

# MÉTAUX ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE AU QUÉBEC

## Rapport de l'étape 2.2 :

### Analyse de flux de matières du cuivre, du fer et du lithium

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

2 juin 2017



**CIRAIQ**<sup>MC</sup>

Centre international de référence sur le  
cycle de vie des produits, procédés et services

Ce rapport a été préparé par le Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG), dans le cadre du projet réalisé par l'Institut EDDEC et ses partenaires institutionnels et financé par le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles

Fondé en 2001, le CIRAIG a été mis sur pied afin d'offrir aux entreprises et aux gouvernements une expertise universitaire de pointe sur les outils du développement durable. Le CIRAIG est un des plus importants centres d'expertise en cycle de vie sur le plan international. Il collabore avec de nombreux centres de recherche à travers le monde et participe activement à l'Initiative sur le cycle de vie du Programme des Nations Unies sur l'Environnement (PNUE) et de la Société de Toxicologie et de Chimie de l'Environnement (SETAC).

Le CIRAIG a développé une expertise reconnue en matière d'outils du cycle de vie incluant l'analyse environnementale du cycle de vie (ACV) et l'analyse sociale du cycle de vie (ASCV). Complétant cette expertise, ses travaux de recherche portent également sur l'analyse des coûts du cycle de vie (ACCV) et d'autres outils incluant les empreintes carbone et eau. Ses activités comprennent des projets de recherche appliquée touchant plusieurs secteurs d'activités clés dont l'énergie, l'aéronautique, l'agroalimentaire, la gestion des matières résiduelles, les pâtes et papiers, les mines et métaux, les produits chimiques, les télécommunications, le secteur financier, la gestion des infrastructures urbaines, le transport ainsi que de la conception de produits « verts ».

## AVERTISSEMENT

Les auteurs sont responsables du choix et de la présentation des résultats. Les opinions exprimées dans ce document sont celles des membres de l'équipe de projet et n'engagent aucunement le CIRAIG ou Polytechnique Montréal.

À l'exception des documents du CIRAIG, comme le présent rapport, toute utilisation du nom du CIRAIG, ou de Polytechnique Montréal lors de communication destinée à une divulgation publique associée à ce rapport doit faire l'objet d'un consentement préalable écrit d'un représentant dûment mandaté du CIRAIG ou de Polytechnique Montréal.

## CIRAIG

Centre interuniversitaire de recherche  
sur le cycle de vie des produits, procédés et services  
École Polytechnique de Montréal  
Département de génie chimique  
2900, Édouard-Montpetit  
Montréal (Québec) Canada  
C.P. 6079, Succ. Centre-ville  
H3C 3A7  
<http://www.ciraig.org>

## Équipe de travail

### Réalisation :

- Pablo Tirado, Analyste, CIRAIG

### Direction :

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

### Collaboration :

- Ulrich Campoare, étudiant, CIRAIG
- Helène Gervais, chargée de project, Institut EDDEC
- Normand Mousseau, professeur, département de physique, Université de Montréal
- François Saunier, Analyste, CIRAIG
- 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) 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, notamment les émissions de gaz à effet de serre, en utilisant l'analyse du cycle de vie, pour les minéraux sélectionnés.

Afin de renforcer le choix des solutions recommandées, le projet s'appuie sur les résultats de deux outils de diagnostic complémentaires : l'analyse des flux de matières (AFM) ainsi que l'analyse du cycle de vie (ACV).

Le but de cette étude était de compléter l'analyse de flux de matières pour les trois métaux, c'est-à-dire d'établir un portrait des flux et stocks des trois métaux au Québec en 2014. Plus spécifiquement, les objectifs de l'étude étaient de :

1. Établir le schéma avec les flux et stocks de trois métaux (fer, cuivre, lithium) au Québec tout au long de leur cycle de vie, dès l'extraction jusqu'à la fin de vie;
2. Identifier les principales activités (et acteurs) de la chaîne de valeurs québécoise qui sont concernées par les trois métaux;
3. Identifier les points chauds, c'est-à-dire les principaux flux qui provoquent une perte de circularité (pertes à l'environnement, exportation ou enfouissement) et les principaux stocks potentiellement exploitables.

Les résultats de cette étude servent à mieux comprendre la circulation des flux de matières sur le territoire québécois et ses échanges avec l'extérieur dans le but d'améliorer la gestion des ressources.

L'analyse de flux de matières (AFM) est une « évaluation systématique de tous les flux et stocks de matériel ou substance à l'intérieur d'un système défini dans le temps et dans l'espace ». L'AFM permet ainsi de rendre visibles les trajectoires suivies par les matières étudiées et d'identifier les activités à l'origine de pertes vers l'environnement et vers la création de déchets. Il s'agit donc d'un outil de diagnostic particulièrement pertinent dans un contexte d'économie circulaire.

Quant à la méthodologie employée, deux types de méthodes existent en AFM. Pour les méthodes ascendantes, il s'agit de construire le système à partir des données individuelles de chaque entreprise pour consolider progressivement et opérer une synthèse, arrivant au portrait complet de l'étape ou du système. Les méthodes descendantes, quant à elles, utilisent des données statistiques à un niveau macro pour le calcul. Dans le cas de cette étude, l'approche préconisée change en fonction des étapes du cycle de vie. En effet, pour les premières étapes du cycle de vie, où le nombre d'entreprises reste limité, l'approche ascendante est utilisée. Par contre, dans les étapes de fabrication ou d'utilisation, la méthode descendante, notamment les statistiques du Québec, a été la principale méthode utilisée pour le calcul des flux.

Le système à l'étude inclut toutes les activités ayant lieu au Québec en 2014, de l'extraction des métaux jusqu'à la gestion en fin de vie et l'émission dans l'environnement, en passant par toutes les étapes de cycle de vie telles que la transformation, la fabrication et l'utilisation. Les échanges avec d'autres provinces canadiennes ou pays et ceux avec l'environnement sont aussi inclus dans l'analyse. La méthode ascendante privilégie les données primaires disponibles, qui ont été collectées auprès des entreprises et organismes concernés alors que la méthode descendante utilise principalement des sources de données compilant des

statistiques agrégées par secteur ou par type de produit, telles que celles rassemblées par Ressources Naturelles Canada, STATCAN et l'Institut de la statistique du Québec. Les données manquantes, incomplètes ou non facilement accessibles ont quant à elles été complétées par des données secondaires issues de bases de données publiques disponibles, d'une revue de littérature ou de jugements d'experts.

Les résultats ont montré que le fer et le cuivre présentent des cycles similaires, avec une exportation nette de produits peu transformés ou semi-finis (dans le cas du fil de cuivre) depuis le Québec et une importation de produits très transformés. Les flux du fer à l'échelle du périmètre d'étude québécois sont de l'ordre de millions de tonnes par an; ceux du cuivre plutôt de l'ordre de milliers de tonnes par an.

Par ailleurs, le stock en utilisation représente un grand gisement pour les deux métaux : 100 000 kt en croissance annuelle de 7 % pour le fer et 2000 kt en croissance annuelle de 2 % pour le cuivre. Toutefois, ces stocks ne sont disponibles qu'à des horizons de temps très variables en fonction de la durée de vie des différents biens les contenant. Seule une partie de ces stocks est disponible pour établir des stratégies de circularité à court terme. Une étude ultérieure sur la dynamique des flux et des stocks devrait être menée pour mieux comprendre quand les stocks seront disponibles, en quelle quantité et à quelle qualité, pour supporter la planification des stratégies de circularité à long terme.

Le lithium présente un cycle très différent des deux autres métaux étudiés. En effet, en 2014, il y avait une activité extractive limitée au Québec qui était directement exportée et il n'y avait aucune métallurgie primaire ou transformation métallique. Tout le lithium utilisé provenait donc des importations. Les flux à l'échelle du Québec sont de l'ordre de dizaines de tonnes par an. Dans le cas du lithium, comme pour le fer et le cuivre, on observe un gisement important dans l'étape d'utilisation (env. 400 t), mais en forte croissance (26 % par an). Présentement, seules les piles et batteries sont facilement récupérables (avec des durées de vie de moins de 8 ans). Le lithium présente aussi des utilisations de type dissipatif, ce qui augmente les émissions à l'environnement et diminue le potentiel de circularité.

Les analyses de l'incertitude et de la qualité des données montrent que les données et hypothèses utilisées pour le calcul de certains flux devraient être améliorées, notamment ceux qui concernent les échanges entre provinces pour les trois métaux et les sorties du système dans le cas du lithium (exportations, pertes et élimination). Néanmoins, les flux les plus contributeurs utilisent en général des données provenant de sources primaires ou spécifiques au Québec, surtout pour les AFM du fer et du cuivre. Dans le cas du lithium, les résultats sont plus incertains en raison du manque de données spécifiques.

Les stratégies de circularité doivent, en général, se concentrer sur les étapes d'extraction, concentration et métallurgie primaire pour le fer et le cuivre et sur le stock disponible en utilisation facilement mobilisable pour les trois métaux. Le développement de l'industrie du recyclage devrait en outre être considéré comme une stratégie pour augmenter la circularité des trois métaux dans le territoire québécois.

## TABLE DES MATIÈRES

Sommaire.....	iii
Table des matières.....	v
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	vii
1 Introduction.....	1
2 Modèle d'étude.....	2
2.1 Objectifs de l'étude et application envisagée.....	2
2.2 Définition et méthodologie de l'AFM.....	2
2.2.1 Définition.....	2
2.2.2 Méthodologie de l'AFM.....	3
2.3 Système et frontières des systèmes.....	4
2.4 Sources de données et hypothèses.....	6
2.5 Analyse des résultats et interprétation.....	9
3 Résultats et interprétation.....	10
3.1 Fer.....	10
3.1.1 Résultats par étape.....	10
3.1.2 Principales conclusions.....	15
3.2 Cuivre.....	16
3.2.1 Résultats par étape.....	16
3.2.2 Principales conclusions.....	22
3.3 Lithium.....	23
3.3.1 Résultats par étape.....	23
3.3.2 Principales conclusions.....	28
3.4 Analyse de l'incertitude et de la qualité des données.....	29
3.4.1 Analyse de l'incertitude.....	29
3.4.2 Analyse de la qualité de données et contribution.....	32
3.5 Applications et limites.....	37
3.6 Recommandations.....	37
4 Conclusions.....	39
5 Références.....	40

## LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Frontières du système et étapes du cycle de vie considérées dans la réalisation de l'Analyse de flux de matière (AFM) du fer, cuivre et lithium au Québec. Chaque étape peut inclure plusieurs processus (ou activités).....	6
Figure 2-2 : Exemple de réconciliation de données. Suite à la réconciliation de données les incertitudes des flux réduisent. (adapté de <a href="http://www.stan2web.net">http://www.stan2web.net</a> ).....	9
Figure 3-1 : Schéma de flux et stocks de fer au Québec en 2014 par étape avec incertitudes associées aux flux (unité des flux : millier de tonnes par an; unités des stocks : millier de tonnes).....	11
Figure 3-2 : Répartition du stock de fer par secteur dans l'étape d'utilisation au Québec en 2014, au total 101000 kt. Calculé à partir de Pauliuk et al (2013) et Muller et al (2011). ....	14
Figure 3-3 : Répartition du flux annuel de fer géré en fin de vie (2,6 Mt/an) par secteur au Québec en 2014 (calculé à partir des stocks en utilisation et des durées de vie de chaque catégorie de produit). ....	15
Figure 3-4 : Schéma de flux et stocks de cuivre au Québec en 2014 par étape avec incertitudes associées aux flux (unité des flux : millier de tonnes par an; unités des stocks : milliers de tonnes).....	18
Figure 3-5 : Répartition du stock de cuivre par secteur dans l'étape d'utilisation au Québec en 2014 (adapté de ICSG, (2015)). Le stock total en utilisation est estimé à 2 200 kt. ....	21
Figure 3-6 : Répartition du flux annuel de cuivre géré en fin de vie (78 kt/an) par secteur au Québec en 2014 (calculé à partir des stocks en utilisation et des durées de vie de chaque catégorie de produit). ....	22
Figure 3-7 : Schéma de flux et stocks de lithium au Québec en 2014 par étape (unité des flux : tonnes; unités des stocks : tonnes).....	24
Figure 3-8 : Répartition des stocks de lithium en utilisation 2014 au niveau mondial (adaptée de USGS, 2016). ....	26
Figure 3-9 : Répartition du stock du lithium par secteur au Québec en 2014 (au total 400 tonnes (Calculé à partir de USGS, 2016). ....	27
Figure 3-10 : Répartition du flux annuel de lithium géré en fin de vie (27 t/an) par secteur au Québec en 2014 (calculé à partir des stocks en utilisation et des durées de vie de chaque catégorie de produit). ....	28

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 : Bilan des flux de matières de fer par étape au Québec en 2014 (unité : kt/an- milliers de tonnes par an).....	13
Tableau 3-2 : Bilan des flux de matières de cuivre par étape au Québec en 2014 (unité : kt/an - milliers de tonnes par an) .....	19
Tableau 3-3 : Bilan des flux de matières de lithium par étape au Québec en 2014 (unité : tonnes/an).....	25
Tableau 3-4 : Catégories des valeurs d’incertitude .....	29
Tableau 3-5 : Quantification et qualification de l’incertitude des flux de l’AFM du fer au Québec en 2014 .	30
Tableau 3-6 : Quantification et qualification de l’incertitude des flux de l’AFM du cuivre au Québec en 2014 .....	31
Tableau 3-7 Quantification et qualification de l’incertitude des flux de l’AFM du lithium au Québec en 2014 .....	31
Tableau 3-8 : Critères de qualification des données .....	32
Tableau 3-9 : Système de pointage des flux et stocks selon la qualité des données et la contribution des flux au total .....	33
Tableau 3-10 : Pointage de la combinaison de la qualité de données et la contribution au flux total pour chaque flux à chaque étape du cycle de vie pour l’AFM du fer .....	34
Tableau 3-11 : Pointage de la combinaison de la qualité de données et la contribution au flux total pour chaque flux à chaque étape du cycle de vie pour l’AFM du cuivre .....	35
Tableau 3-12 : Pointage de la combinaison de la qualité de données et la contribution au flux total pour chaque flux à chaque étape du cycle de vie pour l’AFM du lithium .....	36

## 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) a mandaté l'Institut EDDEC pour réaliser un projet de recherche en économie circulaire visant deux objectifs distincts :

1. Évaluer le potentiel de circularité de trois métaux stratégiques pour le Québec;
2. Contribuer à documenter les impacts de l'industrie minière québécoise sur l'environnement, notamment les émissions de gaz à effet de serre, en utilisant l'analyse du cycle de vie, pour les minéraux sélectionnés.

D'un point de vue méthodologique, il a été trouvé pertinent de traiter ces deux objectifs au sein d'un seul projet afin de :

- Gagner en efficacité sur l'étape de diagnostic, les deux projets utilisant des sources de données similaires;
- Renforcer le choix des solutions recommandées en s'appuyant sur les résultats de deux outils de diagnostic complémentaires : l'analyse des flux de matières (AFM) ainsi que l'analyse du cycle de vie (ACV).

Ce rapport porte sur l'analyse de flux de matières au Québec des trois métaux sélectionnés. Il présente :

- les objectifs et la méthodologie suivie (Chapitre 2)
- les résultats de l'AFM, l'interprétation et les recommandations associées (Chapitre 3);
- les conclusions résultantes (Chapitre 4).

## 2 MODÈLE D'ÉTUDE

Ce chapitre présente les objectifs et applications de l'étude, le cadre méthodologique de l'AFM et une description des métaux à l'étude (fer, cuivre, lithium).

### 2.1 Objectifs de l'étude et application envisagée

Le **but de cette étude** était d'établir un premier portrait des flux et stocks des trois métaux au Québec en 2014. Plus spécifiquement, les **objectifs** de l'étude étaient de :

4. Établir le schéma avec les flux et stocks de trois métaux (fer, cuivre, lithium) au Québec tout au long de leur cycle de vie, dès l'extraction jusqu'à la fin de vie;
5. Identifier les principales activités (et acteurs) de la chaîne de valeurs québécoise qui sont concernées par les trois métaux;
6. Identifier les points chauds, c'est-à-dire les principaux flux qui provoquent une perte de circularité (pertes à l'environnement, exportation ou enfouissement) et les principaux stocks potentiellement exploitables.

Les résultats de cette étude serviront à mieux comprendre la circulation des flux de matières sur le territoire québécois et ses échanges avec l'extérieur dans le but d'améliorer la gestion des ressources. Concrètement, les résultats aident à identifier les activités dans le cycle de vie des métaux où développer et appliquer des stratégies de circularité. Ils servent aussi comme critère pour l'évaluation des stratégies potentielles, en fonction de l'ampleur des flux concernés par ces stratégies.

### 2.2 Définition et méthodologie de l'AFM

#### 2.2.1 Définition

L'analyse de flux de matières (AFM) est une « évaluation systématique de tous les flux et stocks de matériel ou substance à l'intérieur d'un système défini dans le temps et dans l'espace » (Brunner *et al.*, 2004). Le **principe de conservation de la masse** d'Antoine Lavoisier doit être respecté : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Le bilan de matière doit donc être équilibré, tel que présenté dans l'équation ci-dessous (Bonnin *et al.*, 2013) :

$$\Sigma \text{Importations} + \Sigma \text{Entrées} = \Sigma \text{Consommation} + \Sigma \text{Sorties} + \Delta \text{Stocks}$$

Les **importations** incluent toutes les entrées de la substance étudiée dans le système à partir d'autres régions. Ces entrées peuvent être sous forme de minerai, métal primaire, produits contenant le métal, etc. Les **entrées** incluent les substances extraites de la nature, majoritairement des minerais dans le cas étudié, mais aussi des extractions à partir de dépôts de matière cumulée suite à un procédé industriel (par exemple de l'enfouissement). Les **exportations** incluent toutes les sorties de la substance vers d'autres régions. Les

sorties incluent les émissions à l'environnement et l'enfouissement. La **variation des stocks** inclut toutes les quantités de substance qui s'ajoutent ou s'enlèvent aux matières présentes, dans une des étapes, pour la période étudiée. Ceci peut être sous forme de stock cumulé par une entreprise, d'augmentation du nombre de biens ou infrastructures en utilisation, etc.

Une liste relativement exhaustive de questions classiques auxquelles une AFM est appelée à répondre est donnée par Graedel (2002) :

- Quelle quantité de matériel ou de substance entre dans le système ?
- Comment le matériel ou la substance est-il transformé ?
- Combien de matériel ou de substance est ajouté au stock en utilisation ?
- Combien de matériel ou de substance est recyclé ?
- Combien de matériel ou de substance sort du système pour finir dans l'environnement ?
- Combien de matériel ou de substance se retrouve à l'élimination ?
- Quelles tendances existent pour l'évolution de ces flux et stocks ?

L'AFM permet ainsi de rendre visibles les trajectoires suivies par les matières étudiées et d'identifier les activités à l'origine de pertes vers l'environnement et vers la création de déchets. Il s'agit donc d'un outil de diagnostic particulièrement pertinent dans un contexte d'économie circulaire. Cet outil est de plus en plus reconnu, comme en témoigne la réalisation d'un nombre croissant d'AFM.

### 2.2.2 Méthodologie de l'AFM

Dans l'AFM, plusieurs éléments peuvent être différenciés :

- le système, qui correspond à l'ensemble des éléments étudiés et aux interactions entre eux. Le système peut être fermé, quand il n'y a pas d'interactions avec l'extérieur ou ouvert, lorsqu'il y en a. Dans le cas qui nous concerne, le système correspond à la « technosphère » du Québec et c'est un système ouvert, puisqu'on tient compte des interactions avec l'environnement (sous forme d'extraction minière ou d'émissions à l'environnement) et avec d'autres régions (sous forme d'importations et d'exportations). Le système inclut toutes les étapes du cycle de vie, de l'extraction des matières premières jusqu'à la gestion en fin de vie, en passant par la production de matériaux, la fabrication de biens ou l'utilisation;
- les substances, qui sont définies par Brunner (2004) comme des éléments chimiques avec des caractéristiques et propriétés homogènes. Dans ce rapport, les substances correspondent aux trois métaux à l'étude;
- les biens, qui correspondent aux entités économiques et qui peuvent être composés d'une ou de plusieurs substances. Ceci correspond aux produits, matières, biens de consommation et infrastructures qui contiennent les différentes substances à l'étude. Les statistiques et données disponibles se réfèrent normalement aux biens;
- les processus (ou activités), qui correspondent à la transformation, au transport et au stockage de biens. Les processus de transformation apparaissent habituellement dans les premières étapes du cycle de vie, où les substances sont transformées pour les extraire, les concentrer, créer des biens, etc. Le stockage peut avoir lieu dans toutes les étapes du cycle de vie en fonction de différents critères et contraintes (économiques, logistiques, de capacité de production, etc.);

- les flux, qui sont les transferts de biens ou de substances entre les étapes, les processus ou le système et l'extérieur (autres régions, l'environnement, etc.);
- les étapes, qui sont le regroupement de plusieurs activités. Dans le cas de cette étude les étapes correspondent aux étapes de cycle de vie des métaux étudiés, concrètement, l'extraction, le traitement, la métallurgie primaire, la transformation métallique, la fabrication de biens, l'utilisation et la fin de vie.

Afin de calculer les flux et les variations de stocks dans un système, les auteurs classent les approches méthodologiques pour la réalisation d'AFM en deux grandes familles (Morris, 2015, Repellin, 2014 et Bonnin, 2013) :

1. Méthode ascendante. Le guide de référence est le livre de Baccini et Brunner de 1991, mis à jour par Brunner *et al.*, (2004). Il s'agit de construire le système à partir de l'échelon le plus fin, pour consolider progressivement et opérer une synthèse. Ce type d'approche permet d'avoir une bonne vision des flux et des stocks à l'intérieur du système étudié, mais demande une grande quantité de données.
2. Méthode descendante. Le guide référentiel de cette méthode a été réalisé par Eurostat (service de statistique de l'Union européenne) en 2001 et mis à jour en 2013. La méthode comptabilise l'ensemble des flux entrants et sortants à un niveau macro, sans analyser au préalable les processus qui les unissent, et les alloue ensuite en utilisant des ratios. Le système est en quelque sorte une boîte noire qui ne sera ouverte qu'une fois le bilan de matières réalisé.

De manière générale, les méthodes descendantes vont être préconisées pour les AFM d'un territoire donné et les méthodes ascendantes pour les AFM d'une substance en particulier. Dans le présent projet, puisqu'une bonne compréhension des flux et des stocks de métaux ainsi que des interactions entre les diverses activités utilisant ces métaux est nécessaire, une approche ascendante est plus appropriée. Cependant, la disponibilité de données pour compléter les calculs fait en sorte que les deux approches ont été utilisées.

Bien que des sources de données « typiques » soient associées à chacune des approches (ex. : données d'entreprises pour la méthode ascendante et statistiques nationales pour l'approche descendante), dans la pratique, il arrive généralement que tous les types de données soient utilisés de façon conjointe afin de combler les manques, voire de créer une redondance permettant une prise en compte de l'incertitude. Dans le cas de cette étude, l'approche préconisée change en fonction des étapes du cycle de vie. En effet, pour les premières étapes du cycle de vie, où le nombre d'entreprises reste limité, l'approche ascendante est utilisée. Par contre, dans les étapes de fabrication ou d'utilisation, la méthode descendante, notamment les statistiques provinciales, a été la principale méthode utilisée pour le calcul des flux.

### 2.3 Système et frontières des systèmes

Le système à l'étude inclut toutes les activités ayant lieu au Québec en 2014. Ceci inclut toutes les activités de l'extraction des métaux jusqu'à la gestion en fin de vie et l'émission dans l'environnement, en passant par toutes les étapes de cycle de vie telles que la transformation, la fabrication et l'utilisation. Les échanges avec d'autres provinces canadiennes ou pays et ceux avec l'environnement sont aussi inclus dans l'analyse.

Tel que mentionné auparavant, l'analyse est restreinte à l'année 2014. Il s'agit donc d'une analyse statique qui cherche à faire un portrait de l'année en question afin d'identifier les caractéristiques principales du

système (principaux flux échangés, importés et exportés par les activités répertoriées dans les systèmes, changement de stocks, possibles pertes d'efficacité, etc.) sans tenir compte de l'aspect dynamique, c'est-à-dire, sans considérer la dynamique des variations de stocks dans le temps pour les différentes étapes et processus du système.

La Figure 2-1 schématise les frontières générales des trois systèmes à l'étude, qui incluent les étapes d'extraction et de traitement du minerai, de production de métal primaire, de fabrication et d'assemblage, d'utilisation et de fin de vie. Plus concrètement :

- **L'extraction et le traitement du minerai** incluent les opérations minières d'extraction du minerai du sous-sol québécois et l'envoi vers les centres de traitement au Québec ou à l'extérieur. Les opérations de concentration des métaux à partir du minerai ayant lieu au Québec (traitement) sont aussi incluses dans cette étape. Le flux sortant de cette étape est le minerai brut ou le concentré, qui contient le métal analysé.
- **La production du métal primaire** inclut les procédés de transformation en métal primaire utilisable, conduisant, par exemple, à la production de lingots d'acier, d'anodes de cuivre, etc.
- **La transformation métallique** inclut la mise en forme des métaux (plaques, fils, etc.) pour l'utilisation dans la fabrication de produits.
- **La fabrication et l'assemblage** correspondent à l'étape finale avant la mise en marché des produits ou infrastructures utilisables par le public.
- **L'utilisation** inclut tous les usages des produits et des infrastructures.
- **L'étape de fin de vie** inclut toutes les activités de collecte, de tri et de gestion des produits à la fin de leur vie utile, principalement le recyclage, où les matières sont remises dans le cycle de vie, de même que l'élimination (enfouissement, incinération).

Les flux de matière circulent d'une étape à l'autre du cycle de vie du métal à l'intérieur du périmètre d'analyse de l'AFM (le Québec), mais aussi vers l'extérieur du système, tant sous forme d'échanges avec d'autres régions (importations et exportations) que depuis ou vers l'environnement (extraction de minerai, émissions à l'eau, l'air et le sol). Les acteurs des différentes activités peuvent, quant à eux, stocker une partie de la matière pour différentes raisons (économiques, logistiques, de capacité de production, durée de vie des produits contenant la matière, etc.).

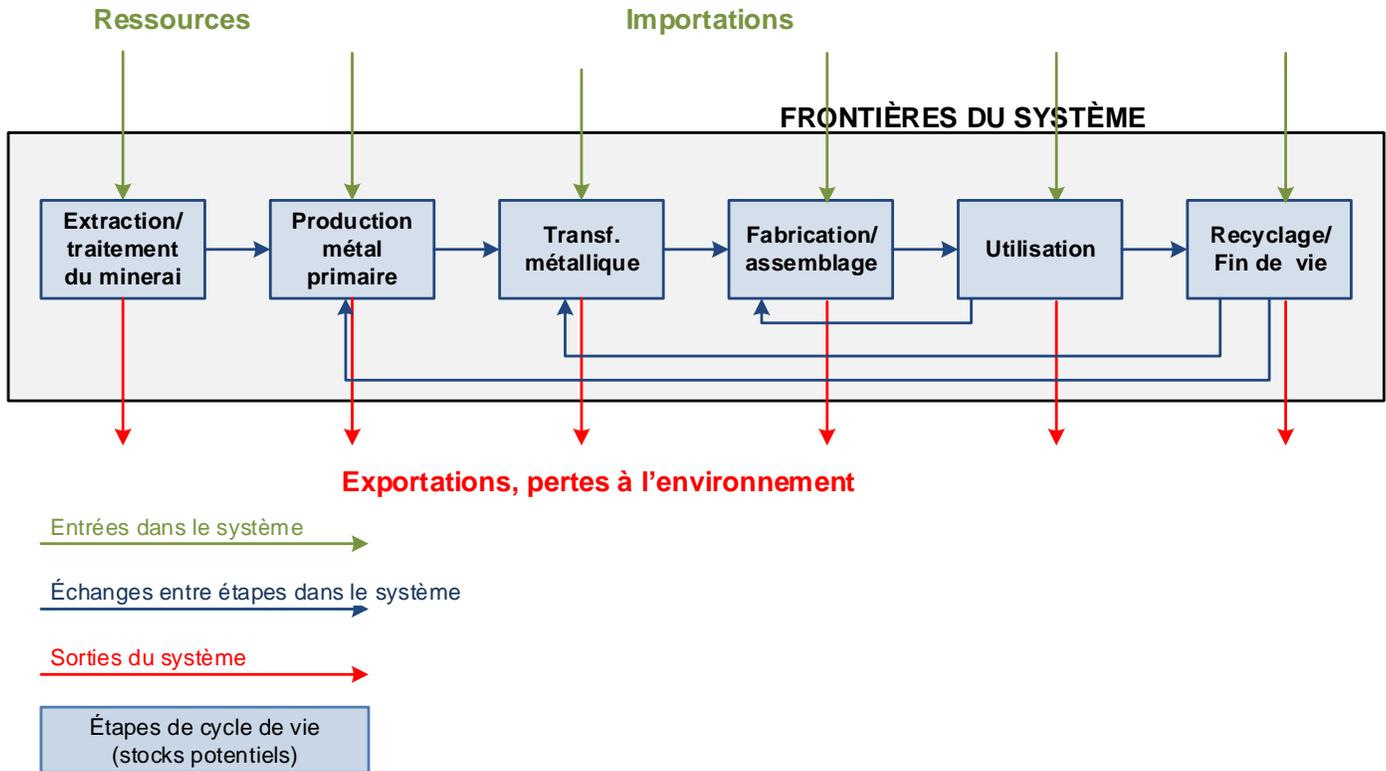


Figure 2-1 : Frontières du système et étapes du cycle de vie considérées dans la réalisation de l'Analyse de flux de matière (AFM) du fer, cuivre et lithium au Québec. Chaque étape peut inclure plusieurs processus (ou activités).

## 2.4 Sources de données et hypothèses

Les données requises pour cette AFM concernent tous les biens et processus qui contiennent chacun au moins un des métaux à l'étude, à chaque étape du cycle de vie, soit de l'extraction du minerai jusqu'à la fin de vie.

La qualité des résultats dépend de la qualité des données utilisées pour effectuer l'évaluation. C'est pourquoi tous les efforts ont été faits pour que les informations disponibles les plus crédibles et les plus représentatives soient intégrées à l'étude. La collecte de données a été réalisée de manière itérative par le CIRAIG, c'est-à-dire que les premiers résultats calculés ont servi à diriger les efforts de collecte pour les flux et les étapes les plus importants et pour lesquels les données étaient les plus incertaines.

Tel que mentionné auparavant, l'étude a été réalisée en utilisant les deux types d'approches existantes pour calculer des résultats d'une AFM. La méthode ascendante a privilégié les données primaires disponibles, qui ont été collectées auprès des entreprises et organismes concernés (entreprises minières et de transformation, RECYC-QUÉBEC, inventaire national de rejets et polluants). La méthode descendante a utilisé principalement des sources de données compilant des statistiques agrégées par secteur ou par type

de produit, telles que celles rassemblées par Ressources Naturelles Canada, STATCAN et l'Institut de la statistique du Québec.

Les données manquantes, incomplètes ou non facilement accessibles ont quant à elles été complétées par des données secondaires issues de bases de données publiques disponibles, d'une revue de littérature ou de jugements d'experts. Certaines de ces bases de données ne fournissent pas des données spécifiques aux flux. Les données extraites permettent toutefois la transformation de données économiques ou de biens en flux de métal, via des données telles que les concentrations de métaux dans les différentes familles de biens ou encore les prix par tonne de biens. Les bases de données consultées sont principalement ProdCom et Forwast.

Il est à noter que certaines de ces bases de données, telles que ProdCom<sup>1</sup> et Forwast, proviennent d'autres régions, principalement de l'Europe, où l'AFM est plus développée qu'en Amérique du Nord. L'utilisation de données européennes pour représenter l'Amérique du Nord peut introduire un biais dans certains cas. Cependant, il est estimé que la complétude et la qualité de ces bases de données européennes en font une option préférable à l'utilisation de données plus spécifiques à l'Amérique du Nord, car ces dernières sont issues de sources diverses dont la collecte aurait exigé des efforts dépassant l'ampleur de ce projet.

Dans les cas où aucune source n'était disponible, plusieurs hypothèses ont été posées, dont :

- Dû au manque de données assez détaillées sur les échanges interprovinciaux et la nature des données d'importation de STATCAN (qui tient compte de la province d'entrée des marchandises, mais pas du lieu d'utilisation finale), il est considéré en général que les importations au Canada sont réparties entre les provinces en fonction du PIB et de la population. Cette hypothèse ne s'applique que si d'autres données ou hypothèses plus fiables ne sont pas disponibles (des données du MESI ont été utilisées pour validation pour certains produits).
- La concentration de métal dans les biens importés ou exportés est extraite de la base de données ProdCom et elle est constante pour toutes les marchandises dans une même catégorie. Ceci implique des estimations peu fiables pour certaines catégories de biens décrites dans les données d'importation et exportations de STATCAN (notamment pour les catégories très génériques telles que « véhicules automobiles à usages spéciaux, nda »).
- Tous les produits importés catégorisés comme semi-finis sont considérés comme des importations pour l'étape de fabrication/assemblage tandis que les produits catégorisés comme finis sont considérés comme des importations pour l'étape d'utilisation.

---

<sup>1</sup> Prodcom : Prodcom est une base de données européenne qui fournit des statistiques sur la production de marchandises manufacturées. Le terme vient du français "PRODUCTION COMMUNAUTAIRE" pour les industries extractives et manufacturières. Des données de prix sont disponibles pour les marchandises répertoriées (<http://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom>).

Forwast : Forwast est un projet européen qui cherchait à quantifier et comprendre les flux et stocks de matière dans l'Union Européenne. Plusieurs données de concentration de métal et de prix des marchandises sont disponibles (<http://forwast.brgm.fr/>).

- La distribution de l'utilisation des métaux par secteur au Québec dans l'étape d'utilisation est considérée égale à celle du Canada pour le cas du fer et égale à la moyenne mondiale pour le cuivre et le lithium.

Le calcul des résultats a été fait à l'aide du logiciel STAN 2.5, développé par l'Université de Vienne. Ce logiciel a permis de calculer les résultats pour les trois métaux à l'étude et de réaliser une étape de réconciliation de données où tous les flux et variations de stocks inconnus sont calculés à partir des données existantes. Les bilans<sup>2</sup> pour chaque étape et pour le système général sont équilibrés à l'aide des informations sur les incertitudes des flux. En effet, l'utilisation de sources de données diverses et le manque de certaines données font en sorte que les bilans de masse ne sont pas toujours parfaitement équilibrés. Il est donc nécessaire de procéder à l'étape de réconciliation des données.

L'étape de réconciliation de données s'appuie sur les données disponibles et leur incertitude associée (provenant par exemple de la variabilité entre deux sources de données pour un même flux) pour faire équilibrer les flux d'entrée et ceux de sortie. En plus du balancement des flux, cette opération a comme résultat une minimisation de l'incertitude finale sur les données existantes<sup>3</sup>. Cette étape aide à compléter l'AFM par des flux et des variations de stocks respectant le bilan de masse du système au complet. Par contre, la réconciliation peut introduire des variations sur les valeurs des flux dont les données sont connues. Ces variations diminuent en fonction de la précision de la valeur de départ du flux. Par exemple, si le flux n'a pas une incertitude importante qui lui est associée parce que la donnée provient d'une source fiable, la réconciliation n'affectera pas, ou peu, la valeur après réconciliation du flux. La Figure 2-2 montre un exemple de l'influence de la réconciliation de données sur les valeurs finales des flux. Dans l'exemple, les deux flux réduisent leur incertitude après la réconciliation. Par contre, la valeur du flux d'exportation s'éloigne plus de sa valeur initiale à cause de sa plus grande incertitude initiale.

---

<sup>2</sup> Le bilan d'entrées, sorties et variation de flux pour la substance étudiée

<sup>3</sup> <http://www.stan2web.net/support/mfa-basics/data-reconciliation>

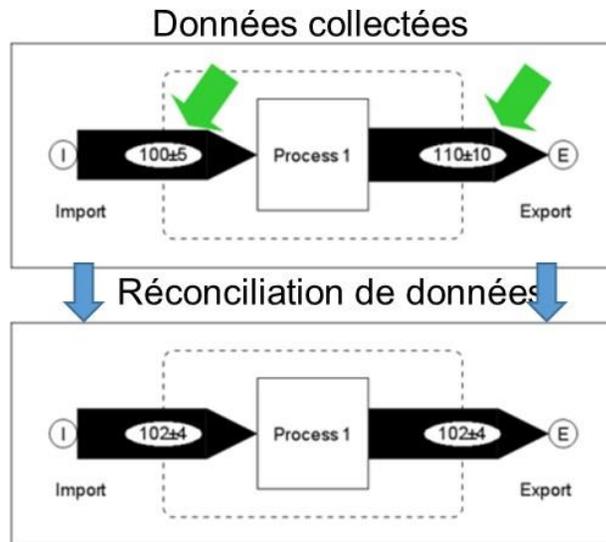


Figure 2-2 : Exemple de réconciliation de données. Suite à la réconciliation de données les incertitudes des flux réduisent. (adapté de <http://www.stan2web.net>).

## 2.5 Analyse des résultats et interprétation

Cette dernière phase de l'AFM permet de présenter les résultats obtenus et de les mettre en perspective. Les résultats présentés au chapitre 3 sont appuyés sur une analyse des données utilisées. Cette analyse comprend notamment :

- l'analyse des résultats, qui inclut l'identification des principaux flux et stocks par étape de cycle de vie, l'identification des principales sources de perte d'efficacité et l'identification des gisements de métaux potentiels;
- l'évaluation de l'incertitude et de la qualité des données utilisées dans l'analyse, qui cherche à déterminer la validité et la robustesse des résultats et des conclusions obtenus;
- les limites de l'analyse, associées à la qualité des données utilisées;
- les principales recommandations qui peuvent être tirées des résultats obtenus.

### 3 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Dans ce chapitre, nous présentons le profil des systèmes à l'étude, l'identification des principaux flux et les gisements des métaux les plus importants, de même que l'analyse de la qualité des données utilisées.

#### 3.1 Fer

##### 3.1.1 Résultats par étape

La Figure 3-1 présente le schéma des flux de matières, en millier de tonnes de fer (kilotonnes par an- kt/an), entre les différentes étapes du cycle de vie du fer au Québec en 2014. Elle indique les flux transitant entre les différentes étapes du cycle de vie de même que les flux échangés avec l'extérieur du système. Ces derniers flux sont représentés par des flèches qui ne relient pas deux boîtes et commencent par un « I » (« importation » ou entrées depuis l'extérieur du système) ou se terminent par un « E » (« exportation » ou sorties vers l'extérieur du système). Les entrées correspondent à l'extraction minière et aux importations de métal depuis d'autres régions sous différentes formes (concentré, produits semi-finis ou produits finis). Les sorties, quant à elles, peuvent être de différentes natures : les exportations de concentré, produits finis, produits semi-finis ou ferraille vers d'autres régions, les émissions dans l'environnement, qui sont pratiquement irrécupérables dues à leur nature dispersée, et les sorties sous forme d'élimination (résidus miniers entreposés, sites d'enfouissement, etc.). Contrairement au métal perdu sous forme d'émission dans l'environnement, ce dernier type de sortie reste potentiellement disponible pour être récupéré plus tard dans le temps, puisque le métal est entreposé dans un endroit ciblé. Dans les boîtes, qui représentent les étapes du cycle de vie, on peut voir les stocks et les variations de stock lorsqu'applicable. Étant donné le caractère statique de l'analyse, seul le stock de l'étape d'utilisation est considéré mais certaines variations de stock sont aussi calculées afin d'équilibrer les entrées et sorties de chacune des étapes. Les quantités des flux sont présentées avec l'incertitude associée sous forme de plage de valeurs autour de la valeur centrale.

Le premier constat pour le fer est que les flux les plus importants ont lieu au cours des étapes d'extraction et de concentration du métal. D'autres flux importants apparaissent durant les étapes de fabrication/assemblage et d'utilisation, où des produits semi-finis et finis sont majoritairement importés pour leur utilisation au Québec. Une grande quantité de métal est aussi non-disponible sous forme de stock dans la phase d'utilisation, qui correspond au fer présent dans les biens de consommation, les infrastructures, les véhicules, les bâtiments, etc.

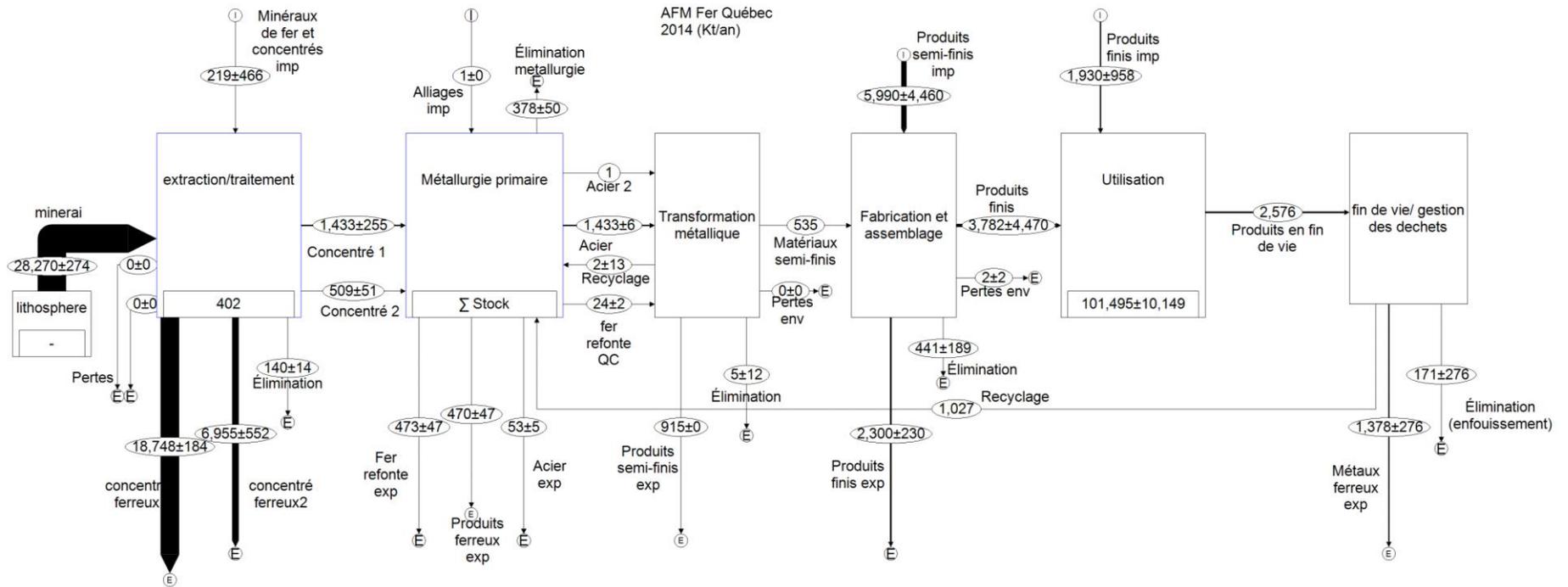


Figure 3-1 : Schéma de flux et stocks de fer au Québec en 2014 par étape avec incertitudes associées aux flux (unité des flux : millier de tonnes par an; unités des stocks : millier de tonnes).

Le Tableau 3-1 montre le bilan des flux de fer transitant dans le système par étape de cycle de vie, c'est-à-dire un résumé des informations présentées dans la Figure 3-1. Le premier constat est que les quantités de fer entrant et sortant du système sont semblables, avec plus de 30 000 milliers de tonnes par an (kt/an) de fer qui entrent et sortent du système (Québec) par année (36 500 kt/an entrent et 32 400 kt/an sortent). Cependant, les entrées et les sorties n'ont pas lieu aux mêmes étapes du cycle de vie. En effet, l'extraction minière représente le principal flux d'entrée de fer dans le système, avec une quantité annuelle de 28 400 kt. Cette quantité est 3.5 fois plus importante que la quantité totale qui rentre via les importations (8 140 kt/an). Les sorties du système sont dominées à 80 % par les exportations de fer peu transformé (25 700 kt/an), alors que les sorties via l'exportation de biens finis et semi-finis représentent 10 % des sorties. Enfin, les pertes ou éliminations ne représentent que 4 % du total des sorties (1 140 kt/an).

Les étapes d'extraction, traitement et métallurgie primaire sont dominées par l'entrée de fer issu de l'activité minière au Québec. Peu d'importations ont lieu à ces étapes, avec seulement une entrée de minerai de fer et de concentrés (219 kt/an). Suite au traitement, la majorité du fer sort via les exportations (25 700 kt/an) et seulement 1 940 kt/an sont transférées aux étapes de métallurgie primaire. Les sorties de l'étape de concentration via les pertes dans l'environnement ou l'élimination sont très faibles.

À l'étape de métallurgie primaire, où il y a aussi une entrée de ferraille récupérée, qui représente un tiers du total entrant, le fer est transformé en acier et autres produits ferreux. Presque la moitié du fer sort via les exportations (996 kt/an), le reste est transféré pour la transformation ultérieure (1 460 kt/an) ou vers l'élimination (378 kt/an). Lors de la transformation métallique, où les produits ferreux sont transformés en produits semi-finis, deux tiers de la production sort du système via les exportations (915 kt/an) et seul un tiers (535 kt/an) sort vers la fabrication/assemblage au Québec. Les quantités éliminées ou émises à l'environnement restent négligeables.

Tableau 3-1 : Bilan des flux de matières de fer par étape au Québec en 2014 (unité : kt/an- milliers de tonnes par an).<sup>4</sup>

Étape	Entrées au système (env)	Entrées au système (imp)	Sorties du système (env)	Sorties du système (exp)	Entrées d'une autre étape	Sorties vers une autre étape	ΔStock
	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur
Extraction/ traitement	2.83E+04	2.19E+02	1.40E+02	2.57E+04		1.94E+03	7.03E+02
Métallurgie primaire		6.63E-01	3.78E+02	9.96E+02	2.97E+03	1.46E+03	1.40E+02
Transformation métallique			6.20E+00	9.15E+02	1.46E+03	5.35E+02	
Fabrication/ Assemblage		5.99E+03	4.43E+02	2.30E+03	5.35E-01	3.79E+03	
Utilisation		1.93E+03			3.79E+03	2.58E+00	5.71E+03
Fin de vie			1.71E+02	1.38E+03	2.58E+00	1.03E+03	
<b>Total</b>	<b>2.83E+04</b>	<b>8.14E+03</b>	<b>1.14E+03</b>	<b>3.13E+04</b>	<b>8.22E+03</b>	<b>8.21E+03</b>	<b>3.98E+03</b>

C'est à l'étape de fabrication/assemblage qu'a lieu la principale entrée de fer via les importations dans le système, avec 5 990 kt/an de fer entrant. Concrètement, les matériaux de fabrication tels que les tuyaux, plaques ou produits laminés sont les principales importations de produits semi-finis. Ces produits semi-finis sont destinés tant à la fabrication de machinerie que d'infrastructures et de bâtiments. La plupart de ces matériaux (plus de 70 %) entrent au Québec via d'autres provinces. Ceci est dû à l'hypothèse de calcul formulée précédemment (voir section 2.4) et visant à compenser le manque de données sur les échanges entre les provinces. La majorité du fer utilisé dans l'étape de fabrication/assemblage est transférée à l'étape d'utilisation et seulement 20 % sort du système via les exportations de produits finis.

L'étape d'utilisation est caractérisée par un grand stock et des entrées de produits finis via l'étape de fabrication/assemblage et via les importations. Les importations représentent une entrée de fer de presque 2 000 kt/an sous forme de produits finis, mais la plupart des produits utilisés au Québec sont fabriqués et assemblés dans la province (3 780 kt/an). Ceci inclut la fabrication des infrastructures et bâtiments ainsi que des biens de consommation assemblés et utilisés au Québec.

Quant aux produits finis importés, ceux qui contribuent le plus au flux entrant sont les équipements mécaniques et industriels (chaudières, machinerie et engins mécaniques), qui représentent deux tiers des importations totales de fer dans des produits finis, et les véhicules (principalement les automobiles et les camions), qui représentent presque 30 % du total du fer importé dans cette étape. Les équipements

<sup>4</sup> Entrées au système (env) : Extraction de l'environnement  
 Entrées au système (imp) : Importations depuis d'autres régions  
 Sorties du système (env) : Émissions à l'environnement et élimination (enfouissement)  
 Sorties du système (exp) : Exportations à d'autres régions  
 Entrées d'une autre étape : Flux de matière depuis une autre étape du système  
 Sorties vers une autre étape : Flux de matière vers une autre étape du système  
 ΔStock : Variation du stock dans l'étape pour l'année de référence

électriques et électroniques ne contribuent quant à eux qu'à 3 % du total, les électroménagers étant les principaux contributeurs à cette catégorie.

Le stock en utilisation est estimé à plus de 101 000 kt et il est reparti entre différents secteurs (Figure 3-2). Une grande partie du fer se trouve dans le secteur du bâtiment et des autres infrastructures (68 % du fer en utilisation) et le stock restant est distribué entre les secteurs des transports, de la machinerie industrielle (14 % et 13 % respectivement) et des biens de consommation de petite taille (électroménagers, petits transformateurs et groupes électrogènes, etc.). Il est à noter que les biens de tous ces secteurs ont des durées de vie très variables, donc la possibilité de mobiliser ce fer est aussi très variable en fonction du secteur. Les biens de consommation courants et le matériel roulant, avec une durée de vie moyenne de 15 et 20 ans respectivement sont les parties du stock total les plus disponibles, alors que l'équipement mécanique et industriel ainsi que le fer contenu dans les bâtiments et autres infrastructures, qui présentent une durée de vie moyenne plus élevée (30 et 75 ans respectivement) est moins disponible<sup>5</sup>.

Le Tableau 3-1 montre une augmentation nette du stock de fer à l'étape d'utilisation d'environ 3 % par an. En effet, le total des entrées représente presque 6 000 kt/an de fer alors que le total des sorties est de 2 580 kt/an, menant à une augmentation nette de plus de 3 000 kt/an pour 2014 (la période à l'étude), qui s'ajoutent à un stock estimé à 101 000 kt. Le temps que le fer reste en utilisation varie selon la typologie du produit, comme mentionné dans le paragraphe précédent.

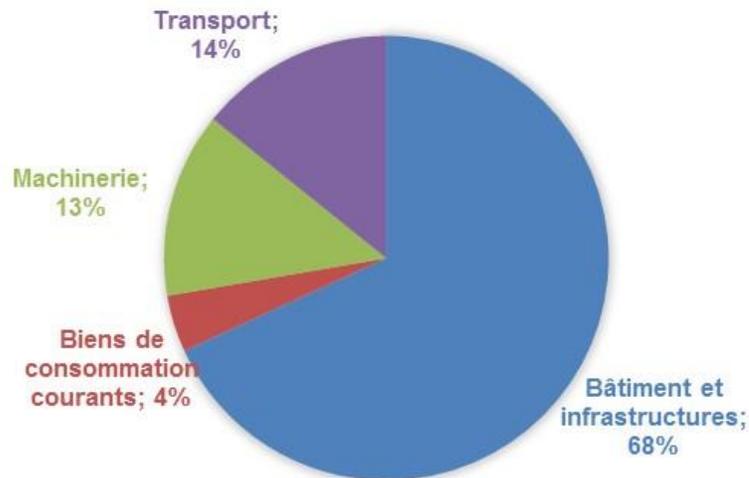


Figure 3-2 : Répartition du stock de fer par secteur dans l'étape d'utilisation au Québec en 2014, au total 101 000 kt. calculé à partir de Pauliuk et al (2013) et Muller et al (2011).

<sup>5</sup> Les durées de vie moyennes ont été extraites de Müller et al, (2011).

L'étape de fin de vie représente environ 7 % des flux totaux échangés dans le système (2 500 kt/an de fer y circulent pour 36 500 kt/an de fer qui rentrent dans le système). Elle gère la totalité des flux provenant de la phase d'utilisation (2 580 kt/an) et est caractérisée par deux flux sortants principaux de la même ampleur : un qui revient à l'étape de métallurgie primaire (1 030 kt/an) et qui représente le recyclage de ferraille au Québec et un deuxième qui sort du système via l'exportation de ferraille (1 380 kt/an). Le portrait est complété par le fer qui aboutit dans des sites d'enfouissement (171 kt/an). La répartition du fer par secteur en fin de vie est présentée dans la Figure 3-3. Elle a été calculée en considérant le total de fer entrant dans l'étape de fin de vie et la durée de vie moyenne des différents secteurs. Les biens de consommation courants et le transport représentent plus de 70 % du total de fer envoyé à l'étape de fin de vie. Cependant, il faut considérer qu'une grande quantité d'infrastructures et bâtiments ont été bâtis il y a plusieurs décennies et ils atteignent la fin de leur vie utile, donc la fraction des bâtiments et infrastructures pourrait augmenter dans les années à venir.

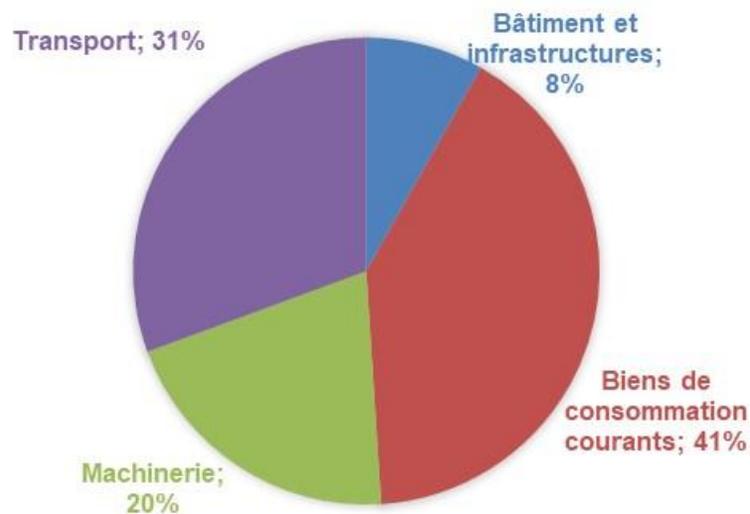


Figure 3-3 : Répartition du flux annuel de fer géré en fin de vie (2,6 Mt/an) par secteur au Québec en 2014 (calculé à partir des stocks en utilisation et des durées de vie de chaque catégorie de produit).

### 3.1.2 Principales conclusions

Les principales conclusions qui peuvent être tirées des résultats sont :

- Le Québec est un exportateur net de fer (32 millions de tonnes - Mt/an), notamment des formes de fer moins transformées. En effet, environ 90% du minerai extrait et concentré est voué à l'exportation.

- L'industrie de la métallurgie primaire et celle de la transformation métallique n'utilisent qu'une faible partie du fer extrait au Québec (moins de 10 %). Leurs produits sont exportés et utilisés dans la province à parts égales.
- Le Québec est un importateur net de fer via des produits très transformés (5,9 Mt/an), principalement de produits semi-finis qui sont ensuite utilisés sur place pour la fabrication ou l'assemblage.
- L'étape d'utilisation est la source du plus grand gisement de fer disponible parmi les différentes étapes de transformation de ce métal (donc excluant le gisement dans le sous-sol), avec un stock d'environ 100 Mt. Cependant, une grande partie de ce stock n'est pas disponible puisque le métal est utilisé dans divers produits. Il sera accessible à des horizons de temps qui diffèrent selon la durée de vie des produits en utilisation. À noter que le stock de fer en utilisation est en augmentation nette de plus de 3 140 kt/an, comparativement à 2 580 kt de fer qui sont annuellement accessibles pour la gestion en fin de vie.
- Le fer dans les biens de consommation courants et dans les véhicules représente la composante essentielle du fer envoyé annuellement en fin de vie (2 580 kt), avec 41 % et 31 % du total respectivement.
- En fin de vie, moins de la moitié du fer est recyclée au Québec (1 030 kt/an). La majorité du fer est exportée hors du Québec pour être traitée dans d'autres régions (1 380 kt/an).
- Dans les différentes étapes, les quantités envoyées annuellement vers l'élimination (enfouissement, résidus miniers entreposés, etc.) restent faibles (1 140 kt/an). Cependant, l'accumulation des stocks, même en faible quantité au fil des années, peut être une source appréciable de fer qui serait intéressante à récupérer.
- Les pertes dans l'environnement restent négligeables, et ce, pour toutes les étapes.

## 3.2 Cuivre

Cette section présente les résultats de l'AFM du cuivre au Québec en 2014.

### 3.2.1 Résultats par étape

La Figure 3-4 montre le schéma des flux de matières entre les différentes étapes du cycle de vie du cuivre au Québec en 2014, ainsi que les stocks (lire section 3.1.1 pour les explications de la lecture des résultats d'une AFM).

Comme dans le cas du fer, les flux les plus importants prennent place dans les premières étapes du cycle de vie du cuivre, notamment aux étapes de métallurgie primaire et de la métallurgie secondaire et tertiaire (transformation métallique). En effet, le Québec est le seul producteur d'anodes et de cathodes de cuivre du Canada. Aussi, un grand transformateur de cuivre (Nexans, producteur de fil de cuivre) est localisé dans la province. Ces deux secteurs font en sorte que les exportations à ces deux étapes sont les principaux flux qu'on trouve dans le système. En conséquence des grandes capacités de l'industrie de transformation, l'extraction minière au Québec (43 kt/an) ne suffit pas à elle seule pour combler la demande en cuivre. D'importants volumes d'importation sont alors observés aux étapes de métallurgie primaire (274 kt/an) et de transformation métallique (43 kt/an).

On peut également observer une grande quantité de métal en stock (2 263 kt) dans la phase d'utilisation, qui correspond comme dans le cas du fer, au métal présent dans les biens de consommation, les infrastructures, les véhicules, les bâtiments, etc.

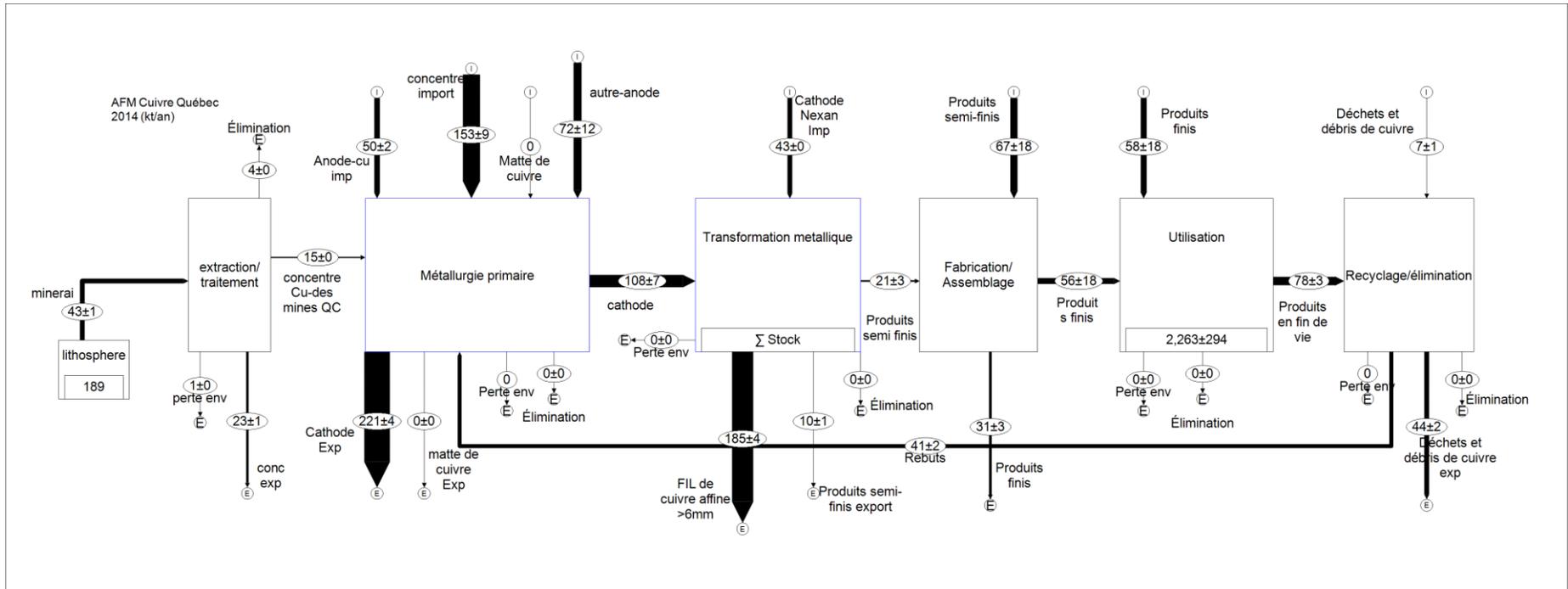


Figure 3-4 : Schéma de flux et stocks de cuivre au Québec en 2014 par étape avec incertitudes associées aux flux (unité des flux : millier de tonnes par an; unités des stocks : milliers de tonnes).

Le Tableau 3-2 montre le bilan des flux de cuivre transitant dans le système par étape de cycle de vie en milliers de tonnes de cuivre par an (kt/an). Comme dans le cas du fer, les quantités de métal entrant et sortant du système sont semblables, avec 492 kt de cuivre qui rentrent et une quantité légèrement supérieure qui quitte le système par année (522 kt). Contrairement au fer, les principales entrées et sorties ont lieu lors de la métallurgie primaire du cuivre, avec l'importation de concentré pour la fabrication d'anodes (153 kt/an) et l'exportation de cathodes (221 kt/an).

L'exportation de produits semi-finis, suite à la transformation métallique, notamment en fil de cuivre, représente le deuxième plus important flux de sortie en cuivre avec 185 kt/an. Les autres produits semi-finis et les produits finis comptent pour environ 40 kt/an de sorties du système, une quantité similaire à celle des rebuts exportés pour traitement à l'extérieur (44 kt/an). Les sorties de cuivre via les émissions à l'environnement ou l'élimination (résidus miniers entreposés, enfouissement, etc.), représentent environ 6 kt/an (1 % du total sortant). Quant aux principaux flux d'entrée, les importations de produits semi-finis et finis représentent ensemble plus de 125 kt/an de cuivre, alors que le Québec en a extrait seulement 43 kt/an en 2014.

Les étapes d'extraction et de traitement ne présentent qu'un flux d'entrée, celui de l'activité minière. Il n'y a pas d'importation à cette étape. Suite à la concentration, plus de la moitié du cuivre est exporté, 34 % sont envoyés vers le secteur de la métallurgie primaire au Québec et le reste (env. 13% du total extrait) est cumulé sous forme de rejets miniers (élimination).

L'étape de la métallurgie primaire est caractérisée par un grand transit de cuivre qui rentre sous forme de concentré et d'anodes (270 kt/an) et ressort sous forme de cathodes (220 kt/an). Ces flux représentent environ 50 % du total du cuivre qui entre et sort du système. Comme dans le cas du fer, une partie du cuivre récupéré en fin de vie est réinséré à cette étape. Cependant, cette entrée est moins importante que dans le cas du fer, avec 40 kt/an de cuivre récupéré, équivalant à 15 % du total des importations. Environ le tiers du métal produit à cette étape, 100 kt, est transféré vers l'étape de transformation métallique sous forme de cathodes.

*Tableau 3-2 : Bilan des flux de matières de cuivre par étape au Québec en 2014 (unité : kt/an - milliers de tonnes par an)*

Étape	Entrées au système (env)	Entrées au système (imp)	Sorties du système (env)	Sorties du système (exp)	Entrées d'une autre étape	Sorties vers une autre étape	ΔStock
	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur
Extraction/ traitement	4.33E+01		5.13E+00	2.33E+01		1.49E+01	
Métallurgie primaire		2.74E+02	1.26E-01	2.22E+02	5.56E+01	1.08E+02	
Transformation métallique		4.26E+01	3.10E-01	1.96E+02	1.08E+02	2.15E+01	-6.69E+01
Fabrication/ Assemblage		6.66E+01		3.15E+01	2.15E+01	5.67E+01	
Utilisation		5.83E+01	1.14E-01		5.67E+01	7.80E+01	3.69E+01
Fin de vie		7.29E+00	4.16E-01	4.41E+01	7.80E+01	4.07E+01	
<b>Total</b>	<b>4.33E+01</b>	<b>4.49E+02</b>	<b>6.09E+00</b>	<b>5.16E+02</b>	<b>3.20E+02</b>	<b>3.20E+02</b>	<b>-3.00E+01</b>

Les produits semi-finis contenant du cuivre sont principalement destinés à l'exportation (90 % du total des sorties de l'étape) et seulement 21 kt/an sont envoyées vers l'étape de fabrication/assemblage. Les sorties sous forme de pertes à l'environnement et d'élimination sont négligeables.

Les trois quarts du cuivre à l'étape de la fabrication/assemblage proviennent de l'étranger avec 67 kt/an, le reste provenant du secteur de la transformation métallique (21 kt/an). Les produits finis (56 kt) sont principalement utilisés au Québec et seules 31 kt/an ont été exportées en 2014. Le cuivre dans les produits finis exportés se trouve principalement dans :

- de la machinerie industrielle (chaudières, machines, appareils et engins mécaniques, etc.), qui représente 63 % du total des exportations à cette étape;
- des appareils électriques (machines, appareils et matériels électriques et leurs parties), 23 %;
- des véhicules (automobiles, tracteurs, etc.), 14 %.

L'étape d'utilisation est caractérisée par un grand stock et des entrées de produits finis via l'étape de fabrication/assemblage et via les importations. Les importations et les produits finis fabriqués au Québec représentent des intrants de taille similaire (environ 57 kt/an). Comme dans le cas du fer, la plupart des produits importés rentrent dans le système via d'autres provinces. Ceci est le résultat de l'hypothèse utilisée pour calculer les importations. Les produits finis importés sont principalement :

- des équipements mécaniques et industriels, à 69 %;
- des appareils électriques, à 16 %;
- des véhicules (automobiles, VUS, tracteurs, etc.), à 15 %.

Un stock d'environ 2 263 kt de cuivre est présent dans les biens et produits finis utilisés aujourd'hui au Québec. Sa répartition dans les divers secteurs économiques est présentée à la Figure 3-5Figure 3-2. Comme dans le cas du fer, la plus grande partie du cuivre en utilisation se trouve dans le secteur du bâtiment et des autres infrastructures qui totalisent 45 % de l'ensemble. Cependant, cette contribution est moins marquée que dans le cas du fer. L'autre grand contributeur au stock de cuivre en utilisation est celui des biens de consommation et autres équipements avec 31 % du total. Les secteurs des transports et de la machinerie contribuent chacun à 12 % du stock total. Ce stock ne peut, bien sûr, pas être mobilisé immédiatement car il faut tenir compte des durées de vie des biens des différents secteurs. Comme dans le cas du fer, le cuivre présent dans le secteur des bâtiments et des infrastructures avec une durée de vie moyenne plus élevée (de 30 et de 75 ans, respectivement) est le moins disponible comparativement au cuivre dans les transports, machinerie et biens de consommation.

Comme pour le fer, on note pour 2014 une augmentation nette du stock de métal à l'étape d'utilisation de 37 kt/an, ce qui représente une augmentation annuelle de près de 2 % du stock en utilisation. À ce point, le seul flux sortant du métal provient des biens et infrastructures qui atteignent l'étape de fin de vie.

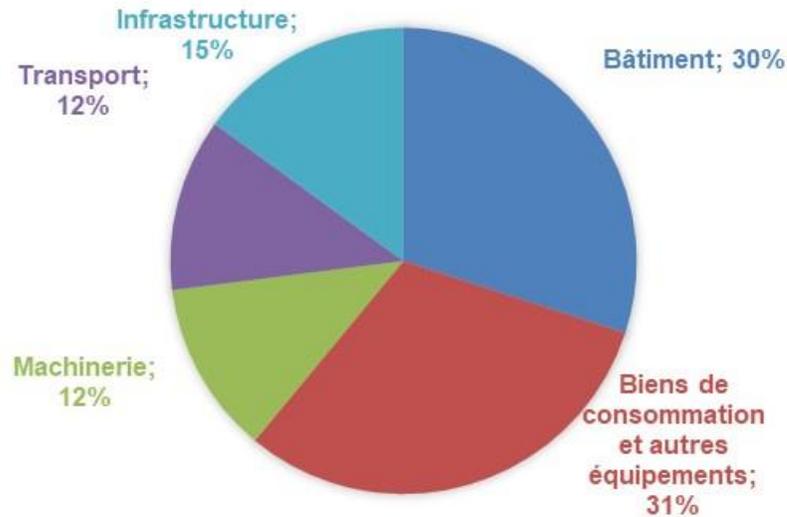


Figure 3-5 : Répartition du stock de cuivre par secteur à l'étape de l'utilisation au Québec en 2014 (adapté de ICSG, (2015)). Le stock total en utilisation est estimé à 2 200 kt.

L'étape de fin de vie est très similaire à celle du fer, avec deux grands flux sortants de la même magnitude (plus de 40 kt/an chacun) recyclés vers l'étape de métallurgie primaire et vers les exportations pour un recyclage hors Québec. Il faut souligner également une importation de déchets de cuivre qui sont répartis ensuite vers les flux sortants. La quantité qui finit dans les sites d'enfouissement est estimée à 0,4 kt/an, soit environ 0,5 % de la quantité de cuivre recyclé.

La répartition des flux de cuivre par secteur en fin de vie est présentée dans la Figure 3-6. Elle a été calculée de manière similaire à celle du fer dans la section 3.1.1. Les biens de consommation courants et le transport représentent plus de 70 % du total envoyé vers l'étape de fin de vie.

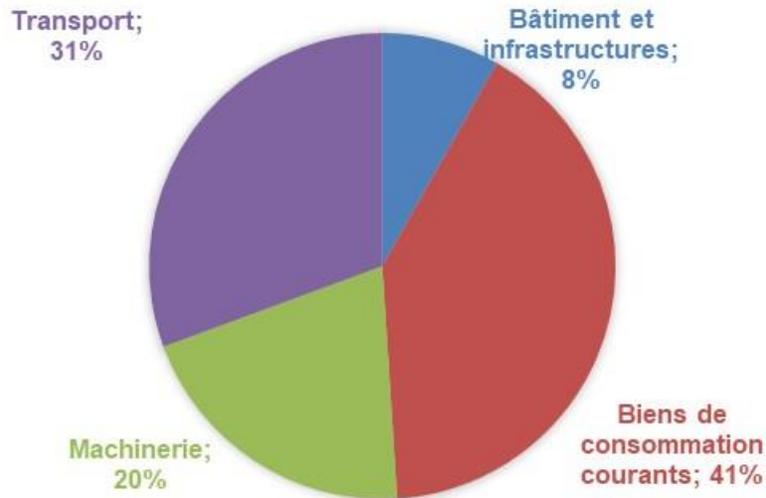


Figure 3-6 : Répartition du flux annuel de cuivre géré en fin de vie (78 kt/an) par secteur au Québec en 2014 (calculé à partir des stocks en utilisation et des durées de vie de chaque catégorie de produit).

### 3.2.2 Principales conclusions

Les principales conclusions qui peuvent être tirées des résultats sont :

- Le Québec est un exportateur net de cuivre (520 kt/an), notamment de cathodes et de produits semi-finis.
- Le Québec est un grand producteur de métal primaire de cuivre (330 kt/an), qui est ensuite exporté pour la plupart (2/3 de la production de cathodes). Moins de 5 % de la demande de cuivre pour la métallurgie primaire est comblée par l'extraction minière au Québec. 95 % de la demande est assurée par les importations de concentrés de cuivre et d'anodes. Cela représente la principale entrée de cuivre de tout le système.
- Le Québec est un importateur net de produits transformés, principalement de produits semi-finis qui sont ensuite utilisés sur place pour la fabrication ou l'assemblage (67 kt/an).
- L'étape d'utilisation représente un grand gisement dans le système, avec un stock estimé de plus de 2 200 kt en augmentation d'environ 2 % en 2014.
- Seule une partie du stock en utilisation était disponible pour la gestion en fin de vie (78 kt/an), en provenance principalement des biens de consommation courants (41 %), des véhicules (31 %) et de la machinerie (20 %).
- En fin de vie, la moitié du cuivre est recyclée dans la province et l'autre moitié est exportée pour être recyclée ailleurs.
- Les pertes de cuivre via l'élimination représentent environ 6 kt/an (1 % du total), dont 4,4 kt/an éliminées à l'étape de concentration, ce qui représente plus de 10 % du cuivre extrait par l'activité minière au Québec.

- Les pertes à l'environnement pour toutes les étapes se chiffrent à moins de 0,5 kt/an, soit 0.1 % du total de flux sortants du système.

### 3.3 Lithium

#### 3.3.1 Résultats par étape

La Figure 3-7 montre le schéma des flux de matières entre les différentes étapes du cycle de vie du lithium au Québec en 2014. La figure montre les flux et stocks tels qu'expliqués à la section 3.1.1. Il est à noter que les étapes de métallurgie primaire et de transformation métallique apparaissent en gris dans la figure parce qu'elles ne sont pas connectées au reste du système. En effet, en 2014, il n'y avait pas d'activité de ce type au Québec.

Contrairement aux deux métaux étudiés dans les sections précédentes, les flux les plus importants ont lieu aux étapes de fabrication et d'utilisation, suivi de l'extraction et de la concentration, pour lesquelles il y a eu de l'activité en 2014. Le Québec est par conséquent un importateur net de lithium, sous forme de produits semi-finis ou sous forme chimique (carbonate de lithium, hydroxyde de lithium, etc.). Avec plus d'entrées que de sorties, une augmentation nette (+104 t/an) du stock en utilisation est observée, correspondant à une augmentation annuelle de 26 % relativement au stock actuel, estimé à environ 400 t. Cette augmentation est due notamment à l'augmentation de batteries sur le marché, qui est le secteur avec la plus forte croissance.

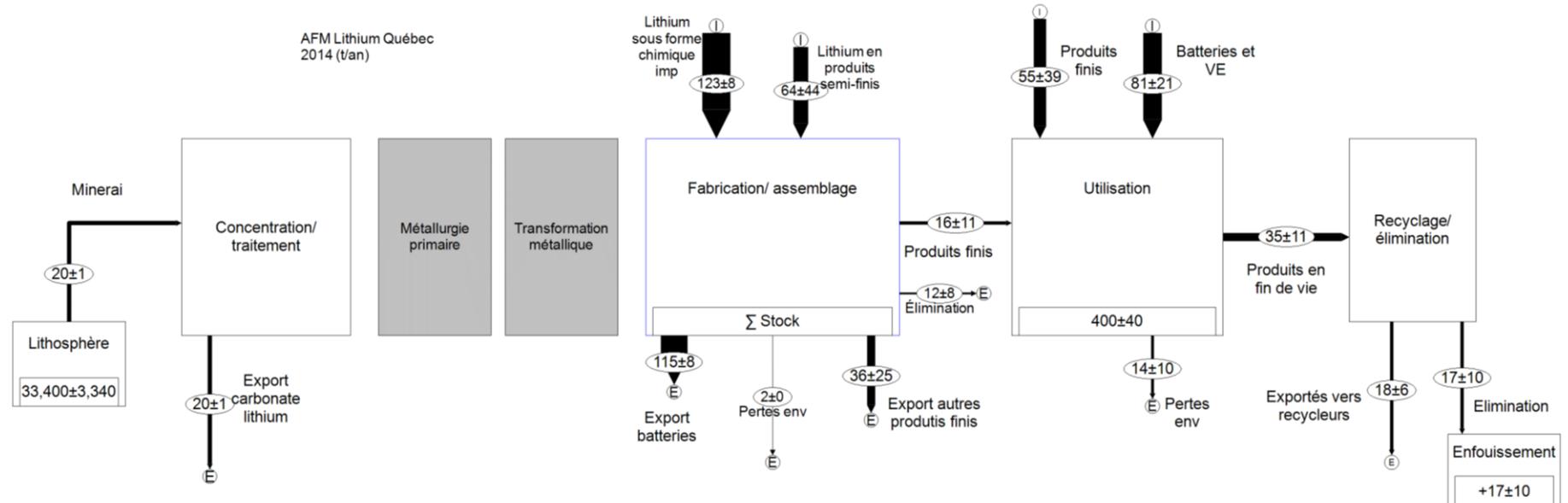


Figure 3-7 : Schéma de flux et stocks de lithium au Québec en 2014 par étape (unité des flux : tonnes; unités des stocks : tonnes).

Le Tableau 3-3 montre le bilan des flux de lithium transitant dans le système par étape de cycle de vie. La quantité de lithium qui entre dans le système est plus élevée que celle qui sort du système, résultant en une accumulation nette. En effet, 350 tonnes/an de lithium sont entrées dans le système, dont 94 % proviennent des importations et 6 % de l'activité minière, alors que seules 240 tonnes/an en sont sorties, dont 80 % via des exportations de concentré et de produits semi-finis et finis. Les autres 20 % des sorties sont éliminés ou émis à l'environnement. Tant les flux d'entrée que les flux de sortie ont lieu principalement durant les étapes de fabrication et d'utilisation.

Les étapes d'extraction et de concentration ne présentent qu'un flux d'entrée et un flux de sortie et ne sont pas connectées avec les autres étapes. En effet, le lithium extrait en 2014 par Québec Lithium était exporté dans sa totalité. Comme expliqué précédemment, en 2014, il n'y avait pas d'activité de transformation du lithium au Québec et donc ces étapes ne font pas partie de l'AFM.

*Tableau 3-3 : Bilan des flux de matières de lithium par étape au Québec en 2014 (unité : tonnes/an)*

Étape	Entrées au système (env)	Entrées au système (imp)	Sorties du système (env)	Sorties du système (exp)	Entrées d'une autre étape	Sorties vers une autre étape	ΔStock
	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur	Valeur
Extraction/ traitement	2.02E+01			2.02E+01			
Fabrication/ Assemblage		1.87E+02	1.66E+01	1.51E+02		1.60E+01	
Utilisation		1.36E+02	1.35E+01		1.60E+01	3.47E+01	1.04E+02
Fin de vie			1.71E+01	1.76E+01	3.47E+01		
<b>Total</b>	<b>2.02E+01</b>	<b>3.23E+02</b>	<b>6.48E+01</b>	<b>1.69E+02</b>	<b>5.07E+01</b>	<b>5.07E+01</b>	<b>1.04E+02</b>

À l'étape de fabrication/assemblage, deux entrées de lithium via des importations apparaissent : une de carbonate de lithium (131 tonnes/an) et une deuxième d'autres composés (64 tonnes/an). Ces deux entrées sont utilisées par les différentes applications du lithium, principalement pour la fabrication de piles et batteries et la production de verre et céramique. Les proportions de toutes les utilisations sont présentées dans la Figure 3-8.

Le lithium utilisé pour la fabrication sort de cette étape par quatre voies :

- les pertes à l'environnement (2 t/an) de nature dissipative lors des processus de fabrication;
- les déchets qui peuvent être récupérés (12 t/an);
- les exportations de piles et de batteries (110 t/an) et d'autres produits finis (36 t/an);
- et les produits finis qui sont utilisés au Québec (16 t/an).

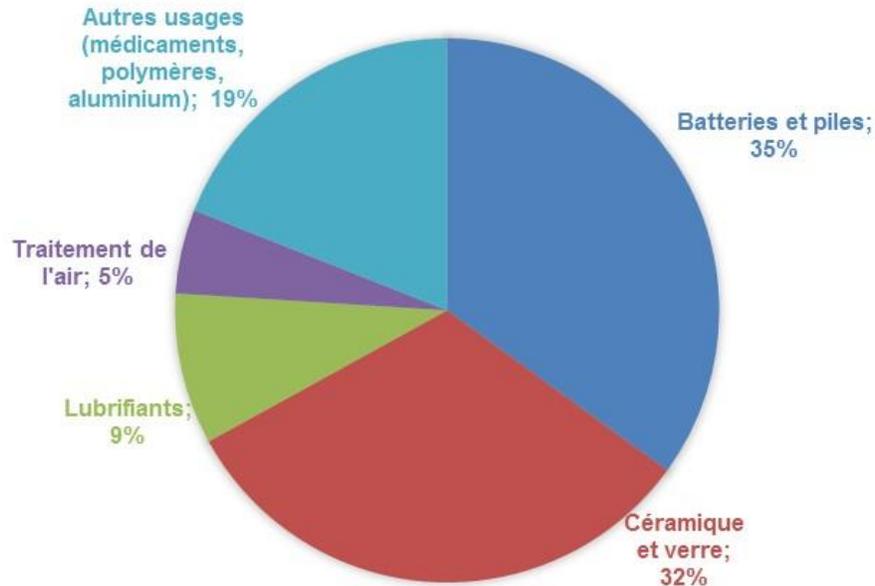


Figure 3-8 : Répartition des stocks de lithium en utilisation 2014 au niveau mondial (adaptée de USGS, 2016).

L'étape d'utilisation est caractérisée par un stock (estimé à environ 400 tonnes) et des entrées de produits finis via l'étape de fabrication/assemblage et via les importations. Le lithium provenant des produits fabriqués au Québec ne représente que 10 % du total des entrées, le reste provenant de l'extérieur des frontières du système. Le lithium dans les produits importés est fortement dominé par les piles et les batteries (59 % du total des entrées via les importations). Le reste du lithium provient principalement du verre et de la céramique ainsi que des lubrifiants importés (23 % et 30 % respectivement).

Le stock en utilisation est réparti entre différents secteurs (voir Figure 3-9). Les piles et batteries ainsi que le verre et la céramique apparaissent comme les principaux stocks de lithium. Le lithium contenu dans plusieurs produits tels que le verre et la céramique, les lubrifiants ou les médicaments est difficilement récupérable à cause de sa faible concentration ou du caractère dissipatif de son utilisation. De ce fait, seules les piles et batteries présentent pour l'instant un potentiel de recyclabilité du lithium. Le lithium émis dans l'environnement via les utilisations dissipatives (lubrifiants et médicaments) est estimé à 14 t/an, soit environ 10 % du lithium contenu dans des produits finis fabriqués ou importés au Québec, ou respectivement 28 % des sorties de l'étape d'utilisation.

Comme on peut voir dans le Tableau 3-3, le stock de lithium en utilisation croît de 25 % (100 t/an se rajoutent), dû principalement à l'augmentation de l'utilisation de batteries.

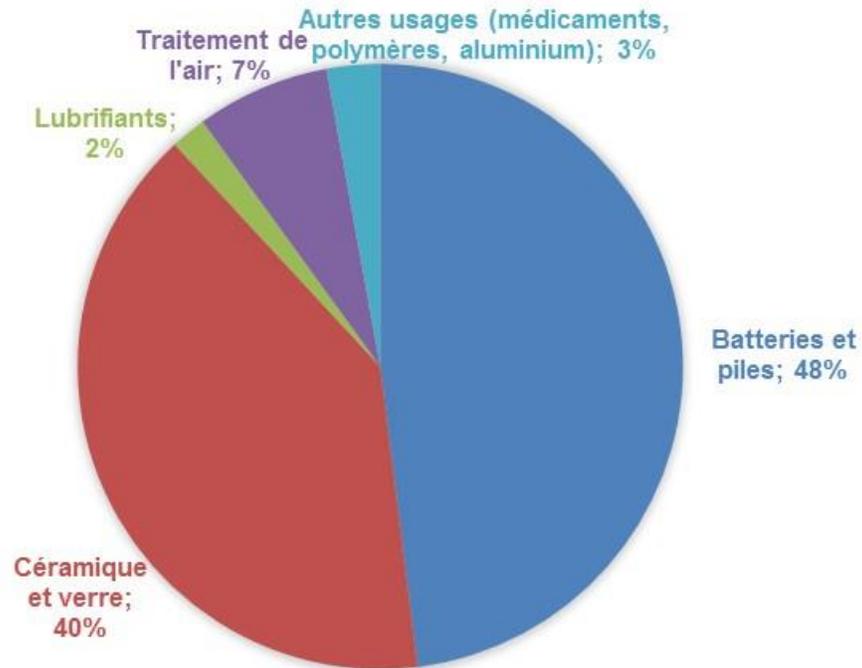


Figure 3-9 : Répartition du stock du lithium par secteur au Québec en 2014 (au total 400 tonnes (calculé à partir de USGS, 2016)).

L'étape de fin de vie est caractérisée par deux flux de même ampleur sortant du système : un flux d'exportation de produits recyclables, c'est-à-dire la plupart des piles et batteries (18 tonnes/an) et un flux qui va à l'élimination pour les produits dont le lithium ne peut pas être récupéré (17 tonnes/an, principalement du verre et de la céramique). La répartition du lithium par secteur en fin de vie est présentée à la Figure 3-10. Elle a été calculée de manière similaire à celle du fer dans la section 3.1.1. Les piles et batteries représentent 64 % du total de lithium qui entre dans l'étape de fin de vie. Cette forte contribution est due à la forte contribution des piles et batteries au stock en utilisation et à leur durée, ce qui leur confère une forte mobilité. Le deuxième contributeur est composé par les polymères et autres usages avec plus de 25 % du total.

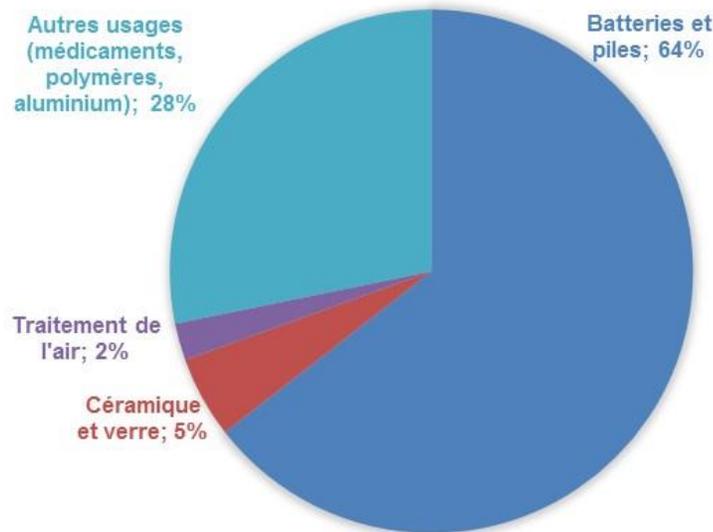


Figure 3-10 : Répartition du flux annuel de lithium géré en fin de vie (27 t/an) par secteur au Québec en 2014 (calculé à partir des stocks en utilisation et des durées de vie de chaque catégorie de produit).

### 3.3.2 Principales conclusions

Les principales conclusions qui peuvent être tirées des résultats sont :

- En 2014, le Québec a extrait 20 t/an de lithium qui, après concentration, ont été exportées sans passer par d'autres étapes de transformation. L'activité extractive a été interrompue en 2014, mais de nouveaux projets sont prévus pour 2017.
- Le Québec était un importateur net de lithium en 2014 (330 t/an), tant des formes peu transformées (carbonate de lithium) que des produits finis et semi-finis (principalement des piles et batteries).
- Les quantités envoyées vers l'élimination représentent environ 7 % des 173 t/an sortant de l'étape de fabrication.
- L'étape d'utilisation représente un gisement avec un stock de plus de 400 tonnes en croissance rapide (+ 25 % en 2014). Par contre, seule une partie du stock (principalement les piles et batteries) est mobile et récupérable en vue du recyclage.
- Les pertes à l'environnement de lithium, dues aux produits dont l'utilisation est dissipative (ex. : médicaments, lubrifiants), s'élèvent à 14 t/an, soit 28 % du total sortant de l'étape d'utilisation.
- Le lithium qui arrive en fin de vie (35 t/an) provient principalement des piles et batteries.
- En fin de vie, la moitié du lithium est exportée pour être recyclée ailleurs et l'autre moitié est envoyée à l'élimination

### 3.4 Analyse de l'incertitude et de la qualité des données

La disponibilité de données pour réaliser l'analyse des trois métaux est très inégale. Afin d'évaluer la validité des résultats et des conclusions, une analyse de l'incertitude associée aux données utilisées et une analyse de la qualité des données sont présentées dans cette section.

#### 3.4.1 Analyse de l'incertitude

L'utilisation de sources diverses et la transformation des données lors des calculs et de la réconciliation font en sorte que les flux et stocks sont associés à une incertitude relative. Cette incertitude donne une idée de la robustesse des résultats et des conclusions qui peuvent en être tirées.

L'incertitude s'exprime sous forme de plage de valeurs et le résultat calculé peut donc varier entre le maximum et le minimum d'une plage de valeurs. Cette incertitude est calculée en fonction des variations relatives aux différentes sources de données ou estimée en fonction du type de source de données utilisée. Ensuite, la réconciliation de données réduit l'incertitude des flux. Dans cette étude, l'incertitude est exprimée comme une plage symétrique et uniforme (toutes les valeurs dans la plage ont la même probabilité d'occurrence). Les valeurs peuvent être absolues (voir Figure 3-1, Figure 3-4 et Figure 3-7) ou relatives (pourcentage de variation par rapport à la valeur centrale). Les flux et stocks avec une incertitude de 10 % indiquent que la valeur réelle est de plus ou moins 10 % de la valeur centrale. Par exemple, une valeur de 10 % veut dire que, pour un flux d'une tonne, la valeur varie entre 0,9 et 1,1 tonne. Afin de mieux identifier les flux avec une forte incertitude, les incertitudes relatives ont été classées en quatre catégories présentées dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

*Tableau 3-4 : Catégories des valeurs d'incertitude*

Valeurs d'incertitude	
1	Incertitude inférieure à 10 %
2	Incertitude entre 11 % et 25 %
3	Incertitude entre 26 % et 50 %
4	Incertitude plus grande que 51 %

Les **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montrent les valeurs d'incertitude pour les flux et stock du fer, cuivre et lithium respectivement. Ces valeurs relatives ont été calculées à partir des valeurs absolues présentées dans les figures 3-1, 3-4 et 3-7. Dans le cas du fer, la plupart des flux présentent des valeurs d'incertitude dans les deux premières catégories de valeurs (inférieures à 25 %). Par contre, certains flux tels que les importations à l'étape de concentration et du traitement ou les flux d'élimination et de perte à l'environnement pour les étapes de la transformation métallique et de la fin de vie présentent une forte incertitude (plus de 100 %). D'autres flux n'ont pas d'incertitude associée. En effet, les valeurs calculées par le logiciel lors de la réconciliation ne présentent pas d'incertitude (concrètement les flux de variation de stock de l'étape de l'utilisation et les échanges entre les étapes de la fabrication et de l'utilisation et entre les étapes de l'utilisation et de la fin de vie).

Les flux incertains qui apparaissent dans l'AFM du fer peuvent faire varier certaines conclusions, notamment dans le cas du fer qui est envoyé en enfouissement dans l'étape de fin de vie. Cette quantité, bien que plus

faible que les quantités exportées et envoyées au recyclage, peut être jusqu'à 1,5 fois plus grande, ce qui ferait des sites d'enfouissement un stock plus intéressant pour la récupération. Les importations de minerai et concentré pour le traitement peuvent aussi atteindre jusqu'à trois fois la valeur centrale due à l'hypothèse de calcul. Par contre, la contribution reste faible par rapport au minerai qui provient de l'extraction au Québec.

Tableau 3-5 : Quantification et qualification de l'incertitude des flux de l'AFM du fer au Québec en 2014

Étape	Entrées au système (env)	Entrées au système (imp)	Sorties du système (env)	Sorties du système (exp)	Entrées d'une autre étape	Sorties vers une autre étape	ΔStock
Extraction/traitement	1%	213%	10%	3%	1%	16%	0%
Métallurgie primaire		1%	13%	10%	10%	1%	-
Transformation métallique			106%	0%	1%	-	
Fabrication/Assemblage		16%	43%	10%	-	-	
Utilisation		49%			-	-	-
Fin de vie			161%	20%	-	15%	

La majorité des flux de l'AFM du cuivre présentent des valeurs d'incertitude dans les deux premières catégories de valeurs (inférieures à 25 %). Seuls les flux d'importation de produits finis (à l'étape d'utilisation) et semi-finis (à l'étape de fabrication) présentent des incertitudes plus grandes (environ 30 %). Ces incertitudes sont dues principalement aux hypothèses de calcul de la partie importée depuis les autres provinces canadiennes. Les flux de variation de stock de l'étape de l'utilisation et les échanges entre les étapes de la fabrication et de l'utilisation sont calculés et ne présentent pas d'incertitude associée. Les flux les plus incertains qui apparaissent dans l'AFM du cuivre ne modifient pas les conclusions.

Tableau 3-6 : Quantification et qualification de l'incertitude des flux de l'AFM du cuivre au Québec en 2014

Étape	Entrées au système (env)	Entrées au système (imp)	Sorties du système (env)	Sorties du système (exp)	Entrées d'une autre étape	Sorties vers une autre étape	ΔStock
Extraction/traitement	2%		1%	4%	2%	3%	
Métallurgie primaire		8%	10%	2%	4%	7%	
Transformation métallique		1%	5%	3%	7%	15%	-
Fabrication/Assemblage		27%		10%	15%	-	
Utilisation		31%	10%		-	-	31%
Fin de vie		10%	10%	5%	-	5%	

La majorité des flux de l'AFM du lithium présentent les valeurs d'incertitude les plus élevées des trois métaux étudiés. En effet, les données et hypothèses utilisées sont rarement spécifiques au Québec (des données primaires ont seulement été utilisées pour les étapes d'extraction et de concentration et certains processus de l'étape de fabrication). Les incertitudes les plus élevées se trouvent dans les flux d'élimination (lithium envoyé à l'enfouissement) et les pertes à l'environnement. Les quantités fabriquées et importées présentent aussi une forte incertitude. Les flux incertains qui apparaissent dans l'AFM du lithium peuvent modifier certaines conclusions, notamment celles concernant la quantité disponible en enfouissement.

Tableau 3-7 Quantification et qualification de l'incertitude des flux de l'AFM du lithium au Québec en 2014

Étape	Entrées au système (env)	Entrées au système (imp)	Sorties du système (env)	Sorties du système (exp)	Entrées d'une autre étape	Sorties vers une autre étape	ΔStock
Extraction/traitement	7%		7%				
Fabrication/Assemblage		28%	57%	22%		69%	
Utilisation		44%	70%		69%	31%	46%
Fin de vie			60%	32%	31%		

### 3.4.2 Analyse de la qualité de données et contribution

Les informations sur l'incertitude de la section précédente donnent de l'information sur la qualité des données utilisées dans l'étude. Elles sont donc utilisées dans cette partie comme indicateur de qualité des données. Afin de compléter le portrait de la qualité et son influence sur les résultats et conclusions, les informations sur l'incertitude sont croisées avec la contribution des flux et stocks aux totaux des entrées ou des sorties. Par exemple, un flux à très forte contribution potentielle calculé avec des données estimées de façon simplifiée (et donc à forte incertitude) est à interpréter avec précaution. Au contraire, pour des flux qui ne contribuent pas beaucoup et qui sont calculés à partir de données primaires, les conclusions obtenues sont beaucoup plus robustes. Les deux critères sont catégorisés tels que détaillés dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Tableau 3-8 : Critères de qualification des données

Contribution au total d'entrées ou sorties		Incertitude (Qualité)	
1	Contribution potentiellement faible ou négligeable (0-5%)	1	Incertitude inférieure à 10 %
2	Contribution potentiellement influente (6-10%)	2	Incertitude entre 11 % et 25 %
3	Forte contribution potentielle (11-50%)	3	Incertitude entre 26 % et 50 %
4	Très forte contribution potentielle (51-100%)	4	Incertitude plus grande que 51 %

Les pointages des deux critères sont multipliés afin d'obtenir une valeur unique pour chaque flux et stock. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre les possibles valeurs ainsi que le code de couleur utilisé. Plus la valeur obtenue est grande, plus les conclusions doivent être prises avec précaution. Au contraire, plus la valeur est faible, plus les conclusions pour ce flux ou cette étape sont certaines.

Tableau 3-9 : Système de pointage des flux et stocks selon la qualité des données et la contribution des flux au total

		Qualité de la donnée			
		1	2	3	4
Contribution au bilan total	1	1	2	3	4
	2	2	4	6	8
	3	3	6	9	12
	4	4	8	12	16

Le Tableau 3-10 illustre les pointages obtenus pour les différentes étapes de cycle de vie du fer. Les flux avec le pointage le plus élevé se retrouvent aux étapes d'utilisation et de fabrication. Ceci est dû principalement à la forte incertitude des données. En effet, tel qu'expliqué dans la section précédente, les données d'importation sont très incertaines à cause de l'hypothèse de calcul utilisée (voir la section 2.4 pour plus de détail). Le flux de sortie vers l'utilisation et la fin de vie et la variation de stock de l'étape de la fabrication et de l'utilisation sont calculés par le système. Bien que le système ne calcule pas d'incertitudes pour ces flux, on attribue le pire pointage de qualité de données à ces données. Les premières étapes du cycle de vie présentent, en général, des pointages bas. Seule la grande contribution au total des entrées de l'extraction et depuis la fin de vie et les sorties (vers d'autres étapes et via les exportations) présentent des pointages plus hauts.

Tableau 3-10 : Pointage de la combinaison de la qualité de données et contribution au flux total pour chaque flux à chaque étape du cycle de vie pour l'AFM du fer

Étape	Entrées au système (env)	Entrées au système (imp)	Sorties du système (env)	Sorties du système (exp)	Entrées d'une autre étape	Sorties vers une autre étape	ΔStock
Extraction/traitement	4	2	1	4	4	4	1
Métallurgie primaire		1	2	1	2	1	4
Transformation métallique			4	1	1	4	
Fabrication/Assemblage		6	3	2	4	12	
Utilisation		6			8	8	8
Fin de vie			4		8	4	

Le Tableau 3-11 illustre les pointages obtenus pour les étapes de cycle de vie du cuivre. Les résultats sont similaires à ceux retrouvés dans le cas du fer; les pointages les plus hauts sont aussi dans les étapes de fabrication et d'utilisation, notamment dans les flux d'importation et les flux calculés (transfert entre la fabrication et l'utilisation et l'utilisation et la fin de vie) et les variations de stock. Les principaux flux en contribution sont les importations d'anodes pour l'étape de métallurgie primaire et les importations de produits finis et semi-finis. Ces fortes contributions font en sorte que le pointage des importations soit des plus élevés pour la fabrication, l'utilisation et la métallurgie primaire. Néanmoins, dans le cas de la métallurgie primaire, la qualité des données utilisée permet de réduire le pointage final.

Tableau 3-11 : Pointage de la combinaison de la qualité de données et contribution au flux total pour chaque flux à chaque étape du cycle de vie pour l'AFM du cuivre

Étape	Entrées au système (env)	Entrées au système (imp)	Sorties du système (env)	Sorties du système (exp)	Entrées d'une autre étape	Sorties vers une autre étape	ΔStock
	Qualité	Qualité	Qualité	Qualité	Qualité	Qualité	Qualité
Extraction/traitement	2		1	1		1	
Métallurgie primaire		4	1	3	3	3	
Transformation métallique		2	1	3	3	2	12
Fabrication/Assemblage		9		2	2	12	
Utilisation		9	1		12	12	8
Fin de vie		1	1	2	12	2	

Le Tableau 3-12 Tableau 3-11 illustre les pointages obtenus pour les étapes de cycle de vie du lithium. Les pointages sont en général plus hauts que dans les cas du cuivre et du fer. En effet, le calcul est basé pour la plupart des flux en données de la littérature et hypothèses, ce qui diminue la qualité des données. Les flux avec le pointage le plus haut sont les importations et exportations de produits à l'étape de la fabrication. Dans ce cas, malgré une qualité de données assez élevée, la forte contribution des flux d'exportations de batteries et d'importation de lithium pour leur fabrication font en sorte que les pointages pour ces deux flux soient les plus hauts du système. En outre, le pointage élevé des flux de sortie vers l'environnement via les pertes et via l'élimination est à noter. Ces flux sont aussi basés sur des données de la littérature ou des estimations, ce qui diminue la qualité des données.

Tableau 3-12 : Pointage de la combinaison de la qualité de données et contribution au flux total pour chaque flux à chaque étape du cycle de vie pour l'AFM du lithium

Étape	Entrées au système (env)	Entrées au système (imp)	Sorties du système (env)	Sorties du système (exp)	Entrées d'une autre étape	Sorties vers une autre étape	ΔStock
	Qualité	Qualité	Qualité	Qualité	Qualité	Qualité	Qualité
Extraction/traitement	2			2			
Fabrication/Assemblage		12	8	12		8	
Utilisation		8	8		9	9	9
Fin de vie			8	6	6		

En vue des résultats de l'analyse de la contribution et de la qualité de données, les principales données à améliorer pour augmenter la robustesse des résultats sont liées aux processus/paramètres suivants :

- Dans le cas du fer :
  - o les entrées de métal et de produits contenant le métal via l'importation depuis d'autres provinces canadiennes;
  - o certaines exportations depuis l'étape de transformation métallique;
  - o les pertes vers l'environnement et vers l'élimination;
  - o les données sur la gestion en fin de vie des rejets qui restent au Québec.
- Dans le cas du cuivre :
  - o les entrées de métal et de produits contenant le métal via l'importation depuis d'autres provinces canadiennes;
  - o les importations et la variation de stock de l'étape de transformation métallique;
  - o certaines exportations depuis l'étape de transformation métallique;
  - o les pertes vers l'environnement et vers l'élimination;
  - o les données sur la gestion en fin de vie des rejets qui restent au Québec.
- Dans le cas du lithium :
  - o la répartition des utilisations du lithium spécifique au Québec;
  - o les entrées de métal et de produits contenant le métal via l'importation depuis d'autres provinces canadiennes;
  - o la répartition des produits entre ceux qui restent au Québec et ceux qui sont exportés.

### 3.5 Applications et limites

Le but de cette étude était de calculer les flux et stocks de fer, de cuivre et de lithium du Québec afin d'identifier les activités ou les stratégies de circularité qui pourraient être appliquées, mais aussi comme critère pour l'évaluation des stratégies potentielles en fonction de la magnitude des flux touchés par ces stratégies.

Les principales limites pouvant cependant être soulevées concernent principalement la collecte de données, notamment :

- La collecte de données auprès des entreprises d'extraction et de transformation ainsi qu'auprès des principaux producteurs de produits semi-finis n'a pas été aussi complète que souhaité, ce qui n'a pas permis d'avoir des informations plus robustes pour certaines des étapes les plus contributrices.
- Les données statistiques d'importation et d'exportation de produits contenant les trois métaux ne sont pas assez désagrégées, ce qui oblige à poser des hypothèses sur le prix unitaire ou la concentration de métal dans les produits. Certaines de ces catégories étaient trop génériques pour avoir des résultats assez fiables.
- La diversité de sources de données basées sur des méthodes de collecte et de traitement différentes peut diminuer la robustesse des résultats.

### 3.6 Recommandations

À la lumière des résultats obtenus, certaines recommandations peuvent être faites :

- Pour le fer :
  - o Les stratégies de circularité devraient viser les premières étapes du cycle de vie (traitement et métallurgie primaire). En effet, les flux les plus importants ont lieu à ces étapes et le potentiel de récupération du métal éliminé est le plus grand.
  - o Étant donné le grand stock disponible, les stratégies doivent aussi se diriger vers les produits et secteurs les plus mobiles de l'étape d'utilisation, notamment, les biens de consommation courants et les véhicules.
  - o Afin d'augmenter la circularité et minimiser les transports, la capacité de recyclage du fer devrait être augmentée et les exportations de fer en fin de vie devraient être diminuées.
  - o En fin de vie, étant donné l'accumulation au fil des années, il pourrait y avoir un potentiel intéressant de récupération de métal dans les sites d'enfouissement.
- Pour le cuivre, les flux et les étapes les plus contributeurs sont très similaires à ceux du fer. De ce fait, les mêmes recommandations s'appliquent, notamment viser la récupération des produits courants de consommation et augmenter la capacité de recycler au Québec.
- Pour le lithium :
  - o Les stratégies devraient viser la diminution de l'utilisation de ce métal dans des applications dissipatives.
  - o La mise en place d'une industrie de recyclage du lithium au Québec, principalement pour les batteries, peut améliorer la circularité de ce métal au Québec.
  - o Le stockage en fin de vie dans des produits contenant du lithium autres que les batteries devrait aussi être considéré pour l'avenir si des technologies capables de le récupérer se développent.

- La mise en place d'une industrie qui assure toute la transformation du lithium pourrait diminuer les pertes liées aux importations et exportations.

## 4 CONCLUSIONS

Cette analyse visait à améliorer la compréhension des cycles de vie du fer, du cuivre et du lithium au Québec.

Les résultats de cette étude avaient pour objectifs de contribuer à mieux comprendre la circulation des flux de matières sur le territoire et donc d'optimiser la gestion des ressources. Concrètement, l'étude a permis d'établir le profil d'utilisation et de transit des trois métaux. En général, on retient que le fer et le cuivre présentent des cycles similaires, avec une exportation nette de produits peu transformés ou semi-finis (dans le cas du fil de cuivre) depuis le Québec et une importation de produits très transformés. Les flux du fer à l'échelle du périmètre d'étude québécois sont de l'ordre de millions de tonnes par an; ceux du cuivre plutôt de l'ordre de milliers de tonnes par an. Par ailleurs, le stock en utilisation représente un grand gisement pour les deux métaux : 100 kt en croissance annuelle de 7 % pour le fer et 2 kt en croissance annuelle de 2 % pour le cuivre. Toutefois, ces stocks ne sont disponibles qu'à des horizons de temps très variables en fonction de la durée de vie des différents biens les contenant. Seule une partie de ces stocks est disponible pour établir des stratégies de circularité à court terme. Une étude ultérieure sur la dynamique des flux et des stocks devrait être menée pour mieux comprendre quand les stocks seront disponibles, en quelle quantité et à quelle qualité, pour supporter la planification des stratégies de circularité à long terme.

Le lithium présente un cycle très différent de celui des deux autres métaux étudiés. En effet, en 2014, il y avait une activité extractive limitée au Québec (plusieurs développements miniers sont sur le point d'ouvrir ou en développement), et aucune métallurgie primaire ou transformation métallique. Tout le lithium utilisé provenait donc des importations. Les flux à l'échelle du Québec sont de l'ordre de dizaines de tonnes par an. Dans le cas du lithium, comme pour le fer et le cuivre, on observe un gisement important dans l'étape d'utilisation (env. 400 t), mais en forte croissance (26 % par an). Présentement, seules les piles et batteries sont facilement récupérables (avec des durées de vie de moins de 8 ans). Le lithium présente aussi des utilisations de type dissipatif, ce qui augmente les émissions à l'environnement et diminue le potentiel de circularité.

Les analyses de l'incertitude et de la qualité des données montrent que les données et hypothèses utilisées pour le calcul de certains flux devraient être améliorées, notamment celles qui concernent les échanges entre provinces pour les trois métaux et les sorties du système dans le cas du lithium (exportations, pertes et élimination). Néanmoins, les flux les plus contributeurs utilisent en général des données provenant de sources primaires ou spécifiques au Québec, surtout pour les AFM du fer et du cuivre. Dans le cas du lithium, les résultats sont plus incertains en raison du manque de données spécifiques.

Les stratégies de circularité doivent, en général, se concentrer sur les étapes d'extraction, de concentration et de métallurgie primaire pour le fer et le cuivre et sur le stock disponible en utilisation facilement mobilisable pour les trois métaux. Le développement de l'industrie du recyclage devrait en outre être considéré comme une stratégie pour augmenter la circularité des trois métaux dans le territoire québécois.

## 5 RÉFÉRENCES

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.

Brunner, P.H. et Rechberger, H. (2004). *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. Lewis Publishers, 318 pages.

Graedel TE.(2002) The contemporary European copper cycle : introduction. *Ecological Economics*, 2002, vol. 42, issue 1-2, pages 5-7

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/>

Morris, A. (2015). *L'analyse de flux de matières au Québec : Enjeux et méthodes*. Essai présenté en vue de l'obtention du double diplôme Maîtrise en environnement et Master en Ingénierie et Management de l'Environnement et du Développement Durable, Université de Sherbrooke (Québec) et Université de Technologie de Troyes (France), 78 pages.

Muller, D.B., Wang, T. et Duval, B. (2011). Patterns of Iron Use in Societal Evolution. *Environmental Science & Technology*. 45 (1), p. 182–188.

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

Repellin, P., Duret, B. et Barles, S. (2014). *Comptabilité des flux de matières dans les régions et les départements*. Guide méthodologique. Pour le Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, France, 114 pages.

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