

MÉTAUX ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE AU QUÉBEC

Rapport de l'étape 2 : Synthèse des stratégies de circularité pour le cuivre, le fer et le lithium

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

13 décembre 2016

Équipe de réalisation

Auteure :

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

Direction :

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

Révision :

- Olivier Bahn, professeur, département de sciences de la décision, HEC Montréal
- Pierre Baptiste, professeur, génie industriel et mathématique, Polytechnique Montréal
- Manuele Margni, professeur, CIRAI, génie industriel et mathématique, Polytechnique Montréal
- Daniel Normandin, directeur exécutif, Institut EDDEC
- Oumarou Savadogo, professeur, génie métallurgique, Polytechnique Montréal
- Richard Simon, professeur, génies civil, géologique et des mines, Polytechnique Montréal

SOMMAIRE

Le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) du Québec a mandaté l'Institut EDDEC pour réaliser un projet de recherche en économie circulaire visant à évaluer le potentiel de circularité de trois métaux stratégiques pour le Québec, soit le fer, le cuivre et le lithium de même qu'à documenter les impacts de l'industrie minière québécoise sur l'environnement. L'objectif de ce rapport d'étape consiste à identifier des initiatives s'inscrivant dans cette mouvance de l'économie circulaire, à l'échelle locale ou internationale, en lien avec les trois métaux étudiés.

D'abord, pour chaque métal sont présentés les éléments suivants : sa disponibilité au niveau local ou mondial ; les principales entreprises impliquées au Québec ; et enfin, les produits issus de sa fabrication ainsi que ceux qui s'avèrent les plus pertinents pour l'exploration de stratégies de circularité.

Cuivre

Au Québec, le cuivre se retrouve maintenant plutôt comme un sous-produit des mines d'or, de nickel et de zinc. Les principales activités industrielles liées au cuivre au Québec concernent la métallurgie primaire ainsi que la transformation métallique. Le Québec compte la seule fonderie de cuivre au Canada, soit la Fonderie Horne, située à Rouyn-Noranda, laquelle produit des anodes de cuivre à partir de concentré. Ces anodes sont expédiées à l'Affinerie CCR à Montréal-Est, qui produit à son tour des cathodes de cuivre. L'Affinerie CCR vend une partie de ses cathodes à Nexans Canada, un fabricant de fils et de câbles de transmission électrique.

Au niveau de la répartition (en % de tonnage) des divers usages du cuivre dans le monde, les équipements et le bâtiment constituent les principaux secteurs d'utilisation, représentant respectivement 31 % et 30 %. Les catégories de produits suivants ont été retenues pour les stratégies de circularité :

- Fils et câbles électriques ;
- Électroménagers (petits et gros) ;
- Équipements mécaniques et industriels ;
- Téléphones mobiles et ordinateurs portables ;
- Bâti (bâtiment et infrastructures) ;
- Véhicules (voitures, camions, autobus, transport maritime, ferroviaire, aérien).

Fer

Le Québec 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. Au Québec, ArcelorMittal Exploitation minière Canada exploite sur la Côte-Nord le site du Mont-Wright ainsi que sa mine d'appoint, celle de Fire Lake. 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. Au niveau de la métallurgie primaire, les trois entreprises suivantes sont actives au Québec : Rio Tinto Fer et Titane, ArcelorMittal Produits longs Canada ainsi que Finkl Steel.

Sur le plan de l'utilisation des produits contenant du fer au Canada, la construction constitue le secteur qui utilise la plus importante quantité de fer, mobilisant environ 45 % de ce métal. Le secteur du transport arrive en seconde position avec 30 % environ. Les machines et les appareils représentent quant à eux environ 20 % alors que les autres produits ne consomment qu'environ 5 % de l'ensemble du fer en utilisation au Canada. Les catégories de produits suivants ont été retenues :

- Véhicules (voitures, camions, autobus, transport maritime, ferroviaire, aérien) ;
- Électroménagers (petits et gros) ;
- Bâti (bâtiment et infrastructures) ;
- Équipements mécaniques et industriels.

Lithium

Le Québec présente un bon potentiel pour le lithium. À l'heure actuelle, quatre projets d'extraction de lithium sont à un stade de mise en valeur au Québec : Nemaska Lithium, Lithium Amérique du Nord, Glen Eagle Resources et Critical Elements Corporation. Deux entreprises sont actives au Québec dans le secteur de la fabrication des batteries. Il s'agit de Johnson Matthey Matériaux pour Batteries, qui fabrique des cathodes de batteries en phosphate de fer lithié (LiFePO₄), et de la compagnie Solutions Bleues, qui fabrique des batteries Lithium-Métal-Polymère (LMP).

Concernant les usages des produits contenant du lithium, les batteries arrivent au premier rang avec 35 % des quantités, suivies de près par les verres et céramiques, avec 32 %. 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 et pour les téléphones cellulaires et les ordinateurs portables. Le produit suivant a été retenu pour l'examen de stratégies de circularité :

- Batteries lithium-ion (dont celles dans les téléphones mobiles, les ordinateurs portables et les véhicules).

Stratégies de circularité

Une revue de littérature sur les stratégies de circularité a été effectuée, certaines étant communes aux trois métaux, d'autres propres aux produits contenant les métaux à l'étude. Voici dans le tableau suivant une synthèse des stratégies répertoriées en fonction de l'étape du cycle de vie des métaux ou en fonction des catégories de produits retenues.

ÉTAPE / PRODUIT	NO	STRATÉGIE(S)
Stratégies de circularité communes aux métaux et aux produits contenant les métaux		
Extraction	1	Développement technologique (logiciels, robotique) pour extraire les minerais de façon plus efficace
	2	Entreposage adéquat des rejets 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
	4	Utilisation des stériles miniers comme agrégats (ex. Les Minéraux Harsco, Contrecœur)
	5	Mines urbaines (<i>urban mining</i>) : récupération des métaux disponibles en milieu urbain
	6	Exploitation de lieux d'enfouissement (<i>landfill mining</i>) : récupération des métaux dans les lieux d'enfouissement
	7	Réemploi, réparation, reconditionnement et location d'équipements d'extraction ; offre d'équipements usagés (ex. : Caterpillar)
	8	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 <u>Exemples :</u> Laitiers utilisés pour routes, remblais, béton, amendements agricoles (ex. : ArcelorMittal, Contreccœur) Utilisation des laitiers comme amendement agricole et agrégat (ex. : Les Minéraux Harsco, Contreccœur) Séquestration de CO ₂ avec les sous-produits de l'industrie métallurgique (ex. : CTTÉI, Sorel-Tracy) Céramiques de stockage d'énergie thermique à partir des laitiers (ex. : Eco-Tech Ceram, France) Récupération des métaux (précieux) dans les boues anodiques (ex. : Affinerie CCR, Montréal-Est)
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
Utilisation	14	Atelier de réparation d'objets par les usagers (ex. : <i>Repair Café</i> , 29 pays) Échanges d'objets et d'outils entre particuliers <u>Exemples :</u>
	15	Bibliothèque d'outils - dons et locations par les membres (ex. : La Remise, Montréal) Plateforme de location de produits et services entre particuliers (ex. : Maxloc, Québec) 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
Stratégies de circularité propres aux produits contenant les métaux		
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)
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 Transport en commun
		Plateforme de covoiturage (ex. : Amigo Express, Québec ; Blablacar, France) Service d'auto-partage (ex. : Communauto, Auto-Mobile, Québec) Location de voitures entre usagers (ex. : Getaround, Turo, ZipCar, États-Unis ; CarNextDoor, Australie)
	37	Service d'auto-partage par le manufacturier (ex. : Car2Go, Québec)
		Location de trains d'atterrissage (ex. : Héroux-Devtek, Longueuil) Location de moteurs (ex. : Pratt & Whitney, Longueuil)
38	Conversion de véhicules à essence en véhicules électriques (ex. : GranTuned, Montréal)	
39	Programme de reprise des véhicules (ex. : Renault, France)	
	Démantèlement et recyclage de trains (ex. : Véolia, France) 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. : Retriev Technologies, Colombie-Britannique ; Xtrata – Glencore, Ontario ; Recupyl, Singapour ; Umicore, Belgique)

Afin d'évaluer leur applicabilité au contexte québécois et d'identifier les barrières et les leviers à l'implantation des stratégies, la prochaine étape consistera à effectuer des entrevues avec des acteurs du milieu. Sur la base d'une liste plus restreinte de stratégies de circularité retenues, une analyse de cycle de vie conséquente de même qu'une analyse technico-économique seront réalisées. De ces exercices s'ensuivront des recommandations quant aux stratégies de circularité à privilégier pour le Québec.

TABLE DES MATIÈRES

Sommaire.....	iii
Table des matières.....	vii
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	ix
1 Introduction.....	1
2 Un portrait des métaux à l'étude.....	2
2.1 Le portrait du cuivre.....	2
2.2 Le portrait du fer.....	5
2.3 Le portrait du lithium.....	9
3 Stratégies de circularité.....	14
3.1 Stratégies de circularité communes aux métaux et aux produits contenant les métaux.....	14
3.1.1 Extraction.....	14
3.1.2 Métallurgie primaire.....	20
3.1.3 Transformation métallique et fabrication.....	23
3.1.4 Utilisation.....	25
3.1.5 Fin de vie.....	26
3.2 Stratégies de circularité propres aux produits contenant les métaux.....	32
3.2.1 Fils et câbles électriques.....	32
3.2.2 Électroménagers (petits et gros).....	33
3.2.3 Équipements mécaniques et industriels.....	34
3.2.4 Téléphones mobiles et ordinateurs portables.....	35
3.2.5 Bâti.....	37
3.2.6 Véhicules (transport).....	40
3.2.7 Batteries lithium-ion.....	45
4 Conclusion.....	51
5 Références.....	52

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 Répartition des usages du cuivre au niveau mondial en 2013 (ICSG, 2015)	3
Figure 2-2 Répartition des usages du fer au Canada en 2005 ; Adapté de (Müller, Wang, & Duval, 2010b) 7	
Figure 2-3 Réserves de lithium dans le monde (en tonnes) (USGS, 2016).....	9
Figure 2-4 Répartition des usages du lithium au niveau mondial ; adapté de (USGS, 2016)	11
Figure 3-1 Pratiques actuelles de gestion des rejets miniers comparées à une gestion des rejets axée sur la récupération des métaux (Lèbre & Corder, 2015)	16
Figure 3-2 Hiérarchie de gestion des matières résiduelles (gauche) ; hiérarchie pour la gestion des rejets miniers (droite) (adaptée de (Lèbre & Corder, 2015)	17
Figure 3-3 Unité de stockage de chaleur ECOSTOCK (Eco-Tech Ceram, 2016).....	23
Figure 3-4 Procédé de recyclage des câbles électriques - Recycâbles (Suez Environnement, 2016).....	33
Figure 3-5 PuzzlePhone (PuzzlePhone, 2016)	36
Figure 3-6 Méthode de déconstruction Tecorep (Trends in Japan, 2013)	39
Figure 3-7 L'économie circulaire dans le secteur automobile (Lacy et al., 2016).....	41
Figure 3-8 Conception d'une chambre de combustion alimentée au métal et applications possibles (Bergthorson et al., 2015)	42
Figure 3-9 Batterie aluminium-air de Phinergy (Phinergy, 2013).....	43
Figure 3-10 Prévisions du BNEF, en GWh, de la disponibilité des batteries usagées et estimation de la portion pouvant être utilisée dans des applications de stockage d'énergie stationnaire 2016-2025 (Roberts, 2016)	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 Liste des principales entreprises dans le secteur du cuivre au Québec	3
Tableau 2-2 Principaux produits de cuivre (ICSG, 2015)	4
Tableau 2-3 Quantité de cuivre dans les produits finis importés au Québec en 2014 (Statistique Canada, 2014)	4
Tableau 2-4 Liste des principales entreprises dans le secteur du fer et de l'acier au Québec.....	6
Tableau 2-5 Principaux produits de fer	7
Tableau 2-6 Quantité de fer dans les produits finis importés au Québec en 2014 (Statistique Canada, 2014)	8
Tableau 2-7 Immatriculations de véhicules automobiles au Québec en 2015 (Statistique Canada, 2016) ...	8
Tableau 2-8 Liste des principales entreprises dans le secteur du lithium au Québec.....	11
Tableau 2-9 Principaux produits de lithium	12
Tableau 3-1 Synthèse des stratégies de circularité communes aux métaux et aux produits contenant les métaux	30
Tableau 3-2 Synthèse des stratégies de circularité propres aux produits contenant les métaux	48

1 INTRODUCTION

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

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

L'objectif de ce rapport d'étape consiste à identifier des initiatives s'inscrivant dans cette mouvance de l'économie circulaire, à l'échelle locale ou internationale, en lien avec les trois métaux étudiés. Elle permettra notamment de fournir des pistes de solutions innovantes pour les étapes d'analyse et de recommandations.

D'une part, un portrait sommaire de chacun des trois métaux sera exposé ; d'autre part, une gamme de stratégies de circularité sera présentée, certaines communes aux trois métaux, d'autres propres aux produits contenant les métaux à l'étude.

Il convient de préciser que les trois métaux ont été choisis parce qu'ils appartiennent à des catégories distinctes, pouvant ainsi conduire à des stratégies différentes. En ce qui a trait au cuivre, les activités au Québec sont surtout concentrées sur la métallurgie primaire et la transformation métallique. Quant au fer, l'ensemble de la filière est présent au Québec, ce qui ouvre la porte à des stratégies de circularité très variées. Finalement, le lithium permet d'avoir une approche plus prospective, car sa filière, actuellement peu développée au Québec, présente un bon potentiel. Ce métal, utilisé notamment dans les batteries de véhicules électriques, représente un attrait certain dans le cadre de la priorité accordée à l'électrification des transports au Québec.

Les stratégies de circularité sont susceptibles d'évoluer au fur et à mesure que seront disponibles les résultats des différentes étapes de la présente étude, soit l'analyse des flux de matières, l'analyse de cycle de vie, l'analyse technico-économique, de même que l'analyse des freins et leviers liés aux stratégies. Les stratégies exposées ont pour visée de présenter un éventail de possibilités aussi complet que possible, sans préciser pour le moment leur importance dans le cadre québécois. Cette liste est donc appelée à se préciser avec l'évolution de la recherche. L'analyse des freins et leviers liés aux stratégies, prochaine étape prévue dans le cadre de l'étude, permettra d'évaluer leur applicabilité au contexte québécois et ainsi, sélectionner celles étant les plus porteuses, pour finalement quantifier leur potentiel de circularité et les bénéfices environnementaux associés.

2 UN PORTRAIT DES MÉTAUX À L'ÉTUDE

Afin de mieux situer le contexte dans lequel s'inscrivent les stratégies de circularité qui seront identifiées, il s'avère tout indiqué de dresser d'abord un portrait sommaire de chaque métal à l'étude. Ainsi, pour chaque métal seront présentés les éléments suivants : sa disponibilité au niveau local ou mondial ; les principales entreprises impliquées au Québec ; et enfin, les produits issus de sa fabrication ainsi que ceux qui s'avèrent les plus pertinents pour l'exploration de stratégies de circularité.

Les critères suivants ont été pris en compte dans la sélection des produits ou catégories de produits, pour lesquels des stratégies de circularité ont fait l'objet d'une exploration :

- Quantité totale ;
- Durée d'usage et disponibilité ;
- Potentiel de circularité ;
- Proportion massique du métal dans le produit ;
- Présence d'acteurs au Québec pour la mise en œuvre de la stratégie ;
- Cas à succès potentiellement reproductibles ;
- Présence d'un ou plusieurs des métaux à l'étude.

Il s'agit d'une présentation sommaire des métaux visant à mieux contextualiser et cibler les stratégies de circularité. L'analyse des flux de matières prévue dans le cadre de cette étude pour chacun des métaux, permettra ultérieurement de cartographier en détail les activités au long des étapes du cycle de vie présentes au Québec, les acteurs impliqués ainsi que les flux échangés.

2.1 Le portrait du cuivre

Le cuivre, en plus d'avoir une excellente conductivité thermique et électrique, est résistant à la corrosion, antibactérien, malléable et généralement facilement recyclable. Il est habituellement utilisé sous sa forme pure, mais on le retrouve aussi sous forme d'alliages, les plus connus étant le bronze et le laiton.

Les principaux producteurs de minerai de cuivre sont le Chili (5,6 millions tonnes (Mt), soit environ le tiers de la production mondiale), les États-Unis (1,31 Mt), le Pérou (1,22 Mt), la Chine (1 Mt) et la République démocratique du Congo. Dans le minerai, la teneur varie de 0,5 % à 5 %, avec une moyenne de 0,8 % (Bihoux & de Guillebon, 2010).

Au Québec, la production de cuivre a fortement diminué de la fin des années 1990 jusqu'en 2006. Le Québec a déjà compté plusieurs mines de cuivre qui sont aujourd'hui épuisées. Ce métal se retrouve maintenant plutôt comme un sous-produit des mines d'or, de nickel et de zinc situées dans les régions de l'Abitibi-Témiscamingue et du Nord-du-Québec (MERN, 2016b).

Les principales activités industrielles liées au cuivre au Québec concernent la métallurgie primaire ainsi que la transformation métallique. Cela peut constituer un atout pour la mise en œuvre de certaines stratégies de circularité. Le Québec compte la seule fonderie de cuivre au Canada, soit la Fonderie Horne, située à Rouyn-Noranda, laquelle produit des anodes de cuivre à partir de concentré. Ces anodes sont expédiées à l'Affinerie CCR à Montréal-Est, qui produit à son tour des cathodes de cuivre par procédé électrometallurgique. Ces deux entreprises appartiennent à Glencore. L'Affinerie CCR vend une partie de ses cathodes à Nexans Canada, un fabricant de fils et de câbles de transmission électrique dont le siège social est à Paris. Nexans est la plus importante entreprise de transformation métallique de cuivre au

Québec. Le tableau 2-1 présente la liste des principales entreprises œuvrant dans le secteur du cuivre au Québec ainsi que leur secteur d'activité.

Tableau 2-1 Liste des principales entreprises dans le secteur du cuivre au Québec

Entreprise	Activité
Mine Matagami (Glencore Canada Corp.)	Extraction
Mine Langlois (Nyrstar Canada Resources)	Extraction
Mine LaRonde (Agnico Eagle)	Extraction
Mine Raglan (Glencore Canada Corp.)	Extraction
Mine Nunavik Nickel (Canadian Royalties)	Extraction
Fonderie Horne (Glencore)	Métallurgie primaire (production d'anodes)
Affinerie CCR (Glencore)	Métallurgie primaire (production de cathodes)
Nexans Canada	Transformation métallique (production de câbles et fils)

L'utilisation des produits contenant du cuivre croît d'année en année. En 2013, on comptait 21,2 millions de tonnes métriques de cuivre utilisées annuellement dans le monde (ICSG, 2015). Au Québec, en 2014, le stock de cuivre estimé pour l'étape d'utilisation s'élevait à 2,26 millions de tonnes, avec une moyenne d'environ 275 kg par personne ; ce stock augmente en moyenne de près de 37 000 tonnes annuellement (Bonnin, Azzaro-Pantel, Pibouleau, Domenech, & Villeneuve, 2013). Le Québec représente donc près de 0,2 % de l'utilisation annuelle mondiale. La figure 2-1 présente la répartition (en % de tonnage) des divers usages du cuivre dans le monde en 2013. Les équipements et le bâtiment sont les principaux secteurs d'utilisation, représentant respectivement 31 % et 30 %.

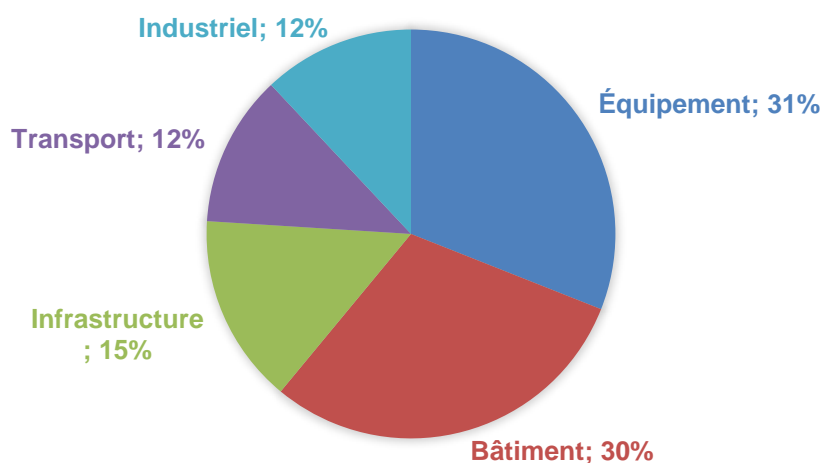


Figure 2-1 Répartition des usages du cuivre au niveau mondial en 2013 (ICSG, 2015)

Le tableau 2-2, de son côté, énumère les principaux produits à base de cuivre classés selon leur catégorie d'utilisation.

Tableau 2-2 Principaux produits de cuivre (ICSG, 2015)

Catégorie	Exemples de produits
Équipement	Fils et câbles électriques Composantes électriques (disjoncteurs, sectionneurs contacteurs, transformateurs, générateurs) Téléphones mobiles et ordinateurs
Bâtiment	Tuyauteries, robinets Toits Gouttières
Infrastructure	Câbles pour les services de télécommunication et d'électricité
Transport	Bobines de moteurs électriques Moteurs, câbles, radiateurs, connecteurs et systèmes de freinage des voitures et camions Coques de bateaux Trains
Industriel	Engrenages, turbines, roulements à billes Échangeurs de chaleur Pompes Compresseurs

Les importations québécoises de produits finis contenant du cuivre se répartissent en trois catégories, lesquelles sont présentées au tableau 2-3. Ces produits sont à considérer dans une optique de circularité. Il s'agit d'une première approximation des importations, effectuée sur une base douanière (produits du monde vers le Québec). Les échanges interprovinciaux n'y sont pas considérés pour le moment. Ces données sont donc appelées à évoluer.

Tableau 2-3 Quantité de cuivre dans les produits finis importés au Québec en 2014 (Statistique Canada, 2014)

Catégorie	Quantité importée (tonnes/an)	Répartition	Principales marchandises importées
Équipements mécaniques / industriels	57 000	68 %	Matériel, machines et appareils pour la production du froid ainsi que pour le levage, le chargement, le déchargement et la manutention, chasse-neige non autopropulsés, coupeuses pour la pâte à papier, le papier ou le carton
Équipements de transport	15 000	18 %	Automobiles et camions à moteur à piston, brouettes et poussettes
Équipements électriques et électroniques	11 600	14 %	Transformateurs électriques et à diélectrique liquide, groupes électrogènes à moteur à piston, appareils électromécaniques à moteur électrique incorporé pour usage domestique

La quantité de cuivre contenue dans les principaux produits sera détaillée dans le cadre de l'analyse de flux de matières. Toutefois, nous savons qu'une automobile de gamme intermédiaire contient en moyenne 20 kg de cuivre, quantité qui peut grimper jusqu'à 45 kg pour les véhicules hybrides. Un téléphone portable typique contient quant à lui 16 g de cuivre en moyenne, une quantité somme toute négligeable même en tenant compte du grand nombre de téléphones fabriqués : au total, ce secteur ne représente qu'environ 0,1 % de la production mondiale de cuivre (Bihoux & de Guillebon, 2010).

La quantité totale de matière dans un secteur n'est pas suffisante pour évaluer les flux de matières. Il faut également tenir compte d'aspects comme la durée d'usage moyenne des produits. Cette donnée permet d'identifier les secteurs qui relâchent le plus rapidement la matière, contribuant ainsi à optimiser la mise en œuvre de stratégies de circularité. La durée de vie moyenne du cuivre dans le secteur du bâtiment est estimée entre 25 et 40 ans, elle est d'environ 50 ans dans les infrastructures, et de 10 à 30 ans dans le transport, (UNEP, 2010) alors que les appareils électroniques ne durent que quelques années (Bihoux & de Guillebon, 2010).

À la lumière des informations actuellement disponibles et considérant les critères mentionnés en introduction de cette section, les catégories de produits suivants ont été retenues pour l'examen de stratégies de circularité :

- Fils et câbles électriques ;
- Électroménagers (petits et gros) ;
- Équipements mécaniques et industriels ;
- Téléphones mobiles et ordinateurs portables ;
- Bâti (bâtiment et infrastructures) ;
- Véhicules (voitures, camions, autobus, transport maritime, ferroviaire, aérien).

2.2 Le portrait du fer

Le fer se présente très peu sous sa forme naturelle en raison de sa sensibilité à la corrosion et de ses faibles propriétés mécaniques. On le retrouve ainsi généralement sous forme d'alliages dont les plus communs forment la grande classe des aciers.

Avec une production mondiale brute de trois milliards de tonnes en 2014, le minerai de fer est de loin la substance métallique produite en plus grande quantité et la plus utilisée dans le monde (MERN, 2013a). 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. En outre, au Québec, en 2014, le stock de fer en utilisation s'élevait à 98,6 millions de tonnes, soit plus de 2 tonnes par personne (Müller, Wang, & Duval, 2010a).

Au Québec, ArcelorMittal Exploitation minière Canada exploite sur la Côte-Nord le site du Mont-Wright ainsi que sa mine d'appoint, celle de Fire Lake, (MERN, 2016a). Le concentré de ce site est par la suite acheminé par voie ferroviaire à Port-Cartier où l'entreprise en transforme une partie dans son usine de bouletage, produisant annuellement près de 10 millions de tonnes de boulettes d'oxyde de fer (ArcelorMittal, 2016).

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. Ce minerai mixte est par la suite transformé au Québec en scorie de titane, en fer et en acier (MERN, 2016a).

Au Québec, le minerai extrait contient environ 30 % de fer en moyenne, une teneur qui grimpe à 65 % après concentration (MERN, 2016a). Le potentiel de développement de projets miniers pour le fer est grand au Québec, comme en témoignent les projets d'exploration en cours. Toutefois, la baisse du prix du minerai de fer connue au cours des dernières années a quelque peu ralenti cette expansion.

Au niveau de la métallurgie primaire, l'usine Rio Tinto Fer et Titane, située à Sorel-Tracy, produit du dioxyde de titane, des lingots de fonte sous forme d'alliage de fer et de carbone de même que des billettes d'acier. Elle produit également une gamme de poudres de fer et d'acier pour des applications requérant des formes précises et complexes, particulièrement dans le secteur automobile (RioTinto, 2016).

ArcelorMittal Produits longs Canada possède quant à elle des installations à Contrecoeur, Longueuil et Montréal. Les boulettes de Port-Cartier partent généralement par bateau vers les installations de Contrecoeur-Est où un processus de réduction directe retire l'oxygène, augmentant ainsi la pureté des boulettes. Le tout est par la suite expédié aux aciéries où sont produites des brames et des billettes. Au complexe de Contrecoeur-Est, l'aciérie opère deux fours à arc électrique et produit du fil machine, en plus de recycler de la ferraille. À Contrecoeur-Ouest se trouve un four à arc électrique et on y produit des barres. Des barres sont également produites à l'usine de Longueuil alors que celle située à Montréal produit des fils (ArcelorMittal Produits longs Canada, 2016).

À St-Joseph-de-Sorel, l'aciérie Forel Forge, qui s'est associée à A. Finkl & Sons, de Chicago, ainsi qu'à Composite Forgins, de Détroit, pour former la bannière Finkl Steel, relève du groupe allemand Schmolz + Bickenbach. On y produit des moules d'acier pour le processus d'injection des plastiques, des aciers forgés pour les manufacturiers d'équipements lourds, des barres de même que des billettes et lingots d'acier (Sorel Forge, 2012). Le tableau 2-4 présente les principales entreprises œuvrant dans le secteur du fer et de l'acier au Québec, de même que leur secteur d'activité.

Tableau 2-4 Liste des principales entreprises dans le secteur du fer et de l'acier au Québec

Entreprise	Activité
Rio Tinto Fer et Titane	Extraction et métallurgie primaire (production de lingots, billettes, poudres)
ArcelorMittal Exploitation minière Canada	Extraction et traitement (bouletage)
ArcelorMittal Produits longs Canada	Métallurgie primaire (production de brames, billettes, barres) et transformation métallique (production de fils)
Finkl Steel (Sorel Forge)	Métallurgie primaire (production de billettes et lingots) et transformation métallique (production d'aciers à moules, aciers forgés et barres)

Sur le plan de l'utilisation des produits contenant du fer au Canada, les données de 2005 montrent que la construction constitue le secteur qui utilise la plus importante quantité de fer, mobilisant environ 45 % de ce métal. Le secteur du transport arrive en seconde position avec 30 % environ. Les machines et les appareils représentent quant à eux environ 20 % alors que les autres produits ne consomment qu'environ 5 % de l'ensemble du fer en utilisation au Canada. La figure 2-2 illustre cette répartition des usages du fer.

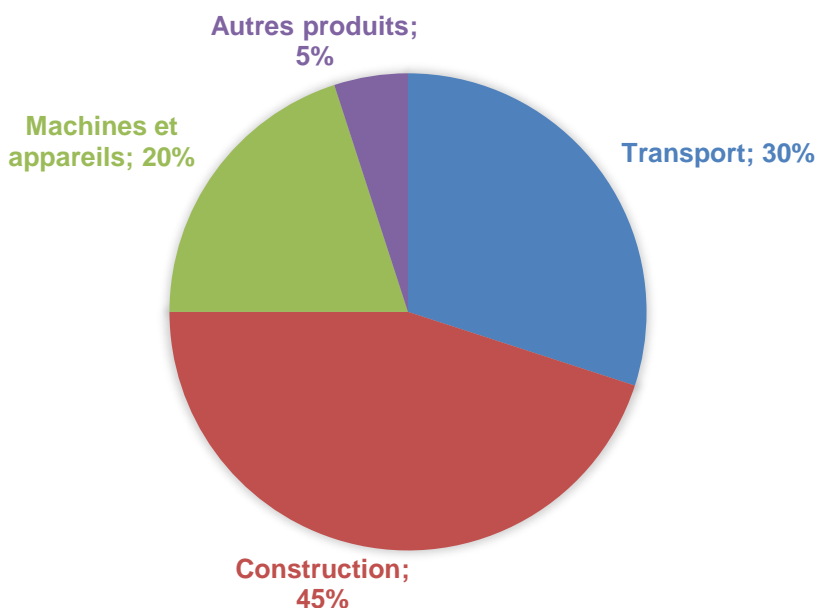


Figure 2-2 Répartition des usages du fer au Canada en 2005 ; Adapté de (Müller, Wang, & Duval, 2010b)

Le tableau 2-5, de son côté, énumère les principaux produits selon les grandes catégories d'utilisation.

Tableau 2-5 Principaux produits de fer

Catégorie	Exemples de produits
Construction (et infrastructures)	Structures de résidences, commerces, institutions et industries Infrastructures de transport (routes, ports, aéroports, voies ferrées) Infrastructures de production et transport d'énergie (barrages, éoliennes, pylônes, câbles, postes de transformation)
Transport	Automobiles, camions, autobus, trains, bateaux
Machines et appareils	Équipements électriques (générateurs, transformateurs, disjoncteurs : autres que ceux inclus dans la production et le transport d'énergie) Équipements industriels (pompes, chaudières) Équipements ménagers et de bureaux (électroménagers, appareils électroniques)
Autres produits	Contenants et emballages Autres biens de consommation

Comme pour le cuivre, la durée de vie des produits contenant du fer varie grandement selon les catégories. Ainsi, la durée de vie du fer dans le secteur des transports est estimée à 20 ans, dans la construction, à 50 ans, dans la machinerie, à 30 ans et dans les autres produits, à 15 ans (Pauliuk, Wang, & Müller, 2013).

Les importations québécoises de produits finis contenant du fer se répartissent en trois catégories, lesquelles sont présentées au tableau 2-6. Ces produits sont donc à considérer dans une optique de circularité. Cette première approximation des importations est effectuée sur une base douanière et les échanges interprovinciaux n'y sont pas considérés pour le moment. Ces données sont donc appelées à évoluer.

Tableau 2-6 Quantité de fer dans les produits finis importés au Québec en 2014 (Statistique Canada, 2014)

Catégorie	Quantité importée (tonnes/an)	Répartition	Principales marchandises importées
Équipements mécaniques / industriels	1 965 200	68 %	Matériel, machines et appareils pour la production du froid ainsi que pour le levage, le chargement, le déchargement et la manutention, chasse-neige non autopropulsés
Équipements de transport	847 500	29 %	Automobiles, camions
Équipements électriques et électroniques	75 800	3 %	Fours, cuisinières, réchauds, grils et rôtissoires, Appareils électromécaniques pour usage domestique, transformateurs à diélectrique liquide

Le secteur des transports présente un bon potentiel pour la mise en œuvre de stratégies de circularité diversifiées. Bien qu'il n'y ait pas de constructeurs automobiles au Québec, il s'agit d'un flux de fer en circulation qui s'avère pertinent à considérer, d'autant plus qu'il y a présence de divers fournisseurs au Québec dans le secteur de l'automobile. Il existe par ailleurs des fabricants d'autobus, soit Autobus Lion à Saint-Jérôme, Nova Bus à Saint-Eustache et Prevost à Sainte-Claire. Le tableau 2-7 présente le nombre de véhicules immatriculés au Québec pour l'année 2015 selon chacune des catégories.

Tableau 2-7 Immatriculations de véhicules automobiles au Québec en 2015 (Statistique Canada, 2016)

Catégorie de véhicule	Nombre
Total, immatriculation des véhicules	8 227 294
Total, immatriculation des véhicules routiers automobiles	5 459 650
Véhicules routiers automobiles légers (véhicules pesant moins de 4 500 kg)	5 086 519
Camion de poids moyen (véhicules pesant 4 500 kg à 14 999 kg)	66 727
Camion poids lourd (véhicules pesant 15 000 kg ou plus)	83 056
Autobus	18 586
Motocyclettes et cyclomoteurs	204 762
Remorques	1 993 922
Véhicules hors-route, construction et agricoles	773 722

Considérant qu'un véhicule automobile de gamme intermédiaire (1 300 kg) contient en moyenne 780 kg d'acier (Bihouix & de Guillebon, 2010), cela représente une quantité minimale en stock de près de 4 millions de tonnes d'acier au Québec, uniquement pour la catégorie des véhicules routiers automobiles légers.

La demande de l'industrie automobile en ressources naturelles est importante, puisqu'elle constitue le secteur le plus consommateur de métaux avec celui de la construction. Le parc mondial de véhicules a franchi le milliard d'unités en 2009 et demeure en croissance. L'OCDE estime en effet que le parc de véhicules augmentera d'ici 2030, de 70 % dans les pays de l'OCDE et de 300 % dans le reste du monde (Bihouix & de Guillebon, 2010).

Considérant les informations actuellement disponibles ainsi que les critères mentionnés en introduction, les catégories de produits suivants ont été retenues pour l'examen de stratégies de circularité :

- Véhicules (voitures, camions, autobus, transport maritime, ferroviaire, aérien) ;
- Électroménagers (petits et gros) ;
- Bâti (bâtiment et infrastructures) ;
- Équipements mécaniques et industriels.

2.3 Le portrait du lithium

Le lithium est un métal léger, ductile et qui s'oxyde facilement au contact de l'air et de l'eau. Il s'agit d'un métal modérément abondant, avec une présence de 65 ppm dans la croûte terrestre, mais difficilement accessible en majeure partie. Le lithium provient pour environ 60 % des saumures, en Amérique du Sud principalement, et pour 40 % des pegmatites (incluant le spodumène), qu'on retrouve notamment en Australie et au Québec (Goffé, Christmann, & Vidal, 2012). Cela conduit à des procédés d'extraction différents selon le minerai et selon le produit fini qu'on souhaite obtenir. Avec le développement des batteries au lithium, le cours du métal a fortement augmenté au cours des dernières années (ADEME, 2010a). La figure 2-3 illustre la répartition des réserves de lithium dans le monde. Il est à noter que les réserves constituent les ressources jugées susceptibles d'être techniquement et économiquement exploitables. La Bolivie, qui ne figure pas dans la répartition ci-dessous, aurait pour sa part des ressources de lithium estimées à 9 millions de tonnes (USGS, 2016).

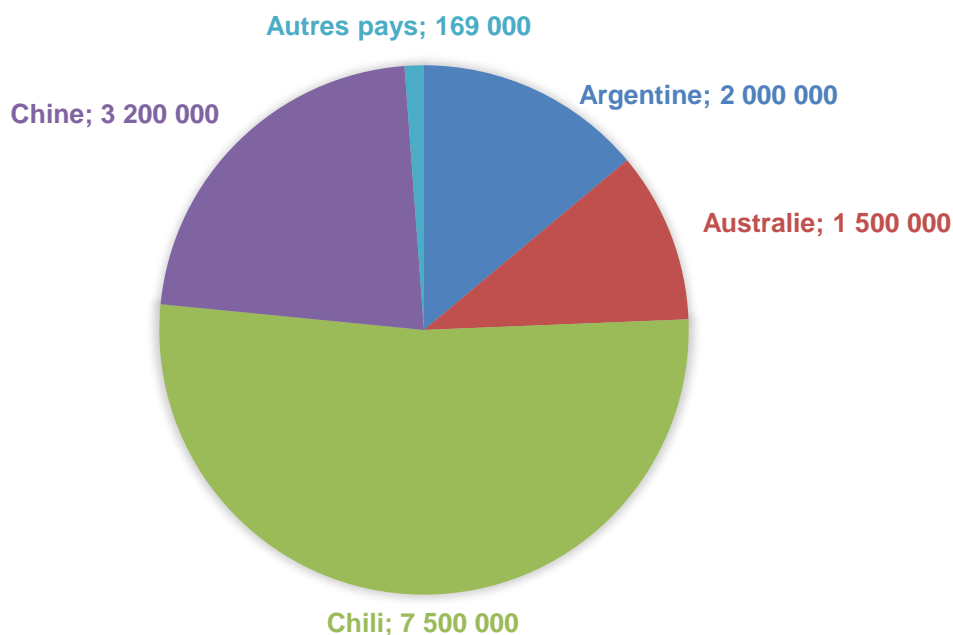


Figure 2-3 Réserves de lithium dans le monde (en tonnes) (USGS, 2016)

La consommation mondiale de lithium se chiffrait approximativement à 32 500 tonnes en 2015, une augmentation de 5 % par rapport à 2014, particulièrement liée à la demande croissante pour les batteries

rechargeables au lithium (USGS, 2016). Les principaux pays producteurs sont le Chili, l'Argentine, l'Australie et la Chine.

Le Québec présente un bon potentiel pour le lithium. D'ailleurs, des travaux d'exploration ont été effectués dans les secteurs de la Baie-James, de Val-d'Or en Abitibi, du nord-ouest de Chibougamau, de même qu'au Témiscamingue (MERN, 2013b). Avec la demande mondiale croissante pour le lithium, il s'agit d'une opportunité pour le Québec de développer cette filière industrielle à caractère énergétique. Le Québec possède tous les matériaux nécessaires pour la fabrication de batteries au lithium ainsi qu'une expertise de pointe reconnue mondialement. En outre, le plan d'action en électrification des transports 2015-2020 du Gouvernement du Québec a pour cible 100 000 véhicules électriques et hybrides rechargeables immatriculés au Québec pour 2020 (Gouvernement du Québec, 2015).

À l'heure actuelle, quatre projets d'extraction de lithium sont à un stade de mise en valeur au Québec. D'abord, Nemaska Lithium fera l'extraction et la concentration du spodumène à la mine Whabouchi, située à la Baie-James, à environ 300 km au nord-ouest de Chibougamau. Le spodumène sera extrait les 20 premières années dans une mine à ciel ouvert et s'en suivra une extraction dans une mine souterraine pour les six dernières années. Le concentré de spodumène sera expédié dans une usine hydrométallurgique de transformation à Shawinigan. On prévoit une production annuelle d'environ 213 000 tonnes de concentré 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). L'entreprise a obtenu son certificat d'autorisation du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) et devrait débiter ses opérations en 2018.

L'ancienne mine Québec Lithium (Énergie RB), qui était sous la loi sur les arrangements avec les créanciers, devrait redémarrer ses opérations en janvier 2017 pour une production en avril suivant, sous le nom de Lithium Amérique du Nord. C'est une compagnie chinoise, Jien International, qui en a fait l'acquisition en juin 2016 (Belzile, 2016). La mine devrait permettre la production de carbonate de lithium de qualité batterie.

Glen Eagle Resources a signé en mai 2016 une lettre d'intention avec une société australienne, Sayona Mining, pour la vente de son site Authier, situé en Abitibi-Témiscamingue non loin de Lithium Amérique du Nord. On y envisage la production d'un concentré de spodumène et possiblement de lithium métal (Glen Eagle Resources, 2016).

Critical Elements Corporation compte, pour sa part, extraire du spodumène dans son gisement Rose Tantal-Lithium à la Baie-James, afin de le transformer en carbonate de lithium et en un concentré de tantale (MERN, 2016a).

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 des cathodes de batteries en phosphate de fer lithié (LiFePO_4). 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 (LMP). Ces deux compagnies s'approvisionnent pour l'instant principalement à l'extérieur de la province. Toutefois, Nemaska Lithium a signé une entente avec Johnson Matthey Matériaux pour Batteries pour le financement de son usine de Shawinigan, en échange de produits et services.

On retrouve, au tableau 2-8, les principales sociétés du secteur du lithium au Québec.

Tableau 2-8 Liste des principales entreprises dans le secteur du lithium au Québec

Entreprise	Activité
Nemaska Lithium	Extraction et métallurgie primaire
Lithium Amérique du Nord	Extraction
Glen Eagle Resources	Extraction
Critical Elements Corporation	Extraction
Johnson Matthey Matériaux pour Batteries	Transformation métallique (production de cathodes de batteries)
Solutions Bleues Canada (Groupe Bolloré)	Fabrication (production de batteries)

Concernant les usages des produits contenant du lithium, les batteries arrivent au premier rang avec 35 % des quantités, suivies de près par les verres et céramiques, avec 32 %. La figure 2-4 illustre la répartition des usages du lithium dans le monde.

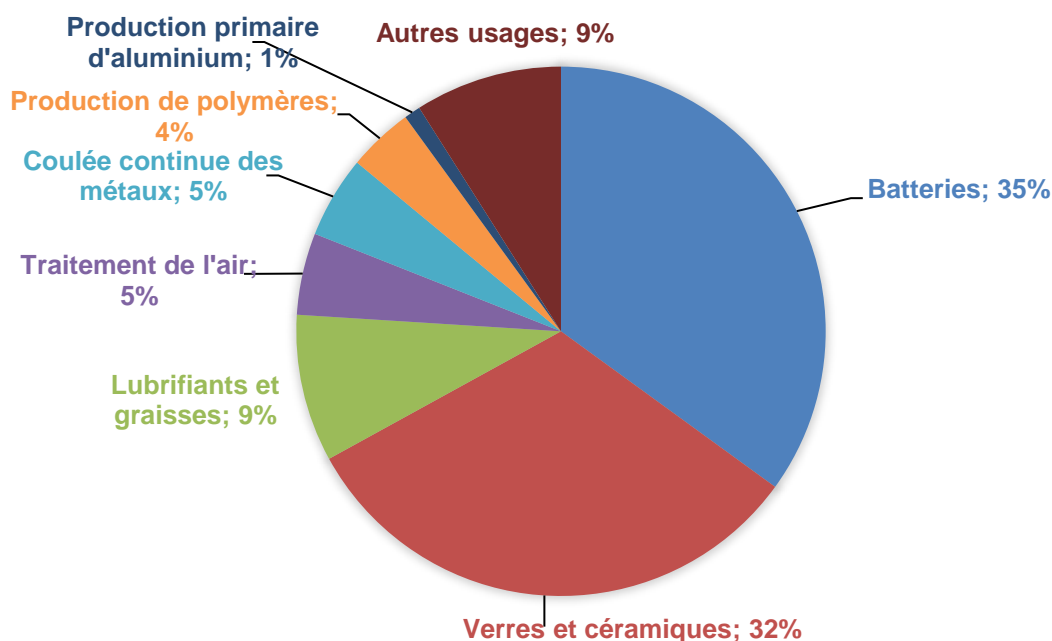


Figure 2-4 Répartition des usages du lithium au niveau mondial ; adapté de (USGS, 2016)

La liste des principaux produits classés selon les grandes catégories d'utilisation est présentée au tableau 2-9.

Tableau 2-9 Principaux produits de lithium

Catégorie	Exemples de produits
Batteries	Batteries pour téléphones mobiles, ordinateurs portables, voitures, vélos, appareils photo numériques, baladeurs audio, consoles de jeu, caméscopes, stockage d'énergie, etc.
Verres et céramiques	Verres creux (bouteilles, pots) Verres plats (fenêtres dans les bâtiments et les voitures) Fibres de verre Verres de spécialité (ex. : ampoules, écrans) Céramiques (ex. : carrelages, vaisselle, toilettes) Vitrocéramiques (plaques et ustensiles de cuisson)
Lubrifiants et graisses	Lubrifiants et graisses
Traitement de l'air	Systèmes de refroidissement (principalement), de déshumidification ou de purification de l'air
Coulée continue des métaux	Ajout d'oxyde de lithium au métal fondu (ex. : acier)
Production de polymères	Catalyseur de réactions de polymérisation de divers caoutchoucs synthétiques
Autres usages	Produits pharmaceutiques et chimie fine Photographies argentiques Teintures

Le lithium est utilisé dans les verres et les céramiques pour abaisser le point de fusion et améliorer la qualité et la résistance aux chocs thermiques. Les quantités de lithium ajoutées peuvent aller de 0,2 à 0,7 % pour la fibre de verre et de 0,1 à 0,25 % pour le verre d'emballage et autres verres (Labbé & Daw, 2012).

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 et pour les téléphones cellulaires et les ordinateurs portables (Goffé et al., 2012). Jusqu'en 2010, l'utilisation des batteries rechargeables lithium-ion était dominée par les téléphones intelligents, les tablettes et ordinateurs portables, mais depuis 2013, le marché de l'automobile a commencé à avoir un plus grand impact. En 2015, les véhicules électriques comptaient désormais pour 30 % du marché des batteries lithium-ion dans le monde (Roskill, 2016). Tesla a récemment inauguré sa « Giga-usine » dans le désert du Nevada. La compagnie compte produire annuellement 500 000 batteries lithium-ion, ce qui pourrait ultimement doubler la production mondiale de batteries lithium-ion une fois que l'usine aura atteint sa pleine capacité, ce qui est prévu pour 2018 (Tesla, 2016).

La fabrication de batteries exige un lithium pur à 99,95 %. Une batterie d'une voiture électrique d'une autonomie moyenne de 300 km nécessite environ 4 kg de lithium (ou 20 kg de carbonate de lithium) (Bihouix & de Guillebon, 2010). Un ordinateur portable contient en moyenne 5,4 g de lithium alors qu'un téléphone cellulaire en contient 0,3 g (Labbé & Daw, 2012).

Les usages du lithium en verrerie, céramique, coulée continue, graisses lubrifiantes, etc. sont en concentration si faible que leur récupération et leur recyclage sont difficiles. Les verres contenant du lithium peuvent cependant être recyclés comme calcins en verrerie. C'est surtout le secteur des batteries et des piles au lithium qui devrait devenir une source importante de lithium secondaire (Labbé & Daw, 2012).

Considérant les critères présentés en introduction et à la lumière des informations actuellement disponibles, le produit suivant a été retenu pour l'exploration de stratégies de circularité :

- Batteries lithium-ion (dont celles dans les téléphones mobiles, les ordinateurs portables et les véhicules).

3 STRATÉGIES DE CIRCULARITÉ

Pour faire suite à la présentation sommaire de chacun des trois métaux à l'étude, il convient désormais d'explorer diverses stratégies de circularité pouvant leur être associées. Dans les sections suivantes, une revue de littérature des meilleures pratiques en matière de circularité sera présentée, en fonction de chacune des étapes du cycle de vie des métaux. Nous regarderons d'abord les stratégies communes aux métaux et à leurs produits, puis les stratégies propres aux produits contenant les métaux à l'étude.

Force est de constater que plus nous nous rapprochons du produit et de son utilisateur, plus nombreuses sont les opportunités de circularité. Il n'en demeure pas moins que des stratégies de circularité s'avèrent possibles dans les étapes en amont, soit l'extraction, la métallurgie primaire et la transformation métallique. Dans l'analyse, l'accent sera donc mis sur les stratégies de circularité applicables aux produits, mais sans toutefois exclure les premières étapes du cycle de vie.

Les stratégies préconisées peuvent également être influencées par les critères de sélection présentés à la section 2, notamment la durée d'usage du produit, qui influence le potentiel de circularité. Par exemple, pour le bâtiment, dont la durée de vie est plus longue, les stratégies viseront davantage l'écoconception alors que pour des produits de courte durée, des stratégies de réemploi, de reconditionnement ou de recyclage par exemple, gagneront à être prises en compte.

3.1 Stratégies de circularité communes aux métaux et aux produits contenant les métaux

Même si les trois métaux possèdent des caractéristiques qui leur sont propres, il existe néanmoins des stratégies d'ordre plus général qui peuvent leur être associées, et ce, pour chacune des étapes du cycle de vie des métaux, de l'extraction du minerai jusqu'à la fin de vie des produits.

3.1.1 Extraction

L'extraction des minerais et leur disponibilité sont intrinsèquement liées à l'énergie. En effet, à l'échelle planétaire, nous avons exploité d'abord les ressources les plus concentrées et les plus simples à extraire. Les nouvelles mines ont des teneurs en minerai inférieures aux mines épuisées ou sont moins accessibles, plus difficiles à exploiter ou plus profondes (Bihouix, 2015). Par exemple, le minerai de cuivre est passé d'une concentration moyenne de 1,8 % dans les années 30 à une concentration moyenne de 0,8 % aujourd'hui (Bihouix & de Guillebon, 2010). Il faut donc consommer plus d'énergie pour l'extraction des ressources. Recourir à des énergies renouvelables (éolien, solaire) peut apparaître comme une alternative intéressante dans ce contexte, mais ces nouvelles technologies commandent à leur tour des ressources métalliques moins répandues et des matériaux moins facilement recyclables (composites, alliages). Hubert Guillaud, journaliste français, avance même qu'il s'agit là d'un paradoxe : plus d'énergie nécessaire pour des métaux moins concentrés ou moins accessibles ; plus de métaux nécessaires pour une énergie moins accessible (Guillaud, 2015).

Au Québec, dans un contexte de lutte aux changements climatiques, certaines mines se sont tournées vers des sources d'énergie renouvelable. Selon la Commission sur les enjeux énergétiques du Québec de 2014, pour les camps miniers, un cocktail d'éolien, de propane, de gaz naturel liquéfié ou d'équipement à l'hydrogène pourrait réduire le besoin en mazout, beaucoup plus polluant (Lanoue & Mousseau, 2014).

La Vision stratégique du développement minier au Québec met en relief le fait que bien que les efforts de l'industrie minière soient essentiellement orientés vers la croissance de la production à court et à moyen terme, il est clair que l'industrie minière devra, tôt ou tard, prendre position relativement à cette nouvelle tendance qu'est l'économie circulaire. Elle pourrait également y voir des occasions en ce qui a trait au modèle d'affaires, à la réduction des coûts et à l'optimisation des façons de faire (MERN, 2016c). Des actions en faveur d'une industrie durable permettront au secteur minier et métallurgique de se différencier des autres secteurs industriels, de trouver de nouvelles opportunités de croissance et d'initier l'engagement des parties prenantes (World Economic Forum, 2014).

3.1.1.1 Stratégie 1 – Développement technologique - Extraction efficace

Au plan énergétique, 8 à 10 % de l'énergie primaire mondiale est utilisée pour extraire ou raffiner les ressources métalliques et 70 % de cette énergie est consommée par la réduction granulométrique, soit l'opération consistant à produire des grains suffisamment petits pour n'être idéalement constitués que d'un seul minéral (Carencotte, Geldron, Villeneuve, & Gaboriau, 2012).

Il y a donc tout avantage à développer des technologies et à optimiser les procédés pour améliorer l'efficacité des activités extractives et faire des gains énergétiques. À cet égard, des outils logiciels ont été développés pour tester des hypothèses et faire des modélisations, permettant ainsi d'augmenter la récupération des substances utiles tout en réduisant l'extraction de ressources et les impacts environnementaux associés. Par exemple, des entreprises minières commencent à utiliser des capteurs pour surveiller l'utilisation exacte de la machinerie lourde afin d'optimiser leur usage et d'accroître leur durée de vie utile (Accenture Consulting, 2016). Les gros équipements sont généralement munis de senseurs afin de ne pas dépasser la charge maximale, évitant ainsi les bris causés par des surcharges. Dans les mines à ciel ouvert, les camions sont généralement munis de GPS afin de mieux effectuer la répartition et réduire les délais d'attente.

Le Forum économique mondial, dans un rapport prospectif sur le rôle que pourrait jouer le secteur des mines dans un monde durable en 2050, insiste sur le développement technologique pour effectuer cette transition vers des pratiques plus durables et vers l'économie circulaire. Dans cette vision du futur, il avance que les progrès des nanotechnologies, de la robotique et des technologies numériques devraient contribuer à une automatisation des opérations des entreprises minières. Cela devrait concourir à optimiser l'extraction des ressources métalliques. Dans le futur, la maintenance et la réparation feront régulièrement appel à l'impression 3D. Les nouvelles technologies permettront d'améliorer la sécurité ainsi que la productivité, tout en réduisant les coûts. Pour mieux se positionner dans l'économie circulaire, les entreprises du secteur des mines et de la métallurgie doivent investir dans la recherche et le développement technologique et travailler à acquérir de nouvelles compétences en la matière (World Economic Forum, 2014).

3.1.1.2 Stratégie 2 - Entreposage adéquat des rejets miniers pour une extraction ultérieure selon le développement technologique et la valeur - Extraction efficace

Une recherche (Laurence, 2011) a analysé 1000 fermetures de mines au cours des 30 dernières années et a démontré que seulement :

- 25 % ont cessé leurs opérations lorsque tout le minerai était complètement extrait ;
- 75 % des mines étaient closes alors qu'il restait du minerai de valeur ;
- Dans bien des cas, les fermetures s'expliquaient par des conjonctures économiques ou organisationnelles.

Une mauvaise gestion des rejets, une fermeture prématurée et des stratégies d'extraction inefficaces risquent d'amplifier les pertes minérales (Golev & Lebre, 2016). Cet état de fait soulève l'importance pour le secteur minier de développer une pensée à long terme, au-delà de la durée de vie prévue de la mine, et de développer ainsi une meilleure résilience face aux aléas de l'économie.

Dans cette optique, les rejets miniers (rejets de concentrateurs et roches stériles et à faible teneur) peuvent contenir des métaux pour lesquels l'extraction pourrait s'avérer économiquement viable dans le futur, selon le développement technologique et la valeur du minerai. Le coût d'extraction de métaux dans des rejets miniers peut parfois 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).

La figure 3-1 compare les pratiques actuelles d'entreposage des rejets miniers avec des bonnes pratiques par lesquelles les rejets de faible concentration entreposés pourraient être traités après ceux de concentration supérieure et ainsi de suite, lorsque le contexte économique devient favorable. Des métaux de valeur pourraient ainsi être extraits des rejets. L'eau du lac peut également être traitée pour récupérer les métaux, tout en prévenant la contamination. Lors de l'entreposage, il faut s'assurer d'une imperméabilisation, tant sous les rejets que sur les rejets, pour éviter toute contamination ou dilution.

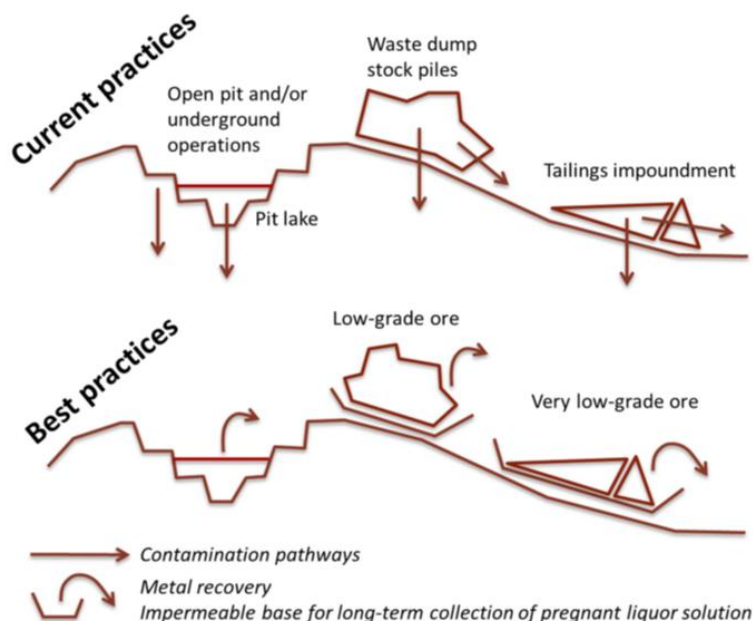


Figure 3-1 Pratiques actuelles de gestion des rejets miniers comparées à une gestion des rejets axée sur la récupération des métaux (Lèbre & Corder, 2015)

Un entreposage favorisant la récupération des métaux pourrait permettre à la mine de diversifier ses activités et d'extraire plusieurs métaux et par le fait même, d'être plus résiliente face aux fluctuations des prix des métaux. Cette pratique permettrait de maximiser l'extraction et ultimement, de réduire l'exploitation de nouvelles mines.

Cette stratégie d'entreposage de rejets miniers a déjà été adoptée par certaines entreprises au Québec. À titre d'exemple, l'entreprise Zinc électrolytique du Canada Itée possède un parc à résidus dédié à des rejets

ayant une teneur en zinc et en d'autres métaux, qu'il pourrait s'avérer pertinent de traiter dans le futur, selon la conjoncture économique et l'évolution technologique.

La gestion des rejets miniers peut s'inscrire dans une hiérarchie de même ordre que celle pour la gestion des matières résiduelles qui préconise le principe des 3RV-E, soit de privilégier dans cet ordre la réduction, le réemploi, le recyclage, la valorisation et enfin, l'élimination. Pour le secteur minier, cette hiérarchie pourrait prendre la forme suivante : prévenir les rejets, retraiter les rejets ayant de la valeur, entreposer les rejets pour des usages futurs, recycler les rejets miniers pour des usages de moindre valeur (ex. : routes), puis enfin, restaurer les sites de rejets miniers lorsque tous les autres usages auront été considérés. Cette hiérarchie est représentée à la figure 3-2.

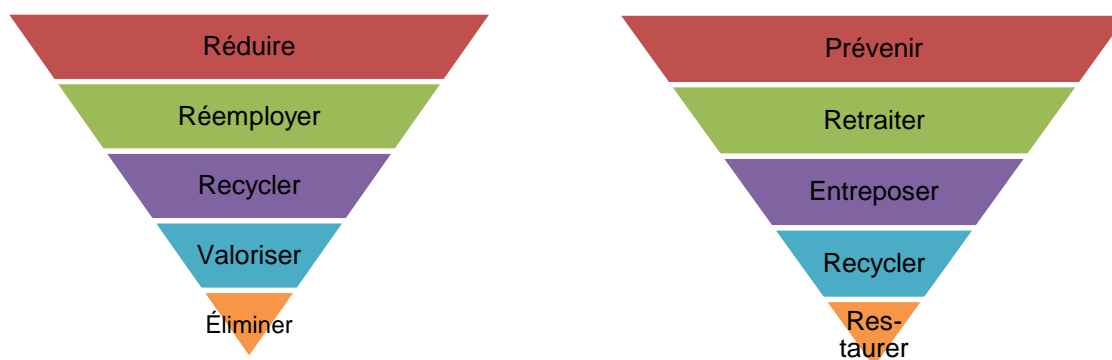


Figure 3-2 Hiérarchie de gestion des matières résiduelles (gauche) ; hiérarchie pour la gestion des rejets miniers (droite) (adaptée de (Lèbre & Corder, 2015))

3.1.1.3 Stratégie 3 - Recyclage des résidus et stériles miniers

Les minéraux contenus dans les minerais étant bien souvent en faibles concentrations, l'activité minière génère d'importantes quantités de résidus. Depuis le 1^{er} janvier 2014, en vertu du Règlement sur les attestations d'assainissement en milieu industriel, les établissements industriels d'extraction de minerai doivent payer des droits annuels variables sur les résidus miniers déposés dans une aire d'accumulation. Le MDDELCC reconnaît les efforts en déduisant de la tarification les résidus miniers qui ont été valorisés. Cela constitue donc un incitatif pour les entreprises minières à valoriser leurs résidus pour réduire le montant de leur facture annuelle.

Les résidus miniers, aussi appelés « rejets de concentrateurs », se présentent sous la forme de fines particules qui s'avèrent souvent réactives au contact de l'air et de l'eau. Sous réserve des autorisations requises, ils peuvent dans certains cas être recyclés en matériaux pour la construction de routes ou encore, comme remblais (Bihouix & de Guillebon, 2010).

Les stériles miniers sont les roches excavées pour parvenir aux minerais exploitables. Ils peuvent être utilisés comme matériaux de construction pour l'aménagement de routes et de digues autour des parcs à résidus. À titre d'exemple, l'entreprise Les Minéraux Harsco, située à Contrecoeur, commercialise à partir de stériles miniers, une large gamme d'agrégats naturels destinés à la construction routière, commerciale, industrielle et résidentielle (Harsco Métaux & Minéraux, 2016).

Il convient de mentionner que dans une optique d'économie circulaire, le recyclage des résidus et stériles miniers dans des applications comme des routes et du ciment constitue un usage dispersif et il devient par la suite difficile, voire impossible, de récupérer les métaux qu'ils pourraient contenir pour les remettre en circulation.

3.1.1.4 Stratégie 4 – Mines urbaines (*urban mining*) - Extraction efficace et recyclage

Déjà en 1961, l'urbaniste James Jacobs avait proclamé que les villes étaient les mines du futur. Une large part des métaux se trouve dans les villes, que ce soit dans la grande variété de produits, les structures et le transport (ex. : chemins de fer, bâtiments abandonnés, ponts). À l'origine, recherchant des bénéfices économiques, l'extraction urbaine a surtout examiné les déchets électriques et électroniques parce qu'ils contenaient des métaux rares ou précieux (Cossu & Williams, 2015). Les « minerais urbains » anthropogéniques peuvent constituer une alternative aux métaux vierges. Leur concentration excède normalement celle retrouvée dans les minerais. Ils peuvent se présenter sous une variété de formes : pure, en alliage, en assemblage complexe comme dans les puces électroniques ou sous des formes dispersives comme dans les peintures. De plus, leur composition varie selon le contexte économique d'un pays. Par exemple, il y aura davantage de cuivre dans les pays développés que dans ceux en voie de développement puisque les réseaux électriques y sont nettement plus présents. Trois éléments sont à considérer pour évaluer le potentiel des mines urbaines (*urban mining*) soit : combien il y a de métal, quand sera-t-il disponible et sous quelle forme (T. E. Graedel, 2011). Globalement, cela implique de procéder à une caractérisation des métaux disponibles (ex. : quantité, répartition, type, forme), d'identifier le ou les propriétaires, de déterminer quels métaux sont susceptibles d'être remis en circulation ainsi que le coût pour les extraire par rapport à leur valeur.

Chaque kilogramme de métal extrait des villes évite l'extraction et la production de métaux vierges, mais des défis persistent pour accélérer la récupération et le recyclage de ces métaux urbains, tant au plan économique, politique que social. De plus, dans certains cas, la filière de recyclage est à développer. Force est de constater qu'à l'heure actuelle, l'extraction urbaine n'a du succès que lorsque les incitatifs économiques sont au rendez-vous. Ces derniers sont bien souvent liés à la valeur des métaux extraits, par exemple l'or dans les bijoux ou encore, le plomb dans les batteries, plutôt qu'à des incitatifs plus larges. (T. E. Graedel, 2011).

3.1.1.5 Stratégie 5 – Exploitation des lieux d'enfouissement (*landfill mining*) – Extraction efficace et recyclage

Dans la même veine que les mines urbaines, l'extraction des minerais pourrait également se tourner vers les lieux d'enfouissement. L'exploitation des lieux d'enfouissement (*landfill mining*) peut se définir comme un procédé d'extraction de minéraux ou de ressources naturelles solides à partir de déchets qui ont été préalablement enfouis (Krook, Svensson, & Eklund, 2012).

Le Québec comptait en 2012, 77 lieux d'élimination répartis de la façon suivante (RECYC-QUÉBEC, 2014):

- 38 lieux d'enfouissement technique (LET) ;
- 13 lieux d'enfouissement de débris de construction et de démolition (LEDCE) ;
- 4 incinérateurs ;
- 22 lieux d'enfouissement en tranchée (LEET).

Typiquement dans le monde, la composition des lieux d'enfouissement est : de 50 à 60 %, en poids, de matériaux de type sol (matériaux de recouvrement et matières fortement dégradées), de 20 à 30 % de

combustibles (ex. : plastique, papier, bois), à 10 % de matériaux inorganiques (ex. : pierres, verre) et, à quelques points de pourcentage, de métaux, principalement des métaux ferreux (Krook et al., 2012).

Les lieux d'enfouissement constituent peut-être les mines du futur, d'autant plus que pour certains métaux, leur concentration n'aurait, semble-t-il, rien à envier aux mines. Dans le cas du cuivre par exemple, on estime dans le monde à 225 millions de tonnes, la quantité qui serait présente dans les lieux d'enfouissement (T. E. Graedel, 2011).

Cinq étapes sont à prévoir pour ce type d'exploitation :

- Étude de caractérisation du site ;
- Évaluation des gains économiques potentiels ;
- Analyse des exigences réglementaires ;
- Élaboration d'un plan préliminaire de santé et sécurité ;
- Évaluation des coûts.

De façon générale, ces opérations d'extraction font appel à des équipements mobiles de criblage et dans quelques cas, à des séparateurs magnétiques. Certaines études ont démontré qu'il serait techniquement possible d'extraire des métaux de haute qualité (ferreux et non ferreux) si des usines de transformation semi-mobiles ou stationnaires plus sophistiquées étaient utilisées, dans la mesure où cela s'avère rentable, ce qui constitue le frein principal aujourd'hui (Krook et al., 2012).

Ce type d'extraction pose des défis au plan technique puisque les sites d'enfouissement, contrairement aux mines, sont formés d'un mélange hétérogène de métaux, tant par leur nature que par leur taille. Leur composition varie également en profondeur, selon les technologies qui prévalaient d'une époque à l'autre. Jusqu'à présent, les principaux travaux en ce sens ont été motivés par le besoin de créer de l'espace pour de nouveaux sites d'enfouissement, mais en fin de compte, peu de matière a réellement été recyclée, et ce, pour deux raisons. D'une part, la matière est souillée ; d'autre part, le prix des matières vierges ne permet pas de rendre l'opération performante au plan financier (Bihoux & de Guillebon, 2010).

Avec les changements à venir sur le plan de la rareté des métaux, de la hausse du prix des matières, de la concurrence pour les ressources naturelles, cette extraction alternative pourrait être appelée à devenir de plus en plus viable et attrayante.

3.1.1.6 Stratégie 6 – Réemploi, réparation, reconditionnement et recyclage des équipements d'extraction

L'une des actions de la Vision stratégique du développement minier au Québec consiste à encourager le partenariat entre les équipementiers et les fournisseurs de différentes régions ayant des expertises complémentaires afin de les rendre plus performants et compétitifs (MERN, 2016c). Une des stratégies à entrevoir pour accroître cette compétitivité consiste à encourager la collaboration de ces différentes parties prenantes afin que les équipements nécessaires à l'extraction des minerais soient conçus pour durer, être réparés et facilement démontables, puis recyclés en fin de vie utile.

Une initiative intéressante est celle de l'entreprise américaine Caterpillar, qui est un important fabricant mondial d'équipements d'extraction. L'entreprise offre un service de reconditionnement via sa marque Cat Reman, qui remet à neuf des produits arrivés en fin de vie. Les produits sont entièrement démontés, nettoyés, inspectés et restaurés afin de leur donner une seconde vie. Ces pièces reconditionnées offrent les mêmes performances que leurs concurrentes neuves, mais à moindre coût. Ce système repose sur l'échange. En effet, un dépôt de garantie est facturé au client et lorsque celui-ci retourne ses composantes usagées, le dépôt de garantie lui est remboursé (Caterpillar, 2016).

Le concessionnaire autorisé Caterpillar pour le Québec et l'ouest du Labrador est Hewitt Équipement Limitée. Cette entreprise a mis en place un service de location d'équipements de même qu'un programme offrant des pièces et équipements d'occasion garantis. De plus, elle offre des programmes de rénovation d'équipements, d'entretien et de réparation (Hewitt, 2016).

Ces initiatives contribuent à allonger la durée de vie et à maximiser la productivité des équipements, évitant ainsi la fabrication d'équipements neufs et les impacts environnementaux associés.

3.1.1.7 Stratégie 7 – Reconditionnement et recyclage des équipements d'extraction laissés sous terre

Il arrive que dans les mines souterraines, surtout celles n'ayant pas de rampe d'accès, les équipements d'extraction soient laissés sous terre à la fin de leur vie utile, particulièrement les équipements qui sont difficiles à démonter et à remonter par les puits. Il s'agit là d'un paradoxe intéressant que de laisser sous terre des équipements fabriqués de concentrés de métal (ex. fer) ayant une valeur certaine, alors que l'objectif des exploitations minières est justement d'obtenir ces concentrés en quantité suffisante et au moindre coût. Dans ce contexte, il serait opportun que les sociétés minières évaluent la possibilité technique et économique de remonter, par rampe ou par puits, ces équipements en pièces détachées afin de les destiner vers les marchés de reconditionnement ou de recyclage.

3.1.1.8 Stratégie 8 – Économie de partage des pièces et équipements de remplacement

Puisque les entreprises minières peuvent difficilement se permettre de cesser leurs activités en cas de bris d'équipements et compte tenu de leur éloignement géographique pour la plupart, elles tiennent un inventaire de pièces et d'équipements en extra. Ces pièces et équipements en doublon s'avèrent utiles en cas de bris, mais peuvent, dans bien des cas, être inutilisés et se détériorer selon les conditions d'entreposage.

Dans ce contexte, une des stratégies à envisager consisterait à favoriser l'économie de partage en encourageant les exploitations minières d'un territoire donné et/ou d'une compagnie donnée à acquérir de façon commune un inventaire de pièces et d'équipements. En plus de leur éviter des coûts et de faire des économies d'échelle pour l'entreposage, cela permettrait d'optimiser l'utilisation de ces pièces et équipements. Chaque partenaire pourrait investir un montant de base pour l'achat des pièces et équipements, puis payer ensuite selon leur utilisation. Cela impliquerait d'avoir un gestionnaire d'inventaire. Le choix, par les sociétés minières, d'équipements similaires et de fournisseurs communs, serait facilitant pour la mise en œuvre d'une telle stratégie.

Par ailleurs, l'impression 3D, qui sera présentée comme 12^e stratégie, pourrait s'avérer utile pour la production à la demande de pièces et d'équipements de remplacement.

3.1.2 Métallurgie primaire

La métallurgie primaire consiste à produire, à partir de concentré métallique, des lingots, brames, billettes, anodes ou cathodes. Des stratégies de circularité peuvent s'appliquer à cette étape du cycle de vie des métaux.

3.1.2.1 Stratégie 9 – Location de la matière métallique – Économie de fonctionnalité

Avec le développement des nanotechnologies sont apparues des stratégies liées à la location de molécule (*rent-a-molecule*). Il s'agit de passer d'une économie de production industrielle à une économie orientée vers la performance du service ou de la connaissance. Les stratégies de location de molécules ont fait leur

apparition dans l'industrie chimique et dans la céramique, mais sont encore très rares dans le secteur métallurgique (Stahel, 2006).

Deux exemples peuvent illustrer ce concept (Stahel, 2010):

- 1- Groupe Cookson (Royaume-Uni) : Cette entreprise a développé une poudre composite qui peut être pressée sous n'importe quelle forme et, lorsqu'elle est magnétisée, devient un aimant permanent extrêmement puissant. Il s'agit d'un matériau idéal pour l'utilisation comme rotor dans les petits moteurs électriques. Après son utilisation, le matériau peut être facilement démagnétisé en le broyant en poudre puis mélangé à nouveau en vue de sa prochaine utilisation.
- 2- Dow Chemical : Par le biais de sa division SafeChem, l'entreprise a opté pour la location de ses produits chimiques plutôt que leur vente. SafeChem fournit les solvants de nettoyage à ses clients et les reprend ensuite dans un système de boucle fermée. Dans les pays qui se sont dotés d'une législation en matière d'inventaire de rejets toxiques, ce modèle de location devient avantageux pour les clients, car ils tiennent un registre sur les quantités de produits chimiques reçus et retournés à SafeChem.

Pour l'industrie de la métallurgie primaire, la location de matière impliquerait de revoir son modèle d'affaires, lequel s'inscrit d'ailleurs dans l'économie de fonctionnalité (voir la stratégie 13 pour plus de détails). Dans ce modèle, l'industrie doit conserver la propriété de son métal, en le louant, par exemple, sous forme de poudre métallique, et en demandant à ses clients, les fabricants principalement, une garantie de retour (Stahel, 2010). Cela nécessite une bonne collaboration des parties impliquées.

La location de matière est basée sur la valeur et la qualité du métal loué plutôt que sur la quantité de métal vendu. En d'autres mots, l'économie de fonctionnalité mise surtout sur la qualité et la valeur du produit loué, à l'inverse du modèle économique actuel qui repose sur la vente de nombreux produits qui s'avèrent parfois de moindre qualité. Les métaux les plus susceptibles d'appliquer ce modèle de location de matière seraient ceux avec un fort potentiel de récupération et une bonne valeur sur le marché, comme le cuivre (Florin et al., 2015). Des recherches supplémentaires s'avèrent nécessaires pour déterminer quels types d'industries métallurgiques pourraient adopter ce modèle de location, en tenant compte par exemple de la performance du recyclage, de la proximité du producteur et de l'utilisateur et des durées raisonnables pour les contrats de location (Florin et al., 2015).

Il est par ailleurs intéressant de signaler que Rio Tinto Fer et Titane commercialise une gamme complète de poudres de fer et d'acier sous l'appellation ATOMET^{MD}, pour lesquelles la clientèle est répartie dans une trentaine de pays. Le modèle est axé sur la vente des poudres. Celles-ci entrent surtout dans la fabrication de pièces mécaniques de précision, permettant de produire des pièces de métal aux formes précises et complexes. L'industrie automobile en est la principale utilisatrice, mais il y a également des clients dans le secteur des appareils ménagers, dans l'outillage, dans les soudures et alliages, etc. (RioTinto, 2016).

3.1.2.2 Stratégie 10 – Recyclage et symbiose industrielle pour les laitiers (scories) et les boues anodiques

La métallurgie primaire du fer et de l'acier produit des laitiers, aussi appelés des scories, tandis que la métallurgie primaire du cuivre produit des boues anodiques. Diverses stratégies sont déjà en œuvre visant à remettre en boucle ces résidus et à leur donner une seconde vie. Il convient ici d'en citer quelques exemples. Ces stratégies n'influencent pas directement la circularité des métaux, mais elles évitent surtout l'exploitation d'autres ressources.

ArcelorMittal Produits longs Canada (Contrecoeur)

Le processus de réduction des boulettes d'oxydes de fer s'effectue par ArcelorMittal Produits longs Canada à Contrecoeur (secteur est). La boue issue du processus de lavage peut être utilisée dans la fabrication de ciment. Quant aux scories (laitiers), il s'agit d'une couche poreuse flottant au-dessus de l'acier en fusion. Elles sont composées principalement de chaux, de silice et d'oxyde de fer. Une fois broyées et tamisées, elles se présentent sous forme d'agrégats pouvant être utilisés pour la construction de routes, comme remblais, comme additifs dans le béton ou encore, comme amendements agricoles (ArcelorMittal Canada, 2015).

Les Minéraux Harsco (Contrecoeur)

Les Minéraux Harsco est une filiale québécoise de la multinationale Harsco Corporation. Cette entreprise de Contrecoeur vise des solutions environnementales pour la gestion des matières résiduelles de l'industrie métallurgique. Elle valorise annuellement près d'un million de tonnes de coproduits de l'industrie métallurgique. Ses principaux clients sont Rio Tinto Fer et Titane, ArcelorMittal et Finkl Steel (Sorel Forge). Elle commercialise deux produits faits à partir des laitiers des sidérurgies :

- 1- Des agrégats utilisés pour les mélanges bitumineux, la construction ou la réparation de routes, la construction sur site, la construction sur terrains municipaux, industriels ou commerciaux ;
- 2- Un amendement calcique et magnésien permettant l'ajustement à la hausse du pH et des minéraux des sols agricoles.

Le métal récupéré est retourné aux aciéries et aux fonderies qui le recyclent au sein de leur production. Il s'agit là d'une symbiose industrielle entre les ferrailleurs, les fondeurs et divers partenaires. Plusieurs projets de cette entreprise sont réalisés en collaboration avec des centres de recherches, tels le Centre de transfert technologique en écologie industrielle (CTTÉI) et le Consortium de recherche appliquée en traitement et transformation des substances minérales (COREM), ainsi que plusieurs universités du Québec (Harsco Métaux & Minéraux, 2016).

CTTÉI (Sorel-Tracy)

Le Centre de transfert technologique en écologie industrielle (CTTÉI), situé à Sorel-Tracy, travaille sur un projet de séquestration du CO₂ provenant de l'industrie métallurgique avec les partenaires industriels suivants : Minéraux Harsco, Rio Tinto Fer et Titane, ArcelorMittal Produits longs Canada. Le projet consiste à utiliser des sous-produits de l'industrie métallurgique riches en hydroxydes susceptibles de séquestrer le CO₂ sous forme de carbonates. L'objectif est d'identifier les conditions d'opération qui favoriseraient une séquestration optimale et rentable du CO₂, tout en s'intégrant harmonieusement aux infrastructures en place. Les entreprises génératrices de CO₂ appliqueraient ainsi le principe d'écologie industrielle et de circularité en séquestrant leurs émissions à même leur site, à partir de leurs propres résidus. Des défis de performance, d'ingénierie et de faisabilité économique doivent être considérés puisque tous les résidus ne possèdent pas le même potentiel de séquestration. La valeur commerciale et les usages possibles des carbonates générés par un tel procédé demeurent des facteurs déterminants dans l'équation économique. Ainsi l'identification de débouchés innovants s'avère essentielle (CTTÉI, 2016).

Eco-Tech Ceram (France)

Eco-Tech Ceram est une société française d'ingénierie en écologie industrielle et lauréate du concours mondial de l'innovation en 2014 et 2015. Elle a développé l'ECOSTOCK, une solution innovante de stockage d'énergie thermique. Il s'agit d'une pile rechargeable de chaleur (*plug & play*) dans laquelle des céramiques

issues de la valorisation de déchets inorganiques, sont utilisées pour stocker puis restituer la chaleur. Selon son président, Antoine Meffre : « *Les laitiers de sidérurgie peuvent également être utilisés pour fabriquer les céramiques avec lesquelles il est possible de valoriser la chaleur perdue de l'aciérie. Il s'agit donc d'une double économie circulaire.* » Une fois stockée, la chaleur peut être utilisée en interne dans le procédé ou en externe pour alimenter une autre industrie ou un réseau de chaleur (Eco-Tech Ceram, 2016).

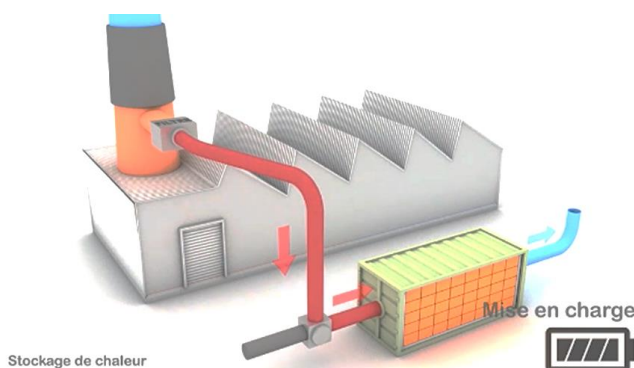


Figure 3-3 Unité de stockage de chaleur ECOSTOCK (Eco-Tech Ceram, 2016)

Affinerie CCR (Montréal-Est)

Affinerie CCR, qui produit des cathodes de cuivre, a développé un procédé pour traiter les boues anodiques, issues du processus d'affinage. Il s'agit des impuretés qui ne sont pas dissoutes dans le bain électrolytique. Ces boues contiennent des métaux précieux. À l'aide d'un convertisseur rotatif permettant de séparer les impuretés et de divers procédés hydro-métallurgiques, l'affinerie est en mesure de produire des lingots d'argent, des lingots d'or ainsi qu'un concentré de platine/palladium (Affinerie CCR, 2016).

Pour certains des exemples présentés ci-dessus, la stratégie préconisée est celle du recyclage. Toutefois, l'utilisation des laitiers dans les routes ou le béton, par exemple, rend difficile, voire impossible, la remise en circuit du métal résiduel. La recherche et le développement doivent donc se poursuivre afin de trouver des applications de recyclage permettant de donner le maximum de valeur aux métaux et aux résidus issus de la métallurgie primaire.

3.1.3 Transformation métallique et fabrication

La transformation métallique consiste à produire des pièces qui seront par la suite modifiées ou assemblées pour fabriquer des produits. Ces pièces peuvent par exemple être des plaques, feuilles, barres, fils, vis, clous, tubes et tuyaux. La fabrication des produits, quant à elle, consiste à assembler diverses pièces afin de créer des produits prêts à l'usage, par exemple des automobiles, des batteries ou des machines industrielles. À ces deux étapes du cycle de vie des métaux, des stratégies de circularité peuvent également s'appliquer. Les stratégies ci-après présentées sont d'ordre général. Des cas plus spécifiques seront présentés dans la section sur les stratégies de circularité propres aux produits contenant les métaux.

3.1.3.1 Stratégie 11 – Écoconception des produits

Les fabricants doivent, dès la conception de leurs produits, veiller à ce que ceux-ci soient réparables, réutilisables, faciles à identifier et démanteler, recyclables en fin de vie, utilisant le moins possible de ressources rares et irremplaçables et contenant le moins de composantes électroniques possible (Bihouix,

2015). De plus, il faut tenter de minimiser les alliages et les usages dispersifs. Lorsque les alliages s'avèrent incontournables, un meilleur marquage de ceux-ci serait une avenue à envisager pour faciliter leur réemploi ou leur recyclage. En bref, une meilleure écoconception des produits est une étape indispensable pour allonger leur durée de vie et contribuer à leur circularité.

3.1.3.2 Stratégie 12 – Impression 3D - Écoconception et réparation

D'abord associée au secteur de la plasturgie, la fabrication additive, plus connue sous le nom d'impression 3D, est maintenant utilisée en métallurgie, notamment dans les secteurs aéronautique, automobile, médical et dentaire. Elle permet déjà des gains économiques pour certains fabricants, leur évitant l'outillage et l'énergie habituellement nécessaires à un procédé manufacturier conventionnel. Cette technologie permet de produire des formes aux géométries parfois complexes.

Selon l'évolution de l'accessibilité (ex. : coût, facilité d'utilisation) de cette technologie, elle pourrait éventuellement délocaliser en partie la fabrication des produits chez les consommateurs, entraînant ainsi de profonds bouleversements dans le secteur manufacturier. Cette technologie du 21^e siècle est appelée à jouer un rôle dans l'économie circulaire (Campbell, Williams, Ivanova, & Garrett, 2011; Giurco, Littleboy, Boyle, Fyfe, & White, 2014):

- Elle permet de faire des prototypes sans devoir recourir à un procédé manufacturier et tous les équipements qui y sont associés.
- Elle réduit les rejets de production en n'utilisant que la matière qui s'avère nécessaire.
- Elle devrait rendre plus abordables par les consommateurs, les pièces de rechange nécessaires à la réparation des produits. Dans ce contexte, l'impression 3D pourrait être envisagée pour les pièces et équipements de remplacement dans l'industrie minière, par exemple.
- Elle contribue à ce que les produits soient plus facilement assemblés et désassemblés par les consommateurs, optimisant ainsi le réemploi et la récupération des matériaux qui les composent.
- Elle permet de personnaliser des produits et ainsi, de mettre un terme à la génération de produits superflus, typiques de l'approche « *one size fits all* » des entreprises manufacturières. Ce scénario implique toutefois que les consommateurs soient habilités à designer des produits et que les logiciels de conception assistée leur soient accessibles. Il pourrait également y avoir des modèles préconçus pour leur rendre la tâche moins ardue. Il existe déjà une plateforme Internet, Shapeways.com, permettant aux consommateurs de fabriquer, vendre et acheter des objets imprimés en 3D, dont des objets métalliques.
- Elle peut réduire l'empreinte carbone des produits en minimisant leur transport et en réduisant l'énergie nécessaire à leur fabrication.

Un effet pervers de l'impression 3D, si elle devient omniprésente et peu dispendieuse, serait la production en masse de produits faits sur mesure, ce qui viendrait accentuer la pression sur les ressources et le gaspillage. Cette technologie nécessite donc un certain encadrement et de la recherche afin de s'assurer que les matériaux utilisés et le design des produits ainsi créés permettent leur réparation et leur recyclage.

3.1.3.3 Stratégie 13 – Économie de fonctionnalité

Avec la volatilité du prix des matières premières, il devient de plus en plus difficile pour les entreprises manufacturières de prévoir le coût de revient de leurs produits. Si un fabricant veut s'affranchir du risque associé à la grande variation du cours des matières premières, il a tout intérêt à rester propriétaire de son produit. L'économie de fonctionnalité s'appuie sur la vente de l'usage du produit plutôt que du produit lui-même. Dans ce modèle, le fabricant reste propriétaire de son capital matière et le client paie pour l'usage ou le service rendu par le produit. Afin d'amortir ses coûts sur le plus grand nombre d'usages, le fabricant est ainsi incité à mieux concevoir ses produits de manière à ce qu'ils soient durables, réparables et recyclables. L'économie de fonctionnalité comporte beaucoup d'avantages pour le fabricant. Ce modèle lui permet d'accroître sa marge de profit, car il est en général moins dispendieux de reconditionner un produit plutôt que d'en fabriquer un nouveau. Il lui permet également d'établir une relation à long terme avec ses clients, car la vente de l'usage fait habituellement appel à des contrats à moyen ou long termes entre le manufacturier et son client. Enfin, en plus d'apporter une différenciation par rapport à ses concurrents, cette stratégie contribue à réduire l'empreinte environnementale des activités de l'entreprise.

3.1.4 Utilisation

L'utilisation est l'étape du cycle de vie où sont utilisés les produits par les consommateurs. Plus nous nous approchons de l'utilisateur, plus grandes sont les possibilités de circularité. Plusieurs stratégies seront présentées dans la section sur les produits, mais en voici deux de nature plus générale, soit la réparation et l'économie de partage.

3.1.4.1 Stratégie 14 – Atelier de réparation (*Repair Café*) – Réparation

Le *Repair Café* est un lieu où des citoyens se réunissent pour réparer divers objets. Des outils et du matériel sont mis à leur disposition et des experts bénévoles, ayant des connaissances et compétences dans le domaine de la réparation, y sont présents pour accompagner les citoyens dans la réparation de leurs objets. Le tout premier *Repair Café* a vu le jour en 2009 à Amsterdam et depuis, l'initiative s'est répandue à travers le monde. Une fondation créée en 2011 aide des groupes locaux à démarrer leur propre *Repair Café* et il y a même une trousse de démarrage mise à leur disposition. Le ministère de l'environnement des Pays-Bas a même investi près d'un demi-million de dollars dans les *Repair Cafés*.

À ce jour, il existe 1 164 *Repair Cafés*, présents dans 29 pays et sur 6 continents. Il y a au Canada 21 *Repair Cafés*, lesquels sont situés en Ontario, en Nouvelle-Écosse, en Alberta et en Colombie-Britannique. Aucun n'est encore officiellement enregistré au Québec, mais depuis 2015, Communautique, en collaboration avec le réseau des Ruches d'art, organise des ateliers de réparation collective inspirés des *Repair Cafés*.

3.1.4.2 Stratégie 15 – Échange d'objets et d'outils – Économie de partage

L'économie de partage, l'une des stratégies de l'économie circulaire, repose sur le partage ou la mise sur le marché (via des plateformes) de l'usage d'un bien que l'on possède, permettant ainsi de maximiser l'usage de ce bien avant sa mise au rebut. Elle consacre le passage d'une culture de consommation et de possession à une culture de consommation centrée sur l'usage. La location, la vente ou l'achat de produits d'occasion peuvent conduire à un meilleur pouvoir d'achat des consommateurs et c'est d'ailleurs souvent la raison qui les motive à embrasser ce modèle. Il faut toutefois veiller à ce que ce pouvoir d'achat ne se traduise pas par une consommation de biens neufs, ce qui aurait pour effet de diminuer les bénéfices environnementaux.

Les exemples d'économie de partage se sont multipliés depuis quelques années, en voici quelques-uns.

La Remise (Montréal)

Mise sur pied en 2015 et située dans le quartier Villeray à Montréal, La Remise est une coopérative de solidarité à but non lucratif qui entretient des outils d'usage commun (ex. : cuisine, menuiserie, mécanique) et qui les met à la disposition de ses membres sous forme de prêts. Un peu à la manière d'une bibliothèque de livres, il s'agit ici d'une bibliothèque d'outils. Plusieurs de ces outils ont été obtenus grâce à des dons de particuliers. En plus d'offrir des outils à ses membres, La Remise organise des ateliers de formation portant sur la menuiserie, la mécanique de vélo, la couture et l'électronique (réparation de petits appareils électroniques). Cette initiative, en plus de contribuer à réduire la consommation, s'avère économiquement avantageuse pour les membres (La Remise, 2016).

Maxloc - plateforme de location de produits entre particuliers (Québec)

Maxloc.ca est une plateforme québécoise lancée en 2013 par deux jeunes entrepreneurs montréalais, permettant aux particuliers de mettre en location leurs produits, mais aussi d'en louer à d'autres particuliers. L'idée est de faire profiter aux autres, les objets dont on ne se sert que quelques fois dans l'année, et ce, tout en les rentabilisant. Les locataires sont libres de déterminer leur prix et le montant de l'amende en cas de retard. Déjà, plus de 3 000 produits sont disponibles en location sur ce site (Maxloc, 2016).

Mutum – plateforme gratuite d'échange d'objets entre particuliers (France)

À la différence de Maxloc, la plateforme française Mutum repose sur la gratuité. Cette plateforme, fondée en 2014, permet de prêter des objets qui servent peu et d'emprunter gratuitement ceux dont on a besoin, grâce à une monnaie d'échange, le mutum. La valeur en mutums est associée à la valeur d'utilisation de l'objet et est calculée selon un algorithme bien précis. L'entreprise fait appel à la ludification (*gamification*) et a également développé une application mobile (Mutum, 2016).

3.1.5 Fin de vie

La fin de vie est l'étape où le produit ne peut plus être réemployé, reconditionné ou réparé. C'est à cette étape qu'il devient opportun de regarder d'autres stratégies, telles le recyclage, le compostage ou la valorisation énergétique. L'économie circulaire nous conduit à repenser la gestion des matières résiduelles pour la voir davantage en termes de gestion des ressources. Il n'en demeure pas moins qu'à l'heure actuelle, le recyclage des matières résiduelles prédomine le discours ainsi que les politiques gouvernementales en matière d'économie circulaire, et ce, même s'il s'agit d'une stratégie qui doit être envisagée davantage en aval.

3.1.5.1 Stratégie 16 – Recyclage des métaux

Au Québec, nous distinguons trois secteurs dans lesquels les matières résiduelles sont générées :

- Le secteur municipal ;
- Le secteur des industries, commerces et institutions (ICI) ;
- Le secteur de la construction, rénovation, démolition (CRD).

La nature, la composition, la quantité de même que la qualité des matières récupérées varient selon chacun de ces secteurs.

De plus, les métaux récupérés peuvent être classés en deux grandes catégories : les métaux ferreux et les métaux non ferreux.

Le tri à la source est primordial pour obtenir des métaux de qualité. Outre le tri manuel, plusieurs technologies facilitent la séparation. Le tri magnétique, par exemple, permet de séparer les métaux ferreux ; le séparateur à courant de Foucault trie l'aluminium ; le tri optique (ex. : à rayons X, à laser) reconnaît les catégories de métal et les sépare à l'aide de buses d'air qui projettent les métaux dans divers compartiments.

Pour certains produits, il est préférable de favoriser les circuits de récupération, de tri et de recyclage en boucle fermée, afin d'éviter la contamination par d'autres matières et d'obtenir une homogénéité dans les produits récupérés. À ce titre, le Règlement sur la récupération et la valorisation des produits par les entreprises, qui s'appuie sur le principe de la responsabilité élargie des producteurs (REP) et qui est en vigueur depuis juillet 2012, oblige les entreprises qui mettent sur le marché québécois des produits à les récupérer et à les traiter à la fin de leur vie utile. Les entreprises visées sont les détenteurs de marques ou les premiers fournisseurs au Québec et les produits visés sont les suivants :

- huiles, antigels, liquides de refroidissement, leurs contenants et leurs filtres, nettoyeurs à freins ;
- peintures, teintures, vernis, apprêts, laques et enduits protecteurs, tous leurs contenants, incluant les aérosols ;
- lampes au mercure incluant les fluorescents et fluocompactes ;
- piles rechargeables et non rechargeables ;
- produits électroniques : ordinateurs, écrans et périphériques, téléviseurs, téléphones cellulaires, sans fil et conventionnels, imprimantes, numériseurs, télécopieurs, lecteurs de livres électroniques, appareils audio et vidéo, caméras et autres accessoires électroniques et informatiques (RECYC-QUÉBEC, 2016b).

Le 25 novembre 2016, le ministre Heurtel annonçait que les gros appareils électroménagers étaient choisis comme produits prioritaires afin qu'ils soient les prochains à être visés par ce règlement (MDDELCC, 2016).

En 2011 au Québec, 168 000 tonnes métriques de métaux ont été éliminées (enfouies), tous secteurs confondus (RECYC-QUÉBEC, 2012). En 2012, 30 000 tonnes métriques de métaux (ex. : contenants, emballages) provenant du secteur résidentiel ont été récupérées, ce qui porte à 52 % le taux de récupération au niveau résidentiel (RECYC-QUÉBEC, 2014). Au Québec, il n'y a pas de données sur les quantités récupérées propres à chaque métal (ex. : cuivre, fer, lithium), ni même sur la traçabilité des matières récupérées. Voici néanmoins quelques informations obtenues pour chacun des trois métaux :

- 1- Cuivre : Le cuivre se recycle bien car on le retrouve généralement sous sa forme pure. Il est reconnu pour avoir une bonne valeur et par conséquent, se trouve convoité. En 2015, la Fonderie Horne aurait recyclé 26 500 tonnes de cuivre et 1,6 million d'onces de métaux précieux à partir de 106 000 tonnes de matières récupérées (Glencore - Fonderie Horne, 2016).
- 2- Fer : En 2015, ArcelorMittal Canada aurait recyclé 2,66 millions de tonnes métriques de ferraille. L'entreprise affirme que 68 % de chaque tonne d'acier qu'elle produit provient de ferraille d'acier recyclées (ArcelorMittal Canada, 2015). AIM est également un important recycleur de ferraille au Québec et au Canada. Elle reçoit et trie divers métaux dont l'acier et le cuivre, puis les expédie aux fonderies et aux aciéries en vue de leur recyclage, au Canada et à l'international.
- 3- Lithium : Le taux mondial de recyclage du lithium est de moins de 1 %. C'est d'ailleurs le cas pour 32 des 37 métaux considérés comme spécialisés et utilisés en grande partie dans les nouvelles technologies

(UNEP, 2011). Des entreprises sont actives dans le recyclage des batteries et seront présentées dans la section sur les stratégies propres aux batteries.

Le recyclage des métaux contribue aux économies d'énergie, car l'énergie consommée pour produire des métaux recyclés est significativement inférieure à celle nécessaire pour la production primaire. Par exemple, la production de cuivre recyclé permettrait une économie d'énergie de 85 % par rapport à la production de cuivre vierge (Bihouix & de Guillebon, 2010).

Malgré le fait que le recyclage atténue le besoin d'extraire des ressources, il n'en demeure pas moins que son efficacité et son bilan net sont affectés par le taux de croissance de l'extraction des matières premières. En effet, selon les professeurs Christian Arnsperger et Dominique Bourg (Arnsperger, 2016) :

« Dès que l'on dépasse un taux de croissance annuelle de 1 % pour la consommation mondiale d'une matière première, les effets du recyclage s'évanouissent. En revanche, plus le taux de croissance est bas et plus le taux de recyclage est élevé, plus on s'approche de la circularité et plus on met à distance l'échéance d'un épuisement de la ressource concernée ».

Par exemple, en 2015, 4 millions de tonnes de cuivre ont été recyclées au niveau mondial, alors que la consommation mondiale annuelle était de 16 millions de tonnes. Il fallait donc extraire 12 millions de tonnes de cuivre. Dans le cas de l'acier, avec une croissance de production-consommation de 3,5 % et un taux de recyclage de 62 %, on ne gagne que 12 années contre la raréfaction de la ressource en fer (Arnsperger & Bourg, 2016).

En outre, il s'avère impossible de recycler 100 % des métaux pour deux raisons : les usages dispersifs et les alliages. Cela nous amène à explorer deux nouvelles stratégies.

3.1.5.2 Stratégie 17 – Recyclage des alliages

Il est difficile de recycler correctement tous les métaux, car les produits sont souvent complexes, avec des alliages, des composites, des composants miniatures, etc. La capacité technologique ou économique à repérer les différents métaux ou à les séparer est donc limitée (Bihouix, 2015). Qui plus est, les métaux ajoutés dans les alliages sont souvent en faible proportion, ce qui rend le processus de séparation très complexe (T. E. Graedel, 2011).

Il est possible d'organiser des filières de récupération avec des ferrailleurs en vue de trier les différentes sortes d'alliages (Bihouix & de Guillebon, 2010) et d'identifier des applications de recyclage dans lesquelles ces alliages continueront à jouer leur rôle, préservant ainsi leur valeur. Des détecteurs à rayons X permettent de reconnaître les divers alliages et de faciliter ainsi leur classement. La préoccupation des recycleurs est d'obtenir une matière de composition connue et constante afin de rencontrer les spécifications de leurs clients. Bien souvent, ils doivent mélanger des métaux secondaires avec des métaux vierges afin de rencontrer ces exigences.

Par ailleurs, les métaux non ferreux contenus dans les aciers alliés sont recyclés de manière indifférenciée et finissent généralement dans des usages moins nobles comme les ronds à béton du bâtiment (Bihouix, 2015). Une des stratégies à entrevoir serait donc d'investir dans la recherche et le développement de technologies qui permettraient de défaire les alliages et ainsi, pouvoir récupérer, en tout ou en partie, les divers métaux ferreux et non ferreux qui les composent. La valeur des métaux alliés constituera sans aucun doute un facteur déterminant pour l'attractivité d'une telle mesure.

3.1.5.3 Stratégie 18 – Recyclage des usages dispersifs ou de faible concentration

Il faut être en mesure de récupérer physiquement la ressource pour la recycler, ce qui n'est pas possible dans le cas des usages dispersifs.

La stratégie à explorer serait donc de trouver des applications de recyclage dans lesquelles les usages dispersifs ou de faible concentration auront une valeur ajoutée et maintiendront leur fonction (ex. : abaisser le point de fusion dans le cas du lithium utilisé dans le verre et la céramique).

Qui plus est, cette stratégie permettra de réduire la demande pour du métal vierge dans ces applications à valeur ajoutée. Par exemple, si les verres contenant du lithium sont recyclés en boucle fermée dans le même secteur, on aura comme conséquence une plus faible demande de lithium en verrerie.

Le tableau 3-1 présente une synthèse des stratégies de circularité communes aux métaux et aux produits contenant les métaux selon chacune des étapes du cycle de vie, ainsi que leur niveau de maturité général au niveau mondial (1 : nouveauté ; 2 : en développement ; 3 : en application).

Tableau 3-1 Synthèse des stratégies de circularité communes aux métaux et aux produits contenant les métaux

ÉTAPE	NO	STRATÉGIE(S)	TYPE(S) DE STRATÉGIE(S) / OUTIL(S)	NIVEAU DE MATURITÉ*
Extraction	1	Développement technologique (logiciels, robotique) pour extraire les minerais de façon plus efficace	Extraction efficace	3
	2	Entreposage adéquat des rejets miniers pour une extraction ultérieure suivant le développement technologique et la valeur du minerai (pensée à long terme)	Extraction efficace	2
	3	Recyclage des résidus et stériles miniers Utilisation des stériles miniers comme agrégats (ex. Les Minéraux Harsco, Contrecœur)	Recyclage	3
	4	Mines urbaines (<i>urban mining</i>) : récupération des métaux disponibles en milieu urbain	Extraction efficace, recyclage	2
	5	Exploitation de lieux d'enfouissement (<i>landfill mining</i>) : récupération des métaux dans les lieux d'enfouissement	Extraction efficace, recyclage	1
	6	Réemploi, réparation, reconditionnement et location d'équipements d'extraction ; offre d'équipements usagés (ex. : Caterpillar)	Réemploi, réparation reconditionnement	3
	7	Reconditionnement ou recyclage des équipements d'extraction laissés sous terre	Reconditionnement, recyclage	1
	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	Économie de partage	1
Métallurgie primaire	9	Location de la matière métallique	Économie de fonctionnalité	1
	10	Recyclage et symbiose industrielle pour les laitiers (scories) et les boues anodiques <u>Exemples</u> : Laitiers utilisés pour routes, remblais, béton, amendements agricoles (ex. : ArcelorMittal, Contrecœur) Utilisation des laitiers comme amendement agricole et agrégat (ex. : Les Minéraux Harsco, Contrecœur)	Recyclage et symbiose industrielle	3

		Séquestration de CO ₂ avec les sous-produits de l'industrie métallurgique (ex. : CTTÉI, Sorel-Tracy) Céramiques de stockage d'énergie thermique à partir des laitiers (ex. : Eco-Tech Ceram, France) Récupération des métaux (précieux) dans les boues anodiques (ex. : Affinerie CCR, Montréal-Est)		
Transformation métallique et fabrication	11	Écoconception des produits : minimisation des alliages et des usages dispersifs, produits durables, réparables, recyclables	Écoconception	2
	12	Impression 3D : fabrication de pièces métalliques optimisant le processus de fabrication et stimulant la réparation	Écoconception et réparation	2
	13	Économie de fonctionnalité : vente de l'usage du produit plutôt que du produit lui-même	Économie de fonctionnalité	2
Utilisation	14	Atelier de réparation d'objets par les usagers (ex. : <i>Repair Café</i> , 29 pays)	Réparation	3
	15	Échanges d'objets et d'outils entre particuliers <u>Exemples</u> : Bibliothèque d'outils - dons et locations par les membres (ex. : La Remise, Montréal) Plateforme de location de produits et services entre particuliers (ex. : Maxloc, Québec) Plateforme gratuite d'échange d'objets entre particuliers (Mutum, France)	Économie de partage	3
Fin de vie	16	Recyclage des métaux (ex. : Fonderie Horne, ArcelorMittal, AIM)	Recyclage	3
	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,	Recyclage	1
	18	Recyclage des usages dispersifs ou de faible concentration : applications dans lesquelles les usages conservent leur fonction	Recyclage	1

***Niveau de maturité :**

Nouveauté	1
En développement	2
En application	3

3.2 Stratégies de circularité propres aux produits contenant les métaux

Force est de constater que l'économie circulaire des trois métaux à l'étude ne peut être complète sans faire intervenir les produits contenant ces métaux. D'ailleurs, comme il a été mentionné au préalable, les stratégies de circularité sont multiples lorsqu'on est au stade des produits. Les stratégies qui seront exposées ci-après sont rattachées aux produits sélectionnés aux sections 2.1 à 2.3 et sont liées aux étapes de fabrication, de l'utilisation ou de la fin de vie des produits. Bien que ces stratégies semblent a priori éloignées des étapes d'extraction et de métallurgie primaire, leur mise en œuvre peut entraîner des répercussions positives sur l'ensemble de la filière. L'économie circulaire nous conduit ainsi à donner vie à des stratégies pour chacune des étapes du cycle de vie d'un produit, de l'extraction à la fin de vie.

3.2.1 Fils et câbles électriques

Les équipements électriques, tels les fils, câbles et composantes électriques, sont composés principalement de cuivre puisque ce métal constitue un excellent conducteur électrique. Trois stratégies méritent notre attention.

3.2.1.1 Stratégie 19 – Écoconception de fils modulaires pour le réemploi ou le recyclage (fabrication)

En plus des distributeurs, quelques compagnies au Québec fabriquent des câbles et fils électriques, telles la compagnie General Cable à Saint-Jérôme ou encore, PTI Cables à Pointe-Claire. Dès l'étape de fabrication des câbles et fils électriques, il serait intéressant de les concevoir de manière à ce qu'ils soient plus facilement réemployés ou recyclés. Par exemple, puisque les câbles et fils ont souvent des diamètres et des longueurs variables selon les usages, pourrions-nous envisager des longueurs fixes, modulaires, favorisant ainsi leur réemploi ? Ou encore, la gaine isolante en polymère pourrait-elle être plus aisément détachable du fil ou du câble de cuivre pour qu'on puisse en poser une nouvelle lorsqu'elle se dégrade, et ainsi, allonger la durée de vie ? Si la conception est repensée et que les composantes du câble ou du fil se séparent plus facilement, cela pourrait également aider au processus de recyclage.

3.2.1.2 Stratégie 20 – Recyclage de câbles et fils électriques (fin de vie)

En matière de recyclage de câbles et fils électriques de cuivre, une des bonnes pratiques est mise en œuvre par la compagnie Recycâbles en France, une filiale de Suez Environnement (Sita). Recycâbles est détenue à 36 % par la compagnie Nexans, un important fabricant de fils et câbles de cuivre. Recycâbles, qui se dit numéro un du recyclage des câbles en France, aurait recyclé 22 000 tonnes de câbles en 2008, issus de ses sites européens et africains, qu'il s'agisse de câbles électriques, de télécommunications, de câbles spéciaux ou ceux issus de chantiers de démolition (Nexans, 2016).

Voici les étapes générales de traitement, lesquelles sont détaillées à la figure 3-4 (Suez Environnement, 2016):

- tri par un personnel formé à la reconnaissance des différents câbles ;
- cisailage (coupe des câbles) ;
- dégainage (séparation de la gaine de plomb du cuivre isolé) ;
- broyage ;
- séparation des différentes composantes (cuivre, aluminium, plastiques).

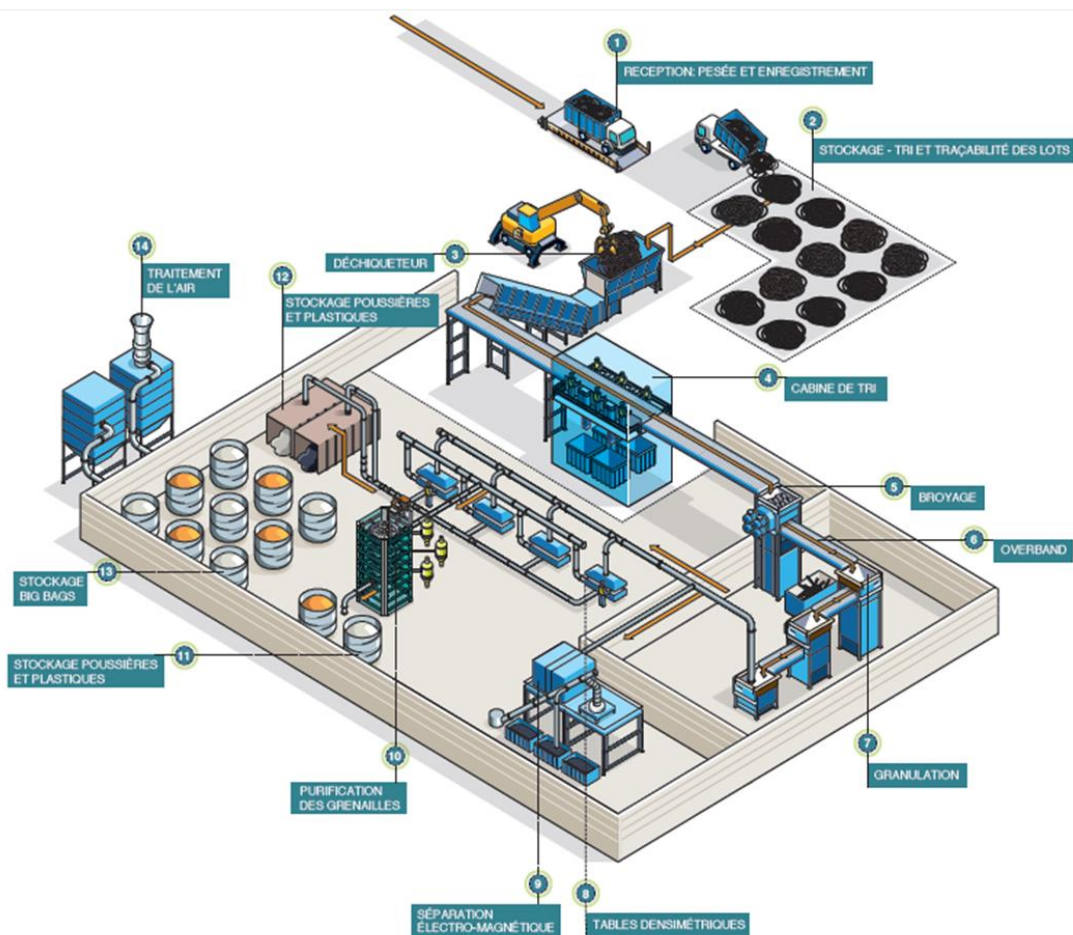


Figure 3-4 Procédé de recyclage des câbles électriques - Recycâbles (Suez Environnement, 2016)

Nexans a investi 10 millions d'euros dans ce procédé qui contribue à sécuriser son approvisionnement. En effet, Nexans s'approvisionne en cuivre et en aluminium recyclés auprès de Recycâbles, pour la fabrication de nouveaux câbles. Les plastiques sont recyclés, quant à eux, en revêtements extérieurs, en bordures de trottoirs ou en cônes de signalisation (Nexans, 2016).

Puisque Nexans est également présent à Montréal-Est, il serait intéressant d'évaluer si une telle activité de recyclage pourrait se mettre en marche au Québec.

3.2.2 Électroménagers (petits et gros)

Les électroménagers, petits et gros, contiennent généralement du cuivre ainsi que du fer (acier). Deux stratégies pourraient être envisagées, l'une ciblant la réparation, l'autre, l'économie de fonctionnalité.

3.2.2.1 Stratégie 21 – Mise en marché de petits électroménagers réparables – Réparation (utilisation)

SEB est un fabricant français de petits électroménagers qui possède, en plus de ses marques locales, des marques mondiales, à savoir Tefal et Rowenta. L'entreprise fabrique notamment des friteuses, grille-pains,

cafetières électriques, bouilloires, robots culinaires, fers à repasser, aspirateurs, qui sont vendus dans 150 pays. Elle s'est récemment engagée à rendre réparables ses produits pour une durée de 10 ans. Pour ce faire, SEB entreposera pour 10 ans en moyenne, toutes les pièces détachées de ses appareils commercialisés depuis 2012, ce qui représente 6 millions de pièces détachées entreposées à Faucogney-et-la-Mer, en France. Lorsque le stock de pièces aura été épuisé, SEB pourra produire, lorsque faisable, des pièces par le biais de l'impression 3D. Afin de rendre le tout possible, SEB a investi massivement dans la conception de produits facilement démontables et réparables. Avec 300 nouveaux produits mis en marché annuellement, ces pratiques de conception mobilisent une équipe de 20 ingénieurs.

L'entreprise a déployé un réseau de 6 500 réparateurs, répartis à travers le monde, dont 250 sont situés en France. Elle s'engage à livrer au réparateur les pièces de rechange dans un délai de 24 à 48 heures et garantit à ses clients un prix de réparation inférieur au coût d'achat d'un appareil neuf. Pour le directeur de la satisfaction client et de l'après-vente du groupe SEB : « *Chaque produit réparé, c'est une vente qui ne va pas chez nos concurrents* ». De plus, cela permet à l'entreprise d'accroître la qualité de ses produits futurs, en acquérant une meilleure connaissance sur les composantes qui font défaut (Arrivet, 2016)

Cette initiative, misant sur la réparation, s'inscrit dans les nouvelles mesures en faveur de l'économie circulaire, mises en place par la Commission européenne et portant notamment sur l'écoconception et la réparation des produits.

3.2.2.2 Stratégie 22 – Économie de fonctionnalité pour les électroménagers (utilisation)

Afin d'allonger la durée de vie des petits et gros appareils électroménagers, il serait opportun de favoriser le développement de modèles d'affaires basés sur l'économie de fonctionnalité. Par exemple, le consommateur pourrait louer les services alors que les fabricants s'assureraient de la maintenance, de la réparabilité, de la durabilité et de la recyclabilité de leurs appareils. Cette stratégie risque de faire face à l'obsolescence et à l'effet de mode, omniprésents à l'heure actuelle, mais des manufacturiers et des consommateurs, prêts à adopter ce nouveau modèle, pourraient en retirer des bénéfices au plan économique.

3.2.3 Équipements mécaniques et industriels

Les équipements mécaniques et industriels, contenant pour la plupart du fer et du cuivre, représentent une quantité non négligeable de produits finis importés au Québec, qu'il s'agisse par exemple de machines et d'appareils pour la production du froid, pour l'emballage ainsi que pour le lavage, le chargement, le déchargement et la manutention.

3.2.3.1 Stratégie 23 – Modularité des procédés industriels – Maintenance, réparation, réemploi (utilisation)

D'une part, la maintenance et la réparation des équipements mécaniques et industriels s'avèrent essentielles pour assurer la plus longue durée de vie possible. Cela suppose que ces équipements soient facilement réparables. Ces pratiques sont bien répandues dans le secteur industriel.

D'autre part, dans le cas des procédés industriels qui font souvent appel à plusieurs équipements, il y aurait avantage à concevoir des systèmes de production modulaires de formats standards et compatibles, pouvant ainsi être réemployés et réorganisés selon les besoins de production, évitant ainsi l'achat d'équipements neufs et la pression sur les ressources métalliques. La combinaison de sous-systèmes modulaires standards amène donc une flexibilité dans le système de production global. Pour les manufacturiers, la modularité des

procédés, en plus de réduire le coût d'achat des équipements, les aide à réagir rapidement selon l'évolution du marché et de la demande. Elle leur permet d'adapter l'architecture du système en changeant un ou quelques modules, sans devoir remplacer l'ensemble des installations (Bejlegaard, Brunoe, & Nielsen, 2016).

3.2.4 Téléphones mobiles et ordinateurs portables

Les téléphones mobiles et les ordinateurs portables contiennent notamment du cuivre et du lithium. Avec une durée d'utilisation moyenne inférieure à deux ans et demi (Ellen MacArthur Foundation, 2012), le téléphone mobile, bien que contenant de faibles quantités de cuivre et de lithium, représente tout de même un certain potentiel de circularité. Il en est de même pour les ordinateurs portables et les autres appareils informatiques, pour lesquels la durée de vie est également très brève. Bien qu'il n'existe pas de fabricants de téléphones et ordinateurs québécois, il s'avère intéressant d'explorer des stratégies de circularité sur ces produits, afin de prolonger leur durée de vie et de donner le maximum de valeur aux métaux qu'ils contiennent.

3.2.4.1 Stratégie 24 – Écoconception des téléphones mobiles pour le réemploi, la réparation ou le reconditionnement (fabrication)

Selon la Fondation Ellen MacArthur, parmi les 10 à 12 principales composantes d'un téléphone mobile, les meilleurs candidats pour le reconditionnement sont la caméra, l'écran et potentiellement la batterie et le chargeur. En plus d'avoir une bonne valeur, ces composantes sont relativement faciles à démonter, et pourraient donc éventuellement être réintroduites dans de nouveaux appareils. Pour faciliter ce reconditionnement des téléphones mobiles, il faudrait s'entendre avec les fabricants pour standardiser les composantes clés (Ellen MacArthur Foundation, 2012). À l'heure actuelle, la variabilité d'un modèle à l'autre complexifie la circularité.

D'ailleurs, sur le plan de l'écoconception des téléphones intelligents, deux exemples européens méritent une attention particulière.

Fairphone (Pays-Bas)

Le Fairphone, créé aux Pays-Bas, est un téléphone modulaire conçu de façon à réparer uniquement les pièces brisées plutôt que de remplacer la totalité de l'appareil. Cette compagnie néerlandaise a le souci de faire appel à des fournisseurs respectueux de l'environnement et du bien-être des employés. En plus d'encourager le réemploi et la réparation de ses téléphones, elle utilise des métaux recyclés autant que faire se peut. Elle vend également des pièces détachées pour permettre la réparation et offre des tutoriels de réparation en ligne. Enfin, elle a mis sur pied un programme de reprise des téléphones usagés afin que ces derniers soient réemployés ou recyclés adéquatement (Fairphone, 2016).

PuzzlePhone (Finlande)

Le PuzzlePhone (voir Fig. 3-5), fabriqué en Finlande est un téléphone intelligent conçu en trois parties :

- le cerveau (*brain*) qui contient les éléments électroniques tels la RAM, la mémoire, la caméra ;
- la colonne (*spine*) qui est la structure ;
- le cœur (*heart*) qui contient la batterie.

Outre la batterie, dont la durée de vie est estimée à trois ans, les autres composantes peuvent durer jusqu'à 10 ans. Les trois modules peuvent être changés aisément par le consommateur, comme un casse-tête (PuzzlePhone, 2016).



Figure 3-5 PuzzlePhone (PuzzlePhone, 2016)

3.2.4.2 Stratégie 25 – Portail de réparation des téléphones intelligents et tablettes – Réparation (utilisation)

En France, il existe une plateforme Internet, OÙRéparer.com, qui permet aux consommateurs de trouver près de chez eux un réparateur pour leur téléphone intelligent ou leur tablette. Sous peu, le service sera également disponible pour les ordinateurs. Les consommateurs peuvent comparer les prix ainsi que les divers réparateurs. La compagnie effectue un contrôle de qualité de ses réparateurs et ses clients ont la possibilité de les évaluer avec un système de notes et de commentaires.

3.2.4.3 Stratégie 26 – Rachat de téléphones usagés – Réemploi, recyclage (utilisation)

Afin de favoriser le réemploi et le recyclage, deux compagnies au Royaume-Uni achètent les téléphones usagés dont les consommateurs veulent se départir :

- Vodafone offre aux consommateurs un service de reprise des téléphones usagés et le paiement est effectué dans les 24 heures.
- Mazuma Mobile, qui reprend également des téléphones usagés, vise pour sa part à ce que 95 % des téléphones soient réemployés dans des endroits où le coût de ceux-ci s'avère généralement inabordable, que ce soit au Royaume-Uni ou dans des pays en voie de développement. Lorsqu'il est impossible de réemployer les téléphones, la compagnie s'engage à les recycler dans les conditions les plus environnementales possibles.

3.2.4.4 Stratégie 27 – Économie de fonctionnalité (utilisation)

Pour les téléphones mobiles, l'économie de fonctionnalité serait tout indiquée. Il s'agirait pour les fabricants de téléphones de vendre le service de téléphonie plutôt que le téléphone lui-même. Par le fait même, les compagnies seraient incitées à concevoir des appareils durables, modulables et réparables. Ce modèle pourrait également s'appliquer aux ordinateurs portables, les clients payant pour le service rendu par l'ordinateur plutôt que l'ordinateur lui-même. Il faudrait sans doute que le disque dur soit dissociable du reste de l'équipement pour assurer une protection des données. Cette stratégie impliquerait tout un changement de paradigme dans un secteur où l'obsolescence demeure omniprésente.

3.2.4.5 Stratégie 28 – Reconditionnement et réemploi des ordinateurs (utilisation)

Plusieurs organismes, principalement des entreprises d'économie sociale, sont actifs au Québec pour donner une seconde vie aux appareils informatiques. Un des exemples est Insertech Angus, une entreprise d'économie sociale située à Montréal. Sa mission est de soutenir des jeunes adultes et des personnes immigrantes dans leur insertion à l'emploi et leur intégration à la société. Pour y parvenir, elle leur offre une expérience de travail en technologie de l'information ainsi qu'une formation personnelle, sociale et professionnelle. Ses employés prolongent la vie des appareils informatiques en les reconditionnant et les réparant pour qu'ils soient réemployés. Du même souffle, cela permet à des citoyens et des organismes d'accéder à des technologies informatiques à moindre coût.

3.2.4.6 Stratégie 29 – Recyclage des téléphones mobiles et ordinateurs portables (fin de vie)

La Fonderie Horne, seule fonderie de cuivre au Canada, récupère, entre autres, le cuivre, l'or, l'argent, le platine et le palladium provenant des produits électroniques. Tel qu'indiqué à la stratégie 16 sur le recyclage des métaux, depuis 2012 est en vigueur le Règlement sur la récupération et la valorisation des produits par les entreprises, lequel s'appuie sur le principe de la responsabilité élargie des producteurs (REP). Ce règlement vise notamment la récupération des produits électroniques, dont les ordinateurs et téléphones cellulaires. Pour les entreprises, cela implique notamment de mettre en place des points de dépôt et des services de collecte pour les produits visés, de les traiter adéquatement, d'en assurer la traçabilité et de réaliser des activités d'information, de sensibilisation et d'éducation.

L'Association pour le recyclage des produits électroniques (ARPE) est l'organisme national chargé de promouvoir et de gérer les programmes de recyclage des produits électroniques au Québec et au Canada. Les recycleurs de produits électroniques doivent répondre à des exigences et sont audités par le biais du programme de qualification des recycleurs mis en place par l'industrie. Une liste de recycleurs certifiés est rendue disponible, laquelle inclut notamment des organismes d'économie sociale, tels des CFER et Insertech.

Selon le Règlement, le programme de récupération et de valorisation doit privilégier dans l'ordre le réemploi, le recyclage, puis toute autre opération de valorisation. Il doit de plus permettre le suivi des produits et des matières, de leur récupération jusqu'à leur destination finale et il doit favoriser la gestion locale ou régionale des matières résiduelles. Une reddition de compte est demandée aux entreprises.

À compter de 2015, les entreprises ont des taux de récupération minimaux à atteindre, qui augmentent d'année en année :

- Dans le cas des ordinateurs portables, le taux minimal est de 40%, lequel est augmenté de 5% par année jusqu'à ce que le taux atteigne 65%.
- Dans le cas des téléphones cellulaires, le taux minimal est de 25%, lequel est augmenté de 5% par année jusqu'à ce que le taux atteigne 65%.

Si ces exigences ne sont pas rencontrées, les entreprises doivent effectuer un versement au Fonds vert (Gouvernement du Québec, 2016).

3.2.5 Bâti

Au Québec, le secteur de la construction, rénovation et démolition (CRD) représente environ le tiers des matières résiduelles générées (récupérées et éliminées) avec près de 5 millions de tonnes. Bien que ce secteur soit reconnu pour ses bonnes performances en matière de récupération, il s'agit tout de même de la

seconde catégorie de matières éliminées (enfouies ou incinérées) en importance, avec 22 % du total (RECYC-QUÉBEC, 2012).

Comme nous l'avons fait remarquer à la section 2, la construction du bâti (bâtiment et infrastructures) représente un secteur d'utilisation important pour le fer et le cuivre et concerne les trois métaux à l'étude :

- Fer : structure, infrastructures de transport (routes, ports, aéroports, voies ferrées), infrastructures de production et de transport d'énergie ;
- Cuivre : tuyauteries, robinets, toits, gouttières ;
- Lithium : vitrage.

La durée de vie importante des bâtiments et des infrastructures majeures limite la circularité des matériaux qui les composent. Les stratégies de circularité ont donc tout intérêt à veiller à prolonger la durée de vie des bâtiments et des infrastructures et à mieux les concevoir, comme le suggèrent les stratégies ci-dessous.

3.2.5.1 Stratégie 30 – Écoconception des poutres en acier permettant leur réemploi (fabrication)

Les designers de bâtiments et d'infrastructures doivent privilégier autant que possible des matériaux durables, sains, réemployés, recyclés et avec des impacts minimes sur l'environnement. De plus, ils doivent non seulement réfléchir à la façon dont ils seront construits, mais également à la façon dont ils seront déconstruits.

Les poutres en acier dans le secteur du bâtiment peuvent s'avérer un bel exemple d'écoconception en vue d'un réemploi futur. Pour faciliter le réemploi, le concepteur d'une poutre métallique doit veiller à :

- Utiliser des raccords vissés de préférence aux joints soudés pour permettre le démontage de la structure lors de la déconstruction ;
- Utiliser des connexions standards, y compris la taille des boulons et l'espacement des trous ;
- Assurer un accès facile et permanent aux connexions ;
- Lorsque cela est possible, veiller à ce que l'acier soit exempt de revêtements ou bien de revêtements qui empêchent l'évaluation visuelle de l'état de l'acier ;
- Réduire au minimum l'utilisation de fixations sur des éléments en acier, qui nécessitent des soudures, des trous de perçage ou des fixations avec des clous ;
- Tenir un inventaire des produits et de leurs composantes ;
- Utiliser des poutres à longue portée car elles sont plus susceptibles de permettre une flexibilité d'utilisation et d'être réutilisables en coupant la poutre à une nouvelle longueur (SteelConstruction.info, 2016).

L'adoption de ces pratiques d'écoconception diminuerait la pression sur les ressources en fer, en allongeant la durée d'usage de structures métalliques devenues modulaires.

3.2.5.2 Stratégie 31 – Maintenance et reconditionnement du bâti (utilisation)

Afin d'allonger la durée de vie du bâti, il est primordial de faire de l'entretien et de la maintenance, minimisant ainsi la dégradation, les fissures et les moisissures, entre autres. Il est également possible de rénover et remettre en état des bâtiments existants et même de les reconverter pour d'autres usages. Cette pratique

s'oppose à la tendance lourde caractérisée par l'attrait pour le neuf, particulièrement dans le bâtiment. Rappelons que la construction de nouveaux bâtiments et infrastructures accroît la pression sur les ressources, dont les métaux.

3.2.5.3 Stratégie 32 – Plateforme pour l'usage temporaire et transitoire de bâtiments vacants – Économie de partage (utilisation)

L'économie de partage peut éviter la construction de nouveaux bâtiments et les impacts environnementaux associés, tout en optimisant ceux déjà existants. On voit apparaître de plus en plus d'initiatives d'économie de partage dans le secteur du bâtiment, avec des plateformes comme Airbnb, Couchsurfing, HomeExchange, etc. L'une d'elles a récemment vu le jour à Montréal. Il s'agit d'une plateforme visant à faciliter les usages temporaires et transitoires dans les bâtiments vacants de Montréal. Elle a été créée par Entremise, un organisme sans but lucratif fondé en mai 2016 par quatre jeunes. En permettant aux occupants de bénéficier d'espaces vacants à prix modique, cela optimise l'usage des bâtiments, contribue à leur entretien ainsi qu'à leur réhabilitation. En outre, les propriétaires de ces bâtiments peuvent potentiellement maintenir la valeur de leurs actifs et accroître leurs chances de ramener le bâtiment à un usage permanent (Entremise, 2016).

3.2.5.4 Stratégie 33 – Déconstruction sélective – Recyclage (fin de vie)

La démolition traditionnelle est encore une pratique largement répandue. Quant à la déconstruction sélective, elle consiste à retirer successivement les composantes d'un bâtiment ou d'une infrastructure afin d'en récupérer un maximum d'éléments réutilisables et recyclables pour d'autres chantiers (RECYC-QUÉBEC, 2016a). Deux exemples de déconstruction sélective gagnent à être connus, l'un au Japon, l'autre plus près de chez nous. Par ailleurs, une filière a été mise en place en France pour recycler les fenêtres.

Déconstruction sélective des édifices (Japon)

Un entrepreneur japonais a développé la méthode *Taisei Ecological Reproduction System* (Tecorep) qui, au lieu de recourir à des explosifs pour démolir les édifices de plusieurs étages, les démonte deux étages à la fois, du haut vers le bas (voir Fig. 3-6). La démolition se fait dans un espace clos, le toit demeurant en guise de couverture et des panneaux insonorisés sont installés pour minimiser le bruit et la poussière. Des vérins supportent la partie supérieure pendant que la structure est progressivement retirée. Les matériaux sont récupérés et descendus vers le bas à l'aide d'un tunnel qui passe dans un trou percé à chaque étage. Cette action génère de l'électricité qui est entre autres utilisée pour l'éclairage du site.



Figure 3-6 Méthode de déconstruction Tecorep (Trends in Japan, 2013)

Il existe également la méthode *Kajima Cut and Take Down*, développée par un autre entrepreneur japonais depuis les années 90. Cette méthode consiste à déconstruire les édifices, mais cette fois, de bas en haut. Cette méthode retient l'attention, car tous les travaux de démontage sont effectués sur le sol, ce qui permet non seulement de réduire le bruit et la poussière, mais aussi d'améliorer considérablement le taux de

recyclage des matériaux. Récemment, un immeuble de 24 étages a été démolé selon ce système (Trends in Japan, 2013).

Déconstruction de l'échangeur Turcot (Montréal)

Au niveau des infrastructures, un exemple intéressant est celui du chantier de l'échangeur Turcot à Montréal. L'entrepreneur qui a obtenu le contrat de démantèlement a l'obligation de réintroduire des matériaux recyclés dans le nouvel échangeur. L'acier est retiré puis acheminé vers des recycleurs privés alors que le béton et l'asphalte sont broyés, à raison de 1 000 à 1 500 tonnes par jour, et réintroduits dans les remblais, la structure et l'asphalte du nouvel échangeur (Bachand, 2016).

Recyclage de fenêtres par Saint-Gobain Glass (France)

Dans le secteur du bâtiment, nous avons vu que le lithium pouvait être utilisé dans la fenestration. Depuis 2013, trois entreprises françaises travaillent en partenariat avec pour objectif de recycler les fenêtres et menuiseries en fin de vie. Le Groupe Lapeyre, distributeur de menuiseries reconnu pour œuvrer dans le bâtiment durable, collecte les menuiseries auprès de ses clients ; le Groupe Paprec sépare les matériaux collectés en fin de vie ; et Saint-Gobain Glass, pour sa part, recycle le verre des fenêtres récupérées pour produire du verre plat (Paprec Group, Groupe Lapeyre, & Saint-Gobain Glass, 2013).

3.2.6 Véhicules (transport)

Comme nous l'avons vu en début de ce rapport, les véhicules, de façon générale, contiennent à la fois de l'acier, du cuivre et dans le cas des véhicules électriques, du lithium. Les trois métaux sont donc concernés par ce produit. On entend ici par véhicules les voitures, les camions, les autobus de même que les véhicules de transport maritime, ferroviaire et aérien. Les stratégies ci-après présentées portent principalement sur les automobiles, mais certaines pourraient se transposer aux autres types de véhicules.

Puisqu'il n'y a pas de fabricant automobile au Québec, les stratégies qui concernent l'automobile visent principalement la phase d'utilisation. Il n'en demeure pas moins qu'il existe des fournisseurs de pièces automobiles au Québec et de la fabrication automobile ailleurs au Canada. Par exemple, ArcelorMittal est un important fournisseur d'acier pour le marché de l'automobile mondiale, avec une présence au Canada par l'intermédiaire d'ArcelorMittal Dofasco, située à Hamilton en Ontario. Pour intégrer l'économie circulaire à leurs activités, les constructeurs automobiles devront développer d'étroites relations avec leurs fournisseurs.

La figure 3-7 illustre l'introduction des principes de l'économie circulaire dans le secteur de l'automobile. Des stratégies telles la maintenance, le réemploi et le reconditionnement permettent d'allonger la durée de vie du véhicule. On y voit des modèles d'affaires à privilégier, basés sur l'économie de partage et l'économie de fonctionnalité (*product as a service*). Des boucles de recyclage peuvent également intervenir lorsque les options en amont ne sont plus envisageables.

Selon une étude, en intégrant les principes de l'économie circulaire tout au long de la chaîne de valeur (conception, fabrication, distribution) et en intégrant des modèles d'affaires basés sur l'automobile en tant que service, les constructeurs automobiles pourraient voir leur coût de base diminuer de 14 %. Cela leur permet en outre d'être plus compétitifs sur les prix, sur la qualité, tout en rejoignant davantage leurs clients (Lacy, Gissler, & Pearson, 2016).

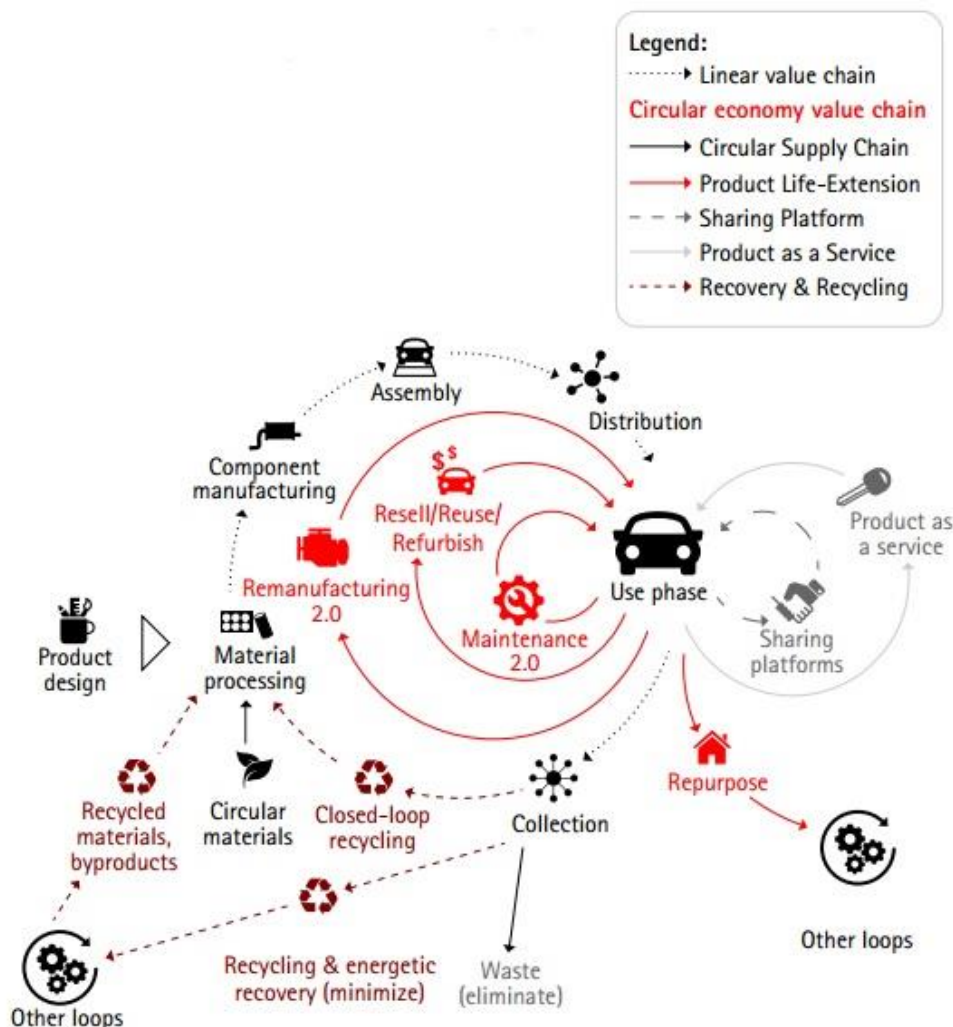


Figure 3-7 L'économie circulaire dans le secteur automobile (Lacy et al., 2016)

3.2.6.1 Stratégie 34 – Écoconception des véhicules (fabrication)

Dans un contexte où les normes en matière d'émissions de gaz à effet de serre (GES) sont de plus en plus strictes, les constructeurs automobiles sont amenés à concevoir des véhicules de plus en plus légers et résistants. Par exemple, ArcelorMittal développe des aciers plus résistants et légers pour répondre aux attentes de ses clients. En revanche, la tendance lourde est l'augmentation du poids moyen des véhicules au Québec. En effet, en 2015, pour la première fois, le nombre de camions légers (minifourgonnettes, véhicules utilitaires sport, camionnettes) vendus au Québec a dépassé le nombre de voitures vendues, soit 232 898 nouveaux camions contre 218 456 nouvelles voitures (Whitmore & Pineau, 2016).

Afin d'intégrer les principes de l'économie circulaire, les fabricants auraient intérêt à concevoir des véhicules légers, démontables, modulables, recyclables et moins énergivores. Un exemple de véhicule modulaire se

trouve à Barcelone où Altran Spain, une société du groupe Altran, a développé l'eMOC (Electric Modular Car), une voiture modulaire et intelligente, pouvant s'adapter aux besoins de l'utilisateur à tout moment grâce à l'ajout ou au retrait de modules. Ces modules peuvent notamment augmenter le nombre de passagers, la capacité de charge ou encore, l'autonomie énergétique.

3.2.6.2 Stratégie 35 – Utilisation du fer comme combustible – Écoconception (fabrication)

Sur le plan de l'écoconception des véhicules qui pourrait avoir un impact sur certains métaux, il convient de souligner les récentes recherches du département de génie mécanique de l'Université McGill à Montréal. L'équipe a travaillé sur l'utilisation de métaux comme combustibles, en remplacement des énergies fossiles. Le concept développé fait appel à la combustion des métaux pour produire de l'énergie. La densité d'énergie et de puissance générée par ce combustible métallique devrait se rapprocher des moteurs conventionnels propulsés aux énergies fossiles. Le recyclage des combustibles métalliques, couplé à des sources d'énergies propres, pourrait contribuer à réduire les émissions de CO₂, mais cette démonstration demeure à faire.

Le choix du combustible métallique optimal ne sera pas uniquement basé sur sa réactivité chimique, sa combustion ou ses propriétés, mais également sur son coût, sur la possibilité de le récupérer de même que sur les impacts sur le cycle de vie des systèmes de production et de recyclage. À ce titre, le fer, l'aluminium et le silicium apparaissent a priori comme des carburants métalliques prometteurs (Bergthorson et al., 2015). La figure 3-8 représente cette technologie ainsi que ses diverses applications à l'étude.

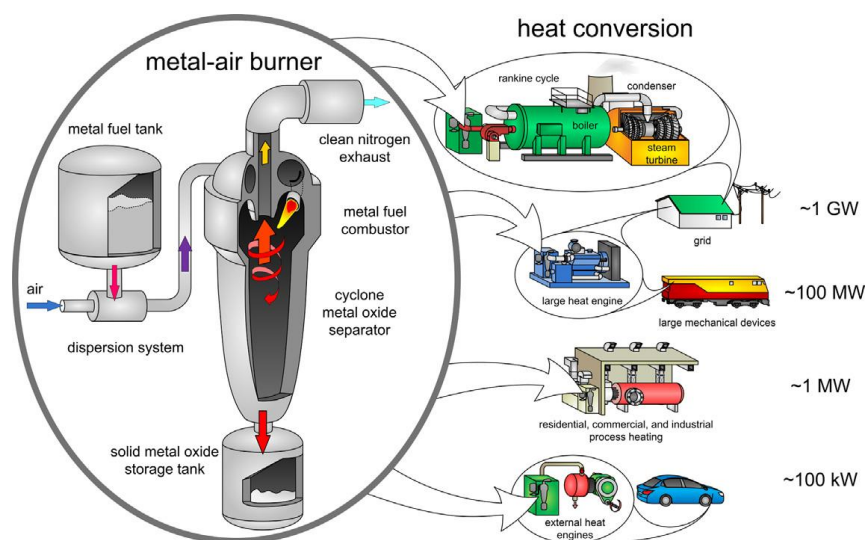


Figure 3-8 Conception d'une chambre de combustion alimentée au métal et applications possibles (Bergthorson et al., 2015)

La compagnie israélienne Phinergy, pour sa part, développe depuis 2008 une batterie aluminium-air (fig. 3-9). Celle-ci est composée d'une série de plusieurs plaquettes d'aluminium qui baignent dans des électrolytes. L'oxygène contenu dans l'air ambiant libère l'énergie contenue dans le métal et dissout par le fait même les plaquettes d'aluminium qui doivent être remplacées régulièrement. Le liquide contenu dans la batterie est à base d'eau avec un antigel. Après quelques centaines de kilomètres parcourus, il faut ajouter de l'eau, soit environ 15 litres aux 300 km. Cette technologie est sur le point d'être commercialisée et a déjà été testée

avec succès dans une automobile électrique. Des applications sont possibles dans les secteurs du transport, du stockage stationnaire d'énergie, de la défense, dans les produits électroniques ainsi que dans l'industrie électrochimique (Phinergy, 2013).

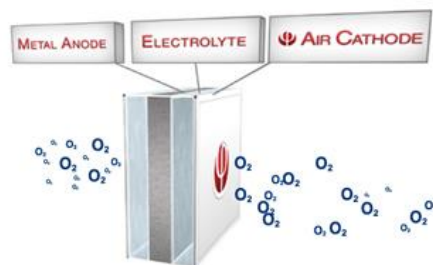


Figure 3-9 Batterie aluminium-air de Phinergy (Phinergy, 2013)

En novembre 2016, la Ville de Montréal a invité Phinergy afin de tester sa motorisation. La technologie de Phinergy avait d'ailleurs été dévoilée pour la première fois en 2014 sur le circuit Gilles-Villeneuve. Le coût est inconnu pour l'instant. De plus, le moteur automobile, qui inclurait cette technologie, aurait une faible puissance, soit une vitesse maximale de 90 km/h sur un terrain plat. Cette technologie a l'avantage de permettre une grande autonomie et les plaquettes d'aluminium sont recyclables, mais leur réduction produit des GES (Templier, 2016).

3.2.6.3 Stratégie 36 – Économie de partage dans les transports (utilisation)

En plus du transport en commun, plusieurs initiatives d'économie de partage sont en place dans le domaine des transports, contribuant ainsi à réduire la pression sur les ressources métalliques et à optimiser l'utilisation des véhicules. Par exemple, des plateformes de covoiturage, comme Amigo Express au Québec ou Blablacar en France, permettent d'optimiser les déplacements. Des services d'auto-partage, tels Communauto et Auto-Mobile, sont également disponibles.

Il existe également des plateformes permettant la location de voitures entre usagers comme Getaround, Turo et Zipcar aux États-Unis ou encore CarNextDoor en Australie. Les propriétaires peuvent ainsi bénéficier d'un revenu lorsqu'ils n'ont pas besoin de leur voiture.

3.2.6.4 Stratégie 37 – Économie de fonctionnalité dans les transports (utilisation)

Par ailleurs, de plus en plus de constructeurs automobiles ont adopté des modèles d'affaires basés sur l'économie de fonctionnalité. Car2Go en est un bel exemple. Selon les estimations de l'Association des constructeurs européens d'automobiles (ACEA), les voitures privées actuellement en service ont une moyenne d'âge de 9,7 ans en Europe, mais sont inactives plus de 95 % du temps. Avec le partage de voitures, les voitures sont utilisées presque 34 % du temps. Cela augmente l'intensité de l'utilisation de la voiture et se traduit par des durées de vie plus courtes. Les voitures de location et les voitures partagées ont en effet un âge estimé à 6,2 ans (ABN-AMRO, 2016).

Dans le secteur aéronautique, deux exemples d'intégration de l'économie de fonctionnalité méritent d'être soulignés. Ainsi, Héroux-Devtek, dont le siège social est à Longueuil, fait la location de trains d'atterrissage ; de son côté, Pratt & Whitney, à Longueuil également, loue des moteurs d'avions. Toutes deux assurent des services de maintenance et de réparation.

3.2.6.5 Stratégie 38 – Conversion de véhicules à essence en véhicules électriques - réusinage et reconditionnement (utilisation)

Le Plan d'action sur les véhicules électriques 2011-2020 (PAVE) du Gouvernement du Québec vise à ce que 25 % des nouveaux véhicules légers pour passagers vendus en 2020 soient électriques (hybrides rechargeables ou entièrement électriques) (Gouvernement du Québec, 2011). De plus, le plan d'action en électrification des transports 2015-2020 du gouvernement québécois vise à atteindre un nombre de 100 000 véhicules électriques et hybrides rechargeables immatriculés au Québec en 2020 (Gouvernement du Québec, 2015).

Dans une optique d'économie circulaire, il appert pertinent d'évaluer l'opportunité pour le Québec de développer des technologies visant à convertir les véhicules à essence en véhicules électriques, évitant ainsi l'achat de véhicules neufs et les impacts environnementaux y étant liés.

Cette idée s'est d'ailleurs incarnée à Montréal avec l'entreprise GranTuned, fondée en 2011 par Andy Ta, un étudiant en génie de la production automatisée au premier cycle de l'École de technologie supérieure (ÉTS) et Meng Lim, diplômé en génie mécanique à la même école. GranTuned a mis en place sa division EcoTuned. Cette entreprise est incubée par le Centech de l'ÉTS et bénéficie du soutien d'une douzaine de professeurs, chercheurs, conseillers d'affaires ainsi que d'une cinquantaine d'étudiants. De plus, elle a bénéficié d'une aide financière du Bureau de l'efficacité et de l'innovation énergétique (BEIE) du MERN.

En collaboration avec le ministère des Transports du Québec (MTQ) et la Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ), EcoTuned a réussi la conversion électrique de deux camionnettes du gouvernement de modèle Ford F-150 2010, en retirant le système de propulsion thermique pour le remplacer par un système de propulsion électrique intégré à un cadre fixé au châssis existant de la camionnette. La durée de vie du moteur serait d'un million de km, avec une autonomie d'environ 150 km.

Les concepteurs d'EcoTuned ont élaboré une structure brevetée contenant le moteur électrique, la transmission et les batteries. La stratégie de cette nouvelle compagnie sera de fournir des ensembles de conversion à des mécaniciens accrédités qui pourront les installer au Canada et aux États-Unis (Substance ÉTS, 2015).

Le système sera conçu pour être réutilisé ultérieurement dans un autre véhicule de la même catégorie. D'après la compagnie, ce système permet :

- de prolonger la vie utile de plusieurs camionnettes (5 camionnettes successives) ;
- d'économiser plus de 80 % en coût annuel de carburant ;
- un retour sur l'investissement en 2,5 ans ;
- de réduire les émissions de GES.

3.2.6.6 Stratégie 39 – Réparation, réemploi et recyclage des véhicules (utilisation, fin de vie)

En matière de réparation, de réemploi ou de recyclage des véhicules, trois cas sont à relever, soit Renault et Veolia en France et la nouvelle entreprise Total Métal Récupération à Laval.

Renault (France)

Renault est un bel exemple d'économie circulaire avec son programme Icarre95 de reprise des véhicules, en collaboration avec Indra notamment, qui est spécialisé dans la déconstruction des véhicules en fin de vie. Renault opère deux lignes de démontage qui servent à écarter les pièces usées et à conserver les bonnes : 43 % de la masse des carcasses sont en moyenne réutilisées et 48 % recyclés dans les fonderies du groupe

pour produire des pièces neuves. Les bonnes pièces usagées sont complétées avec des pièces neuves, puis réassemblées.

Renault propose aux clients des pièces usagées de 30 à 50 % moins chères que les neuves, qui sont garanties dans le réseau de distribution commercial. L'entreprise offre aussi à ses clients des pièces de carrosserie usagées. D'ailleurs, en France, au 1^{er} janvier 2017, entrera en vigueur un décret selon lequel les professionnels commercialisant des prestations d'entretien ou de réparation de véhicules (voitures et camionnettes) devront permettre aux consommateurs d'opter pour l'utilisation, pour certaines catégories de pièces de rechange, de pièces issues de l'économie circulaire (ex. : pièces de carrosserie amovibles, pièces mécaniques ou électroniques), à la place de pièces neuves (Ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer en charge des relations internationales sur le climat, 2016).

Par ailleurs, les composantes hors d'usage sont recyclées dans les fonderies du Groupe Renault, dont des câbles de cuivre, et une part est réintroduite dans les nouveaux véhicules du fabricant. En effet, 29 % des matières des véhicules Renault seraient issues du recyclage. Renault projette de créer des modules de formation afin de transmettre ses savoirs. Pour le constructeur automobile, ce virage vers l'économie circulaire s'est avéré profitable, tant au plan économique qu'environnemental (Afep, 2015; ICARRE95, 2015).

Veolia (France)

Dans le domaine des véhicules de grand volume, Veolia, par le biais sa filiale Bartin Recycling Group, s'est engagée à démanteler 317 voitures du RER de la RATP en France, au rythme de neuf voitures par mois. Le processus consiste à enlever d'abord les équipements (ex. : sièges, marchepieds), puis à désamianter et découper les voitures. Par la suite, la carcasse est découpée et les divers matériaux sont triés. Sur les 16 000 tonnes de matières, 97 % ont été valorisés, soit 85 % d'acier, 10 % de métaux non ferreux (ex. : cuivre) et 2 % de matériaux divers (surtout du verre). Ces matières sont destinées à être commercialisées dans le secteur sidérurgique pour l'acier et auprès d'affineurs pour les métaux non ferreux (Afep, 2015).

Total Métal Récupération (Laval)

Une nouvelle usine débutera ses opérations au début de l'année 2017 dans un parc industriel de Laval. Total Métal Récupération récupérera les carcasses d'automobiles afin de les déchiqueter et de les trier à l'aide d'un système de tri optique. Le fer et l'acier seront acheminés vers les aciéries locales et étrangères alors que les métaux non ferreux, notamment le cuivre, seront vendus localement. L'entreprise a investi 70 millions de dollars pour l'achat d'équipements à la fine pointe de la technologie (Dubuc, 2016).

3.2.7 Batteries lithium-ion

Deux stratégies de circularité sont mises de l'avant pour les batteries lithium-ion que l'on retrouve dans les véhicules électriques, mais également dans les divers appareils électroniques. L'une portant sur le reconditionnement et le réusinage, l'autre ciblant le recyclage.

3.2.7.1 Stratégie 40 – Stockage d'énergie avec des batteries usagées - reconditionnement et réusinage (utilisation, fin de vie)

Dans le contexte de pannes, le stockage d'énergie électrique peut représenter une option intéressante pour accroître la fiabilité du réseau électrique. Le stockage permet d'accumuler l'énergie en surplus qui est générée et de la libérer lors des périodes de forte demande.

Les batteries fabriquées pour l'automobile arriveront en fin de vie lorsqu'elles auront atteint 70 à 80 % de leur capacité de stockage initiale, soit après une durée d'usage d'environ 8 à 10 ans. Avec environ 1,26 million de véhicules électriques ou hybrides dans le monde, il y aura plusieurs de ces batteries à se départir dans 4 ou 5 ans. Ces batteries ne seront alors pas suffisamment performantes pour le transport, mais il serait envisageable de leur donner une seconde vie en les réusinant et en les reconditionnant pour construire des unités de stockage d'énergie stationnaire. Cela allongerait la durée de vie des batteries au lithium-ion. Il reste à vérifier si les performances d'un tel système seraient adéquates avec les charges/décharges et si les coûts seraient abordables.

Une étude publiée en 2016 par le Bloomberg New Energy Finance (BNEF) prévoit que d'ici 2025, un total de 95 GWh seront disponibles au niveau mondial, provenant des batteries de seconde vie, dont environ un tiers, soit 26 GWh, serait approprié pour le stockage d'énergie stationnaire, tel qu'illustré à la figure 3-10. Plusieurs défis sont à relever pour le réemploi de ces batteries dans le stockage stationnaire. D'abord, les batteries usagées ont une densité énergétique et une durée de vie inférieures aux batteries neuves. Elles sont aussi variables en termes de formes, de taille et de performance et ont été exposées à des conditions différentes (ex. : climat), ce qui pourrait influencer leur trajectoire de dégradation (Roberts, 2016).

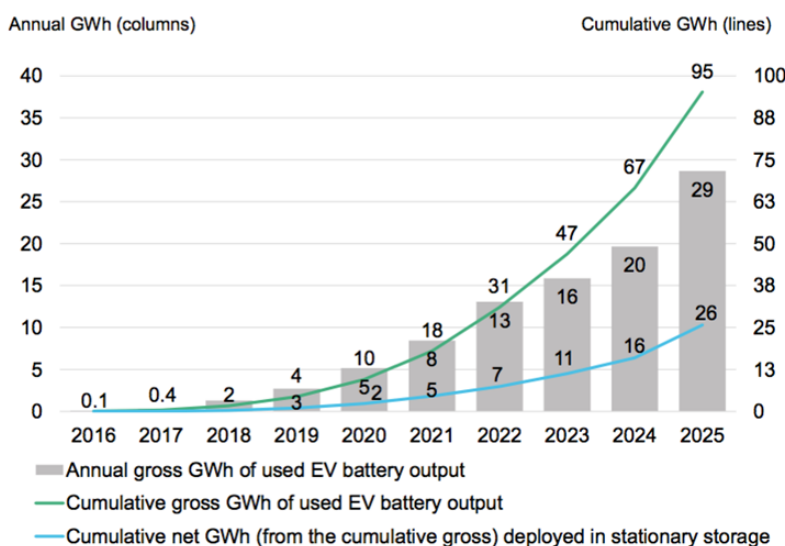


Figure 3-10 Prévisions du BNEF, en GWh, de la disponibilité des batteries usagées et estimation de la portion pouvant être utilisée dans des applications de stockage d'énergie stationnaire 2016-2025 (Roberts, 2016)

Le consortium européen ELSA développe depuis 2012 une solution de stockage d'énergie à partir de batteries en fin de vie de véhicules électriques et en vise la commercialisation. En utilisant des batteries de seconde vie, le consortium espère offrir un prix de commercialisation compétitif par rapport à d'autres batteries de stockage stationnaire mises en marché par des constructeurs automobiles comme Tesla (Desrosiers, 2016).

3.2.7.2 Stratégie 41 – Recyclage des batteries lithium-ion (fin de vie)

Au Canada, il n'y a que deux entreprises qui effectuent le recyclage des batteries Li-ion provenant des véhicules ou des appareils électroniques, soit Retriev Technologies en Colombie-Britannique (anciennement connue sous le nom Toxco) ainsi que Xtrata (Glencore) en Ontario. Ailleurs dans le monde, Recupyl à Singapour a développé un procédé de traitement des accumulateurs Li-ion qui permet de récupérer à la fois le cobalt et le lithium. L'entreprise Umicore en Belgique récupère le cobalt des batteries. Quant au lithium, il se retrouve dans les scories qu'Umicore expédie à d'autres industries pour être valorisées. Mis à part Recupyl et Retriev Technologies qui ont développé des procédés pour recycler le lithium séparément, c'est actuellement uniquement le cobalt qui est recyclé dans les batteries Li-on alors que le lithium se retrouve généralement dans les scories (ADEME, 2010b).

Le tableau 3-2 présente un sommaire des stratégies de circularité identifiées, propres aux produits contenant le cuivre, le fer ou le lithium.

Tableau 3-2 Synthèse des stratégies de circularité propres aux produits contenant les métaux

RODUIT(S)	MÉTAL(AUX) CONCERNÉ(S)	NO	STRATÉGIE(S)	TYPE(S) DE STRATÉGIE(S) / OUTIL(S)	ÉTAPE(S)	NIVEAU DE MATURITÉ*
Fils et câbles électriques	Cuivre	19	Écoconception de fils modulaires pour en faciliter le réemploi ou le recyclage	Écoconception	Fabrication	1
		20	Recyclage de câbles et fils (ex. : Nexans et Recycâbles, France)	Recyclage	Fin de vie	3
Électroménagers (petits et gros)	Cuivre, fer	21	Mise en marché de petits électroménagers réparables (ex. : SEB, France)	Réparation	Utilisation	3
		22	Économie de fonctionnalité pour les électroménagers	Économie de fonctionnalité	Utilisation	1
Équipements mécaniques et industriels	Cuivre, fer	23	Modularité des procédés industriels, facilitant le réemploi des équipements	Maintenance, réparation, réemploi	Utilisation	2
Téléphones mobiles et ordinateurs portables	Cuivre et lithium	24	Écoconception de téléphones mobiles (ex. : Fair Phone, Pays-Bas ; PuzzlePhone, Finlande)	Réemploi, réparation, recondition- nement	Fabrication	3
		25	Portail de réparation de téléphones intelligents et tablettes (ex. : Oureparer.com, France)	Réparation	Utilisation	3
		26	Rachat de téléphones usagés (ex. : Vodafone et Mazuma, Royaume-Uni)	Réemploi, recyclage	Utilisation	3
		27	Vente du service de téléphonie plutôt que du téléphone	Économie de fonctionnalité	Utilisation	1
		28	Reconditionnement et réemploi des ordinateurs (ex. : Insertech Angus, Montréal)	Réemploi, recondition- nement	Utilisation	3
		29	Recyclage des téléphones mobiles et ordinateurs portables	Recyclage	Fin de vie	3

Bâti (bâtiments et infrastructures)	Fer (structure), cuivre (tuyauterie, toit, gouttières), lithium (vitrage)	30	Écoconception des poutres en acier permettant leur réemploi	Écoconception réemploi	Fabrication	2
		31	Entretien des bâtiments et remise en état de bâtiments existants	Maintenance, reconditionnement	Utilisation	2
		32	Plateforme pour l'usage temporaire et transitoire des bâtiments vacants (ex. : Entremise, Montréal)	Économie de partage	Utilisation	2
		33	Déconstruction sélective (ex. : déconstruction des édifices, Japon ; échangeur Turcot, Montréal ; recyclage de fenêtres par Saint-Gobain, France)	Recyclage	Fin de vie	2
Véhicules (voitures, camions, autobus, transport maritime, ferroviaire, aérien)	Fer, cuivre (lithium si électrique)	34	Écoconception des véhicules (ex. : véhicules plus légers et résistants, ArcelorMittal ; voiture modulaire eMOC, Barcelone)	Écoconception pour réduction et réemploi	Fabrication	2
		35	Utilisation du fer comme combustible (ex. : batterie aluminium-air de Phinergy, Israël)	Écoconception	Fabrication	1
		36	Économie de partage dans les transports Transport en commun Plateforme de covoiturage (ex. : Amigo Express, Québec ; Blablacar, France) Service d'auto-partage (ex. : Communauto, Auto-Mobile, Québec) Location de voitures entre usagers (ex. : Getaround, Turo, ZipCar, États-Unis ; CarNextDoor, Australie)	Économie de partage	Utilisation	3
		37	Service d'auto-partage par le manufacturier (ex. : Car2Go, Québec) Location de trains d'atterrissage (ex. : Héroux-Devtek, Longueuil) Location de moteurs (ex. : Pratt & Whitney, Longueuil)	Économie de fonctionnalité	Utilisation	3
		38	Conversion de véhicules à essence en véhicules électriques (ex. : GranTuned, Montréal)	Réusinage, reconditionnement	Utilisation	2

Batteries Li-ion	Lithium	39	Programme de reprise des véhicules (ex. : Renault, France) Démantèlement et recyclage de trains (ex. : Véolia, France) Recyclage des automobiles (ex. : Total Métal Récupération, Laval)	Réparation, réemploi, recyclage	Utilisation Fin de vie	3
		40	Stockage d'énergie avec des batteries Lithium-ion usagées provenant de véhicules électriques	Reconditionnement, réusinage	Utilisation	2
		41	Recyclage des batteries Lithium-ion (ex. : Retriev Technologies, Colombie-Britannique; Xtrata – Glencore, Ontario; Recupyl, Singapour; Umicore, Belgique)	Recyclage	Fin de vie	3

***Niveau de maturité :**

Nouveauté	1
En développement	2
En application	3

4 CONCLUSION

Cette revue de littérature a permis de relever de nombreuses stratégies de circularité, pour chacune des étapes du cycle de vie du cuivre, du fer et du lithium, de l'extraction jusqu'à la fin de vie des produits contenant ces métaux. Certaines stratégies représentent de nouvelles idées qui méritent d'être explorées davantage alors que d'autres sont en stade de développement ou bien déjà en application. Ces stratégies ont pour ambition de créer des boucles courtes de circulation des métaux afin d'accroître la productivité des ressources.

Afin d'évaluer leur applicabilité au contexte québécois et d'identifier les barrières et les leviers à l'implantation des stratégies, la prochaine étape consistera à effectuer des entrevues avec des acteurs du milieu. Cette démarche permettra du même coup de sonder leur intérêt à la mise en œuvre de certaines des stratégies avancées.

Sur la base d'une liste plus restreinte de stratégies de circularité retenues, une analyse de cycle de vie conséquente de même qu'une analyse technico-économique seront réalisées. La première examinera les bénéfices et les impacts environnementaux associés aux stratégies alors que la seconde veillera à identifier les stratégies optimales en termes technico-économiques dans une perspective de long terme.

De cette analyse s'ensuivront des recommandations quant aux stratégies de circularité à privilégier pour le Québec. Les secteurs des mines et de la métallurgie seront alors appelés à emboîter le pas vers une économie plus circulaire.

5 RÉFÉRENCES

- ABN-AMRO. (2016). *On the road to the circular economy - How car component suppliers can become future-proof by applying circular economy principles*. Disponible <http://www.circle-economy.com/wp-content/uploads/2016/08/abn-amro-the-circular-car-report-EN-20160803-light.pdf?submission=65003093>
- Accenture Consulting. (2016). *Sustainability in mining: Q&A with Sonia Thimmiah*. Disponible <https://www.accenture.com/us-en/insight-perspectives-natural-resources-sustainability-sonia>
- ADEME. (2010a). *Étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares - Partie 1*. Disponible http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/73279_bio_ademe_metauxrares-partie1.pdf
- ADEME. (2010b). *Étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares - Partie 2*. Disponible http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/73279_recyclage_metaux_rares-partie_2.pdf
- Afep. (2015). *Les entreprises s'engagent pour l'économie circulaire, Rapport des entreprises de l'Afep*. 79 p.
- Affinerie CCR. (2016). *Nos procédés - L'électro-affinage du cuivre et le traitement des boues anodiques*. Disponible <http://www.affinerieccr.ca/FR/Produits/Pages/Nosprocedes.aspx>
- ArcelorMittal. (2016). *Produits*. Disponible <http://www.transformerlavenir.com/a-propos/produits/>
- ArcelorMittal Canada. (2015). *Rapport de développement durable 2015*. Disponible http://corporate.arcelormittal.com/~/_media/Files/A/ArcelorMittal/sdr-2015/country-reports/canada/canada2015-fr.pdf
- ArcelorMittal Produits longs Canada. (2016). Disponible <http://long-canada.arcelormittal.com/fr>
- Arnsperger, C., & Bourg, D. (2016). *Vers une économie authentiquement circulaire. Revue de l'OFCE(1)*, 91-125.
- Arrivet, D. (2016). *Seb va réparer tous ses produits* *Le Figaro*. Disponible sur le site Internet <http://www.lefigaro.fr/societes/2016/09/13/20005-20160913ARTFIG00243-seb-va-reparer-tous-ses-produits.php>
- Bachand, O. (2016). *Les débris de l'échangeur Turcot recyclés et réutilisés dans la nouvelle structure. Radio-Canada.ca*. Disponible sur le site Internet <http://ici.radio-canada.ca/nouvelle/795989/echangeur-turcot-recyclage-beton-asphalte-acier-debris>
- Bejlegaard, M., Brunoe, T. D., & Nielsen, K. (2016). *Application of module drivers creating modular manufacturing equipment enabling changeability*. In A. Nassehi & S. Newman (Eds.), *Sixth International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production* (Vol. 52, pp. 134-138). Amsterdam: Elsevier Science Bv.
- Belzile, J.-M. (2016). *Québec Lithium redémarre* *Radio-Canada Abitibi-Témiscamingue*. Disponible sur le site Internet <http://ici.radio-canada.ca/regions/abitibi/2016/09/23/005-quebec-lithium-la-corne-redemarre-north-american-lithium.shtml>

- Bergthorson, J., Goroshin, S., Soo, M., Julien, P., Palecka, J., Frost, D., & Jarvis, D. (2015). Direct combustion of recyclable metal fuels for zero-carbon heat and power. *Applied Energy*, 160, 368-382.
- Bihouix, P. (2015). Du mythe de la croissance "verte" à un monde post-croissance. *Rue89Bordeaux*. Disponible sur le site Internet <http://rue89bordeaux.com/2015/09/du-mythe-de-la-croissance-verte-a-un-monde-post-croissance/>
- Bihouix, P., & de Guillebon, B. (2010). Quel futur pour les métaux? *EDP Sciences, Paris*, 299 p.
- Bonnin, M., Azzaro-Pantel, C., Pibouleau, L., Domenech, S., & Villeneuve, J. (2013). Development and validation of a dynamic material flow analysis model for French copper cycle. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(8), 1390-1402.
- Buchert, M., Schüler, D., Bleher, D., & l'environnement, P. d. N. U. p. (2009). *Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential*: UNEP DTIE; Öko-Institut.
- Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., & Garrett, B. (2011). Could 3D printing change the world. *Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*, Atlantic Council, Washington, DC.
- Carencotte, F., Geldron, A., Villeneuve, J., & Gaboriau, H. (2012). Économie circulaire et recyclage des métaux. *Geosciences*(15), 64-71.
- Caterpillar. (2016). Développement durable - Remanufacturing. Disponible <http://www.caterpillar.com/fr/company/sustainability/remanufacturing.html>
- Cossu, R., & Williams, I. D. (2015). Urban mining: Concepts, terminology, challenges. *Waste Management*, 45, 1-3.
- CTTÉI. (2016). Séquestration du CO2. Disponible <http://www.cttei.com/sequestration-du-co2/>
- Desrosiers, R. (2016). Projet ESLA: une deuxième vie pour les batteries des voitures électriques. Disponible sur le site Internet Automobile propre: <http://www.automobile-propre.com/projet-elsa-deuxieme-vie-batteries-voitures-electriques/>
- Dubuc, A. (2016). Un récupérateur de «minounes» s'installe à Laval. *LaPresse.ca*. Disponible sur le site Internet <http://affaires.lapresse.ca/economie/automobile/201612/02/01-5047298-un-recuperateur-de-minounes-sinstalle-a-laval.php>
- Eco-Tech Ceram. (2016). Disponible <http://www.ecotechceram.com/>
- Ellen MacArthur Foundation. (2012). In-depth - Mobile Phones. Disponible <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/interactive-diagram/in-depth-mobile-phones>
- Entremise. (2016). Faciliter le déploiement d'usage transitoires dans les bâtiments vacants de Montréal. Disponible <http://www.entremise.ca/#apropos>
- Fairphone. (2016). Our goals: A better phone is a phone made better. Disponible <https://www.fairphone.com/>
- Florin, N., Madden, B., Sharpe, S., Benn, S., Agarwal, R., Perey, R., & Giurco, D. (2015). *Shifting Business Models for a Circular Economy: Metals Management for Multi-Product-Use Cycles*. Disponible

Sydney: <http://wealthfromwaste.net/wp-content/uploads/2015/11/P3-FINAL-SHIFTING-BUSINESS-MODELS-FOR-CE-ONLINE.pdf>

Giurco, D., Littleboy, A., Boyle, T., Fyfe, J., & White, S. (2014). Circular economy: questions for responsible minerals, additive manufacturing and recycling of metals. *Resources*, 3(2), 432-453.

Glen Eagle Resources. (2016). Sayona Mining advancing towards completing the due diligence process on Glen Eagle's Authier lithium project. Disponible <http://www.gleneagleresources.com/fr/sayona-mining-advancing-towards-completing-the-due-diligence-process-on-glen-eagles-authier-lithium-project-2/>

Glencore - Fonderie Horne. (2016). Environnement. Disponible <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.

Golev, A., & Lebre, E. (2016). The contribution of mining to the emerging circular economy. *The AusIMM Bulletin*.

Gouvernement du Québec. (2011). *Plan d'action 2011-2020 sur les véhicules électriques - Québec roule à la puissance verte!* : Bibliothèque et Archives nationales du Québec Disponible <http://mern.gouv.qc.ca/publications/energie/strategie/plan-action.pdf>.

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 Disponible <http://medias.mtq.fabrique3.net.s3.amazonaws.com/wp-content/uploads/2016/04/CIAO-050-LG2-MTQ-Rapport2016FRv2.1.pdf>.

Règlement sur la récupération et la valorisation de produits par les entreprises, (2016).

Graedel, T., Harper, E., Nassar, N., Nuss, P., & Reck, B. K. (2015). Criticality of metals and metalloids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(14), 4257-4262.

Graedel, T. E. (2011). *The Prospects for Urban Mining*. Disponible

Guillaud, H. (2015). Faut-il prendre l'effondrement au sérieux? *Internet Actu*. Disponible sur le site Internet LeMonde.fr: <http://internetactu.blog.lemonde.fr/2015/10/17/faut-il-prendre-leffondrement-au-serieux/>

Hagelüken, C. (2015). *Recycling of high-tech metals in the context of the circular economy*. Paper presented at the Remedia Circular Economy Conference, Milan.

Harsco Métaux & Minéraux. (2016). Disponible <http://www.harscomineraux.com/>

Hewitt. (2016). Disponible <http://www.hewitt.ca/fr>

ICARRE95. (2015). Le projet ICARRE95. Disponible <http://icarre95-programmelife.com/>

ICSG. (2015). *The World Copper Factbook 2014*. Disponible <http://copperalliance.org/wordpress/wp-content/uploads/2012/01/ICSG-Factbook-2014.pdf>

Institut EDDEC. (2016). Économie circulaire. Disponible <http://instituteddec.org/themes/economie-circulaire/>

- International, G. T. (2014). *L'économie circulaire*. Disponible
- Kiørboe, N. K., Sramkova, H., & Krarup, M. (2015). Moving towards a circular economy:-successful Nordic business models.
- Krook, J., Svensson, N., & Eklund, M. (2012). Landfill mining: A critical review of two decades of research. *Waste Management*, 32(3), 513-520.
- La Remise. (2016). Bibliothèque d'outils. Disponible <http://laremise.ca/>
- Labbé, J.-F., & Daw, G. (2012). Panorama 2011 du marché du lithium. 151 p.
- Lacy, P., Gissler, A., & Pearson, M. (2016). *Automotive's latest model: Redefining competitiveness through the circular economy*. Disponible https://www.accenture.com/t20161216T034331_w_us-en/acnmedia/PDF-27/Accenture-POV-CE-Automotive.pdf#zoom=50
- Lanoue, R., & Mousseau, N. (2014). *Maîtriser notre avenir énergétique: Pour le bénéfice économique, environnemental et social de tous*: Commission sur les enjeux énergétiques du Québec.
- Laurence, D. (2011). Establishing a sustainable mining operation: an overview. *Journal of Cleaner Production*, 19(2-3), 278-284.
- Lèbre, É., & Corder, G. (2015). Integrating Industrial Ecology Thinking into the Management of Mining Waste. *Resources*, 4(4), 765-786.
- Maxloc. (2016). Disponible <http://www.maxloc.ca/fr/>
- MDDELCC. (2016). Le ministre Heurtel annonce 5 M\$ pour le recyclage des électroménagers froids et rappelle qu'ils seront prochainement assujettis à la responsabilité élargie des producteurs [communiqué de presse]. Disponible <http://www.fil-information.gouv.qc.ca/Pages/Article.aspx?aiguillage=ajd&type=1&idArticle=2411253968>
- MERN. (2013a). Le fer - Expéditions du Québec et prix. Disponible <http://mern.gouv.qc.ca/mines/statistiques/substance/substance-fer.jsp>
- MERN. (2013b). Potentiel géologique des minéraux de lithium. Disponible <http://mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/mineraux/mineraux-potentiel-lithium.jsp>
- MERN. (2016a). *Choisir le secteur minier du Québec*. Disponible <https://mern.gouv.qc.ca/publications/mines/secteur-minier.pdf>
- MERN. (2016b). Le cuivre - Expéditions du Québec et prix. Disponible <http://mern.gouv.qc.ca/mines/statistiques/substance/substance-cuivre.jsp>
- MERN. (2016c). *Vision stratégique du développement minier au Québec*.
- Ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer en charge des relations internationales sur le climat. (2016). *Décret no 2016-703 du 30 mai 2016 relatif à l'utilisation de pièces de rechange automobiles issues de l'économie circulaire*. Journal officiel de la République française Disponible http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2016-05-31_Decret_utilisato_pieces_de_rechange_automobiles-2.pdf.
- Müller, D. B., Wang, T., & Duval, B. (2010a). Patterns of Iron Use in Societal Evolution. *Environmental science & technology*, 45(1), 182-188.

- Müller, D. B., Wang, T., & Duval, B. (2010b). Patterns of Iron Use in Societal Evolution - Supporting Information. *Environmental science & technology*, 45(1), 182-188.
- Mutum. (2016). Disponible <https://www.mutum.com/#/>
- 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). Disponible <http://www.nemaskalithium.com/fr/>
- Nexans. (2016). Une solution complète de recyclage. Disponible http://www.nexans.ca/eservice/Canada-fr_CA/navigate_250207/Recyclage.html
- Paprec Group, Groupe Lapeyre, & Saint-Gobain Glass. (2013). Naissance d'une filière industrielle française de recyclage des fenêtres et menuiseries en fin de vie. - Paprec Group, le Groupe Lapeyre et Saint-Gobain Glass France créent un partenariat vertueux. [communiqué de presse]. Disponible https://www.paprec.com/sites/default/files/cp_vd_partenariat_groupe_lapeyre_-_sggf_-_paprec_group.pdf
- Pauliuk, S., Wang, T., & Müller, D. B. (2013). Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 71, 22-30.
- Phinergy. (2013). Disponible <http://www.phinergy.com/>
- PuzzlePhone. (2016). Upgradeable Sustainable Incredible: Made in Finland. Made to last. Disponible <http://www.puzzlephone.com/>
- RECYC-QUÉBEC. (2012). *Bilan 2010-2011 de la gestion des matières résiduelles au Québec*. Bibliothèque et Archives nationales du Québec Disponible <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2010-2011.pdf>.
- RECYC-QUÉBEC. (2014). *Bilan 2012 de la gestion des matières résiduelles au Québec*. Disponible <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2012.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2016a). *Plan d'action 2016-2017 - Comité mixte sur la réduction à la source*. Disponible <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/plan-action-comite-mixte-2016-2017.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2016b). Responsabilité élargie des producteurs (REP). Disponible <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/entreprises-organismes/mieux-gerer/responsabilite-elargie-producteurs>
- RioTinto. (2016). Nos produits. Disponible <http://www.riotinto.com/canada/rtft/our-products-15035-fr.aspx#faq-4>
- Roberts, D. (2016). Millions of used electric car batteries will help store energy for the grid. Maybe. Disponible sur le site Internet Vox: <http://www.vox.com/2016/8/29/12614344/electric-car-batteries-grid-storage>
- Roskill. (2016). Re-energized battery industry waits for lithium supply to charge. Disponible <https://roskill.com/news/re-energized-battery-industry-waits-lithium-supply-charge/>
- Sorel Forge. (2012). Nos produits. Disponible <http://www.sorelforge.com/fr/nos-produits.aspx>
- Stahel, W. R. (2006). The role of metals for designing products and solutions in the context of a sustainable society *Sustainable Metals Management* (pp. 593-607): Springer.

- Stahel, W. R. (2010). *The performance economy* (Vol. 572): Palgrave Macmillan London.
- Statistique Canada. (2014). Base de données sur le commerce international canadien de marchandises. Consultée le 21 septembre 2016 <http://www5.statcan.gc.ca/cimt-cicm/home-accueil?lang=fra>
- Statistique Canada. (2016). Immatriculations de véhicules automobiles, par province et territoire (Québec, Ontario, Manitoba). Consultée le 24 novembre 2016, de CANSIM <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/l02/cst01/trade14b-fra.htm>
- SteelConstruction.info. (2016). The free encyclopedia for UK steel construction information - Sustainability. Disponible http://www.steelconstruction.info/Sustainability#Recycling_and_reuse
- Substance ÉTS. (2015). GranTuned : convertir des camionnettes en véhicules électriques. Disponible <http://substance.etsmtl.ca/grantuned-conversion-camionnettes-des-vehicules-electriques/>
- Suez Environnement. (2016). Recyclables: collecte, traitement et valorisation de câbles. Disponible <http://www.sita.fr/regions-poles/sita-recyclables/>
- Templier, S. (2016). Visite de Phinergy à Montréal: à quoi bon utiliser l'aluminium et l'air? Disponible sur le site Internet <http://auto.lapresse.ca/technologies/201611/25/01-5045196-visite-de-phinergy-a-montreal-a-quoi-bon-utiliser-laluminium-et-lair.php>
- Tesla. (2016). Gigafactory Tesla. Disponible https://www.tesla.com/fr_CA/gigafactory
- Trends in Japan. (2013). High tech Demolition Systems for High-rises - Safe and Environmentally Friendly Methods. Disponible http://web-japan.org/trends/11_tech-life/tec130325.html
- UNEP. (2010). *Metal Stocks in Society - Scientific Synthesis*. Disponible <http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/50244/publications/Metalstocksinsociety.pdf>
- UNEP. (2011). *Assessing Mineral Ressources in Society: Metal Stocks & Recycling Rates*. Disponible https://www.google.ca/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwibLurifTPAhUmzIMKHc4zBjAQFggfMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.unep.org%2Fresourcepanel%2FPortals%2F24102%2FPDFs%2FMetalstocksinsociety.pdf&usq=AFQjCNFCesBIN_s7KNC9h3O85Lk8dQFJvA&bvm=bv.136593572,d.amc
- USGS. (2016). *Mineral Commodity Summaries - Lithium*. Disponible <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2016-lithi.pdf>
- Whitmore, J., & Pineau, P.-O. (2016). *État de l'énergie au Québec 2017*. Disponible <http://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2016/12/EEQ2017.pdf>
- World Economic Forum. (2014). *Scoping Paper: Mining and Metals in a Sustainable World*. Disponible Suisse: http://www3.weforum.org/docs/WEF_MM_MiningMetalSustainableWorld_ScopingPaper_2014.pdf