec, le potentiel de recyclabilité et le nombre d'emplois associés. Ces informations étaient facilement accessibles par le MERN et des publications scientifiques. Pour d'autres critères, tels que la durée d'usage moyenne, le pourcentage recyclé et la sensibilité des métaux (risque d'approvisionnement, implications environnementales), les informations proviennent uniquement de publications scientifiques non spécifiques au Québec et représentent soit des systèmes économiques similaires soit une moyenne mondiale.<sup>12</sup>

#### Freins et leviers

Les stratégies sélectionnées ont été analysées de façon qualitative pour identifier les freins et leviers de leur implantation. Cette étape a été réalisée au moyen d'entrevues semi-dirigées avec des acteurs clés, c'est-à-dire des experts d'organisations susceptibles de mettre en œuvre les stratégies ou qui les ont déjà implantées. Compte tenu de l'échantillonnage relativement restreint de personnes interrogées (au total, 23 entrevues semi-dirigées ont été réalisées), les informations ne peuvent, par ailleurs, être qualifiées d'exhaustives ou de statistiquement représentatives. Elles sont donc à interpréter avec discernement.<sup>13</sup>

<sup>12</sup> Voir le rapport « Choix des trois métaux pour le projet: Économie circulaire des métaux au Québec » pour plus de détails.

<sup>13</sup> Voir le rapport de l'étape 3.1 « Analyse des freins et leviers liés aux stratégies de circularité pour le cuivre, le fer et le lithium » qui traite des limites de la méthodologie employée.

### Analyse de flux de matières (AFM)

L'analyse de flux de matières visait à identifier les principales activités et acteurs de la chaîne de valeur québécoise concernés par les trois métaux, ainsi que les principaux flux qui provoquent une perte de circularité.

Les données utilisées pour le calcul des flux de matières incluent les données primaires disponibles, collectées auprès des entreprises et organismes concernés, ainsi que des sources de données compilant des statistiques agrégées par secteur ou par type de produit, telles que celles compilées par Ressources Naturelles Canada, Statistique Canada et l'Institut de la statistique du Québec. Les données manquantes, incomplètes ou non facilement accessibles ont quant à elles été complétées par des données secondaires issues de bases de données publiques disponibles, d'une revue de littérature, par extrapolation ou par jugement d'expert.<sup>14</sup>

Les principales limites des données utilisées concernent principalement :

- La collecte de données auprès des entreprises d'extraction et de transformation et des principaux producteurs de produits semi-finis, qui n'a pas permis d'avoir des informations robustes pour certaines des étapes les plus importantes.
- Le niveau d'agrégation des données statistiques d'importations et d'exportations de produits contenant les trois métaux. Certaines de ces catégories étaient trop génériques pour avoir des résultats fiables.
- La diversité de sources de données, basées sur des méthodes de collecte et de traitement différentes pouvant diminuer la robustesse des résultats.

Dans le cas du fer et du cuivre, les flux les plus importants ont été calculés en général avec des données provenant de sources primaires ou propres au Québec. À cet égard, les conclusions sont robustes. Pour le lithium, les résultats sont moins certains en raison du manque de données spécifiques.

### Analyse technico-économique

Une première collecte de données a permis de documenter et d'intégrer la chaîne de valeur des trois métaux dans le modèle technico-économique NATEM, afin d'établir le scénario de référence. Ensuite, la seconde collecte a servi à documenter et analyser les stratégies suivant une revue de littérature visant à quantifier les paramètres technico-économiques de chacune dans le contexte du Québec.

Les limites de l'analyse sont multiples, principalement liées à la disponibilité des données et au nombre de scénarios étudiés. En effet, une certaine quantité de données n'a pu être obtenue et de nombreuses hypothèses ont par conséquent dû être effectuées, limitant le type de scénarios pouvant être construits. L'amélioration des résultats passerait donc par une documentation et une collecte de données plus exhaustives, de même que par l'intégration d'un plus grand nombre de scénarios liés aux stratégies.

Malgré toutes ces sources d'incertitudes, l'évaluation comparative et qualitative obtenue finalement représente une contribution pertinente pour l'identification des stratégies les plus prometteuses pour le Québec.

<sup>14</sup> Voir le rapport de l'étape 2.2 « Analyse de flux de matières du cuivre, du fer et du lithium » qui traite de l'incertitude sur les flux de matières calculés.

### ACV conséquentielle

L'objectif de cette partie du projet était d'évaluer les risques de conséquences environnementales négatives directes et indirectes dues à l'implantation de chaque stratégie. Seules six d'entre elles ont été analysées à cette étape.

Les résultats de la modélisation technico-économique ont été combinés à une ACV à l'aide de bases de données commerciales adaptées au contexte québécois. Néanmoins, certaines limites concernant les données et la méthodologie sont présentes<sup>15</sup> :

- Les avancées technologiques considérées par le modèle NATEM liées à l'exploitation et à l'utilisation des sources d'énergie ne se reflètent pas dans les données ACV, basées sur les technologies courantes ;
- Dans certains cas, les émissions ont été modélisées à l'aide de données approximatives, en l'absence de données spécifiques. Ces données peuvent donc influencer la validité des résultats.

Malgré ces faiblesses, des conclusions sur le risque de déplacement des impacts ont pu être tirées pour chaque stratégie analysée. Les résultats pourraient être partiellement améliorés avec une collecte de données ACV plus poussée ou une adaptation des bases de données existantes pour mieux représenter l'évolution technologique.

## 6.2 Les résultats peuvent-ils s'appliquer à d'autres métaux ?

Aux étapes d'extraction et de métallurgie, ainsi qu'en fin de vie, les industries, leurs procédés et leur implantation au Québec sont probablement trop spécifiques à chaque métal pour permettre une extrapolation à d'autres métaux. L'extraction conjointe de plusieurs métaux à une même mine serait une exception et plusieurs des stratégies de circularité proposées pour cette étape pourraient profiter à d'autres métaux (ex. optimisation de l'extraction et entreposage pour extraction ultérieure).

À l'étape d'utilisation, la plupart des métaux extraits au Québec (Fe, Ni, Zn, Cu) ne partagent que quelques secteurs d'applications, notamment le bâtiment et les infrastructures, le transport (pièces d'automobiles) ou la machinerie. Plusieurs des stratégies proposées pour le fer, le cuivre et le lithium pourraient alors profiter à la circularité de plusieurs de ces autres métaux. En contrepartie, l'or, le niobium et le titane présentent des applications plus diverses. Les stratégies, comme celles concernant les produits modulaires ou l'écoconception pour faciliter la réparation et la récupération des matières, sont applicables à plusieurs métaux.

Les résultats de l'analyse technico-économique et de l'ACV dépendent beaucoup des données utilisées pour la modélisation des filières d'extraction et de métallurgie des métaux. De ce fait, l'extrapolation des résultats et conclusions à d'autres métaux semble risquée. Bien que des stratégies soient applicables à d'autres métaux que le fer, le cuivre et le lithium (ex. autopartage), il n'est pas possible d'évaluer la faisabilité à long terme des stratégies sans avoir intégré leur chaîne d'approvisionnement au modèle NATEM.

<sup>15</sup> Pour plus de détails sur les limites, voir le rapport de l'étape 3.3 « Analyse du cycle de vie des stratégies de circularité ».

Enfin, toutes les méthodologies développées lors des différentes étapes du projet et plusieurs sources de données utilisées pour combler le manque de données primaires permettraient d'étendre les résultats à d'autres métaux d'une façon plus rapide et efficace que dans le cadre de ce projet. Par exemple, lors de l'analyse de flux de matières, les méthodes pour calculer les entrées et sorties de métal à partir des importations et exportations de biens sont facilement applicables à d'autres métaux une fois la concentration de métal dans chaque catégorie de biens établie.

### 6.3 Est-il approprié de penser par métal ?

À quelques occasions, l'implantation d'une stratégie pour un métal était accompagnée d'une augmentation de l'utilisation ou d'une diminution du recyclage d'un ou d'autres métaux. C'est le cas pour l'écoconception de véhicules avec des matériaux plus légers, plus précisément l'aluminium, ainsi que du stockage d'énergie avec des batteries usagées, une stratégie dépendante de la filière de production d'électricité solaire décentralisée. L'outil qui a permis l'évaluation des impacts potentiels sur les autres métaux était l'ACV conséquentielle. Cela démontre l'importance de l'utilisation de ce genre d'outil dans l'évaluation des stratégies de circularité axées sur un métal.

### 6.4 Avec le recul, aurait-on pu considérer d'autres stratégies ?

Le projet a considéré, pour débiter, un large éventail de stratégies de circularité (41). Ensuite, une sélection des plus pertinentes (13) a été effectuée à l'aide d'une liste de critères établis pour les besoins de l'étude. Elles ont ensuite fait l'objet d'analyses pour connaître les freins et leviers, leur potentiel de circularité, leur faisabilité à long terme et les retombées environnementales de leur implantation. Seule la moitié des stratégies sélectionnées ont été évaluées complètement.

Le caractère exploratoire du projet impliquait que la combinaison d'outils appliqués pour l'évaluation de ce genre de stratégies n'avait pas beaucoup de précédents, ce qui a conduit au développement de nouvelles méthodes et modèles, à la collecte de données supplémentaires et à une interprétation de résultats combinée et novatrice. L'addition de nouvelles stratégies aurait exigé une collecte de données plus étendue, ainsi que du temps de modélisation et d'interprétation additionnel.

L'analyse du potentiel de circularité des stratégies a mis en perspective les quantités de métaux extraits potentiellement évitées et **l'augmentation de leur demande à long terme** en raison de la croissance économique. Il en ressort que cette augmentation est de loin plus **importante** que tout ce que les stratégies permettent d'éviter, et que la recherche de nouvelles solutions pour **ralentir cette demande** semble pertinente.

À la lumière du présent chapitre, les résultats des différentes analyses réalisées dans le cadre de cette étude possèdent plusieurs limites en ce qui a trait à leur fiabilité et leur extrapolation à d'autres métaux par exemple. Malgré cela, étant donné leur originalité, ils permettent de formuler une série de conclusions et de recommandations qui préparent le terrain pour le développement d'une stratégie d'économie circulaire pour le Québec.

## 7 QUELLES SONT LES CONCLUSIONS PRINCIPALES ET RECOMMANDATIONS DE L'ÉTUDE ?

Le principal objectif de cette étude était d'évaluer le potentiel de circularité de trois métaux stratégiques pour le Québec – le fer, le cuivre et le lithium – en intégrant, pour la première fois, une série d'approches et de techniques d'analyse généralement appliquées de manière indépendante, incluant : des entrevues semi-dirigées, une analyse de flux de matières, une analyse technico-économique et une analyse de cycle de vie.

L'analyse de flux de matières, couvrant les étapes du cycle de vie ayant lieu dans le périmètre québécois, a permis de dresser un portrait global des trois filières métalliques, répondant à des questions telles que : quelles quantités sont extraites, importées ? qu'en fait-on ? quel est leur devenir ? etc. En se basant sur ces résultats et une revue étendue de la littérature internationale sur le sujet, l'équipe de recherche a identifié plus d'une quarantaine de stratégies de circularité applicables à ces métaux, de l'extraction à la gestion de fin de vie. De celles-ci, treize stratégies ont été retenues pour des études plus poussées, en commun accord avec le MERN. Ces stratégies ont fait l'objet d'une analyse de freins et leviers, en s'appuyant sur des entrevues semi-dirigées avec des acteurs-clés des divers secteurs, et d'une analyse technico-économique, permettant de chiffrer leur potentiel de circularité et leur faisabilité dans des cas particuliers, représentatifs de ce qui pourrait être mis en place au Québec. L'étude a été complétée avec une ACV sur les conséquences possibles de l'implantation de certaines stratégies dans le but d'identifier des risques environnementaux en découlant.

À l'issue de ce processus, une série de conclusions et de recommandations phares ont pu être formulées.

### Une circularité déjà bien implantée

Cette étude livre une bonne nouvelle : la circularité (via le recyclage) dans le fer et, encore plus, dans le cuivre, est déjà très bien implantée et le Québec fait même figure de meneur au niveau mondial pour cette dernière filière. Grâce, en particulier, à la Fonderie Horne, ainsi qu'à l'Affinerie CCR, le cuivre et un ensemble de métaux connexes sont récupérés et recyclés suivant les meilleures pratiques.

**Recommandation :** Il y aurait lieu de mieux publiciser ce succès québécois, pour renforcer la fierté et démontrer l'intérêt de concevoir des approches de circularité pour d'autres éléments, produits et infrastructures.

### S'appuyer sur les forces du Québec : les stratégies de substitution

L'étude présentée ici suggère que les principaux métaux exploités ou transformés au Québec – fer, cuivre et, peut-être aussi, aluminium – sont déjà intégrés dans des filières de circularité ou peuvent être exploités avec un impact environnemental relativement faible. Il y aurait donc lieu d'étudier la valeur des gains de circularité pour le Québec de soutenir la substitution d'autres éléments ou matériaux de construction par ces produits. En remplaçant des produits à fort impact environnemental par d'autres à plus faible impact, et pour lesquels le Québec est un joueur important, il serait alors possible de contribuer au développement économique

du Québec tout en réduisant l'impact environnemental sur la planète. Ces substitutions pourraient aussi viser le remplacement de certains métaux par des ressources renouvelables, par exemple remplacer l'acier par du bois. Ces stratégies n'ont pas été étudiées dans le cadre de cette étude étant donné l'approche par métal, mais il serait pertinent de réfléchir à remplacer les ressources les plus critiques (ex : en termes de rareté, d'enjeux géopolitiques, d'impacts environnementaux sur leur cycle de vie) par des ressources moins problématiques. Certaines substitutions seront faciles à déployer, d'autres plus complexes ou demanderont des efforts de recherche et développement.

Cela dit, certains cas de la présente étude ont montré qu'une telle substitution peut augmenter la consommation d'énergie d'un produit lors de son utilisation et occasionner des impacts environnementaux supérieurs aux gains réalisés causés par une augmentation de la circularité. Il est donc nécessaire d'effectuer une analyse de cycle de vie (ACV) dans un tel cas, afin de garantir des gains environnementaux nets positifs.

**Recommandation :** Étant donné la forte circularité de certaines filières d'extraction et transformation au Québec, il y aurait lieu de mener des études quant à la possibilité de développer des stratégies de substitution visant à remplacer des métaux par d'autres à plus faible impact ou des ressources renouvelables. Ces études doivent faire l'objet d'une analyse du cycle de vie afin d'éviter tout déplacement d'impacts environnementaux.

### Des stratégies prometteuses

Les diverses stratégies de circularité retenues pour chacune des filières métalliques pourraient, individuellement, faire l'objet d'études détaillées qui dépassent l'ampleur de ce projet. Ainsi, l'écoconception d'infrastructures et de produits à base de fer, à elle seule, représente un domaine complexe qui fait intervenir facilement des milliers de concepts, d'usages et de choix. Il est donc impossible de tester l'impact complet de chaque stratégie pour tous les cas imaginables. Autant que possible, l'équipe a tenté de choisir, pour tester les stratégies, que ce soit pour les entrevues semi-dirigées ou les modélisations, des transformations ou des actions concrètes, représentatives et quantifiables qui soient réalisables avec les technologies d'aujourd'hui ou prévisibles à moyen terme. En s'appuyant sur des cas de figure précis, il devient toutefois possible d'estimer l'ampleur des retombées par rapport aux efforts pour les différentes stratégies.

Quoi qu'il en soit, l'analyse holistique intégrant plusieurs indicateurs a permis de mettre en évidence des situations de compromis ou des stratégies avec un potentiel de circularité intéressant et de tirer un certain nombre de conclusions plus générales sur la question. Plus spécifiquement, quelques stratégies ressortent comme étant particulièrement intéressantes à la lumière des analyses : la **fabrication additive**, le **recyclage du lithium des batteries**, la **séquestration du CO<sub>2</sub> à partir de laitiers**, l'**écoconception de véhicules** et le **recyclage des ferrailles**. Les deux dernières sont déjà bien implantées dans le contexte québécois (surtout pour les véhicules lourds en termes d'écoconception). Les trois restantes sont donc celles qui sont les plus prometteuses et qui devraient être approfondies.

Pour le **recyclage du lithium des batteries**, compte tenu de la valeur potentielle importante des métaux présents dans les batteries au lithium, il paraît très intéressant et important de procéder à son recyclage.

La filière de recyclage du lithium est peu développée dans le monde et le Québec est bien positionné pour s'établir comme un joueur important dans le développement de la chaîne de valeur de ce métal avec la présence de plusieurs entreprises œuvrant dans l'extraction, mais aussi dans la transformation du lithium et sa politique d'électrification des transports. Pour ce faire, il faut encore travailler à développer des procédés de recyclage efficaces et peu coûteux, tout en mettant en place des politiques et des incitatifs visant la récupération et le recyclage sur place des batteries. En agissant rapidement, le Québec pourrait se positionner avantageusement sur la scène nationale et internationale. Le développement de la filière de traitement des batteries pourrait aussi favoriser des stratégies de réemploi, comme le stockage d'énergie avec des batteries usagées de voitures, une stratégie à fort potentiel dans le contexte de l'électrification des transports et comme outil pour la gestion du réseau de distribution électrique d'Hydro-Québec (ex. gestion des pointes de consommation). Ces propositions restent à évaluer auprès des acteurs de la filière et devraient faire l'objet d'une étude de marché plus approfondie.

La deuxième stratégie d'intérêt, c'est-à-dire la **valorisation de déchets industriels par la séquestration de CO<sub>2</sub>** à partir des laitiers issus des aciéries, fait partie des stratégies ayant lieu dans le cadre de symbioses industrielles. Les symbioses existantes au Québec dans l'industrie métallurgique du fer font en sorte que les laitiers ont déjà des applications multiples en construction et en agriculture. Ce qui distingue la séquestration de CO<sub>2</sub> des débouchés conventionnels est son impact positif potentiel sur les changements climatiques. D'autant plus, les résidus générés par le procédé de séquestration, c'est-à-dire des carbonates, sont à leur tour valorisables, par exemple dans la production de matériaux de construction. Cette stratégie peut également être couplée à la production d'électricité par la récupération de la chaleur des laitiers, une autre stratégie évaluée qui, à elle seule, ne représente pas un potentiel de circularité très important. La séquestration de CO<sub>2</sub> est donc une avenue intéressante dans le contexte des aciéries québécoises et du marché du carbone.

Enfin, la **fabrication additive** est une nouvelle technologie en croissance exponentielle. L'analyse du potentiel de circularité et de la faisabilité de cette stratégie a donné des résultats très prometteurs, bien que dans la présente étude, elle a été restreinte à une seule application. Certaines industries étudient déjà l'implantation de cette technologie, comme par exemple en aéronautique, mais elle est encore en phase de recherche et développement, surtout pour l'impression avec des poudres métalliques. Il serait néanmoins pertinent d'intégrer des questions d'économie circulaire dans le volet fabrication additive de la feuille de route de l'Industrie 4.0, pour y intégrer les avantages environnementaux et économiques de cette stratégie (mesurer les économies de matière possibles, les réductions de coûts associées, etc.). Cela permettrait de cibler les secteurs ou produits dans lesquels cette stratégie est la plus pertinente en termes d'économie circulaire.

En plus de ces stratégies, une autre a retenu l'attention des auteurs quant à son fort potentiel de circularité et aux volumes importants de métaux qu'elle touche, mais elle nécessiterait des analyses plus poussées : les **mines urbaines**. L'AFM a révélé que les stocks de fer et de cuivre en utilisation dans les milieux urbains sont importants (bâtiments, produits de consommation, etc.). Or, peu d'informations sont disponibles sur les modes d'exploitation de ce gisement. En particulier, plusieurs questions se posent pour les métaux intégrés dans des produits à longue durée de vie : quand ces produits seront-ils en fin de vie ? Quelle sera leur qualité ? À quelle fréquence seront-ils disponibles ? Des travaux de recherche répondant à ce manque d'information pourraient faire la lumière sur le potentiel réel de cette stratégie, ainsi que sur sa faisabilité. De

plus, la stratégie de **déconstruction sélective**, qui présente elle aussi un fort potentiel de circularité, est une option pour valoriser au mieux ces stocks de métaux présents dans les milieux urbains.

**Recommandation :** Les résultats de l'étude supportent le développement du recyclage du lithium des batteries, de la séquestration du CO<sub>2</sub> à partir de laitiers et de la fabrication additive. De plus, il est recommandé d'explorer le potentiel des mines urbaines et d'élaborer des stratégies de circularités pertinentes pour ce contexte.

### Des stratégies très diverses à adapter au Québec

Ce projet a permis de montrer qu'un grand nombre de stratégies de circularité pouvaient s'appliquer au Québec, même en limitant l'étude à trois métaux en particulier. Les diverses analyses montrent également que pour maximiser les retombées, il faut adapter avec soin ces stratégies à l'environnement local ; dans bien des cas, il n'est pas possible de se contenter de copier-coller les approches retenues ailleurs dans le monde. Il y a donc place au développement d'un savoir-faire et d'une expertise québécois dans le domaine.

**Recommandation :** Les stratégies de circularité devant être adaptées aux conditions locales d'extraction, de transformation, de production, d'utilisation et d'élimination, il serait intéressant de poursuivre les études spécifiquement sur les meilleures stratégies pour le Québec.

### Une étude originale utilisant une approche transversale

L'approche par filière métallique retenue par le MERN est une première mondiale. Elle recense et évalue l'impact de multiples stratégies de circularité, de l'extraction à la fin de vie, gardant la perspective filière de chaque métal plutôt que celle des usages ou des produits. Cette approche a permis de mieux comprendre ces filières à l'échelle québécoise, leur intégration dans l'économie mondiale et le défi que représente l'implantation de stratégies de circularité pour une économie comme celle du Québec. Elle montre que le Québec se positionne comme un maillon dans des chaînes de valeurs globales. Ce maillon se positionne à l'étape des activités extractives pour le fer, de métallurgie et de transformation métallique pour le cuivre (où le Québec fait figure de chef de file), de fabrication et d'assemblage pour le lithium. C'est pour ce dernier métal que le Québec a l'opportunité de développer des activités industrielles circulaires à haute valeur ajoutée dans une chaîne de valeur globalisée. Cette étude montre aussi qu'une circularité importante exigera des approches intégrées qui impliquent de nombreux ministères et acteurs économiques divers.

En lien avec les chaînes de valeur mondialisées pour les métaux à l'étude, les efforts du Québec pour la mise en place de stratégies de circularité dépassent ses frontières et dépendent en partie de ce qui se passe dans le reste du monde. Il est donc recommandé de développer des partenariats avec des acteurs hors de la province pour faciliter la création de stratégies circulaires performantes dans un contexte mondialisé. De

plus en plus d'experts internationaux, en particulier en Asie et en Europe, s'intéressent à ces questions de circularité et pourraient être amenés à collaborer sur de nombreux enjeux.

Malgré cette nouvelle perspective, l'étude a montré que les stratégies de circularité ne peuvent pas être dissociées des usages ou des produits au fur et à mesure qu'on avance dans la chaîne de valeur des métaux. Comme l'ont montré certaines analyses présentées dans ce rapport, les gains associés simplement à un seul métal justifient rarement des stratégies complexes (ex. recyclage de batteries lithium-ion). De plus, des propositions comme l'autopartage agissent à la fois sur le fer, le cuivre et le lithium, dans le cas des voitures électriques et hybrides, ainsi que sur la réduction des impacts sur l'environnement, moins de voitures étant nécessaires pour la même distance parcourue. Il serait donc pertinent que le gouvernement poursuive les efforts déjà entrepris pour développer une approche transversale à l'étude des stratégies de circularité pour le Québec, c'est-à-dire en considérant les industries connexes.

Enfin, bien qu'il soit aussi envisageable de tester plus largement l'effet des stratégies, avec un ensemble d'indicateurs qui inclurait, par exemple, l'énergie, les ressources, l'économie, la qualité de vie, la santé et l'environnement, l'étude présentée ici est la première à intégrer directement une optimisation technico-économique sur l'énergie, les ressources et l'environnement.

**Recommandation :** Que le gouvernement poursuive les efforts déjà entrepris pour développer une approche transversale à l'étude des stratégies de circularité pour le Québec, c'est-à-dire impliquant les industries connexes aux trois métaux étudiés, ainsi que des acteurs en dehors des frontières du Québec. Pour le lithium, le Québec a l'opportunité de développer des activités industrielles circulaires à haute valeur ajoutée dans une chaîne de valeur globalisée qui inclut l'ensemble des matériaux associés aux produits à base de lithium. Pour les trois métaux, le Québec pourrait aussi développer des liens avec des experts internationaux sur le sujet.

### Agir sur la demande en métaux

Bien que cette étude ait permis d'identifier et d'évaluer des stratégies de circularité prometteuses, impliquant parfois des synergies avec une réduction de gaz à effet de serre, il est à noter que ce potentiel de réduction reste largement insuffisant pour satisfaire les prévisions de l'augmentation de la demande estimée dans les prochaines décennies. Il est prévu qu'en 2030, trois fois plus de fer et de cuivre et trente fois plus de lithium soient consommés. Cela suggère qu'il est inévitable d'agir davantage sur la demande de ces métaux, qui sont ultimement en quantités limitées dans la croûte terrestre, et de la contrôler. Seulement une stratégie globale intégrant à la fois la production et la consommation de biens et services pourra agir sur l'enjeu de la préservation des ressources et de l'environnement naturel sur le long terme.

Des cibles d'intensité, quantifiant un niveau de consommation par personne pour chaque métal, seraient pertinentes pour mesurer l'efficacité des mesures mises en place. Cette approche pourrait se faire à l'échelle d'un territoire ou d'une filière pilote, pour lesquelles ces cibles seraient fixées. À l'échelle du Québec, un groupe de travail pourrait également être mis en place pour réfléchir avec une approche prospective à la

quantité de matériel requis pour répondre aux besoins futurs (ex. Création de la Ville 2050 ou du Québec Circulaire 2050). Les approches déployées sur d'autres enjeux environnementaux, comme le système de plafonnement des émissions de gaz à effet de serre, pourraient aussi être étudiées en vue de réduire la quantité de métaux consommés. L'équité intergénérationnelle dans l'extraction des ressources minières au Québec serait aussi un aspect à inclure dans cette réflexion sur la demande en métaux.

**Recommandation :** Développer une vision globale pour le Québec sur l'économie circulaire qui intègre la question de la consommation de ressources par personne pour un développement durable. Cette question pourrait être présentée sous la forme de cibles globales d'intensité qui permettraient de définir des objectifs quantitatifs et de mesurer l'efficacité des mesures déployées.

## 8 RÉFÉRENCES

- ArcelorMittal. (2016). *Produits*. Tiré de <http://www.transformerlavenir.com/a-propos/produits/>
- Bihouix, P. et de Guillebon, B. (2010). *Quel Futur Pour les Métaux ? : Raréfaction des Métaux : un Nouveau défi Pour la Société*, EDP Sciences. Tiré de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/polymtl-ebooks/detail.action?docID=3155155>
- Buchert, M., Schüler, D., Bleher, D. (2009). *Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential*: UNEP DTIE; Öko-Institut.
- Collporterre. (2014). *Quelles définitions de la consommation collaborative?* Tiré de <http://www.eco-sol-brest.net/Quelles-definitions-de-la.html>
- Commission européenne. (2014) *Study on modelling of the economic and environmental impacts of raw material consumption*. Technical report 2014-2478. Luxembourg. Tiré de [http://ec.europa.eu/environment/enveco/resource\\_efficiency/pdf/RMC.pdf](http://ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/RMC.pdf)
- Critical Elements Corporation. (2017). *Rose Lithium-Tantale*. Tiré de <https://www.ceccorp.ca/fr/projets/rose-lithium-tantale/>
- De Wit, M., Hoogzaad, J., Ramkumar, S., Friedl, H. et Douma, A. (2018). *The CIRCULARITY GAP report - How the linear economy is failing people and the planet and what we can do to close the global circularity gap*. Tiré de <https://www.circularity-gap.world>
- Demilly, D. et Novel, A.-S. (2013). *Économie du partage: enjeux et opportunités pour la transition écologique*.
- Fondation Ellen MacArthur (2015). *Growth Within: A Circular Economy Vision for a Competitive Europe*, Ellen MacArthur Foundation Cowes, Royaume-Uni.
- Glencore - Fonderie Horne. (2016) *Environnement*. Tiré de <http://www.fonderiehorne.ca/FR/durabilite/Pages/Environnement.aspx>
- Goffé, B., Christmann, P., & Vidal, O. (2012). La recherche pour l'utilisation durable des ressources minérales. *Geosciences* (15), 80-89.
- Gouvernement du Québec. (2015). *Propulser le Québec par l'électricité - Plan d'action en électrification des transports 2015-2020*. Bibliothèque et Archives nationales du Québec.
- Graedel, T., Harper, E., Nassar, N., Nuss, P. et Reck, B. K. (2015). *Criticality of metals and metalloids*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(14), 4257-4262.
- Grahl C. (2004). *Glass Forming & Processing: Saving Energy with Lithium*. Tiré de <http://www.ceramicindustry.com/articles/84228-glass-forming-processing-saving-energy-with-lithium>
- Hagelüken, C. (2015). *Recycling of high-tech metals in the context of the circular economy*. Communication présentée à Remedia Circular Economy Conference, Milan.

- Homrich, A. S., Galvão, G., Abadia, L. G. et Carvalho, M. M. (2017). The Circular Economy Umbrella: Trends and Gaps on Integrating Pathways. *Journal of Cleaner Production*.
- ICSG. (2015). *The World Copper Factbook 2014*. Tiré de <http://copperalliance.org/wordpress/wp-content/uploads/2012/01/ICSG-Factbook-2014.pdf>
- Institut EDDEC (2018). *Économie circulaire au Québec : opportunités et impacts économiques*. Tiré de : <https://www.cpq.qc.ca/wp-content/uploads/2018/03/economie-circulaire-au-quebec.pdf>
- Institut de la statistique du Québec. (2015). *Croissance du produit intérieur brut du Québec au quatrième trimestre*. Tiré de <http://www.stat.gouv.qc.ca/salle-presse/communiqué/communiqué-presse-2015/mars/mars1527.html>
- Institut de la statistique du Québec. (2016). L'utilisation des technologies de pointe dans les entreprises au Québec - Rapport d'enquête. Tiré de : <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/science-technologie-innovation/technologie-pointe/technologies-pointe.html>
- Institut Montaigne (2016), *Économie circulaire : réconcilier croissance et environnement*. Institut Montaigne, France, ISSN 1771-6756, nov. 2016.
- Kjørboe, N. K., Sramkova, H. et Krarup, M. (2015). *Moving towards a circular economy:-successful Nordic business models*.
- Labbé, J.-F., & Daw, G. (2012). *Panorama 2011 du marché du lithium*. 151 p.
- Lèbre, É. et Corder, G. (2015). *Integrating Industrial Ecology Thinking into the Management of Mining Waste Resources*, 4(4), 765-786.
- Legrand, C. (2017). *La fièvre du lithium, « pétrole du XXIe siècle », saisit l'Argentine*. Le Monde Économie, 15 février 2017. Tiré de [http://www.lemonde.fr/economie/article/2017/02/15/la-fievre-du-lithium-saisit-l-argentine\\_5080015\\_3234.html](http://www.lemonde.fr/economie/article/2017/02/15/la-fievre-du-lithium-saisit-l-argentine_5080015_3234.html)
- Marcaillou, L. (2005). *Un centre de démantèlement d'avions à Tarbes*. LesEchos.fr, 10 novembre 2005: [https://www.lesechos.fr/10/11/2005/LesEchos/19538-026-ECH\\_un-centre-de-demantelement-d-avions-a-tarbes.htm](https://www.lesechos.fr/10/11/2005/LesEchos/19538-026-ECH_un-centre-de-demantelement-d-avions-a-tarbes.htm)
- MERN. (2016). *Le cuivre - Expéditions du Québec et prix*. Tiré de <http://mern.gouv.qc.ca/mines/statistiques/substance/substance-cuivre.jsp>
- MERN. (2017). *L'activité minière au Québec*. Tiré de <http://mern.gouv.qc.ca/publications/mines/publications/activite-miniére-quebec.pdf>
- Müller, D. B., Wang, T. et Duval, B. (2011). Patterns of Iron Use in Societal Evolution - Supporting Information. *Environmental science & technology*, 45(1): 182-188. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es102273t>
- Nassar, N. T., Barr, R., Browning, M., Diao, Z., Friedlander, E., Harper, E., . . . Jun, C. (2012). Criticality of the geological copper family. *Environmental science & technology*, 46(2), 1071-1078.

Nemaska Lithium. (2016). Tiré de <http://www.nemaskalithium.com/fr/>

Normand, F. (2017). *Cette mine d'Abitibi redémarre grâce aux autos électriques*. Les Affaires, 1er juin 2017. Tiré de <http://www.lesaffaires.com/secteurs-d-activite/ressources-naturelles/lithium-amerique-du-nord-demarre-officiellement-ses-operations/595329>

Orée, G. (2009). *Mettre en œuvre une démarche d'écologie industrielle sur un parc d'activités*.

Pauliuk, S., Wang, T. et Muller, D. B. (2013). Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries. *Resources, Conservation and Recycling*. 71, p. 22–30.

Réseau Québec-3D. (2015). *Une révolution industrielle*. Tiré de <http://www.reseauquebec3d.com/fr/une-revolution-industrielle/les-procedes/23-une-revolution-industrielle>

Retriev Technologies. (2017). *Recycling Technology - Lithium Ion*. Tiré de <http://www.retrievtech.com/recycling/lithium-ion>

Sayona Mining Limited. (2017). *Authier Lithium Project*. Tiré de <http://sayonamining.com.au/authier-project/>

USGS. (2016a). *Iron ore statistics dans Kelly, T.D., and Matos, G.R., comps. (2014). Historical statistics for mineral and material commodities in the United States (2016 version)*: U.S. Geological Survey Data Series 140. Tiré de <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/historical-statistics/ds140-feore.xlsx>

USGS. (2016b). *Mineral Commodity Summaries 2016 - Lithium*. Tiré de <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2016-lithi.pdf>

UNION EUROPÉENNE. (2015). *Boucler la boucle - Un plan d'action de l'Union européenne en faveur de l'économie circulaire*. Tiré de : <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52015DC0614&from=EN>

van Oorschot, A. et van Ratingen, B. (2015). *Circular economy: DSGC companies on their journey of implementing circular business models*, The Dutch Sustainable Growth Coalition (DSGC).

## ANNEXE A - LISTE COMPLÈTE DES STRATÉGIES DE CIRCULARITÉ

Pour plus de détails sur les stratégies, le lecteur est invité à consulter le rapport intitulé « MÉTAUX ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE AU QUÉBEC – Rapport de l'étape 2 : Synthèse des meilleures pratiques de circularité pour le cuivre, le fer et le lithium ».

**Tableau A-1 : Stratégies de circularité répertoriées dans la littérature**

| ÉTAPE / PRODUIT   | NO | STRATÉGIE(S)  |
|---|----|---|
| <b>Stratégies de circularité communes aux métaux et aux produits contenant les métaux</b> |    |   |
| Extraction  | 1  | 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)   |
|   | 3  | Recyclage des résidus et stériles miniers<br>Utilisation des stériles miniers comme agrégats (ex. Les Minéraux Harsco, Contrecœur)  |
|   | 4  | Mines urbaines (urban mining) : récupération des métaux disponibles en milieu urbain  |
|   | 5  | Exploitation de lieux d'enfouissement (landfill mining) : récupération des métaux dans les lieux d'enfouissement  |
|   | 6  | Réemploi, réparation, reconditionnement et location d'équipements d'extraction ; offre d'équipements usagés (ex. : Caterpillar)   |
|   | 7  | Reconditionnement ou recyclage des équipements d'extraction laissés sous terre  |
|   | 8  | Économie de partage de pièces et équipements nécessaires en cas de bris, pour les mines d'un même territoire ou d'une même compagnie  |
| Métallurgie primaire  | 9  | Location de la matière métallique   |
|   | 10 | Recyclage et symbiose industrielle pour les laitiers (scories) et les boues anodiques<br><u>Exemples :</u><br>Laitiers utilisés pour routes, remblais, béton, amendements agricoles (ex. : ArcelorMittal, Contrecœur)<br>Utilisation des laitiers comme amendement agricole et agrégat (ex. : Les Minéraux Harsco, Contrecœur)<br>Séquestration de CO <sub>2</sub> avec les sous-produits de l'industrie métallurgique (ex. : CTTÉI, Sorel-Tracy)<br>Céramiques de stockage d'énergie thermique à partir des laitiers (ex. : Eco-Tech Ceram, France)<br>Récupération des métaux (précieux) dans les boues anodiques (ex. : Affinerie CCR, Montréal-Est) |
| Transformation métallique et fabrication  | 11 | Écoconception des produits : minimisation des alliages et des usages dispersifs, produits durables, réparables, recyclables   |
|   | 12 | Impression 3D : fabrication de pièces métalliques optimisant le processus de fabrication et stimulant la réparation   |
|   | 13 | Économie de fonctionnalité : vente de l'usage du produit plutôt que du produit lui-même   |

| ÉTAPE / PRODUIT  | NO | STRATÉGIE(S)  |
|--|----|---|
| Utilisation  | 14 | Atelier de réparation d'objets par les usagers (ex. : Repair Café, 29 pays)   |
|  | 15 | Échange d'objets et d'outils entre particuliers<br>Exemples :<br>Bibliothèque d'outils – dons et locations par les membres (ex. : La Remise, Montréal)<br>Plateforme de location de produits et services entre particuliers (ex. : Maxloc, Québec)<br>Plateforme gratuite d'échange d'objets entre particuliers (Mutum, France) |
| Fin de vie   | 16 | Recyclage des métaux (ex. : Fonderie Horne, ArcelorMittal, AIM)   |
|  | 17 | Recyclage des alliages : organiser des filières de récupération et des applications dans lesquelles les alliages conservent leur fonction, R&D pour défaire les alliages  |
|  | 18 | Recyclage des usages dispersifs ou de faible concentration : applications dans lesquelles les usages conservent leur fonction   |
| <b>Stratégies de circularité propres aux produits contenant les métaux</b> |    |   |
| Fils et câbles électriques   | 19 | Écoconception de fils modulaires pour en faciliter le réemploi ou le recyclage  |
|  | 20 | Recyclage de câbles et fils (ex. : Nexans et Recycâbles, France)  |
| Électroménagers (petits et gros)   | 21 | Mise en marché de petits électroménagers réparables (ex. : Seb, France)   |
|  | 22 | Économie de fonctionnalité pour les électroménagers   |
| Équipements mécaniques et industriels                                      | 23 | Modularité des procédés industriels, facilitant le réemploi des équipements   |
| Téléphones mobiles et ordinateurs portables                                | 24 | Écoconception de téléphones mobiles (ex. : Fair Phone, Pays-Bas ; PuzzlePhone, Finlande)  |
|  | 25 | Portail de réparation de téléphones intelligents et tablettes (ex. : Oureparer.com, France)   |
|  | 26 | Rachat de téléphones usagés (ex. : Vodafone et Mazuma, Royaume-Uni)   |
|  | 27 | Vente du service de téléphonie plutôt que du téléphone  |
|  | 28 | Reconditionnement et réemploi des ordinateurs (ex. : Insertech Angus, Montréal)   |
|  | 29 | Recyclage des téléphones mobiles et ordinateurs portables   |
| Bâti (bâtiments et infrastructures)  | 30 | Écoconception des poutres en acier permettant leur réemploi   |
|  | 31 | Entretien des bâtiments et remise en état de bâtiments existants  |
|  | 32 | Plateforme pour l'usage temporaire et transitoire des bâtiments vacants (ex. : Entremise, Montréal)   |
|  | 33 | Déconstruction sélective (ex. : déconstruction des édifices, Japon ; échangeur Turcot, Montréal ; recyclage de fenêtres par Saint-Gobain, France)   |

| ÉTAPE / PRODUIT   | NO | STRATÉGIE(S)  |
|---|----|---|
| Véhicules (voitures, camions, autobus, transport maritime, ferroviaire, aérien) | 34 | Écoconception des véhicules (ex. : véhicules plus légers et résistants, ArcelorMittal ; voiture modulaire eMOC, Barcelone)  |
|   | 35 | Utilisation du fer comme combustible (ex. : batterie aluminium-air de Phinergy, Israël)   |
|   | 36 | Économie de partage dans les transports<br>Transport en commun  |
|   |    | Plateforme de covoiturage (ex. : Amigo Express, Québec ; Blablacar, France)<br>Service d'autopartage (ex. : Communauto, Auto-Mobile, Québec)<br>Location de voitures entre usagers (ex. : Getaround, Turo, ZipCar, États-Unis ; CarNextDoor, Australie) |
|   |    | Service d'autopartage par le manufacturier (ex. : Car2Go, Québec)<br>Location de trains d'atterrissage (ex. : Héroux-Devtek, Longueuil)<br>Location de moteurs (ex. : Pratt & Whitney, Longueuil)   |
|   | 37 | Conversion de véhicules à essence en véhicules électriques (ex. : GranTuned, Montréal)  |
|   | 38 | Programme de reprise des véhicules (ex. : Renault, France)  |
|   |    | Démantèlement et recyclage de trains (ex. : Veolia, France)<br>Recyclage des automobiles (ex. : Total Métal Récupération, Laval)  |
| Batteries Li-ion  | 40 | Stockage d'énergie avec des batteries Lithium-ion usagées provenant de véhicules électriques  |
|   | 41 | Recyclage des batteries Lithium-ion (ex. : Retrieval Technologies, Colombie-Britannique ; Xtrata – Glencore, Ontario; Recupyl, Singapour; Umicore, Belgique)  |

## ANNEXE B – FICHES-RÉSUMÉS DES STRATÉGIES DE CIRCULARITÉ

## DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE POUR UNE EXTRACTION PLUS EFFICACE (1)

**Description :** L'adoption de technologie de pointe (ex. foreuses intelligentes, capteurs, camions automatisés, etc.) permet une réduction des coûts et l'optimisation de l'extraction minière. Elle permettrait par exemple de prolonger la vie de mines existantes. 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.

**Potentiel de circularité (faible) :** Cette stratégie ne vise pas directement la circularité des métaux, mais plutôt l'optimisation des opérations d'extraction. L'adoption de nouvelles technologies peut même conduire à extraire davantage dans certaines mines.

**Faisabilité technico-économique (forte) :** Les résultats de la modélisation de l'implantation de camions automatisés montrent que malgré des coûts d'investissement plus élevés, cette stratégie est optimale économiquement. Cependant, cet investissement supplémentaire initial peut s'avérer dissuasif pour les plus petites entreprises qui démarrent ou pour celles dont les camions conventionnels sont encore bons.

**Risque de déplacement d'impacts :** non évalué

### Principaux acteurs d'implantation

- Entreprises minières
- Cégeps, universités et centres de recherche
- Fournisseurs d'équipements
- Firmes de consultants

### Principaux freins et leviers à l'implantation

| Freins  | Leviers  |
|---|--|
| Délocalisation et perte d'emplois, disponibilité limitée d'une main-d'œuvre qualifiée | Économie d'énergie et de temps, réduction des GES, réduction des risques d'accident et meilleure rentabilité                                 |
| Changement de culture organisationnelle et résistances aux changements                | Prolongation de la durée de vie des mines souterraines   |
| Sécurité des travailleurs en jeu, en présence d'équipements automatisés               | Réouverture d'anciennes mines  |
| Manque d'interopérabilité des systèmes de traitement de données                       | Normes et réglementations environnementales  |
| Disponibilité des données à accroître   | Formation de la relève et du personnel en fonction   |
| Enjeu de cybersécurité  | Maintien et renforcement des rabais sur les tarifs d'électricité et des programmes gouvernementaux d'efficacité énergétique et de conversion |
| Automatisation plus difficile et dispendieuse dans les mines existantes               | Recherche et développement   |
|   | Adoption d'un code de gestion de risques (ex. : Australie)   |
|   | Perspective globale d'amélioration des procédés et de génie industriel en faisant appel à des firmes de consultants                          |

## ENTREPOSAGE ADÉQUAT DES RÉSIDUS MINIERES POUR UNE EXTRACTION ULTÉRIEURE (2)

**Description :** Les résidus miniers 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.

**Potentiel de circularité (moyen) :** Il est difficile de quantifier le potentiel de circularité réel de cette stratégie. Cela nécessiterait de connaître entre autres la quantité de résidus miniers existants au Québec, leurs compositions et leurs potentiels de récupération. Néanmoins, il est possible d'affirmer qu'il en existe un, notamment en considérant l'extraction de minerais autre que celui à l'origine des activités minières initiales.

**Faisabilité technico-économique (moyenne) :** Les faibles coûts d'opération après investissement initial de la technologie de récupération des métaux dans les résidus miniers considérée, c.-à-d. la biolixiviation, pourraient faire en sorte que ces approches soient économiquement optimales, surtout pour les métaux qui ont une valeur importante sur les marchés. Il est cependant difficile de se prononcer de manière générale.

**Risque de déplacement d'impacts :** non évalué

### Principaux acteurs d'implantation

- MERN
- MDDELCC
- Écotech Québec
- Entreprises minières
- Firmes de consultants qui conçoivent les aires d'accumulation
- Fournisseurs de technologies
- Universités et les centres de recherche (ex. : Centre technologique des résidus industriels)

### Principaux freins et leviers à l'implantation

| Freins  | Leviers  |
|---|--|
| Obstacle financier : investissements importants en restauration, coûts de traitement des résidus vs valeur du minerai<br>Stabilité géotechnique et chimique des aires d'accumulation de résidus en contradiction avec l'entreposage pour un traitement ultérieur<br>Défis techniques pour récupérer le minerai ainsi que pour classer et déplacer les résidus<br>Perception des résidus miniers comme des déchets | Coordination interministérielle pour l'arrimage des réglementations sur la gestion des résidus miniers<br>Ententes de partenariat pour le traitement des résidus miniers dans les sites miniers abandonnés<br>Ajout d'une section portant sur la valorisation des résidus miniers dans le Guide de restauration <sup>16</sup><br>Information, sensibilisation et éducation des entreprises minières<br>Incitatifs économiques (ex. : fiscaux, crédits, subventions, tarifs réduits de transport)<br>Normes plus strictes sur les effluents miniers<br>Développement technologique pour la traçabilité, le déplacement et le traitement des résidus miniers ; programmes d'aide en innovation<br>Pression sociale et image d'entreprise |

<sup>16</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)

## MINES URBAINES (3)

**Description :** 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). L'utilisation de ces stocks peut constituer une alternative à l'extraction conventionnelle des minerais sous terre.

**Potentiel de circularité (fort) :** Certes, le potentiel des mines urbaines comme gisements de métaux est très intéressant, et d'autant plus à long terme, mais il est difficile à évaluer. Par ailleurs, les modèles d'estimation des flux et des stocks de cuivre ne sont pas encore abondamment utilisés en raison du manque de données.

**Faisabilité technico-économique (faible) :** La pertinence économique de cette stratégie, par rapport à l'extraction conventionnelle, reste à démontrer. Plus les techniques de recyclage sont complexes, plus elles sont coûteuses et l'exploitation des gisements urbains de métaux pose de nombreux défis en ce sens : dissémination géographique, composition physico-chimique, évolution des quantités et qualités, etc. Cependant, le développement technologique et l'augmentation du coût des métaux pourraient changer la situation.

**Risque de déplacement d'impacts :** non évalué

### Principaux acteurs d'implantation

- MDDELCC
- RECYC-QUÉBEC
- Associations de récupérateurs et recycleurs
- Fabricants et concepteurs de produits contenant des métaux
- Universités et centres de recherche

### Principaux freins et leviers à l'implantation

| Freins   | Leviers  |
|--|--|
| Caractérisation difficile des gisements : quantités mises en marché, composition et durée de vie | Soutien à la recherche pour documenter les gisements et les modèles économiques                                |
| Acier, cuivre et lithium principalement en usage   | Internet des objets pour une meilleure traçabilité des produits et leurs métaux                                |
| Propriété et considérations légales  | Proximité des entreprises de recyclage avec leurs sources de matières secondaires                              |
| Coûts  | Modification aux lois et règlements pour permettre la récupération de produits ou d'infrastructures abandonnés |
| Évolution des produits vs retour sur l'investissement des recycleurs                             | Subventions aux entreprises de recyclage   |
|  | Étude prospective sur les besoins en métaux  |

## FABRICATION ADDITIVE (5)

**Description :** La fabrication additive, aussi connue sous le nom d'impression 3D, permet d'utiliser uniquement le matériel nécessaire, d'imprimer des pièces complexes sans avoir à recourir à toute la machinerie caractéristique des procédés manufacturiers conventionnels et de faciliter la réparation de pièces métalliques par fusion au laser ou à l'aide de poudres métalliques.

**Potentiel de circularité (fort) :** Le potentiel est probablement très important, mais il est difficile de quantifier les impacts globaux au Québec étant donné la grande variété de secteurs, de pièces et de compositions qu'il est possible de considérer. Il est d'autant plus élevé que le taux d'utilisation est encore faible : seulement 0.7 % des entreprises en général utilisaient la fabrication additive et l'impression 3D pour les métaux en 2014 (ISQ, 2016). En plus des économies de métaux vierges, les technologies de fabrication additive ont un rôle à jouer pour aider la société à atteindre ses objectifs de sécurité énergétique et de réduction des émissions de GES. Plusieurs études de cas démontrent les économies d'énergies associées à la réduction du poids des pièces dans l'aéronautique par exemple. L'exercice de modélisation appliquée au cas du Québec indique les mêmes conclusions.

**Faisabilité technico-économique (forte) :** De manière globale pour la société, les économies d'énergie et les réductions importantes de GES qu'il est possible d'envisager font en sorte que la stratégie de fabrication additive soit optimale économiquement. Des gains potentiels sur les coûts de production de 50 %-80 % dans certains cas sont possibles ; les gains sont d'autant plus importants que la complexité de la pièce est grande. Cependant, les coûts d'investissement importants sont dissuasifs pour les plus petites entreprises, mais avec la diffusion des technologies sur le marché, les coûts sont amenés à diminuer.

**Risque de déplacement d'impacts :** non évalué

### Principaux acteurs d'implantation

- Universités et centres de recherche, notamment le CRIQ
- Centres collégiaux de transfert de technologie
- Grandes entreprises du secteur manufacturier
- Fournisseurs de pièces
- Fournisseurs de poudres métalliques
- Syndicats
- BNQ

### Principaux freins et leviers à l'implantation

| Freins  | Leviers   |
|---|---|
| <p>Normalisation et certification</p> <p>Coût élevé des équipements d'impression</p> <p>Difficulté pour les entreprises d'obtenir du financement</p> <p>Pas adaptée à toutes les applications et à la production de masse</p> <p>Limites de répétabilité</p> <p>Manque de main-d'œuvre spécialisée</p> <p>Ignorance des entreprises sur l'impression 3D de métaux</p> <p>Inertie dans le secteur manufacturier</p> <p>Perte d'emplois</p> | <p>Formation académique (ex. : bacc. en mécatronique) et continue, incitatifs aux entreprises pour la formation</p> <p>Programmes de financement ou incitatifs fiscaux pour l'achat ou la mutualisation d'achat d'imprimantes 3D</p> <p>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.</p> <p>Choix de matériaux imprimables à accroître</p> <p>Diminution du coût des équipements</p> <p>Adaptation des normes</p> <p>Mobilisation par secteur d'activités s'appuyant sur des cas appliqués</p> |

## MODULARITÉ DES ÉQUIPEMENTS MÉCANIQUES ET INDUSTRIELS (9)

**Description :** Les équipements mécaniques et industriels, contenant pour la plupart du fer et du cuivre, comprennent notamment les machines et appareils pour la production du froid, l'emballage, le levage, le chargement/déchargement, 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.

**Potentiel de circularité (faible) :** La pertinence environnementale de la modularité est évidente, cependant, il n'existe aujourd'hui qu'une très faible littérature quantitative sur son utilisation ou ses avantages.

**Faisabilité technico-économique (moyen) :** Il n'y a pas suffisamment d'information pour se prononcer à cet effet. Cette technologie est cependant déjà présente au Québec pour plusieurs équipements, ce qui laisse supposer que sa faisabilité est moyenne ou forte.

**Risque de déplacement d'impacts :** non évalué

### Principaux acteurs d'implantation

- Fabricants et fournisseurs d'équipements
- Consultants spécialisés en génie industriel
- Industries
- Courtiers d'achat et de vente d'équipements
- Organismes de normalisation
- Designers et spécialistes en écoconception (dont l'institut de développement de produits)
- EnviroCompétences

### Principaux freins et leviers à l'implantation

| Freins  | Leviers  |
|---|--|
| Effondrement d'un secteur industriel<br>Miniaturisation qui rend désuets des équipements<br>Équipements spécialisés et dédiés<br>Normes et spécifications<br>Carence de formation en écoconception<br>Financement insuffisant pour l'achat de produits de qualité par les usagers | Fabricants et fournisseurs : <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> Industries : <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> Autres : <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</li> <li>• Incitatifs fiscaux encourageant l'adaptation, la réparation ou la remise à neuf</li> </ul> |

## ÉCOCONCEPTION DES POUTRES EN ACIER PERMETTANT LEUR RÉEMPLOI (10)

**Description :** Beaucoup de fer (acier) est utilisé dans la construction des bâtiments ou des infrastructures. L'écoconception des poutres en acier est avancée dans une optique de réemploi. Cela implique notamment l'utilisation de raccords vissés plutôt que soudés pour permettre le démontage, l'utilisation de connexions standards, etc.

**Potentiel de circularité (moyen) :** Incertain, mais il apparaît intéressant, puisque cette stratégie permet d'augmenter le réemploi de l'acier. Elle est également pertinente d'un point de vue environnemental.

**Faisabilité technico-économique (faible) :** La réutilisation de poutres présente des freins économiques très importants. Le marché des structures métalliques est un marché international très compétitif et le Québec est en concurrence avec de gros joueurs. Avec cette compétitivité, il est difficile d'ajouter une nouvelle variable environnementale dans les projets de structures métalliques.

**Risque de déplacement d'impacts :** non évalué

### Principaux acteurs d'implantation

- Donneurs d'ouvrage
- Firmes d'ingénierie
- Fabricants de poutres d'acier
- Designers
- ICCA
- Conseil national de recherches du Canada (Code national du bâtiment)
- Conseil du bâtiment durable du Canada (certification LEED)

### Principaux freins et leviers à l'implantation

| Freins  | Leviers   |
|---|---|
| <p>Règle du plus bas soumissionnaire limitant l'innovation et la qualité</p> <p>Augmentation possible du coût de l'acier par rapport à d'autres matériaux sans exigence de réemploi</p> <p>Temps et main-d'œuvre pour le montage et le démontage nuisant à la rentabilité</p> <p>Normes du Code du bâtiment : intégrité de la poutre et coefficient de sécurité, exigence d'acier neuf dans la construction</p> <p>Faible disponibilité des poutres d'acier usagées</p> <p>Fin de vie des poutres n'étant pas une préoccupation pour les fabricants</p> | <p>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</p> <p>Développement de standards de concert avec tous les acteurs</p> <p>Crédits à la déconstruction</p> <p>Qualité à mettre davantage au-devant dans les critères d'évaluation des soumissions</p> <p>Rareté de l'acier pouvant entraîner les fabricants à garder la mainmise sur leurs poutres</p> <p>Conditions ambiantes propices à l'intégrité des poutres</p> <p>Poutres conçues pour durer et pour être démontées (ex. : systèmes d'attaches)</p> |

## DÉCONSTRUCTION SÉLECTIVE DES BÂTIMENTS ET INFRASTRUCTURES (11)

**Description :** La déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures 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. Cette méthode permet principalement d'augmenter le réemploi de pièces de fer, le cuivre étant plutôt recyclé comme lors de la démolition.

**Potentiel de circularité (fort) :** La déconstruction sélective permet d'augmenter le rapport entre emploi et recyclage comparativement à la démolition. Plusieurs exemples démontrent cette affirmation. Bien que cette stratégie ne contribue pas à changer la quantité de métaux récupérés au final, elle est pertinente du point de vue de l'économie circulaire.

**Faisabilité technico-économique (faible) :** Suivant la revue de la littérature, il est possible d'affirmer que cette stratégie n'est pas économiquement optimale. En effet, le salaire d'un employé dans la démolition d'un bâtiment équivaut à entre trois et six fois le salaire d'un employé engagé pour la déconstruction sélective du même bâtiment. De plus, d'après une étude de cas québécoise, le temps de déconstruction d'un bâtiment est trois fois plus grand que celui nécessaire à une démolition traditionnelle. Par ailleurs, les matériaux extraits sur place doivent être triés et envoyés sur les sites adéquats par types de contenus : cela ajoute du temps et des frais de transport.

**Risque de déplacement d'impacts :** non évalué

### Principaux acteurs d'implantation

- Regroupement des Récupérateurs et des Recycleurs de Matériaux de Construction et de Démolition du Québec (3RMCDQ)
- RECYC-QUÉBEC
- Conseil du bâtiment durable du Canada - Québec
- Écohabitation
- Écobâtiment
- Ordre des architectes du Québec
- RénoCyclage
- Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec (APCHQ)
- Association de la construction du Québec (ACQ)
- Corporation des entrepreneurs généraux du Québec (CEGQ)
- Commission de la construction du Québec (CCQ)
- Syndicats
- Entrepreneurs en déconstruction (ex. : Pomerleau, Panzini)
- EnviroCompétences
- MDDELCC
- MESI
- Entreprises de réemploi de matériaux
- Municipalités
- Gestionnaires d'écocentres (municipalités)

## Principaux freins et leviers à l'implantation

| Freins   | Leviers  |
|--|--|
| <p>Réglementation et décret de la construction : seuils salariaux élevés</p> <p>Marché des matériaux usagés : dimensions non standards</p> <p>Marché de réemploi des matériaux peu structuré, mise en marché déficiente, jonction offre/demande aléatoire et peu conviviale</p> <p>Statut de « matières résiduelles » aux matériaux récupérés sur chantiers, même à des fins de réemploi</p> <p>Bas tarifs à l'élimination</p> <p>Réticence des entrepreneurs à modifier leurs habitudes</p> | <p>Allègement de la réglementation pour la déconstruction (ex. : nouvelles catégories de corps de métiers)</p> <p>Création d'emplois et réinsertion sociale</p> <p>Volonté des entrepreneurs de faire les choses autrement, logistique de ségrégation des matériaux avec des conteneurs</p> <p>Bannissement des métaux des lieux d'élimination</p> <p>Programme de financement pour le démarrage d'entreprises de déconstruction</p> <p>Mission entrepreneuriale en déconstruction</p> <p>États généraux sur la déconstruction</p> <p>Modèle caritatif pour les entreprises de déconstruction (reçu de charité déductible d'impôts pour les propriétaires donnant leurs matériaux)</p> <p>Incidatifs municipaux : crédits d'impôts, rabais, gratuité à l'enfouissement des résidu, délivrance rapide de permis de déconstruction</p> <p>Réseau structuré de réemploi des matériaux : inventaire, entreposage (intérieur), commercialisation, plateformes</p> |

## AUTOPARTAGE (12A)

**Description :** Issu du concept d'économie de partage, le service d'autopartage de véhicules consiste à instaurer au sein d'un territoire une flotte de véhicules qu'il est possible d'emprunter pour de courtes périodes. Ce service est particulièrement écologique, car il donne la possibilité aux membres d'utiliser une voiture ponctuellement, sans le besoin d'en posséder une. Cela permet ainsi de réduire le nombre de véhicules produits et achetés. Par conséquent, des économies de fer, de cuivre et, dans le cas des voitures électriques, de lithium sont possibles grâce à cette stratégie.

**Potentiel de circularité (faible) :** Son potentiel faible devient plus important en considérant que tous les types de véhicules peuvent être partagés ou encore dans un contexte de politique climatique et/ou d'électrification. Elle contribue à diminuer le nombre de véhicules sur les routes.

**Faisabilité technico-économique (moyen) :** La stratégie est économiquement optimale.

**Risque de déplacement d'impacts (bénéfice environnemental attendu) :** La stratégie sur l'autopartage de véhicules affiche un potentiel de circularité impliquant une amélioration de l'indicateur *Ressources minérales*. L'analyse a permis de conclure que l'implantation de la stratégie n'implique pas un déplacement d'impact environnemental vers d'autres indicateurs, mais plutôt une tendance à l'amélioration.

### Principaux acteurs d'implantation

N/D

### Principaux freins et leviers à l'implantation

N/D

## ÉCOCONCEPTION DES VÉHICULES – MATÉRIAUX PLUS LÉGERS (12)

**Description :** Les véhicules routiers, ainsi que les trains, les bateaux et les avions, contiennent pour la majorité du fer (carrosserie en acier), du cuivre (moteur, filage) et dans le cas des véhicules électriques, du lithium (batterie). L'écoconception réfère aux éléments suivants : légèreté et résistance, démontabilité, modularité, facilité de réparation, recyclabilité et faible consommation énergétique.

**Potentiel de circularité (fort) :** L'effet de la substitution des métaux avec le remplacement d'une portion d'acier par de l'aluminium contribue davantage à la circularité de l'acier que, par exemple, l'autopartage.

**Faisabilité technico-économique (forte) :** La stratégie est économiquement optimale. Sa rentabilité est reliée aux économies d'énergie.

**Risque de déplacement d'impacts (nul, bénéfique à long terme) :** La stratégie sur l'utilisation de matériaux plus légers affiche un potentiel de circularité impliquant une amélioration de l'indicateur *Ressources minérales* si les effets liés aux variations des exportations sont exclus. L'analyse a permis de conclure que l'implantation de la stratégie peut impliquer des déplacements d'impacts dus aux effets indirects des exportations, notamment pour l'indicateur *Ressources énergétiques*. Cela dit, un bénéfice environnemental est attendu à long terme.

### Principaux acteurs (écoconception de véhicules en général)

- Gouvernements fédéral, provincial et municipal
- Constructeurs de véhicules québécois
- Sociétés publiques de transport
- Concessionnaires
- Gouvernements fédéral, provincial et municipal
- Industrie du démantèlement et du recyclage des véhicules
- Organisations spécialisées en écoconception (ex. : Institut du véhicule innovant, Centre de technologies avancées BRP – Université de Sherbrooke)

### Principaux freins et leviers (écoconception de véhicules en général)

| Freins  | Leviers   |
|---|---|
| <p>Constructeurs automobiles se limitant à leurs obligations</p> <p>Pas d'effet de levier pour le Québec qui est un petit marché</p> <p>Constructeurs peu motivés à construire des véhicules électriques : pas assez de revenus, modification des procédés, dépendance pour la batterie</p> <p>Concessionnaires qui encouragent les véhicules automobiles à essence pour le service après-vente (revenus)</p> <p>Contraintes sur l'écoconception pas assez agressive dans les appels d'offres (ex. : autobus et camions)</p> <p>Résistances, pressions et menaces des constructeurs automobiles en cas d'ingérence de l'État</p> <p>Lobby pétrolier</p> <p>Résistance au changement des consommateurs</p> | <p>Incitatifs gouvernementaux (municipal, provincial, fédéral) pour encourager les véhicules électriques (financement, voies réservées, stationnements gratuits)</p> <p>Loi VZE du Gouvernement du Québec qui oblige les constructeurs automobiles à respecter une cible annuelle de vente de VZE</p> <p>Directive européenne rendant les constructeurs responsables de la fin de vie de leurs véhicules et qui fixe des règles d'écoconception</p> <p>Compétitivité chez les constructeurs</p> <p>Programmes d'aide du MTMDDET favorisant la durabilité des autobus publics et l'électrification des autobus scolaires</p> <p>Augmentation du coût de l'essence</p> <p>Écart important entre le prix de l'essence et le prix de l'électricité (faible en émissions GES) au Québec</p> <p>Information, sensibilisation et éducation des consommateurs</p> |

## STOCKAGE D'ÉNERGIE AVEC DES BATTERIES LITHIUM-ION USAGÉES (13)

**Description :** Quand les batteries de véhicules hybrides et électriques parviendront à la fin de leur vie, 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 ou de faible production, notamment dans le contexte d'énergies solaire et éolienne.

**Potentiel de circularité (fort) :** Pourrait être important dans un contexte d'électrification des transports. Cependant, les besoins de stockage en milieu décentralisés sont limités.

**Faisabilité technico-économique (moyenne) :** Le coût des systèmes de stockage avec batteries usagées devra évoluer pour atteindre des niveaux nettement inférieurs à ceux des systèmes avec batteries neuves pour être compétitif, étant donné la durée de vie moindre.

**Risque de déplacement d'impacts (risque présent) :** Dans un contexte québécois, l'implantation de la stratégie peut impliquer des déplacements d'impacts sur les ressources minérales dus à la fabrication de panneaux photovoltaïques additionnels, la forte pénétration de l'énergie solaire sur les marchés étant une condition nécessaire à sa faisabilité dans le scénario étudié. Des risques de déplacement d'impact sont également identifiés pour les autres indicateurs dus à des effets indirects.

### Principaux acteurs

- Fournisseurs de batteries usagées (ex. : ARPAC)
- Hydro-Québec, IREQ
- Centres de recherche universitaires
- Écotech Québec
- Fabricants de batteries (ex. : Solutions Bleues)
- MERN
- Entreprises actives dans le stockage d'énergie
- MTMDDET
- Entreprises de systèmes de production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelable
- MESI

## Principaux freins et leviers

| Freins  | Leviers  |
|---|--|
| <p>Transport des batteries usagées : coût et normes</p> <p>Réglementation pouvant limiter l'emploi de batteries usagées</p> <p>Système informatique (logiciel) complexe à développer avec des batteries variables</p> <p>Normes de sécurité différentes pour le bâtiment et le réseau de distribution</p> <p>Sécurité (incendie)</p> <p>Froid</p> | <p><b>Projet ELSA (Europe) :</b></p> <p>Subventions gouvernementales</p> <p>Réponse au manque de débouchés pour les batteries usagées (difficulté de recycler)</p> <p>Marché suffisant de batteries usagées</p> <p>Évolution de la réglementation pour permettre ce type d'application</p> <p>Exigences de stockage dans les appels d'offres de certains pays européens</p> <p>Financement pour le stockage (ex. : Allemagne)</p> <p>Prix compétitif par rapport à un système de stockage avec des batteries neuves</p> <p>Subventions des gouvernements et des villes pour la R&amp;D sur le stockage</p> <p>Électrification des transports</p> <p>Économies d'électricité, énergies renouvelables favorisées, coupures d'électricité évitées, création d'emplois</p> <p><b>Québec :</b></p> <p>Communautés isolées et entreprises minières en régions éloignées, étant propices à des applications de stockage</p> <p>Énergie solaire et éolienne en développement</p> <p>Études de faisabilité économique, de vieillissement des batteries, de modélisation, de simulation, analyse technico-économique</p> <p>Économie de fonctionnalité chez les fabricants de batteries pour un meilleur suivi des batteries</p> <p>Intégration des surplus d'énergie au réseau d'Hydro-Québec et intégration de systèmes de stockage de grande capacité dans son réseau</p> |

## RÉCUPÉRATION DES MÉTAUX PRÉCIEUX DES BOUES ANODIQUES (4A)

**Description :** Les raffineries de cuivre produisent des boues dites « anodiques ». Par électrolyse, le cuivre non pur sous forme de grandes plaques appelées anodes est dissous dans un électrolyte liquide laissant derrière lui les impuretés. Celles-ci sont récupérées sous forme de boues. Elles contiennent des éléments précieux tels que l'or, l'argent, le platine et le palladium, ainsi que du tellure et du sélénium, des éléments qui peuvent être séparés, contribuant à la valorisation des boues. Cette pratique est bien implantée au Québec.

**Potentiel de circularité (faible) :** Cette stratégie est déjà en place au seul endroit possible au Québec, l'Affinerie CCR à Montréal-Est. Il n'y a donc pas beaucoup de possibilités de faire mieux, seulement de faire plus. De plus, elle ne contribue pas directement à la circularité du cuivre lui-même, mais elle favorise un meilleur rendement de l'industrie. La manière d'augmenter le potentiel de récupération des métaux serait d'augmenter l'importation de boues anodiques. L'avantage est que peu de joueurs de l'industrie du cuivre détiennent cette option de traitement et l'Affinerie CCR reçoit des boues anodiques d'autres raffineries en Amérique du Nord et d'ailleurs dans le monde. De plus, la compagnie Glencore possède déjà une flotte de navires et un réseau de transport à cet effet.

**Faisabilité technico-économique (forte) :** Il est reconnu que les boues anodiques bénéficient d'un intérêt économique pour leur contenu en métaux précieux. À partir des dépenses annuelles de l'affinerie CCR et du prix moyen des métaux récupérés sur le marché, il est possible de voir par un calcul très simple que cette activité est rentable. En effet, les prix de l'or et de l'argent font en sorte qu'un revenu important peut être obtenu avec la vente des quantités récupérées. Ce calcul ignore cependant les investissements initiaux qui ont été nécessaires pour mettre en place toute l'infrastructure de traitement des boues anodiques et de récupération des métaux. Ces informations sont manquantes. L'affinerie CCR se démarque d'autant plus par sa capacité à traiter des boues complexes qui lui assure une meilleure rentabilité par rapport aux concurrents.

**Risque de déplacement d'impacts :** non évalué

### Principaux acteurs d'implantation

- Affinerie CCR
- Fonderie Horne
- Entrepreneurs qui font l'entretien des équipements
- Fournisseurs d'équipements spécialisés
- Universités et les centres de recherche
- Environnement Canada
- Ministères des Transports fédéral et provincial

### Principaux freins et leviers à l'implantation

| Freins   | Leviers  |
|--|--|
| Normes de transport contraignantes (matières dangereuses)<br>Procédés d'électro-affinage et de traitement des boues soumis à des défis à cause de la variabilité des anodes et des boues importées | Rentabilité souhaitable, liée à la conversion des procédés au gaz naturel par l'hydroélectricité (crédits de carbone)<br>Avenues réglementaires pour faciliter le transport des boues anodiques et l'obtention de permis d'importation<br>Investissement dans la R&D |

## RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE DES LAITIERS (4B)

**Description :** Les aciéries produisent des laitiers, aussi appelés des scories. Ils sont composés principalement de chaux, de silice et d'oxyde de fer. Il s'agit d'une couche poreuse flottant au-dessus de l'acier en fusion. Leur température est donc très élevée : au-delà de 1500 °C. À leur sortie du procédé, ils peuvent fournir de la chaleur pour la production d'électricité.

**Potentiel de circularité (faible) :** Cette stratégie ne contribue pas directement à la circularité du fer lui-même, mais elle favorise un meilleur rendement de l'industrie. Le potentiel est limité par la quantité de laitiers produits ainsi que le faible taux de récupération de l'énergie. De plus, la pertinence de réduire les GES est moindre au Québec, où l'électricité produite est déjà renouvelable.

**Faisabilité technico-économique (moyen) :** La récupération d'énergie des laitiers d'aciérie ne constitue pas une pratique courante en raison des difficultés de mise en œuvre et des perspectives économiques peu intéressantes, mais l'augmentation de la demande d'électricité et les incitatifs pour une production à partir des énergies renouvelables pourraient globalement contribuer à l'essor de cette filière dans les prochaines années. L'estimation des coûts pour un cas du Québec, avec possibilité de vendre l'électricité à Hydro-Québec, démontre que l'utilisation des laitiers à des fins énergétiques peut engendrer des profits nets. Cependant, au Québec, où les tarifs d'électricité sont peu élevés et l'électricité déjà renouvelable, il y a cependant moins de valeur ajoutée qu'ailleurs. Enfin, les laitiers ne peuvent pas être transportés sur de longues distances, car leur température diminuerait et ils ne seraient plus exploitables. Cette technologie doit donc se situer sur les lieux de la métallurgie primaire, et par conséquent, sa taille sera limitée par les capacités des aciéries individuelles.

**Risque de déplacement d'impacts :** non évalué

### Principaux acteurs d'implantation

- Aciéries
- Centres de recherche
- CTTÉI
- Acteurs de la chaîne de valeur qui sont au fait des marchés
- Médiateurs externes (pour développer les synergies)
- Organisations œuvrant au développement économique
- Bailleurs de fonds (banques)
- Ministères (ex. : MDDELCC) pour les normes et les certificats d'autorisation

**Principaux freins et leviers à l'implantation (pour les synergies de valorisation des laitiers)**

| Freins   | Leviers  |
|--|--|
| <p>Perception négative par rapport à la matière recyclée</p> <p>Définition de « matière résiduelle » qui limite la valorisation et l'innovation</p> <p>Défis techniques pour trouver des débouchés</p> <p>Rentabilité de la symbiose et concurrence avec la matière vierge</p> | <p>Aciéries : concurrence, rentabilité, acceptabilité sociale, GES, débouchés pour les rejets</p> <p>Démarchage pour attirer des entreprises près des aciéries</p> <p>Liens de confiance et collaboration entre les entreprises</p> <p>Investissement dans la R&amp;D</p> <p>Directives pour l'achat de produits à contenu recyclé par les donneurs d'ordre</p> <p>Sensibilisation des entreprises à la valorisation des sous-produits</p> <p>Médiateur externe pour convaincre les aciéries</p> <p>Formation des jeunes</p> <p>Programme de recrutement de stagiaires dans les aciéries pour travailler sur les résidus</p> |

## SÉQUESTRATION DU CO<sub>2</sub> À PARTIR DE LAITIERS (4C)

**Description :** Une fois broyés et tamisés, les laitiers sous forme d'agrégats sont actuellement utilisés de plusieurs façons, notamment en construction, comme remblais ou additifs, et en agriculture, comme amendements agricoles. Leur teneur en calcium en fait de bons candidats pour la séquestration de CO<sub>2</sub>, issu de l'aciérie elle-même ou d'une autre industrie, comme une cimenterie. Cette méthode consiste à faire réagir les laitiers avec ce gaz pour former un carbonate solide. Le CO<sub>2</sub> y est ainsi emprisonné et n'est donc pas émis dans l'atmosphère. Le produit de la réaction peut être entreposé ou servir pour la fabrication de matériaux de construction.

**Potentiel de circularité (moyen) :** Cette stratégie ne contribue pas directement à la circularité du fer lui-même, mais elle favorise un meilleur rendement de l'industrie. Cependant, elle est intéressante dans la mesure où elle peut contribuer à la diminution des émissions de GES du Québec. Un tel projet est à l'étude pour la valorisation des résidus de l'amiante au Québec au Centre de transfert technologique en écologie industrielle (CTTÉI), situé à Sorel-Tracy. Les 2 000 Mt de résidus générés pendant la période 1970-1980 permettraient de séquestrer 625 MtCO<sub>2</sub>. Par comparaison, la quantité maximale annuelle de CO<sub>2</sub> pouvant être séquestrée à partir des laitiers serait de 0,08 MtCO<sub>2</sub> aujourd'hui et de 0,4 MtCO<sub>2</sub> en 2050, étant limitée par la quantité de laitiers produits. Le potentiel est donc moins important pour ce type de résidus.

**Faisabilité technico-économique (forte) :** Dans le cas des résidus de mine d'amiante, l'étude de faisabilité a démontré qu'un tel projet était rentable, puisque la quantité de résidus est importante et que la vente du carbonate de magnésium représente un revenu financier important. Certes, les coûts d'opération varient passablement selon le mode de transport et le type d'énergie : les coûts sont moins élevés si la roche est transportée par train plutôt que par camion. Dans tous les cas cependant, les opérations sont rentables.

Dans le cas des laitiers, l'avantage est dû au fait que les laitiers sont disponibles à proximité de la source émettrice de CO<sub>2</sub>, ce qui minimise les coûts d'exploitation. De plus, le Québec dispose de sources d'électricité à faibles coûts et d'un prix sur le carbone.

**Risque de déplacement d'impacts :** non évalué

### Principaux acteurs d'implantation

- Aciéries
- Centres de recherche
- CTTÉI
- Acteurs de la chaîne de valeur qui sont au fait des marchés
- Médiateurs externes
- Organisations œuvrant au développement économique
- Bailleurs de fonds (banques)
- Ministères (ex. : MDDELCC) pour les normes et les certificats d'autorisation

**Principaux freins et leviers à l'implantation (pour les synergies de valorisation des laitiers)**

| Freins   | Leviers  |
|--|--|
| <p>Perception négative par rapport à la matière recyclée</p> <p>Définition de « matière résiduelle » qui limite la valorisation et l'innovation</p> <p>Défis techniques pour trouver des débouchés</p> <p>Rentabilité de la symbiose et concurrence avec la matière vierge</p> | <p>Aciéries : concurrence, rentabilité, acceptabilité sociale, GES, débouchés pour les rejets</p> <p>Démarchage pour attirer des entreprises près des aciéries</p> <p>Liens de confiance et collaboration entre les entreprises</p> <p>Investissement dans la R&amp;D</p> <p>Directives pour l'achat de produits à contenu recyclé par les donneurs d'ordre</p> <p>Sensibilisation des entreprises à la valorisation des sous-produits</p> <p>Médiateur externe pour convaincre les aciéries</p> <p>Formation des jeunes</p> <p>Programme de recrutement de stagiaires dans les aciéries pour travailler sur les résidus</p> |

## RECYCLAGE DU FER (6)

**Description :** Le recyclage du fer en fin de vie est bien organisé au Québec. Dans les aciéries, le fer sous forme de véhicules routiers démantelés et de ferraille triée et conditionnée est fondu. Les voitures automobiles et camions sont pour la majorité recyclés. La ferraille provient des secteurs résidentiel (ex. collecte sélective), industriel, commercial, institutionnel et CRD (construction, rénovation et démolition). Trois sources potentielles de fer actuellement non recyclé ont été identifiées : ferraille non collectée, avions et trains.

**Potentiel de circularité (faible à fort) :** La quantité d'acier pouvant être recyclée à partir des avions demeure faible. La quantité d'acier provenant des trains et de la ferraille résiduelle, non recyclé actuellement, est plus importante. Cependant, le total d'acier recyclé obtenu à partir de ces nouvelles sources demeure marginal par rapport à la demande totale d'acier.

**Faisabilité technico-économique (faible à forte) :** Autant l'analyse que la modélisation technico-économique montre que le recyclage de la ferraille est une activité rentable et d'ailleurs déjà bien implantée au Québec. Le problème n'est donc pas la rentabilité, mais les quantités supplémentaires qu'il est possible d'aller chercher. Quant au recyclage de l'acier dans les avions et les trains, les études de cas documentées montrent que ces activités sont moins rentables. Dans le cas des avions, cela est principalement dû à la baisse du prix de l'aluminium. Dans les deux cas, il serait nécessaire de considérer la vente d'autres sous-produits, comme les équipements électroniques.

**Risque de déplacement d'impacts (non significatif) :** Le recyclage du fer implique une amélioration de l'indicateur *Ressources minérales*. L'analyse conséquentielle n'a pas permis de déceler un risque significatif de déplacement d'impact environnemental vers d'autres indicateurs.

### Principaux acteurs d'implantation

- Fournisseurs de métaux (industriel, commercial, institutionnel, résidentiel, CRD)
- Récupérateurs (collecteurs), dont les entreprises de démantèlement de véhicules
- Entreprises de tri et de conditionnement (ferrailleurs)
- Courtiers de métaux
- Aciéries
- Clients des aciéries (fabricants)

## Principaux freins et leviers à l'implantation

| Freins  | Leviers   |
|---|---|
| <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/D</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 (7)

**Description :** Le cuivre est principalement présent dans l'équipement électrique et électronique. Il s'agit d'un métal relativement bien recyclé puisqu'il se retrouve la plupart du temps sous sa forme pure. Sa filière de recyclage est bien implantée au Québec. Il est reconnu pour avoir une bonne valeur et par conséquent, est convoité. En 2015, la Fonderie Horne aurait recyclé 26 500 tonnes de cuivre. Les produits suivants sont peu récupérés et constituent des sources potentielles de cuivre en fin de vie : ordinateurs, téléphones mobiles, câbles et fils, ainsi que les circuits imprimés.

**Potentiel de circularité (faible à moyen) :** La quantité de cuivre pouvant être recyclée à partir des ordinateurs, cellulaires et circuits imprimés demeure faible. Celle provenant des câbles est plus importante. La quantité totale de cuivre obtenu à partir de ces nouvelles sources demeure marginale par rapport à la demande totale. De plus, alors que les quantités les plus importantes se trouvent dans les ordinateurs, les tendances futures sont délicates à prévoir quant au potentiel de recyclage de cette source. Les ordinateurs vont être de plus en plus légers et de moins en moins constitués de composantes de grande valeur.

**Faisabilité technico-économique (faible à moyenne) :** Autant l'analyse que la modélisation technico-économique montre que le recyclage des câbles et des circuits imprimés sont des activités rentables. Quant au recyclage du cuivre des ordinateurs et des cellulaires, les études de cas documentées montrent que ces activités sont moins rentables. De plus, dans tous les cas, ces stratégies n'ont du sens que si l'ensemble des sous-produits sont valorisés.

**Risque de déplacement d'impacts (non significatif) :** Le recyclage du cuivre implique une amélioration de l'indicateur *Ressources minérales*. L'analyse conséquentielle n'a pas permis de déceler un risque significatif de déplacement d'impact environnemental vers d'autres indicateurs.

### Principaux acteurs d'implantation

N/D

### Principaux freins et leviers à l'implantation

Le taux de récupération du matériel électronique en fin de vie, qui est parfois envoyé vers des pays ayant des normes encadrant le traitement moins strictes, est un frein actuel au recyclage du cuivre pour ce type de produits.

## RECYCLAGE DU LITHIUM (8)

**Description :** Le lithium est principalement présent dans les batteries ainsi que dans les verres et céramiques. Les batteries lithium-ion proviennent des véhicules électriques et hybrides, ainsi que des appareils électroniques et des réseaux électriques. Un procédé de broyage, de séparation par flottaison et de dissolution permet la séparation des différentes composantes (par ex. : aluminium, cuivre, polymère, lithium, cobalt). Le lithium est aussi utilisé dans le verre pour abaisser sa température de fusion lors de sa fabrication. Bien que la quantité contenue dans les verres et céramiques représente une quantité presque aussi importante que celui contenu dans les batteries, il s'y trouve en faibles concentrations, 0,1 % dans le cas du verre. La stratégie de recyclage de ce lithium est donc basée sur le recyclage du verre.

**Potentiel de circularité (faible à fort) :** Dans un contexte de politique climatique ou d'électrification des transports, le potentiel de circularité du lithium à partir des batteries est significatif. Cependant, la fraction massique du lithium dans le verre est de 0,1 %, ce qui est très peu.

**Faisabilité technico-économique (faible à forte) :** Le recyclage des batteries pour y récupérer le lithium et les autres métaux (lesquels constituent la majorité) est économiquement optimal. De plus, il y a un intérêt à développer toute la chaîne au Québec, puisque le transport des batteries usagées à travers tout le Canada est dispendieux. Les batteries sont en effet actuellement recyclées en Colombie-Britannique. Cependant, il n'est pas certain que ces activités de recyclages seraient rentables dans un scénario de référence, avec l'évolution marginale du nombre de véhicules électriques et hybrides rechargeables au Québec. De plus, à long terme, la quantité de batteries augmente, mais la distribution des différentes technologies de batteries arrivant en fin de vie aura évolué : il est possible que la valeur qui peut être tirée d'une tonne de batteries ne compense plus les coûts variables massiques, qui eux sont supposés constants au cours des années. Quant au recyclage du verre, ces opérations ne sont pas rentables en comparaison du coût de l'enfouissement.

**Risque de déplacement d'impacts (non significatif) :** Le recyclage du lithium implique une amélioration de l'indicateur *Ressources minérales*. L'analyse conséquentielle n'a pas permis de déceler un risque significatif de déplacement d'impact environnemental vers d'autres indicateurs.

### Principaux acteurs d'implantation

- 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
- Entreprises minières de lithium, telle Nemaska Lithium
- Entreprises dans le secteur de la batterie, comme Johnson Matthey et Solutions Bleues
- Centres de recherche et universités
- Acteurs gouvernementaux
- Recycleurs actuels, tel Retriev Technologies

### Principaux freins et leviers à l'implantation

| Freins  | Leviers   |
|---|---|
| <p>Cinq différents matériaux de cathodes aux chimies distinctes</p> <p>Lithium seul ne justifie pas le recyclage des batteries pour l'instant</p> <p>Absence de filière de récupération des batteries lithium-ion des véhicules hybrides et électriques</p> <p>Coût du recyclage et nécessité d'importantes quantités pour rentabiliser l'opération, concurrence avec Retriev Technologies</p> <p>Quantité actuellement faible de batteries de véhicules</p> <p>Polymère fluoré parfois problématique pour le recyclage</p> | <p>Présence de mines de lithium, d'expertise dans la batterie et faible coût de l'énergie hydroélectrique : Québec en bonne position</p> <p>Transport de batteries (matières dangereuses) pouvant favoriser le recyclage local</p> <p>Législation et incitatifs pour la récupération, le conditionnement et le recyclage des batteries lithium-ion de véhicules</p> <p>Législation pour l'approvisionnement local de batteries de véhicules</p> <p>Concertation avec les parties prenantes (symposium)</p> <p>Appel de projets avec les universités et l'industrie pour le développement de procédés de recyclage</p> <p>Phase pilote d'un procédé, soutenue par un programme de financement</p> <p>Recyclage pour tous les types de batteries, pour une meilleure rentabilité</p> <p>Batteries de véhicules rarement endommagées lorsque localisées à l'arrière du véhicule, facilitant le démantèlement en fin de vie</p> |