

Titre: Analyse de flux de matière du cuivre au Québec pour le
Title: développement de stratégies de circularité

Auteur: Ulrich Landry Compaore
Author:

Date: 2017

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Compaore, U. L. (2017). Analyse de flux de matière du cuivre au Québec pour le
développement de stratégies de circularité [Master's thesis, École Polytechnique
de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/2829/>
Citation:

Document en libre accès dans PolyPublie Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2829/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Oumarou Savadogo, & Manuele Margni
Advisors:

Programme: Génie énergétique
Program:

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

ANALYSE DE FLUX DE MATIÈRE DU CUIVRE AU QUÉBEC POUR LE DÉVELOPPEMENT DE STRATÉGIES DE CIRCULARITÉ

ULRICH LANDRY COMPAORE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CHIMIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE ÉNERGÉTIQUE)

DÉCEMBRE 2017

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ANALYSE DE FLUX DE MATIÈRE DU CUIVRE AU QUÉBEC POUR LE DÉVELOPPEMENT DE STRATÉGIES DE CIRCULARITÉ

présenté par : COMPAORE Ulrich Landry

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Mme DESCHÈNES Louise, Ph. D., présidente

M. SAVADOGO Oumarou, D. d'état, membre et directeur de recherche

M. MARGNI Manuele, Doctorat, membre et codirecteur de recherche

M. MARLEAU Guy, Ph. D., membre

DÉDICACE

*À tous ceux qui sont devenus ce qu'ils sont à cause
de leurs pensées et de leurs désirs dominants.*

*Les pensées des hommes renferment plus de ré-
serves de cuivre, d'or ou tout autre métal précieux
que la terre n'en possèdera jamais.*

*« N'attendez pas ; le moment ne sera jamais pro-
pice. » Napoléon HILL*

*« La vérité ce n'est pas le certain, et l'incertain ce
n'est pas l'ignorance. » Ilya Prigogine*

REMERCIEMENTS

Parfois notre Lumière s'éteint, puis elle est rallumée par un autre être humain. Chacun de nous doit de sincères remerciements à ceux qui ont ravivé leur flamme. Albert SCHWEITZER

Je voudrais remercier mon directeur de recherche Oumarou Savadogo et mon codirecteur Manuele Margni de m'avoir offert la chance d'intégrer le CIRAI en travaillant sur ce projet. VOUS m'aviez soutenu de manière incommensurable pendant toute ma maîtrise.

Je voudrais aussi remercier Gabrielle Van Durme et Pablo Tirado qui m'ont encadré pendant cette maîtrise par leurs conseils et leurs attentions à mon égard.

Merci à la grande famille du CIRAI ! Votre disponibilité, votre bonne humeur, les échanges qui ont lieu et l'ambiance qui se crée autour de vous, les individus qui composent cette famille en font un lieu de travail privilégié.

Merci à l'institut EDDEC pour la coordination efficace du projet Economie circulaire des métaux.

Merci aux partenaires de la Chaire internationale du cycle de vie ainsi qu'aux ministères engagés dans le projet économie circulaire des métaux au Québec.

Un grand merci à ma famille qui depuis « KaMa » me supporte et m'encourage dans mes études.

RÉSUMÉ

Parce que le cuivre est très recherché pour ses propriétés, ce qui le rend éminemment adapté aux applications de nouvelles technologies, une compréhension claire des acteurs, une analyse descriptive des flux de matière et des stocks peut contribuer à projeter l'avenir du cuivre dans l'économie du Québec. Ce métal est de plus en plus sollicité nécessitant l'accroissement de la production par la construction de nouvelle mine (risque sur l'environnement) ; il est aussi inégalement réparti dans le monde avec des teneurs de plus en plus faible dans le minerai entraînant un risque sur l'approvisionnement. Ce travail consiste à réaliser l'analyse de flux de matières du cuivre au Québec sur l'année 2014 tout en évaluant la robustesse des résultats par une analyse d'incertitude. Cette analyse inclut les étapes d'extraction et de traitement (minerais et concentré de cuivre), de production de métal primaire (anodes de cuivre, cathodes de cuivre), de transformation métallique (fil machine, tube ou tuyau en cuivre affiné et alliage...), de fabrication et d'assemblage (moteur, groupe électrogène, véhicule ...), d'utilisation et de gestion des déchets au cours de l'année 2014. Les échanges de cuivre à l'intérieur du Québec, avec le monde, avec d'autres provinces canadiennes ainsi que les émissions et les rejets de cuivre dans l'environnement sont quantifiés sous forme de flux (kt/a) dans le présent document. La méthode ascendante a privilégié les données primaires disponibles, qui ont été collectées auprès des entreprises et organismes concernés alors que 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, Statistique Canada et l'Institut de la statistique du Québec. Les données manquantes ont été complétées par des données secondaires issues de bases de données publiques disponibles (Eurocom par exemple), d'une revue de littérature ou de jugements d'experts ou calculées par le logiciel STAN (conservation de la masse). Les résultats montrent d'une part que le Québec exporte une grande quantité de cuivre contenu dans les produits semi-finis au niveau des premières étapes du cycle (83% de fil de cuivre fabriqué par Nexans, 62% des cathodes produite par l'affinerie CCR et 55% du concentré de cuivre provenant des mines sont exportés) et d'autre part les importations de cuivre dans les produits finis à l'étape d'utilisation sont aussi importantes (78 kt/a de cuivre importé sur une demande total de 139 kt/a). On dira aussi que la province du Québec transforme en moyenne 7 fois plus de cuivre qu'il en extrait (soit 311 kt/a de cathodes de cuivre produites sur 42 kt/a de cuivre extrait). Le stock de cuivre à l'étape d'utilisation représente un grand gisement soit 2000 kt en croissance annuelle de 2%. Les incertitudes montrent que les données et hypothèses

utilisées pour le calcul des flux devraient être améliorées, notamment ceux qui concernent les importations de cuivre aux Québec (>20% de la valeur moyenne). Compte tenu du stock de cuivre disponible en utilisation, la mine urbaine serait une des stratégies intéressantes dans le but d'améliorer la circularité du cuivre du futur. Le développement de l'industrie du recyclage et de l'éco-conception devrait en outre être considéré dans toutes les étapes comme des stratégies pour augmenter la circularité du cuivre dans le territoire Québécois et augmenter la durée de vie des produits finis utilisant ce matériel.

ABSTRACT

Copper is highly sought after due to its properties which makes it significantly suitable for tenders of various technologies. A clear understanding of the actors, the materials flow and stocks can help to plan the future impact of copper in the Quebec economy. This metal is more and more solicited requiring the increase of the production by the construction of new mine (risk on the environment); it is also unevenly distributed throughout the world with lower and lower grades in the ore leading to a risk on the supply. This work analyzes the flow of materials and stocks of copper in Quebec in 2014 and evaluates the robustness of the results by an uncertainty analysis. This analysis consists of the extraction and processing steps (copper ores and concentrates), production of primary metal (copper anodes, copper cathodes), processed metal products (wire rod, tube or pipe made of copper and alloys), manufacture and assembly (engine, generator, vehicle), along with the use and management of waste during the year 2014. Copper trade within Quebec, the world, and other Canadian provinces as well as emissions and releases of copper into the environment are quantified as flows (kt/y) in this document. The bottom up approach uses the available primary data collected from the companies and organizations concerned. Whereas top down method primarily uses data sources gathering aggregated statistics by sector or product type, such as those collected by Natural Resources Canada, Statistics Canada and the Institut de la statistique du Québec. The missing data were supplemented by secondary data from publicly available databases (e.g. Eurocom), literature assessment, expert judgment, or calculated by the STAN (mass conservation) software. The results show that Quebec exports a large quantity of copper in semi-finished products at the first stages of the cycle (83% of copper wire produced by Nexan, 62% of the cathodes produced by the refinery CCR and 55% of copper concentrate from mines are exported). On the other hand imports of copper into finished products at the stage of use are also important (78 kt/y of copper imported on a total demand of 139 kt/y). Moreover, the Province of Quebec transforms on average 7 times more copper than it extracts (311 kt/y of copper cathodes produced on 42 kt/y of copper extracted). The stock of copper at the stage of use represents a large deposit, i.e. 2000 kt in annual growth of 2%. The uncertainties show that the data and assumptions used to calculate flows should be improved, mainly those related to imports of copper to Québec (>20% the average value). Given the stock of copper available that is in use, the urban mine would be one of the most intriguing approaches to improve the copper's circularity in the future. The development of the recycling and eco-design

industry should also be considered at all stages as methods for increasing the circularity of copper on the Québec territory and to increase the shelf life of the finished products using this material.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XV
LISTE DES ANNEXES	XVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	2
2.1 Le cuivre.....	2
2.1.1 Généralité	2
2.1.2 Les procédés d'affinage du cuivre	3
2.1.3 Les filières du cuivre	5
2.2 Analyse de flux de matière.....	7
2.2.1 Historique	7
2.2.2 Définition	9
2.2.3 Objectifs d'une AFM	10
2.2.4 Les différentes approches d'une AFM	10
2.2.5 Les limites d'une analyse de flux de matières.....	12
2.2.6 Utilisation de l'AFM dans le secteur des métaux	12

2.3	Incertitude en AFM	14
2.3.1	Définition	14
2.3.2	La gestion de l'incertitude dans l'AFM	15
2.4	Économie circulaire et stratégies de circularité.....	21
2.4.1	La réforme du système économique.....	21
2.4.2	Définition	23
CHAPITRE 3 PROBLÉMATIQUES DE RECHERCHE ET OBJECTIFS		27
3.1	Problématique de recherche	27
3.2	Définition des objectifs du projet	28
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE.....		29
4.1	Modélisation du cycle du cuivre au Québec avec l'outil STAN.....	29
4.1.1	Système, frontières du système	29
4.1.2	Acquisition ou collecte de données	31
4.1.3	Conception du model AFM.....	37
4.1.4	Hypothèses sur les données d'importation.....	45
4.2	Détermination du niveau d'incertitude des différents flux entrées/sorties du système ..	47
4.2.1	Classification et Calcul d'incertitude	47
4.2.2	Réconciliation des données	51
CHAPITRE 5 RÉSULTATS		57
5.1	Présentation globale des résultats.....	57
5.2	Étape d'extraction et de traitement du minerai de cuivre.....	60
5.3	Étape de production de métal primaire	62
5.4	Étape de transformation métallique et de fabrication/assemblage	66
5.5	Étape d'utilisation	72

5.6	Étape de gestion des déchets	75
CHAPITRE 6	DISCUSSION	79
CHAPITRE 7	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	82
RÉFÉRENCES	84	
ANNEXES	88	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: les caractéristiques physiques du cuivre selon les nuances	4
Tableau 2.2 : Liste des principales entreprises dans le secteur du cuivre au Québec	6
Tableau 2.3: Les différentes approches pour gérer les incertitudes	17
Tableau 4.1: Comparaison des prix moyens disponibles de la France, du Danemark et du Québec	35
Tableau 4.2: Taux de change mensuelle de l'annee 2014	36
Tableau 4.3: Correspondance de certaines marchandises du code NACE et du code SH.	37
Tableau 4.4: Flux entrants et flux sortants du processus d'extraction/ concentration	39
Tableau 4.5 : Flux entrants et flux sortants du processus de production de métal primaire	40
Tableau 4.6 : Flux entrants et flux sortants des processus de transformation métallique de fabrication et d'assemblage	40
Tableau 4.7 : Flux entrants et flux sortants du processus d'utilisation	42
Tableau 4.8 : Flux entrants et flux sortants du processus de gestion des déchets	45
Tableau 4.9: Echelle de classification du niveau de confiance des données selon Graedel et al...48	
Tableau 4.10: Echelle de classification du niveau de confiance et de la contribution des flux adaptée à notre étude après réconciliation des données	49
Tableau 5.1 : Récapitulatif des valeurs des flux à l'étape 1 du cycle de vie du cuivre au Québec	61
Tableau 5.2 : Récapitulatif des valeurs des flux à l'étape 2 du cycle de vie du cuivre au Québec	64
Tableau 5.3 : Récapitulatif des valeurs des flux à l'étape 3 du cycle de vie du cuivre au Québec	71
Tableau 5.4 : Récapitulatif des valeurs des flux à l'étape 4 du cycle de vie du cuivre au Québec	75
Tableau 5.5: Récapitulatif des valeurs des flux à l'étape 5 du cycle de vie du cuivre au Québec.	77

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1: Répartition des usages du cuivre au niveau mondial (source : International Wrought Copper Council (IWCC) and International Copper Association (ICA)).....	7
Figure 2.2: Éléments pour lesquels des cycles à l'échelle mondiale ont été élaborés (Source : Chen et al [20]).	13
Figure 2.3: Éléments pour lesquels des cycles à des échelles régionales ont été élaborés (Source : Chen et al [20]).....	14
Figure 2.4: Démarche proposée pour la prise en compte de l'incertitude selon Laner [21]	16
Figure 2.5: Courbe de représentation graphique de la loi Normale	20
Figure 2.6: Extraction de ressources mondiales (Source : OECD ; WMM Global Insight; Ellen McArthur Foundation circular economy team).....	22
Figure 2.7: Indice MGI du cours des matières premières (Source : McKinsey Global Institute)..	23
Figure 2.8: Les pratiques de l'économie circulaire (source : Institut EDDEC 2015)	25
Figure 4.1: Frontières du système et étapes du cycle de vie considérées dans la réalisation de l'Analyse de flux de matière (AFM) du cuivre au Québec.	31
Figure 4.2: Procédure de collecte et de regroupement des données d'inventaire à disposition.	33
Figure 4.3: Flux entrant et sortant du processus de transformation métallique	40
Figure 4.4: Flux entrée/sortie du processus de fabrication et assemblage	41
Figure 4.5: Regroupement de processus	41
Figure 4.6: Processus avec deux flux entrants et un flux sortant.....	50
Figure 4.7: Exemple simplifié d'un modèle AFM	52
Figure 4.8: Système AFM avant réconciliation avec des flux bruts en entrée et en sortie. Les valeurs moyennes des flux entrants et sortants sont différentes et seul le flux sortant possède une incertitude	53
Figure 4.9: Système AFM après réconciliation des flux bruts en entrée et en sortie.....	53

Figure 4.10: Système AFM avant réconciliation avec des flux bruts en entrée et en sortie. Les Valeurs moyennes des flux entrants et sortant sont différentes et les écarts types sont les mêmes.....	54
Figure 4.11: Système AFM après réconciliation des données du scenario 2.....	54
Figure 4.12: Système AFM avant réconciliation avec des flux bruts en entrée et en sortie. Les valeurs moyennes et les écarts types des flux entrants et sortants sont différents.	55
Figure 4.13: Système AFM après réconciliation des données du scenario 3.....	55
Figure 5.1: Flux et stocks de cuivre au Québec en 2014.....	59
Figure 5.2: Sous système de l'étape de Production de métal primaire	62
Figure 5.3: Sous système du processus de transformation métallique, fabrication et assemblage	66
Figure 5.4: Proportion du cuivre présent dans les produits semi-finis en alliage de cuivre.....	68
Figure 5.5 : Schéma simplifié de l'étape de transformation, de fabrication/assemblage représentant le regroupement des flux d'importation et d'exportation.....	70
Figure 5.6: Répartition du stock de cuivre par secteur dans l'étape d'utilisation au Québec en 2014 (adapté d'ICSG, (2015)). Le stock total en utilisation est estimé à 2 263 kt	73
Figure 5.7: Schéma simplifié de l'étape d'utilisation représentant le regroupement de tous les flux d'importation.....	74
Figure 5.8: Répartition du flux annuel de cuivre géré à l'étape de gestion des déchets (79 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).	76

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AFM	Analyse de flux de matière
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
ISQ	Institut de la statistique du Québec
STATCAN	Statistique Canada
Cu	Cuivre
STAN	Substance flow a nalysis
ETP	Electrolytic Tough-Pitch
FRHC	Fire Refined High Conductivity
F RTP	Fire Refined Tough-Pitch
DHP	Phosphorus Deoxidised High Residual Phosphorus
DLP	Phosphorus Deoxidised Low Residual Phosphorus
OFHC	Oxygen Free High Conductivity
OF	Oxygen Free
OFE	Oxygen Free Electronic Grade
S.m ⁻¹	Siemens par mètre
Pb, Te, Ag Au, Pt, CuSO ₄	Plomb, tellure, Argent, Or, platine, sulfate de cuivre
Zn, Fe, Ni, Co, As, Bi, Sn	Zinc, Fer, Nickel, Cobalt, Arsenic, Bismuth, Etain
kt/a:	kilotonne par an
k\$/a:	kilo dollars par an
hbt :	Habitant
nda :	Non-disclosure agreement
SH :	Système harmonisé

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : CLASSIFICATION DES DIFFÉRENTES MARCHANDISES SELON LE CODE SH ET LA TENEUR EN CUIVRE.....	88
ANNEXE B : LES ÉTAPES DE L'AFFINAGE DU CUIVRE AU QUÉBEC.....	137
ANNEXE C: STRATÉGIE DE CIRCULARITÉS COMMUNES AUX MÉTAUX ET AUX PRODUITS CONTENANTS LES MÉTAUX SELON EDDEC	138
ANNEXE D : SCHEMA SYNTHÉTIQUE DES PROCÉDÉS CLASSIQUES DE TRAITEMENT MINÉRAL.....	142

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet de grande envergure visant à bâtir une économie circulaire des métaux au Québec. Il est conduit par une équipe de professeurs éminents de l'École Polytechnique de Montréal, de l'Université de Montréal et de HEC Montréal. La coordination est principalement assurée par l'institut de l'environnement du développement durable et de l'économie circulaire (EDDEC) mandatée par le MERN (Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles). Une première étape de sélection parmi les différents métaux extrait, transformés ou recyclés au Québec a conduit au choix du cuivre, du fer et du lithium selon neuf critères bien définis (disponibilité des données, nombres de mines qui produisent des métaux au Québec, la production primaire et la transformation des métaux aux Québec, potentialité du recyclage...). C'est le cuivre qui a été retenu dans le cadre de ce projet de maîtrise. Il s'agit d'identifier les principales activités (et acteurs) de la chaîne de valeur que le cuivre apporte au Québec durant son cycle de vie ; de quantifier les rendements de matière ainsi que les types et les quantités de déchets générés à chaque activité de son cycle de vie au Québec, notamment les déchets métalliques issus des différents processus de transformation et d'identifier les gisements de métaux potentiels et les échanges de métal entre chaque activité sur le marché Québécois. En résumé, il s'agit de réaliser l'analyse de flux de matière (AFM) du cuivre au Québec. Le chapitre 2 porte sur une revue de littérature présentant les propriétés physico-chimiques du cuivre, ses procédés d'affinage et ses filières dans le monde et au Québec. Ensuite, nous nous focaliserons sur l'AFM tout en mettant particulièrement l'accent sur les différentes approches existantes et leur utilisation dans le secteur des métaux. Une attention particulière sera également portée sur la réconciliation des données et la gestion de l'incertitude. Enfin une revue sur les stratégies d'économie circulaire viendra éclairer notre lanterne en relief dans le présent projet dans le but de maximiser la circularité des flux de cuivre. La problématique et les objectifs de la recherche sont définis au chapitre 3. Le chapitre 4 présente la méthodologie utilisée pour répondre aux objectifs de ce mémoire. Les résultats obtenus pour les différents objectifs sont présentés au chapitre 4 et discutés au chapitre 5, suivie d'une conclusion et des recommandations pour d'éventuelles recherches futures.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Le cuivre

2.1.1 Généralité

Le cuivre dont le numéro atomique est 29, appartient à la même famille que l'argent et l'or, et partage certaines de leurs propriétés, notamment la haute conductivité électrique et thermique, la ductilité (permet de faire des fils) et une grande malléabilité (permet de faire des feuilles de métal). Le cuivre est le deuxième métal le plus conducteur électriquement ($59,6 \cdot 10^6$ S/m) et thermiquement (401 W/ (m.K)) après l'argent. Le cuivre est également résistant à la corrosion en absence d'oxygène, et il s'oxyde lentement dans l'air. Il a une température de fusion¹ relativement élevée (1084 °C), avec une chaleur spécifique de 0,39 kJ/ kg/°C, et sa chaleur de fusion est de 343 kJ/kg, d'où un besoin de chaleur théorique faible pour la fusion du cuivre pur par rapport au fer. Il a un point d'ébullition très élevé (2595 °C) et a une très faible tendance à la fumée, par rapport à d'autres métaux non ferreux tels que l'arsenic, cadmium, plomb et zinc.

Les minérais de cuivre se divisent en minérais sulfurés et en minérais oxydés, les premiers représentant la principale ressource. On trouve généralement les minérais oxydés dans le même gisement que ceux qui sont sulfurés car ces derniers constituent la partie altérée superficielle du gisement. Les minéraux sulfurés de cuivre sont souvent accompagnés par d'autres sulfures tels que les sulfures de molybdène (MoS₂), de plomb (PbS), de zinc (ZnS), de fer (Fe₂S), les sulfoarséniques et les sulfoantimoniures. Étant donné la grande variété des composés minéraux, seule la flottation sélective peut permettre d'isoler les espèces sulfurées sous forme de concentrés (environ 30 % de Cu). Les minérais oxydés ne sont pas flottés, mais sont soumis à une lixiviation qui donne des solutions acides de cuivre. Lorsqu'ils sont associés à des sulfures, on peut d'abord les lixivier (technique d'extraction de produits solubles par un solvant) et opérer, ensuite, une flottation sélective sur les espèces sulfurées. Il existe, en outre, des minérais mixtes sulfurés et complexes de Cu, Pb, Zn ou de Cu-Ni, où le cuivre n'est plus qu'un métal secondaire en regard des autres métaux.

¹ Propriétés du cuivre <http://copperalliance.fr/le-cuivre/les-proprietes-du-cuivre>

Les opérations de métallurgie extractive consistent à obtenir, à partir des concentrés sulfurés, des blisters de cuivre (environ 98% de Cu), qui sont ensuite coulés en anodes et raffinés électrolytiquement. Les métaux qui accompagnent le cuivre dans les concentrés (Ni, As, Sb, métaux précieux, etc.) nécessitent des opérations pyrométallurgiques complexes pour diminuer leurs teneurs dans le blister. Lors de l'électroaffinage, leur élimination se poursuit dans les boues anodiques. Enfin, aux ressources naturelles, il faut ajouter une part importante de cuivre recyclé à partir des déchets.

Le cuivre est utilisé en agriculture comme fongicide ; toutefois, il présente des inconvénients majeurs. Le cuivre peut sérieusement influencer ce qui se passe sur les terres agricoles, suivant l'acidité du sol et la présence de matière organique. Le cuivre peut interrompre l'activité du sol, car il influence de façon négative l'activité des micro-organismes et des vers de terre. La décomposition de la matière organique est sérieusement ralentie de ce fait. Quand le sol des terres agricoles est pollué par du cuivre, les animaux en absorbent des concentrations importantes leur causant des problèmes de santé.

2.1.2 Les procédés d'affinage du cuivre

L'extraction du cuivre s'effectue à partir de minerais oxydés (traités par hydrométallurgie) ou sulfurés (traités par pyrométallurgie). Les procédés d'affinage ont pour but de produire du cuivre de haute pureté dont la teneur minimale en cuivre est de 99,99%. Deux types de traitement sont pratiqués : l'affinage thermique et l'affinage électrolytique qui est le plus répandu dans le monde et appliqué au Québec. La norme NFA 51-050 identifie 3 catégories de cuivre pour mettre en exergue quelques nuances du cuivre suivant la présence ou l'absence d'oxygène (tableau 2.1). Il s'agit :

- Les cuivres contenant de l'oxygène

L'oxygène est présent au cours des opérations de fusion et de coulée à des teneurs de quelques centaines de parties par million (100ppm ou 0,01%). Dans cette catégorie nous pouvons citer le Cu-a1 qui correspond à la désignation ISO : Cu-ETP, le Cu-a2 de la désignation ISO : Cu-FRHC possédant les mêmes critères de compositions et de conductivités électriques que le Cu-a1 mais contient plus d'impureté (Te, Se, Pb). Enfin le cuivre Cu-a3 avec la désignation ISO : Cu-FRTP est principalement réservé à l'élaboration d'alliage de fonderie.

- Les cuivres désoxydés avec désoxydant résiduel

Il s'agit du cuivre affiné électrolytiquement ou thermiquement. La désoxydation du cuivre est obtenue en fonderie par addition de phosphore. Deux catégories sont observables. Il s'agit du Cu-b1 principalement utilisé dans la fabrication les tubes sanitaires et de laminés pour toitures ; et du Cu-b2 utilisé souvent pour la fabrication de supports de composants électroniques.

- Les cuivres exempts d'oxygènes et désoxydés sans désoxydant résiduel

C'est le cuivre affiné par voie électrolytique, refondu au four à induction et coulé sous atmosphère inerte ou désoxydé sans désoxydant résiduel. Il existe deux nuances de cuivre exempts d'oxygène qui se distinguent par leur niveau de pureté. Le premier est le cuivre Cu-c1 (ISO : Cu-OF) qui ne se distingue du cuivre Cu-a1 que par l'absence d'oxygène ; les autres impuretés se trouvent aux mêmes teneurs moyennes. Le second est le cuivre Cu-c2 se trouvant à un total d'impuretés inférieur à 100 ppm. Les cuivres Cu-c1 et Cu-c2 conviennent dans les applications scientifiques (en laboratoire).

Tableau 2.1: Les caractéristiques physiques du cuivre selon les nuances

Désignations	Cu-a1 Cu-a2	Cu-b1	Cu-b2	Cu-c1	Cu-c2
Température de fusion	1065 à 1083	1083	1083	1084	1084
Masse volumique à 20 °C	8,89 à 8,92	8,94	8,94	8,94	8,94
Conductivité électrique à 20 °C	389	328	362	389	392
Résistivité électrique à 20 °C	1,7	2,2	1,9	1,7	1,7
Teneur minimale en cuivre %	99.85-99.9	NS	NS	99.95	99.99

NS : non spécifié

L'affinage thermique

Dans cette opération, une fusion oxydante est réalisée dans un four à réverbère et la plupart des impuretés sont oxydées puis éliminées soit par scorification (Be, Fe, Ni, Co, Sn et Pb) soit par volatilisation (Zn, As et Sb). Une partie du cuivre s'oxyde en Cu₂O puis est réduit en introduisant des troncs d'arbres verts qui dégagent par pyrogénération du dihydrogène et du monoxyde de carbone. Le cuivre (lingot) obtenu par ce procédé contient des porosités entraînant une réduction de son champ d'application dans l'industrie. De plus, ce cuivre contient des impuretés, comme Se, Si, Te, Ni, Co, As et Pb qui réduisent considérablement les conductivités électriques et thermiques. L'utilisation de ce procédé tend à disparaître de nos jours. Les lingots sont refondus pour avoir une meilleure pureté. Le procédé thermique fournit les métaux Cu-b1, Cu-b2, Cu-a2 et Cu-a3

L'affinage électrolytique

C'est le procédé de base de production de cuivre raffiné. Il consiste à dissoudre électrochimiquement le Blister coulé sous forme anode, par le procédé d'anode soluble. Le cuivre affiné et quelques impuretés comme As, Bi et Sb se déposent sur les cathodes alors que les impuretés telles que Zn, Fe, Ni, Co, Sn et Pb restent dans le bain sans se déposer. Ag, Au et Pt insolubles dans l'électrolyte CuSO₄ s'accumulent dans les boues. Étant donné que les cathodes obtenues contiennent toujours des impuretés faisant défaut sur l'état de leur surface et de la présence de porosité, elles sont refondues pour avoir du cuivre pur à au moins 99,9% et de meilleures caractéristiques de plasticité. Ce procédé donne le métal désigné Cu-a1, Cu-c1, Cu-c2, Cu-b1 et Cu-b2.

2.1.3 Les filières du cuivre

Le cuivre, en plus d'avoir une excellente conductivité thermique et électrique, est résistant à la corrosion, antibactérien, malléable et facilement recyclable. Il est généralement utilisé sous sa forme pure, mais on le retrouve aussi sous forme d'alliages, les plus connus étant le bronze et le laiton. Les principaux producteurs de minerai de cuivre² sont le Chili (5,76 millions tonnes (Mt)), soit environ le tiers de la production mondiale), les États-Unis (1,38 Mt), le Pérou (1,70 Mt), la Chine (1,71 Mt), la République démocratique du Congo (1,02 Mt) et l'Australie (0,97 Mt). Dans le minerai, la teneur en cuivre varie de 0,5 % à 5 %, avec une moyenne de 0,8 % [1]. Au Québec, la production de cuivre a fortement diminué de la fin des années 1990 jusqu'en 2006. Les principales activités industrielles liées au cuivre au Québec concernent la production de métal primaire ainsi que la transformation métallique. Cela peut constituer un atout pour la mise en œuvre de certaines stratégies de circularité. Le Québec compte la seule fonderie de cuivre au Canada, soit la Fonderie Horne, située à Rouyn-Noranda, laquelle produit des anodes de cuivre à partir de concentré. Ces anodes sont expédiées à l'Affinerie CCR à Montréal-Est, qui produit à son tour des cathodes de cuivre par procédés hydrométallurgique et électrométallurgique. Ces deux entreprises appartiennent à Glencore. L'Affinerie CCR vend une partie de ses cathodes à Nexans Canada, un

² Pays producteurs de cuivre <https://fr.statista.com/statistiques/565205/production-de-cuivre-dans-les-principaux-pays/>

fabricant de fils et câbles de transmission électrique dont le siège social est à Paris. Nexans est la plus importante entreprise de transformation métallique de cuivre au Québec. Le tableau 2.2 présente la liste des principales entreprises œuvrant dans le secteur du cuivre au Québec ainsi que leur secteur d'activité.

Tableau 2.2 : Liste des principales entreprises dans le secteur du cuivre au Québec

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

L'utilisation des produits contenant du cuivre croît d'année en année. En 2013, on comptait 21,2 millions de tonnes métriques de cuivre raffiné utilisées annuellement dans le monde [2]. En France, en 2000, le stock de cuivre estimé pour l'étape d'utilisation s'élevait à 170 ± 20 % kg/personne, avec une moyenne d'environ 275 kg par personne et les additions au stock ont été fixées à 5 ± 30 % kg/ (personne, an) [3]. La figure 2.1 présente la répartition (en % de tonnage) du stock de cuivre

dans le monde en 2013 [2]. Les équipements et le bâtiment sont les principaux secteurs d'utilisation, représentant respectivement 31 % et 30 %.

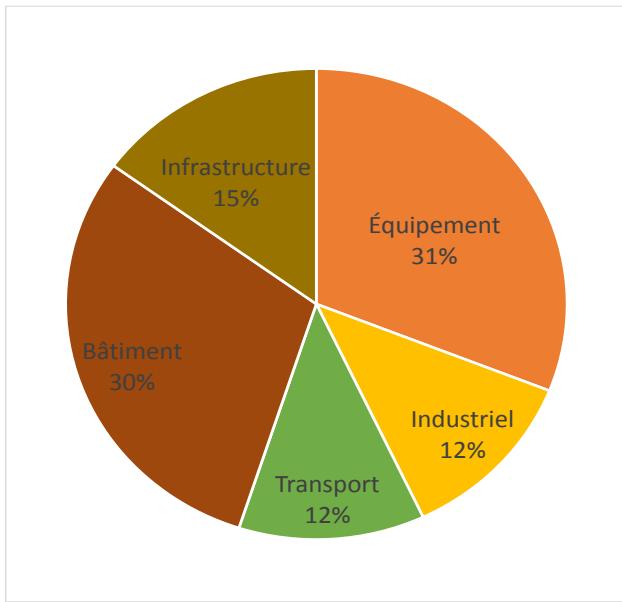


Figure 2.1: Répartition des usages du cuivre au niveau mondial (source : International Wrought Copper Council (IWCC) and International Copper Association (ICA))

2.2 Analyse de flux de matière

2.2.1 Historique

Bien avant que l'AFM devienne un outil de gestion des ressources, des déchets et de l'environnement, le principe du bilan de masse a été appliqué dans des domaines aussi divers que la médecine, la chimie, l'économie, l'ingénierie et les sciences de la vie. Le principe fondamental de toute AFM est basé sur la conservation de la matière et a d'abord été postulée par les philosophes grecs il y a plus de 2000 ans. L'un des premiers rapports sur une analyse des flux de matières a été écrits au 17 siècle par Santorio Santorio (1561-1636). Il a développé la première méthode entrées/sorties d'une personne. Santorio a mesuré le poids de la personne, de la nourriture et des boissons qu'il mangeait, et des excréptions qu'il dégageait et conclut qu'il est difficile d'équilibrer un processus ou un système si les informations de base concernant ce processus ou système (tels que les données d'entrée et de sortie importantes) sont manquantes. Le chimiste français Antoine Lavoisier (1743-1794) a fourni des preuves expérimentales que la masse totale de matière ne peut être modifiée par des procédés chimiques: «car rien ne se crée, ni dans les opérations de l'art, ni dans celles de la nature, et l'on

peut poser en principe que, dans toute opération, il y a une égale quantité de matière avant et après l'opération; que la qualité et la quantité des principes est la même, et qu'il n'y a que des changements, des modifications» (*Traité élémentaire de chimie*[4]). Au 20ieme siècle, de nombreux chercheurs dans divers domaines ont utilisé la loi de conservation de la matière pour équilibrer les processus. En 1930, Leontief introduit la méthode des entrées-sorties dans le domaine économique, et le met en application dans une étude sur la conservation des ressources et la gestion de l'environnement en 1970 [5]. En 1975, Duvigneaud et Denayeyer-De Smet [6] ont analysé la ville de Bruxelles en utilisant les écosystèmes naturels comme une analogie. Ils ont évalué le total des importations et des exportations de produits tels que le carburant, les matériaux de construction, la nourriture, l'eau, les déchets, les eaux usées, les émissions, dans et hors de la ville pour établir un bilan énergétique. Rauhut [7] a été parmi les premiers à publier des inventaires nationaux pour le Bureau des Mines des États-Unis. Ses études étaient suffisamment détaillées pour servir comme base pour les décisions politiques concernant les métaux lourds, comme la gestion et la réglementation du cadmium (Cd) ; une étape vers la protection de l'environnement. En 2001, Baccini et Brunner [8] ont étendu l'analyse des flux de matériaux en définissant une méthodologie systématique et exhaustive et en introduisant les concepts d'activité et de métabolisme de l'anthroposphère. Par exemple, pour évaluer l'efficacité avec laquelle un système de traitement des eaux usées fonctionnait, on calculait le ratio entre la quantité de sortants décontaminés et la quantité d'entrants contaminés ce qui donnait une indication de l'efficacité du traitement. Treize années plus tard, des méthodes d'analyse, d'évaluation et de contrôle des processus métaboliques dans les systèmes artificiels pour améliorer l'utilisation des ressources et la protection de l'environnement au niveau régional furent développées[9]. Les avantages de ces méthodes étaient d'identifier les flux les plus impactant pour l'environnement, ceux qui possèdent un potentiel de valorisation et les acteurs qui peuvent améliorer l'efficacité avec laquelle ces flux sont utilisés. En 2013, Moore et ses collègues[10] réalisent une étude sur l'inventaire de l'ensemble des flux de matières et d'énergie qui traverse Vancouver enfin d'évaluer les impacts environnementaux. Leur méthode consistait à délimiter le système, identifier les classes et sous-classes de matières et d'énergie qui traversent le territoire et compiler les données désagrégées (phase cruciale du projet) ; ce travail a permis de comprendre la manière dont les flux circulent à l'intérieur du territoire. Une autre étude dénommée «La Bourgogne comptabilise ses flux de matières[11]» a permis de mettre en lumière l'importance

des flux de matériaux de construction et des flux agricoles et alimentaires dans l'optique d'optimiser l'utilisation des ressources et de réduire les impacts sur l'environnement. Plus récemment, Audrey Morris[12] affirme que l'AFM représente un premier pas vers un Québec durable par une amélioration de la connaissance de la gestion des ressources. En effet, toutes ces études reconnaissent la nécessité d'acquérir des données fiables en intégrant les différents acteurs enfin que l'AFM soit un outil puissant de prise de décisions.

2.2.2 Définition

L'analyse de flux de matière (AFM) est une évaluation systématique des flux et stocks de matière dans un système défini dans le temps et dans l'espace [9]. L'AFM est basée sur un cycle théorique où la loi de la conservation de la masse doit être vérifiée; cette analyse peut aboutir à une analyse quantitative révélant l'état de la matière en entrée et en sortie à chaque étape du cycle [13]. En effet, cette méthode permet de dégager des perspectives ou des stratégies fortes et durables dans un territoire, une entreprise etc. Graedel [14] fait une description complète du cycle du cuivre. Spatari [15] étudie la situation du cuivre en Europe en retracant les différents flux et stocks qui interviennent dans le système. Kapur [16] réalise l'analyse de flux de substance du cuivre au Japon et montre que ce pays occupe le premier rang en Asie en matière d'utilisation, de génération de déchets et de recyclage du cuivre. Wang [13] montre que le cuivre aux Etats Unis est plus utilisé dans la construction de bâtiments. Il existe une panoplie d'études sur l'analyse du cycle global du cuivre dans différentes régions du monde. Cependant, le Québec ne présente pas d'étude dans ce sens et ne doit pas être en reste. Une liste relativement exhaustive de questions classiques auxquelles une AFM est appelée à répondre est donnée par Graedel [17]:

- Quelle quantité de matières entre dans le système ou sort du système ?
- Comment la matière est-elle transformée ?
- Combien de matière est ajoutée ou soustraite au stock ?
- Combien de matière est recyclée ?
- Combien de matière se retrouve en décharge ?
- 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 de la création de déchets. Il s'agit donc d'un outil de diagnostic particulièrement pertinent dans un contexte d'économie circulaire.

Cette utilité de l'AFM est de plus en plus reconnue, en témoigne la réalisation d'un nombre croissant d'AFM comme étape préliminaire à la mise en place de stratégies de circularité[12] [18].

2.2.3 Objectifs d'une AFM

Les objectifs de l'AFM selon Brunner et Rechberger [9] sont les suivantes:

1. Délimiter un système de flux de matières et de stocks par des méthodes bien définies et des termes uniformes,
2. Réduire autant que possible la complexité du système tout en garantissant une base pour une bonne prise de décision,
3. Évaluer les flux et les stocks pertinents en termes quantitatifs, en appliquant le principe de la conservation de la masse et révélant les incertitudes,
4. Présenter les résultats concernant les flux et les stocks d'un système de manière reproductible, compréhensible et transparent,
5. Utiliser les résultats comme base de gestion des ressources, de l'environnement et des déchets, notamment pour :
 - La reconnaissance précoce des accumulations potentiellement nocives ou bénéfiques et l'épuisement des stocks ;
 - L'établissement de priorités concernant les mesures de protection de l'environnement, conservation des ressources et la gestion des déchets (ce qui est important) ;
 - La conception de biens, de procédés et de systèmes qui favorisent la protection, la conservation des ressources et la gestion des déchets (conception écologique, conception pour le recyclage, conception pour l'élimination, etc.).

2.2.4 Les différentes approches d'une AFM

L'analyse de flux de matière repose sur la loi de Lavoisier : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Sur cette base, deux grandes familles [19] peuvent être distinguées. La première famille de méthodes [9] repose sur une typologie des activités caractérisant les sociétés humaines. Les flux de matières mis en jeu par chacune d'entre elles sont quantifiés, l'addition de tous les flux reflétant le métabolisme territorial. Brunner et Reichberger en dénombrent par exemple quatre :

nourrir, laver, résider et travailler, transporter et communiquer. Ces méthodes sont ascendantes (ou bottom-up), c'est-à-dire basées sur des données élémentaires qu'elles agrègent. Le guide référentiel est le livre de Baccini et Brunner de 1991[8], mis à jour par Brunner *et al.* 2004 [9]. Il s'agit en effet, 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 un grand nombre de données. La seconde famille comptabilise l'ensemble des flux entrants dans le système, ainsi que l'ensemble des flux sortants sans analyser au préalable les processus qui les unissent. Le système est en quelque sorte une boîte noire qui ne sera ouverte qu'une fois le bilan de matière réalisé. C'est le cas de la méthode mise au point par le service européen de statistique (Eurostat). Ces méthodes sont descendantes (ou top-down), c'est-à-dire basées sur des données globales (éventuellement susceptibles d'être désagrégées). Selon les méthodes, les limites du système peuvent varier. Elles sont géographiques (et souvent administratives, pour des raisons de disponibilités des données). Ainsi, il est possible d'étudier une région, un département, ou une commune (bien que dans ce dernier cas les données existent rarement). Pour chacune des approches deux types de modèle sont observables. Il s'agit :

- du modèle statique qui représente une «photo» du système pris à un moment précis (typiquement une année) dans le temps,
- du modèle dynamique qui suit l'évolution des flux et des stocks sur une période de temps plus longue (5 ans, 10 ans ...) [20].

Les AFM dynamiques offrent des informations supplémentaires par rapport aux AFM statiques (par exemple, les effets de la variation de stocks de la phase d'utilisation, Existe-t-il un niveau de saturation ?). Cependant, elle nécessite une collecte de données sur plusieurs années.

Pour faire mention d'une autre vision concernant la classification des méthodes AFM, Laner *et al* [21] font la distinction entre les AFM descriptives, qui quantifient la circulation des matières étudiées dans une région, et les AFM exploratoires, qui visent à identifier les paramètres critiques ou le comportement du système à l'étude par des études de sensibilité. Pour ce projet, l'AFM doit servir à dresser le portrait actuel des flux et stocks de métaux au Québec afin d'identifier là où il existe un potentiel intéressant pour développer et renforcer des initiatives d'économie circulaire. Une AFM descriptive ou statique peut répondre à ce besoin à court terme. Comprendre les objectifs de telles analyses est donc particulièrement important, car ils influencent le choix de l'approche méthodologique [12].

2.2.5 Les limites d'une analyse de flux de matières

Les analyses de flux de matières fournissent des informations très riches sur les territoires et permettent d'identifier des enjeux en termes sociaux, économiques et environnementaux. Cependant, elles ne constituent pas un outil miracle qui se substituerait à tous les autres en termes d'indicateurs territoriaux. En effet, elles ne comptabilisent pas l'énergie en tant que telle, et donc ne constituent pas un bilan énergétique. ACV comme AFM se basent sur les bilans de masse. Cependant, l'un des outils comptabilise les flux de matière dans une région (AFM) et l'autre calcule pour une unité fonctionnelle donnée, les émissions et extractions de matière liées à ces flux de matière (ACV). On dira que l'AFM ne tient pas compte des externalités environnementales lors de la gestion ou de la transformation de la matière, bien qu'il s'agisse d'un enjeu important pour certains territoires. Même si le métal (cuivre) contribue à l'économie d'une région, l'AFM ne permet pas de comptabiliser les flux monétaires (coût) enfin d'établir un état de la situation ou un bilan financier. Elle ne peut pas non plus assurer un bien-être social au sein d'une région. Ces limites peuvent être dépassées par la réalisation d'analyses complémentaires (ACV (environnemental, social ou économique), table entrée/sortie économique, modélisation technico-économique...).

2.2.6 Utilisation de l'AFM dans le secteur des métaux

L'AFM peut être utilisée pour suivre toutes les matières présentes au sein d'un territoire donné (on peut alors parler de « métabolisme territorial ») ou seulement une matière. Dans cette dernière famille d'AFM, les métaux ont fait l'objet de très nombreuses études, d'étendue et de qualité diverses. Une importante revue de la littérature a été publiée en 2012 par Chen et Graedel [20], portant sur la quantification des cycles anthropogéniques des éléments, soit les éléments pour lesquels l'activité humaine est la force dominante du cycle plutôt qu'une perturbation d'un système existant. Sur base du critère du cycle anthropogénique, l'étude a porté sur 75 éléments du tableau périodique. Certaines de leurs conclusions sont résumées ci-dessous :

- Le fer est le métal le plus largement étudié, avec plus de 200 cycles disponibles.
- Les autres métaux utilisés couramment, soit le nickel, le cuivre le plomb, le zinc, l'argent, l'aluminium et le chrome présentent chacun plus de 70 cycles.
- Ce sont l'aluminium, le cuivre et le fer qui ont fait l'objet du plus grand nombre de cycles dynamiques.

- Les études diffèrent significativement d'un point de vue méthodologique. Ces différences proviennent souvent des objectifs de l'étude et de la disponibilité des données.

Les figures ci-dessous présentent les éléments pour lesquels des cycles ont été réalisés et publiés, à l'échelle mondiale (figure 2.2) et à des échelles régionales (figure 2.3). Sur 92 éléments, 33 ne présentent pas de cycle. Le Québec ne semble pas avoir fait l'objet d'AFM, tandis que le Canada est représenté dans certaines études de portée mondiale, mais ne semble pas non plus avoir fait l'objet d'études spécifiques.

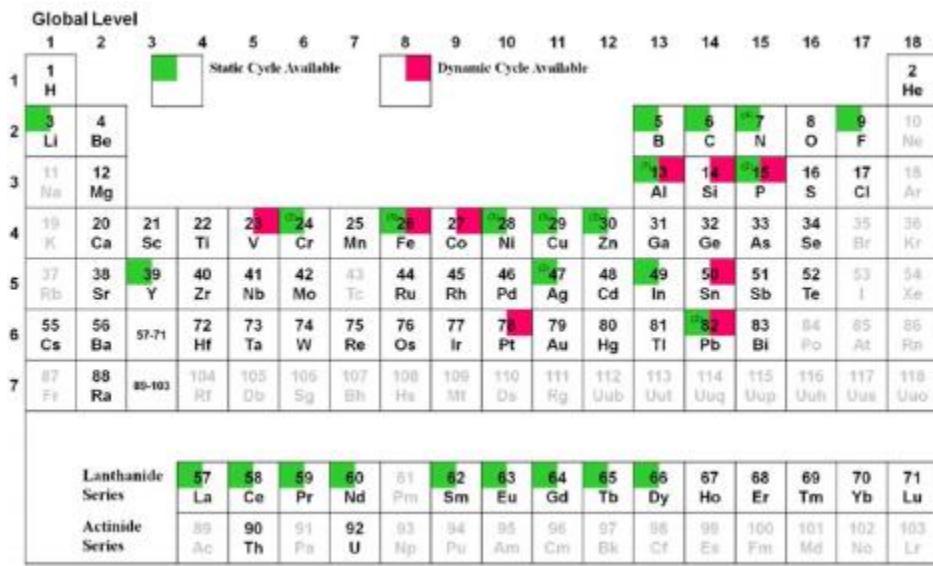


Figure 2.2: Éléments pour lesquels des cycles à l'échelle mondiale ont été élaborés (Source : Chen et al [20]).

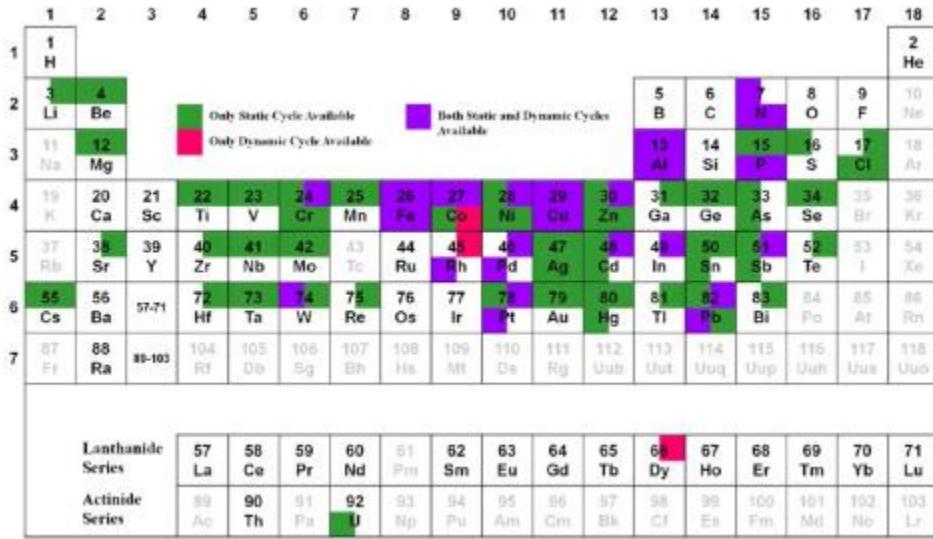


Figure 2.3: Éléments pour lesquels des cycles à des échelles régionales ont été élaborés (Source : Chen et al [20])

2.3 Incertitude en AFM

2.3.1 Définition

Une définition générale de l'incertitude selon le petit Larousse serait la suivante : « Caractère de ce qui ne peut être déterminé, connu à l'avance; ce qui ne peut être établi avec exactitude, qui laisse place au doute[22]». La définition de l'incertitude varie selon les auteurs. L'Organisation météorologique mondiale, (2011) définit l'incertitude comme étant l'expression du degré de méconnaissance d'une valeur. Selon Björklund [23], il s'agit « du manque de connaissance sur la valeur réelle d'une donnée » pour le cas particulier de l'incertitude sur les valeurs quantitatives. L'incertitude peut également provenir du manque de confiance, du doute que l'on a sur un état de la connaissance tout comme sur une quantité donnée. Ciroth et collègues [24] lient l'incertitude à la réalité en soulignant le fait qu'une valeur mesurée diffère de la « vraie valeur » d'une donnée et ce, de manière probabiliste. En effet, l'incertitude peut être due à un manque d'information ou à un désaccord sur ce qui est connu, voire connaissable. Elle peut avoir des origines diverses et résulter ainsi d'erreurs chiffrables dans les données, d'une définition trop imprécise des concepts ou de la terminologie employés ou encore de projections incertaines du comportement humain. L'incertitude peut donc être représentée par des mesures quantitatives (par exemple un ensemble de valeurs calculées par

divers modèles) ou par des énoncés qualitatifs (réflétant par exemple l'opinion d'un groupe d'experts). Comme cette étude est basée sur plusieurs données collectées, alors déterminer la source de ces incertitudes et déterminer la façon de les gérer est très important.

2.3.2 La gestion de l'incertitude dans l'AFM

La gestion de l'incertitude a été assez peu prise en compte dans les AFM. Les résultats des AFM sont incertains en raison des incertitudes sur les données utilisées et sur le modèle. Rechberger et al [25] recommandent de présenter les quantités de flux et de stocks résultant d'une AFM avec leur intervalle d'incertitude. Les points clés d'une bonne prise en compte de l'incertitude sont :

- l'adéquation avec les objectifs de l'étude : d'après Laner *et al* [21], les AFM descriptives peuvent se contenter d'approches plus simples, tandis que pour les AFM prospectives, les approches statistiques sont recommandées;
- l'application de procédures cohérentes et transparentes pour la caractérisation de l'incertitude associée aux données utilisées: cette incertitude n'est en effet que très rarement disponible, il revient donc aux praticiens de l'AFM de la caractériser [21, 25]
- l'adéquation entre la caractérisation de l'incertitude et la méthode de propagation des incertitudes au sein du modèle [21, 25];
- la redondance des données: obtenir une estimation pour un même flux par plusieurs approches ou sources d'information est une façon efficace d'améliorer la qualité des résultats et d'évaluer cette qualité. Des logiciels, tel STAN, permettent alors de faire de la «réconciliation» des données [3, 21];
- l'arrondissement des résultats: Rechberger *et al* [25] proposent d'arrondir les résultats à deux chiffres significatifs (sauf exception) afin que l'incertitude se reflète dans la présentation des résultats.

Laner *et al* [21] proposent une démarche en 5 étapes et les différentes approches à considérer pour prendre en compte l'incertitude (figure 2.4).

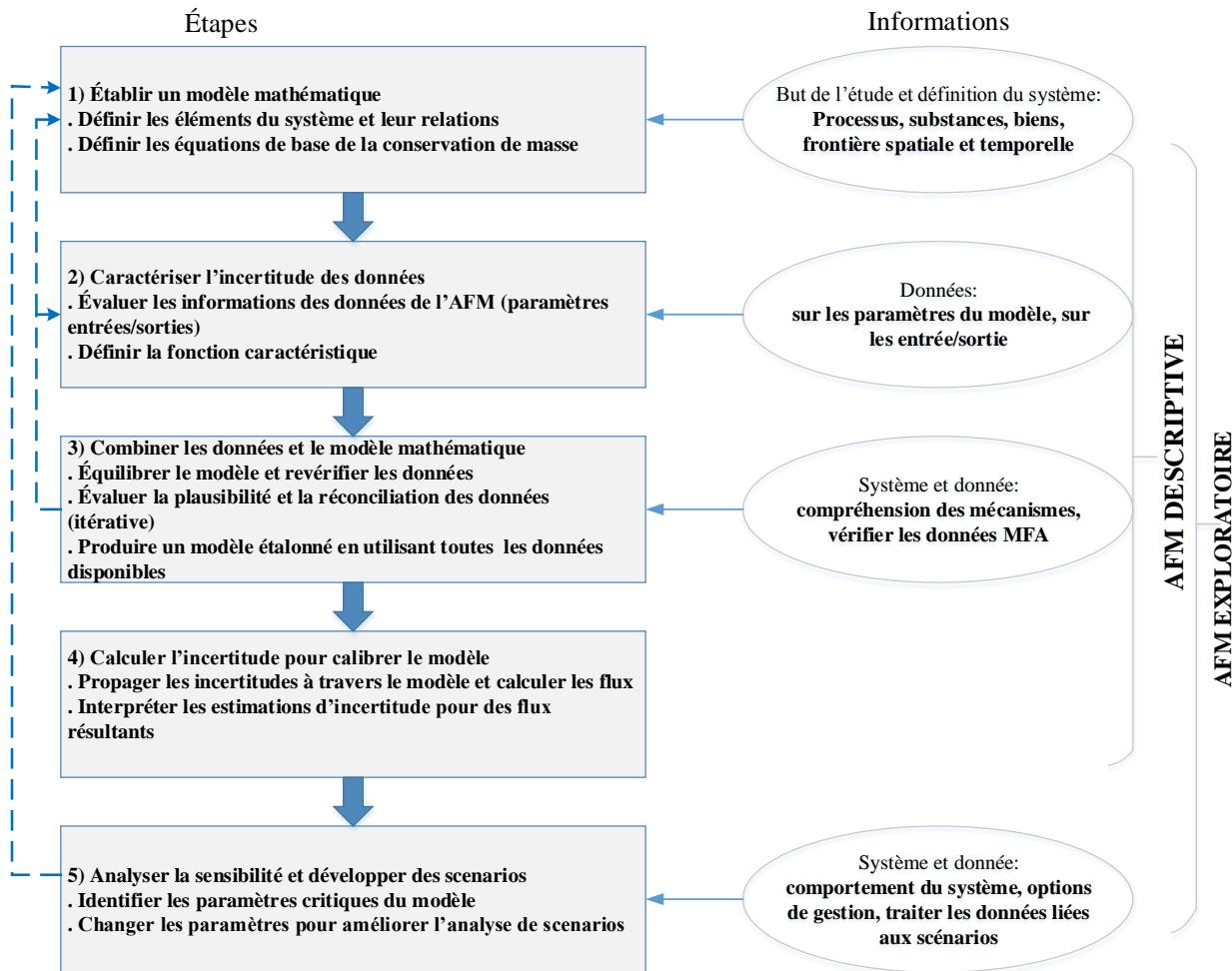


Figure 2.4: Démarche proposée pour la prise en compte de l'incertitude selon Laner [21]

Il existe trois familles d'approches pour la gestion de l'incertitude[21] :

1. L'approche qualitative et semi quantitative : cette approche utilise des catégories (niveau de confiance) pour décrire l'incertitude des résultats généralement basée sur des jugements personnels,
2. L'approche basée sur la classification des résultats : elle repose sur des concepts formels pour caractériser la qualité et l'incertitude des données, en combinant avec des méthodes mathématiques simples,
3. L'approche statistique : les données d'entrées sont décrites par des fonctions caractéristiques et des méthodes mathématiques rigoureuses sont appliquées pour évaluer la sensibilité et l'incertitude du modèle de sortie.

Les approches pour considérer l'incertitude en AFM selon Laner [21] sont présentées dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3: Les différentes approches pour gérer les incertitudes

Sous-approches	Caractérisation de l'incertitude des données	Evaluation du modèle	Application typique/Approche	Références
Evaluation basée sur la confiance	non	Classements (qualificatifs ou scores)	AFM descriptive/ Approche 1	Graedel et al [26]
Intervalles asymétriques	Source de données- et spécificité concept de base pour obtenir des intervalles asymétriques	Les résultats sont exprimés sous la forme d'intervalles asymétriques définis par multiplication et par division avec un facteur d'incertitude	AFM descriptive/ Approche 2	Hedbrant et Sorme [27]
Intervalles symétriques	Des intervalles sont définis pour contenir la vraie valeur avec un certain niveau de confiance	Les intervalles d'incertitude des résultats ont des niveaux de confiance supérieurs à ceux des intrants	AFM descriptive/ Approche 2	Lasen et Hansen [28]

Sous-approches	Caractérisation de l'incertitude des données	Evaluation du modèle	Application typique/Approche	Références
Matrice Pedigree	Incertitude de base et la qualité des données imparfaites sont évaluées pour calculer l'incertitude des données	Les intervalles de confiance ne peuvent pas être construits directement à partir des coefficients de variation	Pas d'applications explicites en AFM/Approche 2	Weidema et Wesnaes [29]
Logiciel STAN ³	Les données incertaines sont spécifiées comme la moyenne et l'écart-type d'une distribution normale	L'incertitude qui en résulte et éventuellement l'étendue de la réconciliation des données (pour équilibrer le système) sont utilisées pour évaluer la sortie du modèle	Principalement en AFM descriptive et exploratoire/ Approche 3	Cencic et Rechberger [30] ; Ott et Rechberger [31]
MMFA (Analyse mathématique des flux de matière)	Les paramètres de modèle incertains sont spécifiés en utilisant diverses fonctions de densité de probabilité	Analyse de sensibilité pour identifier les paramètres critiques du modèle et vérifier la plausibilité des résultats	Principalement en AFM descriptive et exploratoire/ Approche 3	Bader et al [32]; Zeltner et al [33] ; Schaffner et al [34]

³ Logiciel gratuit et téléchargeable sur (<http://www.stan2web.net/>)

Sous-approches	Caractérisation de l'incertitude des données	Evaluation du modèle	Application typique/Approche	Références
PMFA (Analyse probabiliste des flux de matière)	Les distributions de probabilité précédentes sont définies en utilisant les connaissances sur les paramètres du modèle	Analyse de sensibilité pour identifier les paramètres critiques du modèle et pour le développement de scénarios	AFM Exploratoire/Approche 3	Gottschalk et al [35]
Approche AS (analyse de sensibilité)	Définir des plages de variation pour des paramètres sélectionnés en utilisant diverses fonctions de densité de probabilité	Évaluation de l'effet de la variation des paramètres sur les résultats du modèle pour identifier les éléments critiques du modèle	AFM Exploratoire/Approche 3	Gloser et al [36] ; Tsai et Krogmann [37]
Fuzzy set theory (Théorie des ensembles flous)	Les paramètres du modèle sont des quantités définies par les fonctions d'adhésion	L'état actuel des connaissances est mieux reflété par les résultats du modèle dans le cas de la rareté de l'information	Suggestions conceptuelles pour l'AFM mais pas encore d'étude de cas/ Approche 3	Clavreul et al [38] ; Viertl [39]; Dubois et al [40]

Notre étude porte sur une AFM descriptive ; les trois dernières approches citées dans le tableau ne sont donc pas applicables dans notre cas. L'outil STAN sert à effectuer une AFM descriptive et exploratoire; et a été largement appliqué pour établir des équilibres de matières à l'échelle régionale (par exemple Bonnin et al [3], Ott et Rechberger [31], Reisinger et al [41]) et au niveau des usines (par exemple, Andersson et al [42], Chancerel et al [43]). Dans STAN, les données et paramètres

incertains (par exemple, les concentrations, les flux massiques et les coefficients de transfert) sont décrits par des variables aléatoires indépendantes normalement réparties. Les quantités incertaines sont exprimées par la moyenne arithmétique et une mesure de variance (typiquement l'écart type) selon Cencic et Rechberger [30]. La distribution que le logiciel STAN utilise est la loi de Gauss (ou loi normale). On dit qu'une variable x suit la loi normale lorsque sa densité de probabilité est une fonction définie par l'expression (2-1) et dont la représentation graphique est donnée par la figure 2.5.

$$n(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2-1)$$

Où σ est l'écart-type arithmétique de x et μ sa moyenne arithmétique.

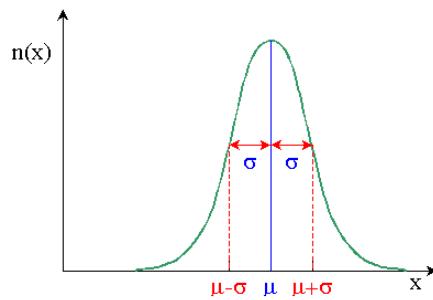


Figure 2.5: Courbe de représentation graphique de la loi Normale

Sur la base de cette loi, il est possible d'utiliser la propagation d'erreur gaussienne et (éventuellement) la réconciliation des données pour évaluer l'incertitude des données. Dans le cas où le système possède plus d'équations que d'inconnues, les données incertaines contradictoires sont réconciliées dans STAN en modifiant les valeurs moyennes. Les inverses des variances de quantités incertaines sont utilisés comme facteurs de pondération pour déterminer le minimum de la somme des carrés. Par conséquent, les valeurs très incertaines seront plus fortement modifiées que les valeurs à faible incertitude. Le logiciel STAN est accessible gratuitement, réalise des simulations statique et dynamique, calcul les incertitudes; il est donc en adéquation avec les objectifs visés dans ce travail. Il peut être utilisé pour élaborer l'analyse de flux de matière du cuivre en tenant compte évidemment des incertitudes. Il faut noter que sans le logiciel STAN il est aussi possible d'utiliser

Microsoft Excel ou d'autres logiciels comme Umberto ou Gabi pour réaliser une AFM (voir Tableau 2.4).

Tableau 2.4: Comparaison simplifiée de la pertinence d'Excel, GaBi et Umberto pour l'AFM

	Excel	Gabi	Umberto
Données import/export	Bon	Moyen	Bon
Simulation statique	Bon	Bon	Bon
Simulation dynamique	Bon	Moyen	Bon
Incertitude	Moyen	Bon	Moyen
Analyse de sensibilité	Moyen	Bon	Pas disponible
Simulation d'erreur Monte Carlo	Moyen	Bon	Pas disponible
Version d'essai	Pas disponible	Gratuit pour 90 jours	Gratuit pour 14 jours

2.4 Économie circulaire et stratégies de circularité

2.4.1 La réforme du système économique

Au cours de la révolution industrielle, l'économie mondiale reposait sur un mode de consommation linéaire suivant la chaîne « extraction de matières - production d'un bien - consommation de ce bien - production de déchets ». De l'énergie est consommée à chacune des étapes du cycle entraînant ainsi un impact sur l'environnement. Vu l'épuisement prévu des ressources, ce mode de fonctionnement est remis en cause par la communauté internationale. C'est ainsi que le Club de Rome

publia en 1972 un premier rapport⁴ sur les limites de la croissance [44], et recommandait la nécessité d'engager un changement de mentalité, visant à stabiliser la population et la production industrielle de manière soutenable à long terme. Le principe qui découle de cette pensée est que dans un monde où les ressources sont finies il est impossible d'envisager une croissance infinie. Ce phénomène (un mode linéaire de consommation des ressources) prend une ampleur assez considérable de nos jours. En termes de volume, quelques 65 milliards de tonnes de matières premières ont été injectées dans l'économie mondiale en 2010 et on devrait atteindre les 82 milliards de tonnes en 2020 (figure 2.6). Les conséquences immédiates [45] sont la flambée des prix des matières premières (consommation excessive d'énergie pour l'extraction, forte augmentation de la demande en métaux) et la rupture d'approvisionnement (crises politiques, conditions météorologiques) .

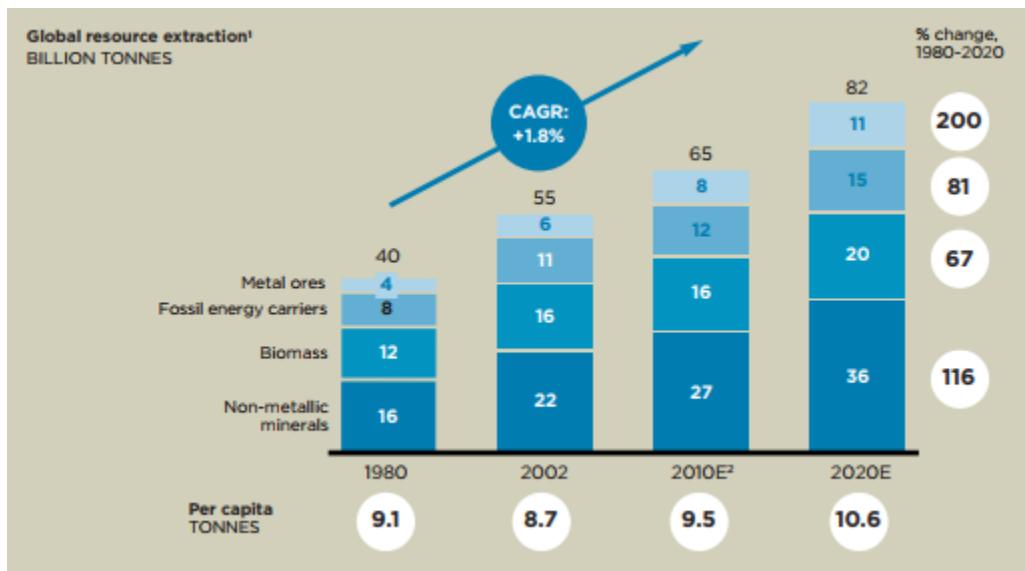


Figure 2.6: Extraction de ressources mondiales (Source : OECD ; WMM Global Insight; Ellen McArthur Foundation circular economy team)

La figure 2.7 présente l'indice MGI qui mesure de façon synthétique l'évolution du prix des matières premières sur des périodes d'un à deux ans ; elle est basée sur la moyenne arithmétique de l'indice synthétique de 4 grandeurs de base (la nourriture, les matières premières agricoles non alimentaires, les métaux et l'énergie). On observe qu'au cours du XXe siècle, le prix des principales

⁴ Objectif de l'étude : Modéliser la croissance mondiale et simuler les conséquences en matière de consommation de ressources, de croissance de la population, de pollution ou encore d'érosion des terres arables.

ressources naturelles a été quasiment divisé par deux. La première décennie du XXI^e siècle aura suffi à inverser le mouvement de déclin du prix des ressources. Néanmoins ce prix a rechuté ces trois dernières années ; on pourrait penser à un changement de paradigme mental entraînant ainsi des actions telles que recycler, valoriser ou concevoir du point de vue écologique.

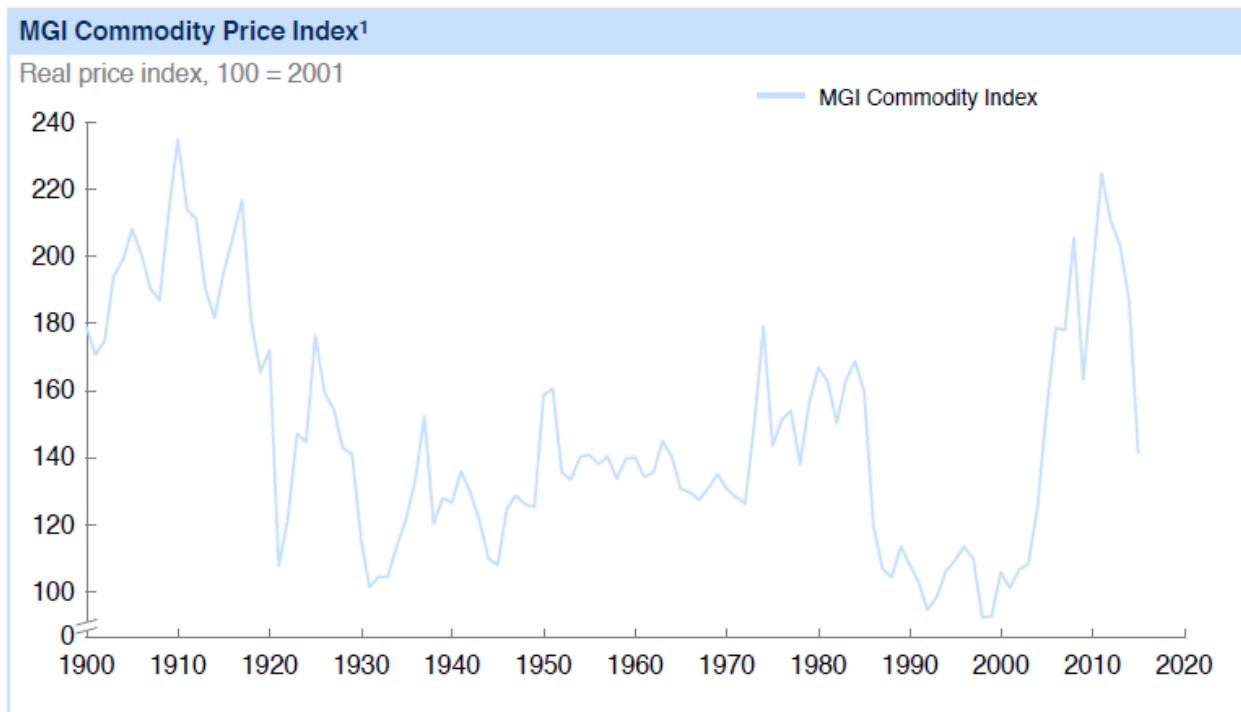


Figure 2.7: Indice MGI du cours des matières premières (Source : McKinsey Global Institute).

À la vue de tout cela, il faudrait protéger les ressources renouvelables ou non renouvelable, l'écosystème, lutter contre la volatilité et l'accroissement du coût des matières premières, minimiser ou stopper la pollution. La transition vers un modèle d'économie circulaire permettrait dit-on de mieux répondre à ces enjeux en créant de la valeur autant d'un point de vue économique que social et environnemental.

2.4.2 Définition

L'économie circulaire (EC) est un concept, une idée dont la définition n'est pas encore stable, ni conventionnelle. Selon ADEME⁵, EC est « un système économique d'échange et de production

⁵ Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'énergie <http://www.ademe.fr/>

qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement tout en améliorant le bien-être des individus ». Plus récemment, l'Institut de l'environnement, du développement durable et de l'économie circulaire (Institut EDDEC) dans son livre intitulé « l'économie circulaire une transition incontournable » définit une EC comme étant 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, tout en réduisant l'empreinte environnementale et en contribuant au bien-être des individus et des collectivités». Ces pensées dans leur concept se rejoignent par la mise en relief du couple producteur consommateur, de l'écologie environnementale ou du social. On peut donc conclure que ce concept veut veiller à la préservation de la biosphère afin d'en maintenir la viabilité, pour l'espèce humaine. C'est une manière de voir le monde, de lui donner un sens, et de prendre du recul critique envers les pratiques conventionnelles (économie linéaire). Cependant, l'économie circulaire ne peut pas tout faire, tout voir, tout prévoir. Elle sera bénéfique pour les promoteurs reconnaissant explicitement ses limites et travaillant avec des approches complémentaires, permettant ainsi une démarche holistique vis-à-vis des défis de la durabilité. Néanmoins elle propose un cadre cohérent de stratégies qui permettent une utilisation optimale des ressources en prolongeant la durée de vie et la qualité des produits. La figure 2.8 présente les stratégies de circularité qui peuvent être considérées, et les dispositions (mode de déploiement, mobilisation des acteurs et les outils disponibles) à mettre en œuvre pour réaliser l'économie circulaire [46].

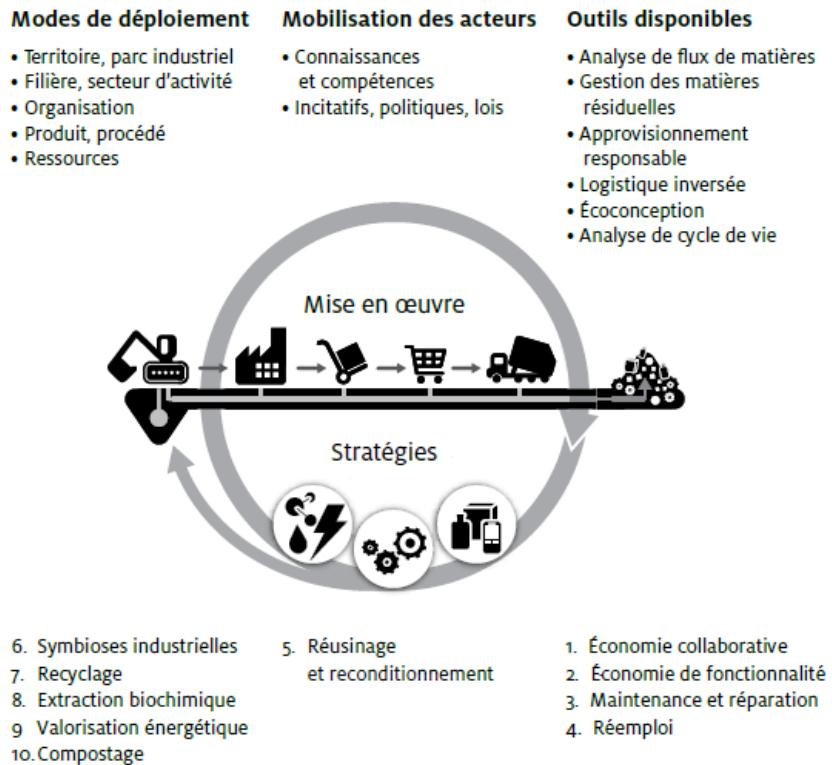


Figure 2.8: Les pratiques de l'économie circulaire (source : Institut EDDEC 2015)

Le compostage, la valorisation énergétique et l'extraction biochimique ne seront pas présentés dans ce rapport car le cuivre se distingue de la catégorie des matières résiduelles, et de la biomasse. Tout ce qui suit explique de manière synthétique les stratégies de circularité qui peuvent potentiellement être adoptées pour le cas du cuivre. En effet, les biens peuvent être maintenus en bon état ou retrouver une seconde vie en cas de panne par le biais de la maintenance et la réparation. Cette stratégie du point de vu développement durable est favorable car elle évite de mettre les équipements non fonctionnels aux rebuts. Néanmoins elle est limitée par le prestige du neuf des consommateurs, du développement technologique (appareils électroniques par exemple) et du coût élevé de la réparation (pays industrialisé). Dans bon nombre de cas, les biens sont redistribués ou partagés entre les consommateurs moyennant une compensation financière ou gratuitement; c'est de l'économie collaborative. De plus, un bien ou produit appartenant à un consommateur peut subir une modification de son usage (une canette transformée en objet décoratif) ou conserver son emploi d'origine (une gourde d'eau réutilisée par un second consommateur); on parle ainsi de réemploi. Il s'agit selon cette stratégie de préserver ou de maximiser l'utilisation des biens en permettant de réutiliser

les produits répondant ou non aux besoins du premier consommateur. Quant à l'économie de fonctionnalité, elle vise à repenser le modèle d'affaire des entreprises en transitant d'une économie de vente de biens à une économie de vente de services. En effet, elle privilégie l'usage à la possession et tend à vendre des services liés aux biens plutôt que les biens eux-mêmes. Par exemple, un fournisseur de groupe électrogène peut offrir à ses clients de payer la quantité d'électricité fournie en kWh mais reste propriétaire de l'équipement. En outre, le reconditionnement et le réusinage consiste à remettre un produit ou composant à l'état neuf avec une garantie égale ou proche de celle du neuf. Il est possible d'obtenir une forme quelconque en apportant ou en enlevant de la matière sur une pièce brute (reconditionner le vilebrequin d'un moteur à piston en est une illustration). Le recyclage très connu, vise à réutiliser les matières premières issues des déchets soit en boucle fermée (pour produire des produits similaires) soit en boucle ouverte (utilisation dans la production d'autres types de biens ou utilisation des matériaux pour une autre fin que leur fonction initiale, cela impose de séparer les éléments pouvant être recyclés), comme le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques par extraction des matériaux (fer, cuivre, inox, aluminium, métaux précieux, plastique...); et qui sont ensuite valorisés en matière première secondaire (anode de cuivre...). La symbiose industrielle est un mode d'organisation industrielle (synergies industrielles) mis en place par plusieurs partenaires d'un même territoire et caractérisé par une gestion optimisée des ressources (eau, matière, énergie) sans risque pour l'environnement. Cette stratégie répond à une logique collective de mutualisation et d'échanges (déchets, matières premières, énergie, services...). En exemple l'utilisation des boues anodiques (déchets en fonderie) dans la production de cathode de cuivre par l'affinerie CCR, ou la récupération des débris et déchets de cuivre par la fonderie HORNE pour la production d'anode de cuivre. Toutes ces stratégies visent à préserver le capital naturel renouvelable, à minimiser l'exploitation des ressources non renouvelables, à maximiser la gestion des matières premières par une réduction considérable des pertes.

CHAPITRE 3 PROBLÉMATIQUES DE RECHERCHE ET OBJECTIFS

3.1 Problématique de recherche

Le cuivre est un métal noble se retrouvant dans la technosphère et touchant plusieurs domaines d'utilisation (électricité, équipements électroniques, constructions, chimie, etc.) d'où un élément essentiel de notre quotidien. Il est le troisième métal le plus utilisé, après le fer et l'aluminium [47]. Selon Ayres [48], le pic de production du cuivre devrait être atteint avant la fin des années 2020, alors que la demande devrait continuer à augmenter durant de nombreuses décennies. Aujourd'hui, 8 à 10% de l'énergie primaire mondiale est utilisée à extraire et raffiner les métaux et l'énergie ainsi dépensée augmente de manière inversement proportionnelle à la concentration du cuivre dans le minéral [49]. D'après Jamet, les réserves mondiales de cuivre seraient épuisées d'ici à 2030 [50]. De plus le manque de cuivre arriverait d'ici la fin des années 2050 selon Graedel [26]. Au Québec, la production de cuivre a fortement diminué à la fin des années 1990 jusqu'en 2006. La province a déjà compté plusieurs mines de cuivre qui sont aujourd'hui épuisées. Ce métal est maintenant plutôt un sous-produit de mines d'or, de nickel et de zinc situées dans les régions de l'Abitibi et du Nord-du-Québec [51]. Les nouvelles mines ont des teneurs en minéral inférieures aux mines épuisées ou sont moins accessibles, plus difficiles à exploiter ou plus profondes. Par exemple, le minéral de cuivre est passé d'une concentration moyenne de 1,8 % dans les années 30 à une concentration moyenne de 0,8 % aujourd'hui. Il faut donc consommer plus d'énergie pour l'extraction des ressources. Les Réserves minières prouvées et probables de cuivre au Québec⁶ en date du 31 décembre 2012 et 31 décembre 2013 sont respectivement de 282 580 tonnes et 231 310 tonnes soit une baisse de 18.1%. Si ce gisement s'épuise complètement il n'existerait plus d'activité minière de cuivre au Québec. Soit un impact direct sur les industries minières (faillite et fermeture), le chômage (licenciement) et une dépendance accrue vis-à-vis des autres pays (enjeux géopolitiques, et géologique). De nos jours, si les stocks de cuivre au Québec sont bien connus alors des actions stratégiques de circularité pour ce métal peuvent se mener sans pour autant être dans l'obligation d'en extraire

⁶Réserves minières de cuivre <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/mines/mines-en-chiffres-2013a.pdf>

constamment du minerai. Une analyse de flux de matière est nécessaire enfin d'établir un portrait quantitatif sur les différents flux physiques (intrants, sortants) et les stocks de cuivre que l'on peut retrouver aux Québec dans l'optique de soutenir des stratégies durables à réaliser pour une gestion efficace du cuivre. Au vue de tous ces problèmes, il est possible de soulever la question suivante : Comment peut-on comptabiliser les flux et les stocks de cuivre entre les activités (et acteurs) de la chaîne de valeur du cuivre au Québec dans le but de supporter le développement de stratégies de circularité ?

Il faut dire qu'une analyse de flux de substance qui est de quantifier les flux et le stock de cuivre entre les différents acteurs de la chaîne de valeur au Québec avec des niveaux d'incertitude n'a jamais été effectué. De plus, le développement des stratégies de circularités à chaque étape du cycle de vie du cuivre est une nouvelle approche qui sera traitée pour la première fois dans ce travail.

3.2 Définition des objectifs du projet

L'objectif général de ce projet de recherche est de réaliser l'analyse de flux de matière (statique et descriptive) du cuivre au Québec sur l'année 2014 et d'évaluer la robustesse des résultats par une analyse d'incertitude. En effet, cette étude sert à mieux comprendre la circulation des flux de cuivre sur le territoire Québécois et ses échanges avec l'extérieur dans le but d'informer le développement de stratégies de circularité pour une amélioration de la gestion de la ressource au Québec. De plus elle sert aussi comme critère pour l'évaluation des stratégies potentielles, en fonction de l'ampleur des flux concernés par ces stratégies. Deux objectifs spécifiques essentiels sont établis dans le but de parfaire cette analyse. Il s'agira de :

- Modéliser et générer les données d'entrée du cycle du cuivre au Québec en 2014 avec l'outil STAN (conservation de masse)
- Déterminer le niveau d'incertitude des différents flux entrées/sorties du système.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE

La méthodologie permet donc de comprendre les différents calculs réalisés en fonction des données primaires collectées (biens ou produits) et des données intermédiaires (concentration de cuivre, durée de vie des produits...).

4.1 Modélisation du cycle du cuivre au Québec avec l'outil STAN

Cette partie présente l'approche de développement du modèle AFM du cuivre, elle précise en effet les étapes et les activités considérées à l'intérieur du périmètre d'analyse, les hypothèses émises sur les données collectées et les différents calculs mathématiques qui en découlent. Une hypothèse est émise pour répondre à cet objectif spécifique sous contrainte de condition bien déterminée.

Hypothèse 1 : L'outil STAN permet de cartographier le cycle du cuivre tout en générant les valeurs des flux, de stock et d'incertitudes.

Réfutabilité

H1 : L'hypothèse 1 est réfutée si le principe de la conservation de masse n'est pas respecté selon l'équation (4-1) (avec I les importations, P la production, C la consommation, E les exportations, ΔS la variation de stock, S_{2014} le stock à l'année n et S_{2013} le stock à l'année n-1).

$$I + P = C + E + \Delta S \quad (4-1)$$

$$\Delta S = S_{2014} - S_{2013} \quad (4-2)$$

4.1.1 Système, frontières du système

Le système à l'étude inclut toutes les activités de l'extraction du minerai de cuivre ; en passant par la production de métal primaire, la transformation métallique, la fabrication et l'assemblage, l'utilisation et la gestion des déchets en fin de vie. Les échanges avec d'autres provinces canadiennes ou pays et ceux avec l'environnement sont aussi inclus dans l'analyse. L'AFM donne des informations sur les flux massiques de matières à l'intérieur des frontières d'un système. Comme cette étude vise à évaluer le cycle Québécois du cuivre, le périmètre d'étude couvre l'échelle de la province. La limite temporelle est fixée à une étude sur un an, afin d'obtenir seulement une photogra-

phie à cette période donnée (principaux flux échangés, importés et exportés par les activités répertoriées dans les systèmes, changement de stocks, possibles pertes d'efficacité, etc.). Il ne s'agit donc pas dans ce cas précis d'obtenir un aperçu de l'évolution du cycle sur le passé récent (AFM dynamique). Le choix de l'année de référence porte donc sur une courte durée soit l'année 2014 compte tenu de la disponibilité des données. La figure 4.1 schématise les frontières générales du système à l'étude, qui incluent les étapes suivantes :

- **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 (concentration) au Québec. Après l'opération de concentration du minerai, le flux sortant de cette étape est le concentré de cuivre.
- **La production du métal primaire** comporte les procédés de fonderie et d'affinerie du cuivre, conduisant, par exemple, à la production d'anodes et de cathode de cuivre.
- **La transformation métallique** inclut la mise en forme des cathodes de cuivre en produit semi fini (plaques, fils, tubes, etc.). Ces produits semi-finis serviront à fabriquer d'autres produits. Par exemple des fils machines sont utilisés pour la fabrication de moteur électrique et ces derniers sont assemblés avec d'autres équipements enfin d'obtenir un groupe électricogène.
- **La fabrication et l'assemblage** vise à obtenir un produit fini par la transformation de pièces ou objet issus de l'étape précédente en adoptant divers procédés tels que l'enlèvement de matière (tournage, fraisage...), la déformation (filage, laminage...), la fusion (frittage, moulage...) et l'assemblage (soudage, boulonnage...).
- **L'utilisation** englobe tous les usages des produits finis en cuivre (Infrastructures, transports...) mis en service et utilisés par le consommateur (ou Client). Ces produits deviendront, en fonction de leur durée de vie physique ou technologique, des déchets.
- **L'étape de gestion des déchets en fin de vie** comprend 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) ou vers l'environnement (extraction de minerai, émissions à l'eau, l'air et le sol). Les acteurs des différentes activités peuvent, stocker une partie de la matière pour différentes raisons (économiques, logistiques, de capacité de production, durée de vie des produits contenant la matière, etc.).

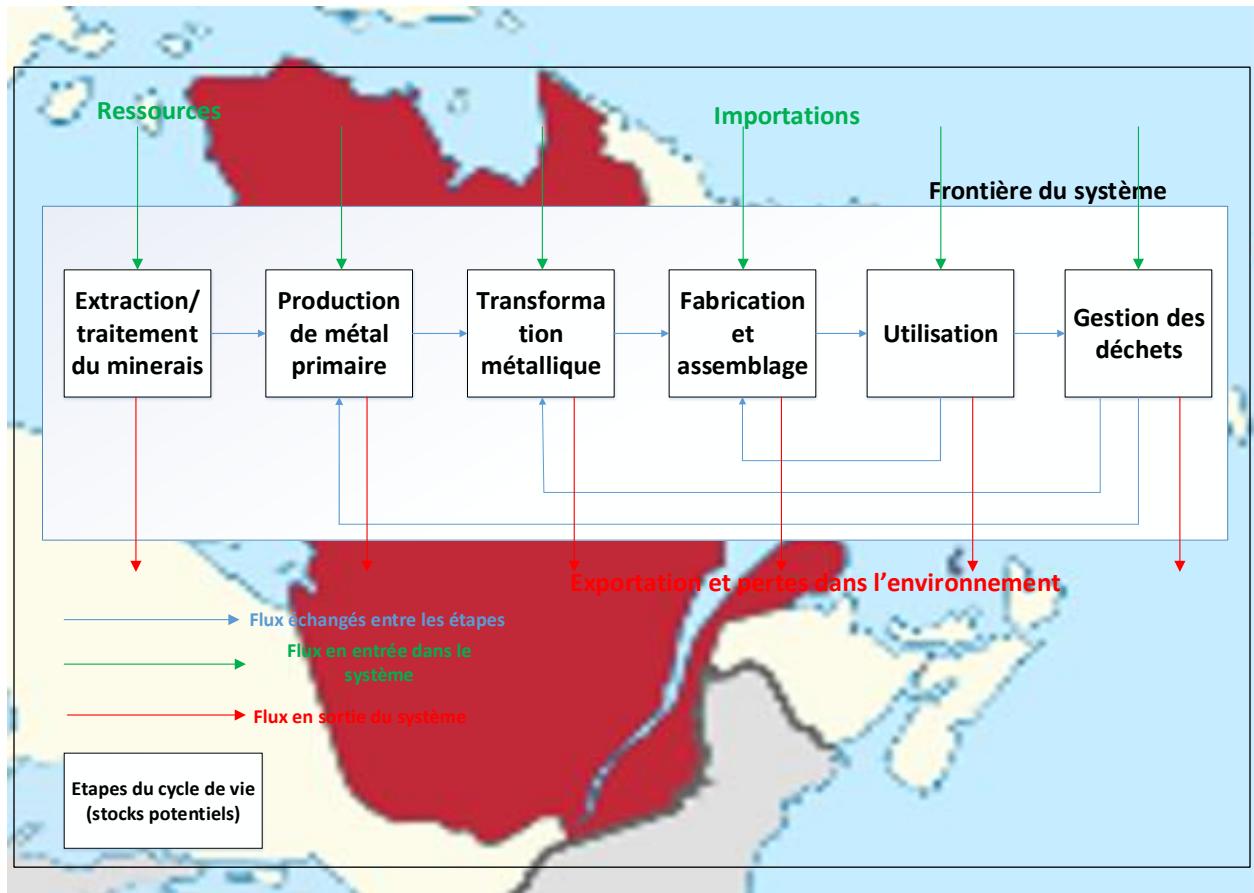


Figure 4.1: Frontières du système et étapes du cycle de vie considérées dans la réalisation de l'Analyse de flux de matière (AFM) du cuivre au Québec.

4.1.2 Acquisition ou collecte de données

4.1.2.a Sources de données potentielles

Les sources gouvernementales à savoir la base de données statistique Canada⁷, les données du MERN⁸ (Ministère de l'Energie et de la Ressource Naturelle), du RNC⁹ (Ressources Naturelles Canada), de l'ISQ (Institut de la statistique du Québec), RecyQuébec, les données déclarées par INRP¹⁰ (installations à l'Inventaire national des rejets de polluants) et la base de données de la Commission Européenne EUROSTAT¹¹ sont identifiées. De plus, des correspondances sont mises en relief pour les entreprises travaillant avec ce métal (exemple : Fonderie Horne, Affinerie CCR, Nexans, Mine Matagami, Raglan etc). Ces entreprises pourront même à long terme participer à la collecte des données en apportant des informations plus précises sur les différents flux et stocks de cuivre mis en évidence. Selon les données recueillies, Tanimoto [52] identifie l'approche descendante et ascendante pour quantifier les flux du cuivre au cours de son cycle. Tout en reconnaissant que l'approche ascendante a besoin de plus de données sur les stocks et flux échangés à l'intérieur du système étudié, on peut imaginer utiliser les mêmes données de détail pour établir une AFM de type descendante. Les contraintes de temps, et la disponibilité des données nous amène à utiliser simultanément les deux méthodes pour valider et corriger les données. En effet certaines données seront obtenues par les entreprises et d'autres directement sur les sites officiels ou les études antérieures.

4.1.2.b Caractérisation des données et conditions d'affranchissement

Cette étude sert à dresser le portrait actuel des flux et stocks de métaux au Québec afin d'identifier là où il existe un potentiel intéressant pour développer des initiatives d'économie circulaire. Ainsi, pour rester dans cette perspective ; une AFM descriptive et un modèle statique sont considérés. Les

⁷ <http://www5.statcan.gc.ca/cimt-cicm/home-accueil?lang=fra> STATISTIQUE CANADA (Base de données sur le commerce international canadien de marchandises selon le code du système harmonisé)

⁸ <http://mern.gouv.qc.ca/mines/statistiques/substance/substance-cuivre.jsp> Energie et Ressources Naturelles Québec

⁹ <http://dsae.rncan.gc.ca/prod-prod/ann-ann-fra.aspx> Ressources Naturelles Canada, Production de cuivre au Québec

¹⁰ <http://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/ea0dc8ae-d93c-4e24-9f61-946f1736a26f> Données sur les rejets de polluants regroupés par province, type d'industrie and substance

¹¹ <http://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom/data/database> Production vendue, exportations et importations par liste PRODCOM (NACE Rév. 2) - données annuelles (DS-066341)

données plus précises recherchées pour réaliser l'AFM sont exprimées en unité physique (kilotonne). Tous les produits contenant du cuivre doivent être identifiés et quantifiés à travers les étapes du cycle de vie (extraction, production de métal primaire, transformation métallique, fabrication, utilisation et la fin de vie) présentes dans le périmètre d'analyse de l'AFM, c.-à-d. le Québec, ainsi que les imports et exports de marchandises. Les données collectées sont soit des flux physiques exprimés en masse ou en nombre d'item soit des flux monétaires (en Dollars Canadien) qui sont transformés par la suite en flux physiques. La figure 4.2 montre la procédure de collecte et de regroupement des données, ainsi que les conditions à franchir pour quantifier le flux en masse/temps du métal (F) en fonction de la teneur en cuivre contenue dans les différentes marchandises ainsi que de leur masse et/ou du prix unitaire.

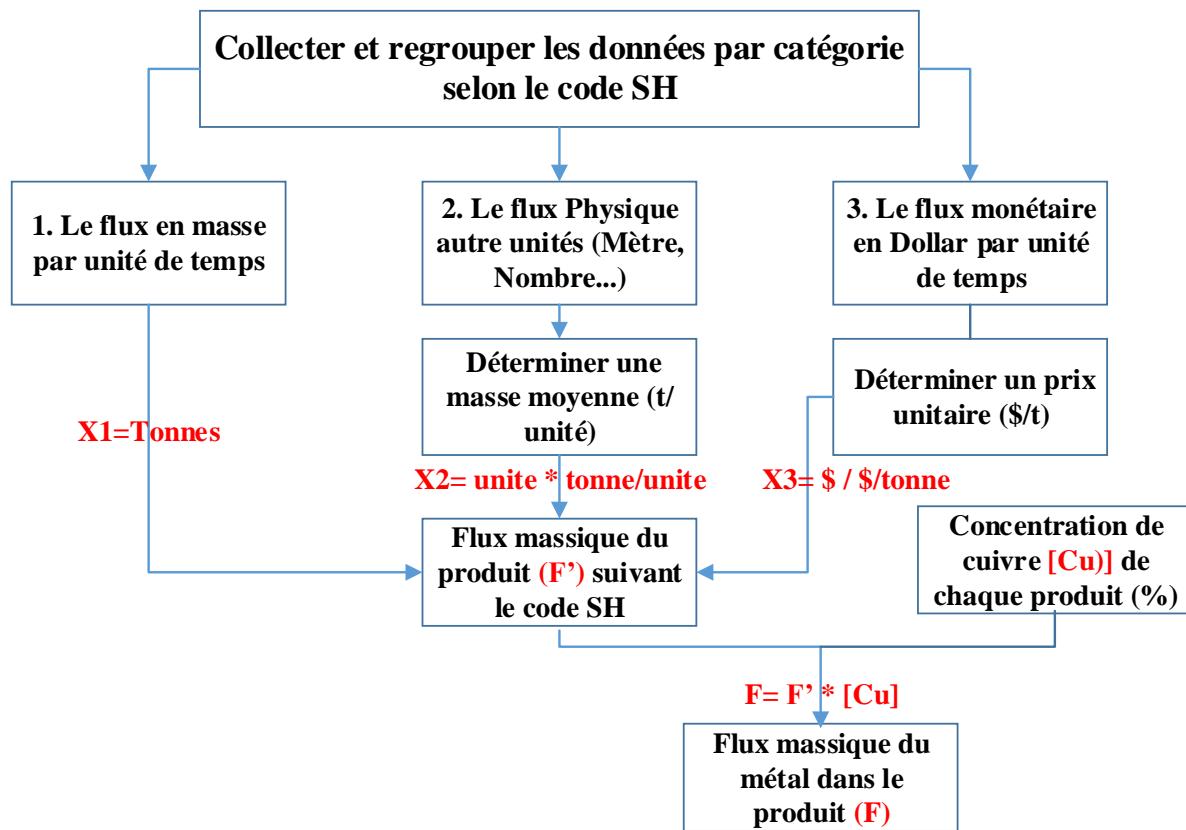


Figure 4.2: Procédure de collecte et de regroupement des données d'inventaire à disposition.

SH : Système Harmonisé ; F : flux en masse du métal dans le produit (kt/a), F_M : Flux monétaire de la marchandise (\$/a), F' le flux massique du produit (kt/a), $[Cu]$ est la concentration du cuivre dans le produit (%). X1, X2 et X3 sont les conditions d'affranchissement.

Condition X1 : Si la donnée collectée est en unité massique la condition est directement affranchie, on obtient donc sans transformation le flux physique en masse du produit (F'). Le flux F du métal dans le produit s'obtient par l'équation suivante :

$$F = F' \times [Cu] \quad (4-3)$$

Condition X2 : Si la donnée est exprimée dans une autre unité (par exemple nombre de véhicules importés ou exportés) alors une opération de conversion est obligatoire. Il s'agit en effet, de déterminer une masse moyenne m_i (kt/unité) de chaque produit exprimé en nombre d'item. Les données sur la masse des marchandises et leur concentration en cuivre sont déterminées par Pauliuk [53] dans une étude intitulée «Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries». Ainsi le flux en masse du métal se calcule selon l'équation (4-4)

$$F = m_i \times q_i \times [Cu]_i \quad (4-4)$$

Où q_i est le flux de produit exprimé en nombre d'item ou en mètre (unité/an).

Condition X3 : Si la donnée acquise est en unité monétaire alors une conversion s'impose. Pour ce faire, la détermination d'un prix unitaire (\$/kt) est nécessaire pour transformer les flux monétaires en flux physiques enfin d'obtenir le flux en masse du produit ou de la marchandise. Dans ce cas précis, les acteurs dans le domaine au Québec se réservent de fournir les informations à cause de la confidentialité des données. Comme solution alternative, la base de données Eurocom est utilisée en sélectionnant arbitrairement la France et le Danemark. En effet, Il y a plus de 3000 marchandises collectées contenant du cuivre et il devient fastidieux de considérer tous les pays de l'Union Européenne. En faisant des vérifications avec quelques prix moyens disponible au Québec et ceux de ces deux pays de l'union Européenne, nous constatons que le prix moyen des biens exportés et importés du Québec est compris entre celui des deux pays (tableau 4.1).

Tableau 4.1: Comparaison des prix moyens disponibles de la France, du Danemark et du Québec

Marchandises (EXPORTATION)	Prix moyen Québec (\$/unité)	Prix moyen France (\$/unité)	Prix moyen Danemark (\$/unité)
Fils de cuivre affiné, la plus grande dimension de la section transversale excède 6 mm²	8,2	7,96	10,11
Automobiles, à moteur diesel/semi-diesel un cylindre >1 500 cm³ mais<=2 500 cm³	22401	20479,13	27051,88
Véhicules pour invalides (fauteuils roulants), sans mécanisme de propulsion	945	323,52	9783
Remorques et semi-remorques, pour le transport de marchandises	15458	15310,46	19407,37
Fiches et prises de courant électriques, pour une tension n'excédant pas 1000 V	3,45	4	0,67

Unité peut être exprimé en kilogramme, ou en mètre (31 euro/mètre de conducteur électrique) ou en élément unitaire (82 euro/condensateur dont la puissance réactive est inférieure à 0,5 kVAR).

En tenant compte de ce constat, l'hypothèse considérée est que le prix moyen au Québec P_{QC} se situe approximativement entre celui de la France (P_{FR}) et du Danemark (P_{DK}). Il faut rappeler que cette hypothèse n'est pas forcement vraie pour tous les produits mais procéder de cette manière permettra d'approximer la valeur du flux. Le prix moyen des produits importés et exportés du Québec pour tous les produits exprimés uniquement en unité monétaire est calculé selon l'équation (4-5).

$$P_{QC-i} = \frac{P_{FR-i} + P_{DK-i}}{2} \times \frac{\sum_{k=1}^{12} T_k \times P_k}{\sum_{k=1}^{12} P_k} \quad (4-5)$$

Où P_{QC-i} est le prix moyen du produit i (importé ou exporté) de la province du Québec, T_k est le taux de change¹² moyen du mois k (CAD/EURO) de l'année 2014 et P_k est le nombre de jour ouvré dans le mois k de l'année 2014. On note que $\frac{\sum_{k=1}^{12} T_k \times P_k}{\sum_{k=1}^{12} P_k}$ représente la moyenne pondérée des taux de change mensuels sur l'année 2014. Les valeurs sont répertoriées dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2: Taux de change mensuel de l'année 2014

MOIS (k)	MOYENNE (T _k)	NB jours ouvrés (P _k)
1/2014	1.488432	22
2/2014	1.509385	20
3/2014	1.535229	21
4/2014	1.518135	20
5/2014	1.495062	21
6/2014	1.472762	21
7/2014	1.452357	23
8/2014	1.454767	21
9/2014	1.419645	22
10/2014	1.421417	23
11/2014	1.41364	20
12/2014	1.421581	21

La base de données PRODCOM présente la quantité et le prix de chaque marchandise importée et exportée suivant le code NACE (Nomenclature statistique des Activités économiques dans la Communauté Européenne). Cependant la base de données STATCAN (Statistique CANADA) est classifiée suivant le code SH (Système harmonisé). Il faut donc faire correspondre les différents produits ou marchandises sans modifier leur nature (tableau 4.3).

¹²Historique des taux de change <http://fxtop.com/fr/historique-taux-change.php>

Tableau 4.3: Correspondance de certaines marchandises du code NACE et du code SH.

Code Nace	Code SH	Marchandise
28141235	848180	Robinets, valves et articles similaires
28151030	848210	Roulements à billes
28152600	848360	Embrayages et organes d'accouplement
27905100	853210	Condensateurs de puissance pour 50/60 Hz ($Q \geq 0,5 \text{ kvar}$)
27321200	854420	Câbles coaxiaux
27321340	854442	Conducteurs électriques ($u \leq 1000 \text{ V}$), munis de pièces de connexion
29104300	870190	Tracteurs actionnés par un moteur à combustion interne

L'équation (4-6) permet de déterminer le flux massique du métal dans le produit dans cette condition.

$$F = \frac{F_{M-i} \times [Cu]_i}{P_{QC-i}} = F_{M-i} \times \frac{2}{P_{FR-i} + P_{DK-i}} \times \frac{\sum_{k=1}^{12} P_k}{\sum_{k=1}^{12} T_k \times P_k} \times [Cu]_i \quad (4-6)$$

4.1.3 Conception du modèle AFM

La conception du modèle AFM consiste à déterminer les éléments suivants [9] :

- *Les substances* qui sont définies comme des éléments chimiques avec des caractéristiques et propriétés homogènes. C'est l'exemple du cuivre (Cu) ;
- *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 correspondent aux transformations, transports et stockages de biens. Ils sont situés à la limite du système, et contiennent parfois des stocks et des sous-systèmes qui peuvent être décrits par un modèle supplémentaire.
- *Les flux* sont les transferts de biens ou de substances entre les étapes, les processus ou entre le système et l'extérieur (autres régions, l'environnement, etc.) nous distinguons les flux internes (ils relient les processus au sein du système) et les flux qui traversent le système. Ils sont appelés respectivement les flux d'importation ou d'exportation.

- *Les étapes* qui sont le regroupement de plusieurs processus (ou activités). Dans le cas de cette étude les étapes sont l'extraction, le traitement, la production primaire, la transformation métallique, la fabrication de biens, l'utilisation et la gestion des déchets.

Les frontières du système et les processus inclus sont explicités dans la sous-section 4.1.1. L'acquisition et la collecte de données pour déterminer les flux de biens et substances intrants et sortant de chaque processus et leur conversion en flux de cuivre sont détaillés dans la sous-section 4.1.2. La classification et le calcul de l'incertitude associés aux flux et stocks de cuivre ainsi que la réconciliation des données sont détaillées aux sous-sections 4.2.1 et 4.2.2.

Les différents processus dans cette étude recoupent essentiellement les étapes du cycle de vie du cuivre. Seules les étapes de production de métal primaire et de transformation métallique sont séparées en sous-systèmes permettant de mettre en évidence la production de la fonderie Horne, de l'affinerie CCR et de l'entreprise NEXAN. Pour chaque étape du cycle, il faut définir les « entrants » et les « sortants » (tableaux 4.4 à 4.8).

- Étape 1

Le tableau 4.4 indique que le minerai (d'une teneur en cuivre variant entre 0,5 à 6%¹³), flux entrant à l'étape 1 ($E_{minerais}$), est traité pour fournir à la sortie du concentré dont la teneur en cuivre est comprise entre 20 à 26% (selon la Chambre de commerce du Montréal métropolitain¹⁴). Une partie du concentré de cuivre (P_{mine}) reste au Québec (pour l'étape de production de métal primaire) et l'autre est exporté (P_{expl}).

¹³ Minerais de cuivre teneur <http://www.universalis.fr/encyclopedie/cuivre/1-metallurgie/>

¹⁴ CCMM www.ccmm.qc.ca/transformationmetalliquemetropole

Tableau 4.4: Flux entrants et flux sortants du processus d'extraction/ concentration

Étape 1 : Extraction /concentration			
Flux entrants	Source	Flux sortants	Source
Minerais de cuivre (E_{minerais})	RNC, MERN	Concentré de cuivre (P _{mine} +P _{expl})	STATCAN
		Pertes (dans l'environnement et élimination sur/hors site)	INRP

- Étape 2

Le tableau 4.5 présente les différents flux à prendre en compte dans l'étape de production de métal primaire. La fonderie Horne est alimentée en concentré de cuivre et produit des anodes d'une pureté d'environ 99.91%. Ces anodes sont ensuite acheminées vers l'affinerie CCR et sert d'intrant à la production de cuivre affiné. Le cuivre affiné mis en marché se présente sous forme de cathodes (la teneur en cuivre égale ou supérieure à 99,99%) est vendu à des producteurs de fils, plaques, câbles, tubes et autres produits à base de cuivre, qui seront ensuite utilisés par plusieurs secteurs industriels et de la construction. Au-delà des quantités massiques que l'AFM peut représenter, il est possible de penser à la relation entre la masse et l'énergie à cette étape du cycle. Le concentré de cuivre et le fondant sont introduits dans un réacteur subissant ainsi un changement de phase de l'état solide à l'état liquide (production de la matte de cuivre). Il est intéressant de déterminer la quantité théorique de chaleur disponible ou à récupérer au cours de cette opération de fonderie. Cela permettra de donner si possible du poids à une valorisation énergétique potentielle dans le secteur minier. Les données disponibles sont : la température de fusion $T_{fus}=1200$ C (fonderie Horne), la chaleur spécifique du cuivre à l'état solide ou liquide est $C_p=0,39$ kJ/kg/C et la chaleur de fusion $\Delta H=343$ kJ/kg. Comme hypothèses, la température initiale (T_i) est égale à 25 C, la température finale (T_f) est égale à la température de fusion et la fraction du liquide dans le solide est $f=1$. La relation (4-7) détermine la quantité théorique de chaleur disponible lors de la phase de fonderie.

$$\begin{aligned}
 Q &= \int_{T_i}^{T_{fus}} m \times C_p \times dT + m \times f \times \Delta h + \int_{T_{fus}}^{T_f} m \times C_p \times dT \\
 Q &= m \times [C_p \times (T_{fus} - T_i) + f \Delta h + C_p \times (T_f - T_{fus})] \quad (4-7) \\
 \text{Hypothèses: } &T_{fus} = T_f \text{ et } f = 1 \\
 Q &= m \times [C_p \times (T_{fus} - T_i) + \Delta h]
 \end{aligned}$$

Tableau 4.5 : Flux entrants et flux sortants du processus de production de métal primaire

Étape 2 : Production de métal primaire			
Flux entrants	Source	Flux sortants	Source
Concentré de cuivre (P_{mine}+concentre import)	STATCAN	Anodes produites	Glen-core/Horne/ISQ
Matte et anode de cuivre importées	STATCAN	Cathodes (P _{cathodes} + Export cathode)	Glencore/CCR
Cuivre récupéré à partir des matières recyclées (Precyc)	Horne	Pertes (dans l'environnement et élimination sur/hors site)	INRP

- Étape 3

Cette étape du cycle de vie (tableau 4.6) est constituée de l'agrégation de processus de transformation métallique, de fabrication et d'assemblage. Les produits semi-finis se retrouvent en entrée comme en sortie dans cette combinaison d'étape. On distingue des cathodes de cuivre (teneur en cuivre 99,99%) et des produits semi finis considérés respectivement comme des flux entrants et sortants du processus de transformation métallique (figure 4.3), des produits semi finis en entrée et des produits finis en sortie du processus de fabrication et d'assemblage (figure 4.4).

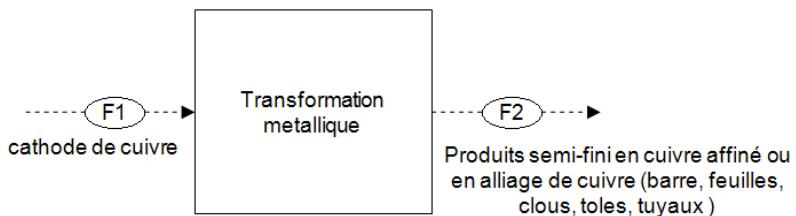


Figure 4.3: Flux entrant et sortant du processus de transformation métallique

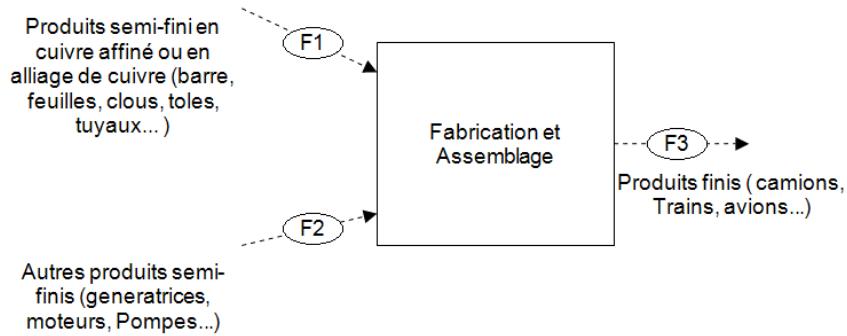


Figure 4.4: Flux entrée/sortie du processus de fabrication et assemblage

En regroupant les deux activités, les différents flux peuvent être combinés dans un seul processus pour former la troisième étape du cycle (figure 4.5). Toutes les teneurs en cuivre des produits semi-finis et finis sont indiquées à l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

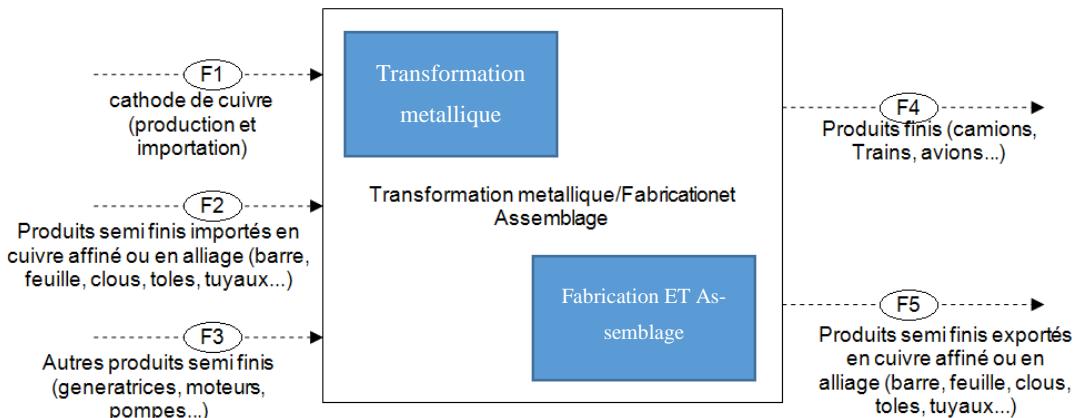


Figure 4.5: Regroupement de processus

Tableau 4.6 : Flux entrants et flux sortants des processus de transformation métallique de fabrication et d'assemblage

Étape 3 : transformation métallique/fabrication et assemblage			
Flux entrants	Source	Flux sortants	Source
Cathode (P_{cathodes}+ Import cathode-Nexan)	Glen-core/ISQ	Produits finis (Fpf)	Par Calcul (STAN)
Import produits semi fini en cuivre affiné	Statcan	Export produits semi fini en cuivre affiné	Statcan
Import produits semi fini en alliage de cuivre	Statcan	Export produits semi fini en alliage de cuivre	Statcan
Import autres produits semi fini en cuivre	Statcan	Export autres produits semi fini et fini en cuivre	Statcan
		Pertes (dans l'environnement et élimination sur/hors site))	INRP

- Étape 4

Dans cette étape (tableau 4.7), tous les produits finis importés ou fabriqués au Québec sont consommés par les utilisateurs et génèrent en sortie des déchets ou débris de cuivre. Comme il n'existe pas suffisamment de données pour conduire une étude plus détaillée pour les stocks et la variation de stock en utilisation au Québec, des données tirées de la littérature sont utilisées. Selon l'UNEP[54], les stocks de cuivre par personne aux États-Unis ont augmenté linéairement entre 1932 et 2002, passant d'environ 70 à 275 kg/hbt en 2002, ce qui représente une croissance d'environ 3 kg/(hbt. a), alors que selon Ruhrberg[55] le stock de cuivre en utilisation augmente de 5 kg/(hbt.a) en Europe de l'ouest, et de 6 kg/(hbt.a) selon Spatari et ses collègues [15]. Bonnin [19] évalue le stock en cuivre de la France à $170 \pm 20\%$ kg/hbt en 2000 et les additions au stock à $5 \pm 30\%$ kg/(hbt.a). Tous ces résultats conduisent à considérer le minimum et le maximum des valeurs trouvées dans la littérature ci-dessus et ainsi estimer les stocks et les additions au stock de cuivre en phase d'utilisation au Québec suivant les expressions 4-8 et 4-9. Les incertitudes liées au stock et à la variation de stock au Québec sont déterminées par application de l'équation (4-16).

$$\text{Stock}_{QC} = \frac{[\text{St}_{Fr} + \Delta S_{Fr} \times (\text{A}_{Etu} - \text{A}_{ref1}) + \text{St}_{Usa} + \Delta S_{Usa} \times (\text{A}_{Etu} - \text{A}_{ref2})]}{2} \times \text{Pop} \quad (4-8)$$

$$\Delta S_{QC} = \frac{(\Delta S_{EO} + \Delta S_{Usa})}{2} \times \text{Pop} \quad (4-9)$$

Ou $Stock_{QC}$ est le stock total de cuivre estimé au Québec en tonne, ΔS_{QC} est l'addition au stock de cuivre au Québec, ΔS_{Fr} et ΔS_{Usa} sont respectivement la variation (ou addition) du stock de la France estimée par Bonnin (0,005 tonne/personne.an) et des USA quantifiée par l'UNEP (0,003 tonne/personne.an), ΔS_{EO} la variation du stock (0,005 tonne/personne.an) de l'Europe de l'Ouest estimée par Spatari et ses collègues, A_{Etu} est l'année d'étude de cet projet qui est de 2014, A_{ref1} et A_{ref2} sont respectivement l'année de référence où le stock a été calculé ou estimé pour la France (année 2000) et pour les USA (année 2002), St_{Fr} et St_{Usa} sont les stocks de cuivre par habitant de la France (170 tonnes/personne) et des USA (275 tonnes/personne). Pop représente la population du Québec en 2014 soit 8 214 503 habitants. Les valeurs minimale et maximale sont choisies en émettant l'hypothèse que la valeur réelle (stock et variation de stock au Québec) se situe dans cette large gamme de valeurs extrêmes.

Une étude réalisée par The International Copper Study Group (ICSG) [2] indique que les principaux produits contenant du cuivre sont les équipements électriques (31%) à cause de leur bonne conductivité électrique et thermique (fils, câbles, organes de commande, de coupure et de protection). Le cuivre est ensuite présent dans le domaine du Bâtiment (30%) ; où l'utilisation dans les toits, les tuyaux et les gouttières. Les équipements de transport (transport terrestre, maritime, ferroviaire et aérien). 15% dans les infrastructures, 12% chacun dans le transport et la machinerie. Ces données source sont utilisées dans ce travail pour repartir les stocks de cuivre à la phase d'utilisation (voir figure 2.1).

Tableau 4.7 : Flux entrants et flux sortants du processus d'utilisation

Étape 4 : Utilisation			
Flux entrants	Source	Flux sortants	Source
Produits finis importés (équipements mécaniques, électriques et de transport)	STATCAN	Déchets (production)	Par Calcul (STAN)
Produits finis (Production)	Par Calcul (STAN)	Pertes (dans l'environnement et élimination sur/hors site)	INRP
		Variation de stock	Estimation

- Étape 5

La répartition du flux de cuivre en entrée de l'étape de gestion des déchets par secteur au Québec en 2014 est calculée à partir des stocks de cuivre en utilisation et des durées de vie de chaque catégorie de produit (4-10 et 4-11) en admettant comme hypothèse que tous les produits sont mis en service à partir de la même année To.

$$R_j = \frac{\frac{Stock_{QC}}{DV_j}}{\sum \frac{Stock_{QC}}{DV_j}} \times 100 \quad (4-10)$$

$$\text{avec } DV_j = Tf_j - T_0 \quad (4-11)$$

Où DV (ans) est la durée de vie moyenne de chaque catégorie de produits, j représente les quatre catégories de produits (infrastructure et bâtiments, machinerie, transport et biens de consommations), Tf_j est l'année de fin de vie du produit de la catégorie j, et R_j (en %) est le taux de répartition du flux annuel selon chaque catégorie j.

En somme, Muller et ses collègues [56] ont réalisé un modèle dynamique d'analyse de flux de matière en montrant l'évolution du stock de fer à l'étape d'utilisation de 6 pays industrialisés (Canada, France, Australie, Etats Unies, Angleterre et Japon). Ils ont considéré que les infrastructures et les bâtiments ont une durée de vie comprise entre 50-100 ans, la machinerie entre 20 et 40 ans, entre 15 à 30 pour le transport et entre 10 à 20 ans de durée de vie pour les biens de consommations

courants. Dans cette étude les durées de vie moyenne (DV) considérées sont 75 ans pour les infrastructures et les bâtiments, 30 ans pour la machinerie, 20 et 15 ans respectivement pour le transport et les biens de consommations.

Tableau 4.8 : Flux entrants et flux sortants du processus de gestion des déchets

Étape 5 : Gestion des déchets			
Flux entrants	Source	Flux sortants	Source
Déchets (importés et produits)	STATCAN	Déchets (exportés)	STATCAN
		Cuivre récupéré à partir des matières recyclées	HORNE
		Pertes (dans l'environnement et élimination sur/hors site)	INRP et Par Calcul (STAN)

4.1.4 Hypothèses sur les données d'importation

Les données acquises à partir de STATCAN (base de données sur le commerce international canadien de marchandises) sont générées sur base douanière c'est-à-dire que les marchandises sont comptabilisées à la douane enfin d'alimenter la base de données. Une limite s'impose vis-à-vis des produits qui rentrent à travers les frontières. En effet, il n'existe pas de base de données permettant de savoir avec exactitude la destination des marchandises importées au Canada. Ce qui nous amène à poser les questions suivantes : Quels sont les produits qui passent par la frontière Québécoise et qui restent effectivement au Québec ? Quels sont les produits qui passent par les autres provinces et qui sont acheminés au Québec ?

Pour répondre à ces deux questions, deux facteurs sont considérés. Il convient de rappeler que l'hypothèse la mieux élaborée ne saurait prévaloir sur la réalité la plus bancale. Les premières étapes (extraction et concentration, production de métal primaire) sont bien fournies et contrôlable (cathodes, anodes, concentré de cuivre importés). En revanche les étapes de transformation métallique, assemblage et autres sont moins certaines. On considère que les produits importés ne sont pas seulement repartis selon la population Québécoise car le pouvoir d'achat aussi des individus compte. Ainsi, il est possible d'établir les facteurs de proportionnalité suivants :

Facteur 1 : le rapport entre le PIB¹⁵ du Québec (334 milliards) et celui du Canada sur l'année 2014 (1747 milliards) comme facteur de proportionnalité noté K1 et égale à 0,19 ;

Facteur 2 : le rapport entre la population¹⁶ Québécoise (environ 8,2 millions) et celle Canadienne (environ 35,5 millions) sur l'année 2014 comme deuxième facteur de proportionnalité noté K2 et égale à 0,23.

On peut remarquer une faible différence entre ces deux facteurs, soit 0,04 ; et émettre l'hypothèse que la valeur moyenne des deux facteurs représente le facteur équivalent K (4-12) qui sert à corriger la valeur des flux de marchandises importées au Québec.

$$K = \frac{(K1+K2)}{2} \quad (4-12)$$

Ainsi seules les marchandises importées au Québec sont affectées par le facteur équivalent K excepté les deux produits spécifiques importés tels que les anodes et les concentrés de cuivre qui sont TOUS acheminés au Québec (K1 =1 et K2 =1). Il existerait une seule fonderie (HORNE) de cuivre au Canada qui est localisée dans la province du Québec traitant respectivement ces deux produits. Pour déterminer les flux de cuivre en importation, il est maintenant question de collecter tous les produits importés au Canada, d'appliquer les 3 conditions du paragraphe 4.1.2.b et d'affecter le facteur équivalent K aux équations (4-3), (4-4) et (4-6). En fonction des 3 conditions, le flux du métal en importation est exprimé selon les expressions suivantes :

$$F = F' \times [Cu] \times K \quad (4-13)$$

$$F = m_i \times q_i \times [Cu]_i \times K \quad (4-14)$$

$$F = F_{M-i} \times P_{QC-i} \times [Cu]_i \times K \quad (4-15)$$

¹⁵ Source : Statistique Canada, Comptes économiques provinciaux et territoriaux, 2014.

¹⁶Population par province et territoire <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/l02/cst01/demo02a-fra.htm>

4.2 Détermination du niveau d'incertitude des différents flux entrées/sorties du système.

Les différents flux de données brutes (les biens) collectées selon des sources diverses et transformées en métal de cuivre lors des calculs sont associés à une valeur moyenne et un écart type ou incertitude type. Cette incertitude donne une idée de la robustesse des résultats et des conclusions qui peuvent en être tirées. Dans cette section, il s'agit de mettre en place un système de classification des écarts types (incertitude), de montrer par quelle méthode le logiciel STAN calcule un flux manquant en fonction des données disponibles, et comment plusieurs données de sources différentes peuvent être réconciliées. Dans cette étude, l'incertitude est exprimée comme une plage symétrique (toutes les valeurs dans la plage ont la même probabilité d'occurrence).

4.2.1 Classification et Calcul d'incertitude

a) Système de classification

L'analyse d'incertitude [21] se distingue selon trois types d'approche. L'approche statistique est celle utilisée dans cette étude : les données d'entrées sont décrites par des fonctions caractéristiques et des méthodes mathématiques sont appliquées pour évaluer la sensibilité et l'incertitude du modèle de sortie. Il importe de mentionner que les données pour déterminer l'incertitude associées aux flux de biens sont peu disponibles. S'il existe une série de valeurs physiques différentes ($p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$) du même produit (données variables provenant de différentes sources) alors la moyenne (μ_p) et l'écart des variables p_i (σ_p) en pourcentage sont calculés selon les expressions (4-16) et (4-17).

$$\sigma_p = \frac{(\mu_p - p_{\min})}{\mu_p} = \frac{(p_{\max} - \mu_p)}{\mu_p} \quad (4-16)$$

$$\mu_p = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n} \quad (4-17)$$

Où p_{\min} est la valeur minimale et p_{\max} la valeur maximale.

En revanche si il existe une seule valeur physique (p_1) d'un produit ou bien quelconque provenant d'une seule ou plusieurs sources alors l'incertitude est quantifiée selon l'adaptation de l'approche de Graedel et son équipe [26] basée sur la proposition de Moss et Schneider définissant une échelle

quantitative de niveaux de confiance de cinq points pour l'AFM (tableau 4.9). Ainsi, lorsque les données sont disponibles directement dans une des sources fiables (statistique Canada, ISQ...), le niveau de confiance est estimé « élevé » ($\pm 5 - 33\%$). Sinon, en fonction des sources et des calculs, le niveau de confiance est spécifié « médium » ($\pm 33-67\%$), « faible » ($\pm 67 - 95\%$) ou « très faible » ($> \pm 95\%$). Même si les données collectées proviennent directement des entreprises, le niveau de confiance n'est pas estimé « très élevé » ($< \pm 5\%$).

Tableau 4.9: Échelle de classification du niveau de confiance des données selon Graedel et al (2001)

Points	Qualité
$< \pm 5\%$)	Très élevé
$\pm 5 - 33\%$	Elevé
$\pm 33-67\%$	Moyenne
$\pm 67 - 95\%$	Faible
$> \pm 95\%$	Très Faible

Après réconciliation des données, les écarts types réconciliés (σ) et la contribution (C) de chaque flux par rapport au total d'entrée ou sortie sont classées en quatre points (de 1 à 4) avec des codes de couleurs (vert, jaune, orange et rouge) dans le tableau 4.10. La contribution de chaque flux permettra de mettre en évidence la taille (de petite à très grande) des flux, et l'écart type ou l'incertitude permettra de fournir une information sur la qualité des données. En exemple si un flux a un écart type ou plus simplement une incertitude de 5% de la valeur moyenne (μ) et une contribution de 50% par rapport au total des flux en entrée ou en sortie alors la qualité de la donnée est élevée (avec la valeur 1 comme pointage) et la taille du flux est grande (soit un pointage de 3). Ainsi, il sera possible de combiner les points et savoir dans quelle mesure il est important ou non de raffiner davantage les données.

Tableau 4.10: Échelle de classification du niveau de confiance et de la contribution des flux adaptée à notre étude après réconciliation des données

Points	Écarts type réconciliés/ qualité	Contribution des flux en entrée et en sortie
1	$\sigma < 11\%\mu$ qualité élevée	$0\% < C \leq 5\%$ petite contribution
2	$11\%\mu \leq \sigma \leq 25\%\mu$ qualité moyenne	$5\% < C \leq 20\%$ moyenne contribution
3	$25\%\mu < \sigma \leq 50\%\mu$ qualité faible	$20\% < C \leq 50\%$ grande contribution
4	$\sigma > 50\%\mu$ qualité très faible	$50\% < C \leq 100\%$ très grande contribution

$\sigma < 11\%\mu$ signifie que l'écart type ou l'incertitude est strictement inférieur à 11% de la valeur moyenne.

b) Calcul avec le logiciel STAN

Si des variables aléatoires sont utilisées dans une fonction, le résultat est une autre variable aléatoire. Sa distribution de probabilité ne peut être déterminée exactement que si les distributions de probabilité des valeurs d'entrée sont connues. STAN utilise une loi de distribution normale pour évaluer et incorporer la propagation des incertitudes à travers un système. C'est la **Loi de Gauss** : une fonction est développée dans une série de Taylor qui est coupée après la partie linéaire (terme de premier ordre). De cette façon, on crée une approximation linéaire de la fonction pour un certain point de développement (résultat de la fonction lorsque les valeurs moyennes μ_i des variables d'entrée aléatoire X_i sont utilisées). Plus l'écart est faible meilleurs sont les résultats obtenus par l'approximation. Avec l'aide de la série de Taylor, il est possible de déterminer approximativement la valeur attendue et la dispersion des valeurs du résultat de la fonction. La formule de calcul de la variance (l'écart type au carré) (4-18) est appelée loi de Gauss de propagation d'erreur [57].

Soit $Y \approx f(X_1, X_2, \dots, X_n)$

$$\text{Var}(Y) \approx \sum_{i=1}^n \left(\text{Var}[X_i] \times \left[\frac{\partial Y}{\partial X_i} \right]_{X=\mu}^2 \right) + 2 \times \sum_{j=1}^n \sum_{i=j+1}^n \left(\text{Cov}[X_i, X_j] \times \left[\frac{\partial Y}{\partial X_i} \right]_{X=\mu} \times \left[\frac{\partial Y}{\partial X_j} \right]_{X=\mu} \right) \quad (4-18)$$

Où $E(X_i) = \mu_i$ est la valeur moyenne arithmétique de X_i , σ_i est l'écart-type de X_i , $Var(X_i) = \sigma_i^2$ est la variance de X_i , $Cov(X_i, X_j) = \sigma_{ij}$ représente la covariance de X_i et X_j .

Limite : Il y'a certaines restrictions pour l'application de la loi de Gauss : les variables doivent être normalement distribuées et les incertitudes doivent être faibles. On peut s'attendre à des résultats raisonnables pour ces conditions seulement.

Une étude de cas pour comprendre la manière dont le logiciel STAN effectue les calculs peut s'appliquer en prenant comme exemple un flux sortant (Y) qui est la somme des flux entrants (X_1 et X_2) (figure 4.6).

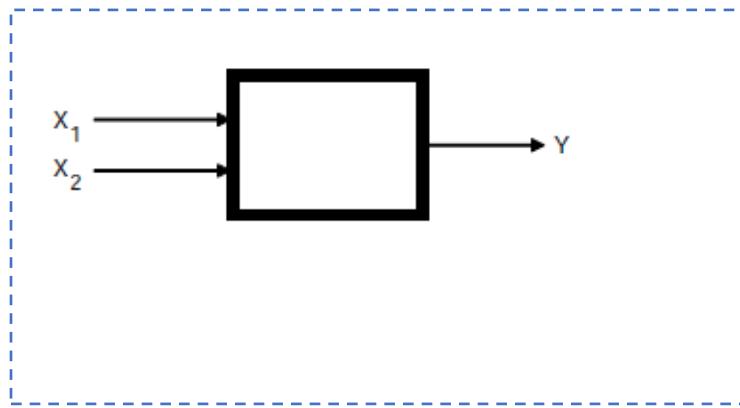


Figure 4.6: Processus avec deux flux entrants et un flux sortant

Dans cet exemple la valeur moyenne et l'écart type des flux en entrée sont connus ou estimés ce qui permet de déduire la variance des variables d'entrée X_1 et X_2 . La moyenne arithmétique et l'écart type des variables d'entrée sont connus et définis respectivement comme $E(X)$ et σ

$$\mu_1 = E(X_1) = 90, \sigma_{X1} = 9 (= 10\% \text{ de } X_1)$$

La variance est donc déduite :

$$Var(X_1) = \sigma_{X1}^2 = 81$$

Et

$$\mu_2 = E(X_2) = 60, \sigma_{X2} = 6 (= 10\% \text{ de } X_2)$$

$$Var(X_2) = \sigma_{X2}^2 = 36$$

L'application de la loi de Gauss (4-18) conduit à établir les relations suivantes :

$$E(Y) \approx (X_1 + X_2) = E(X_1) + E(X_2)$$

$$Var(Y) \approx Var(X_1 + X_2) = Var(X_1) + Var(X_2) + [2 * Cov(X_1, X_2)]$$

Si les variables X_1 et X_2 sont indépendantes, leur covariance est nulle. Cela mène à :

$$Var(X_1 + X_2) = Var(X_1) + Var(X_2) = \sigma_{X_1}^2 + \sigma_{X_2}^2$$

Ainsi, on calcule la moyenne et l'écart type en sortie du système de la manière suivante :

$$E(Y) \approx 90 + 60 = 150$$

$$Var(Y) \approx 81 + 36 = 117 \rightarrow \sigma_Y = \sqrt{117} = 10,8 (= 7,2\% \text{ de } Y)$$

Par cet exemple, Il est alors possible de regrouper plusieurs flux indépendants (entrant ou sortant) en un seul flux en appliquant les expressions (4-19) et (4-20).

$$\mu_T = \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (4-19)$$

$$\sigma_T = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} \quad (4-20)$$

Ou μ_T est la valeur moyenne globale des flux indépendants en entrée ou en sortie du système, σ_T est l'écart type global des flux indépendants en entrée ou en sortie du système

4.2.2 Réconciliation des données

Selon Bonnin [19] deux cas doivent être pris en compte : soit le système est redondant, c'est-à-dire qu'il y a moins d'inconnues que d'équations, soit le système n'est pas redondant. Si le système est redondant, l'objectif de la réconciliation est de satisfaire la conservation de la masse. Dans cette étude, les données proviennent de diverses sources, la conservation de la masse est rarement vérifiée et une étape de réconciliation est nécessaire pour parvenir à la satisfaire. Les valeurs manquantes sont estimées à partir de valeurs connues. Tout ce qui suit ci-dessous aide à mieux apprécier la réconciliation des données :

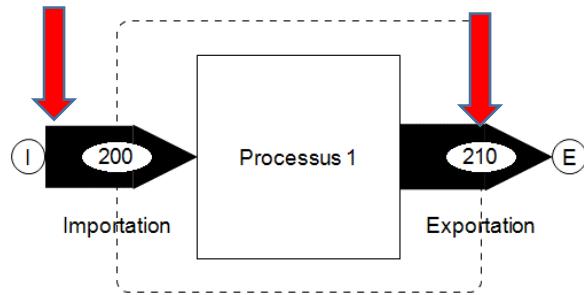


Figure 4.7: Exemple simplifié d'un modèle AFM

Dans le processus 1 (figure 4.7), aucune accumulation de stock n'est observée, suivant ainsi la loi de conservation de masse, le flux d'importation devrait être égal au flux d'exportation. Il y a en effet une contradiction dans les données. Ces problèmes peuvent être résolus par la réconciliation des données. Mais il y a deux conditions à satisfaire :

- Le système doit comporter plus d'équations que de variables inconnues (Système redondant).
- Les données doivent être normalement distribuées (les variables de mesure sont indépendantes).

À partir de la réconciliation, les valeurs moyennes des données incertaines seront modifiées de manière que les contradictions disparaissent. Une solution est trouvée lorsque la somme des carrés des écarts à la moyenne atteint un minimum (méthode des moindres Carrés). L'écart-type (facteur de qualité) ou la racine carrée de la variance des quantités incertaines est utilisée comme mesure de dispersion autour de la moyenne. Les scénarios ci-dessous sont des illustrations servant à mieux comprendre les résolutions mathématiques permettant de réconcilier les données. Les figures 4.8, 4.10 et 4.12 montrent toujours la situation avant la réconciliation, et les figures 4.9, 4.11 et 4.13 indiquent la situation après la réconciliation des données.

Scenario 1 :

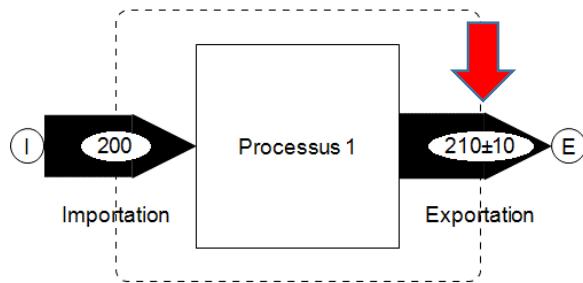


Figure 4.8: Système AFM avant réconciliation avec des flux bruts en entrée et en sortie. Les valeurs moyennes des flux entrants et sortants sont différentes et seul le flux sortant possède une incertitude

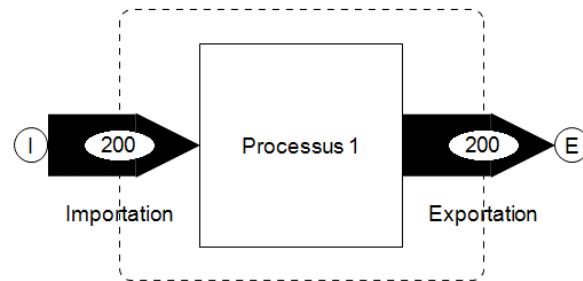


Figure 4.9: Système AFM après réconciliation des flux bruts en entrée et en sortie

Sur la figure 4.8, le flux en entrée (importation) est différent du flux en sortie (exportation) à cause de l'existence de l'écart type de 10 du flux d'exportation et une différence entre les valeurs moyennes en entrée (200) et en sortie (210). Il est possible d'affirmer dans ce cas précis que les données proviennent de deux sources différentes d'où la nécessité de réconcilier les données. Après la réconciliation (figure 4.9), le flux d'exportation est modifié, car il est le seul flux à avoir une incertitude ($\pm 4,7\%$ de la valeur moyenne). Le flux d'exportation est égal au flux d'importation d'où la valeur de 200 de part et d'autre. Le logiciel STAN considère que les valeurs sans incertitude insérées par l'analyste sont plus certaines car il ne peut deviner ou distinguer la qualité de la source. Alors cette hypothèse est vraie si et seulement si la précision de mesure du flux d'importation est de 100%.

Scenario 2 : Considérons avant la réconciliation (figure 4.10), le flux brut en entrée $X1=200$ avec un écart type $\sigma_1=10$ et le flux brut en sortie $X2=210$ avec un écart type $\sigma_2=10$. Dans ce scenario, les écarts types des variables sont identiques.

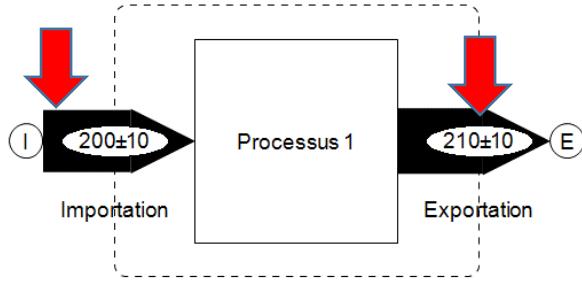


Figure 4.10: Système AFM avant réconciliation avec des flux bruts en entrée et en sortie. Les Valeurs moyennes des flux entrants et sortants sont différentes et les écarts types sont les mêmes.

La seule différence entre les scénarios 1 et 2 (avant la réconciliation) est l'existence d'une incertitude sur les flux d'importation et exportation. STAN établit les équilibres en supposant que l'entrée et la sortie sont des variables dépendantes selon la loi de la conservation de masse (entrée=sortie). Ainsi la moyenne (\bar{X}) et l'écart type sur la moyenne $\sigma(\bar{X})$ des variables X_1 et X_2 peuvent se calculer par application des formules suivantes :

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4-21)$$

$$\sigma(\bar{X}) = \frac{\sigma_i}{\sqrt{n}} \quad (4-22)$$

Les valeurs moyennes des importations et des exportations sont modifiées dans la même mesure (+/-5) et leurs écarts types ont été réduits à 7. Ainsi, les flux en entrée et en sortie deviennent 205 ± 7 après réconciliation (figure 4.11).

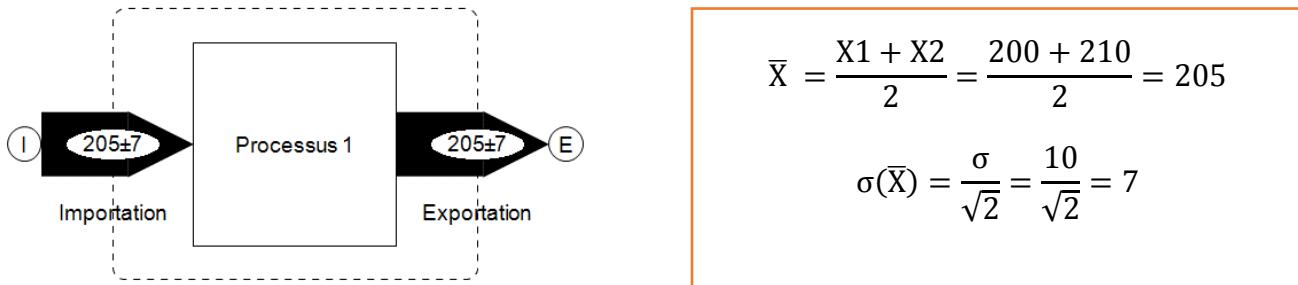


Figure 4.11: Système AFM après réconciliation des données du scénario 2.

Scénario 3 : Considérons avant la réconciliation (figure 4.12), le flux brut en entrée $X_1=200$ avec un écart type $\sigma_1=5$ et le flux brut en sortie $X_2=210$ avec un écart type $\sigma_2=10$. Cette situation présente des valeurs brutes, et des écarts types différents.

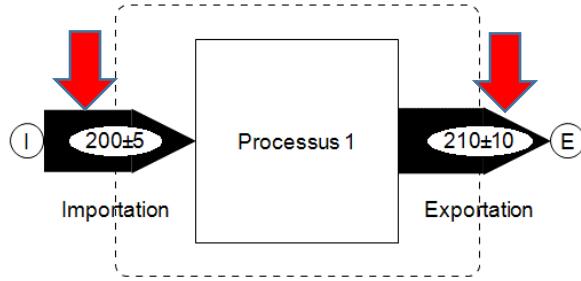


Figure 4.12: Système AFM avant réconciliation avec des flux bruts en entrée et en sortie. Les valeurs moyennes et les écarts types des flux entrants et sortants sont différents.

La valeur réconciliée \bar{X} des flux en entrée et sortie après réconciliation partielle se détermine selon l'expression (4-23) :

$$\bar{X} = X_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \times (X_2 - X_1) \quad (4-23)$$

L'équation 4-23 peut encore s'écrire de la manière suivante :

$$\bar{X} = X_2 - \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \times (X_2 - X_1) \quad (4-24)$$

L'écart type réconcilié s'obtient selon l'équation (4-25).

$$\sigma(\bar{X}) = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 \times \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (4-25)$$

Où X_1 est la valeur du flux brut en entrée (soit égale à 200 pour ce scenario), X_2 est la valeur du flux bruts en sortie (soit égale à 210 dans cet exemple). En effet, la réconciliation des données s'effectue en appliquant l'équation 4-23 ou l'équation 4-24 (voir figure 4.13).

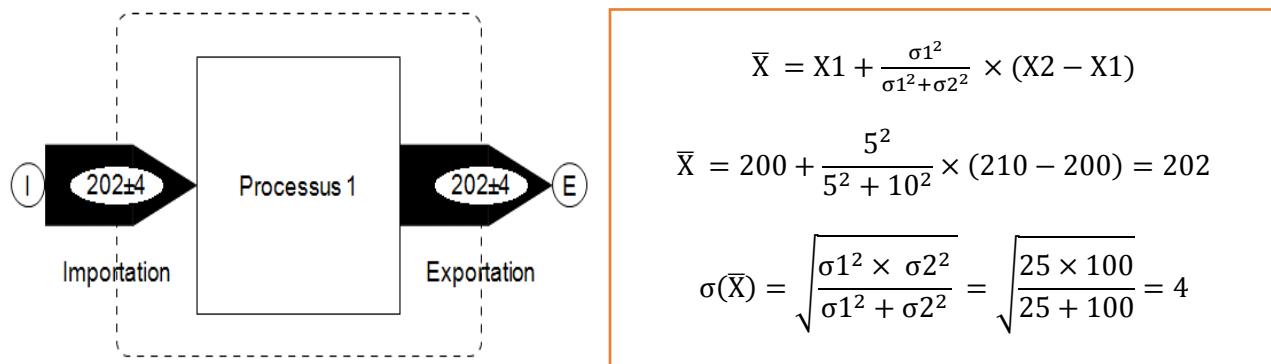


Figure 4.13: Système AFM après réconciliation des données du scenario 3.

Il faut noter que la réconciliation des données faite ci-dessus est partielle. Cependant, le système à l'étude contient plusieurs processus et plusieurs flux entrés/sortis qui sera réconcilié globalement dans STAN. Le logiciel STAN effectue de manière automatique la réconciliation à l'aide de ses modules de calcul (module Cencic 2012 et module Kelly 2011).

CHAPITRE 5 RÉSULTATS

5.1 Présentation globale des résultats

Le résultat de l'AFM du cuivre au Québec est présenté à la figure 5.1 sur la base du module de calcul Cencic 2012. Elle montre les quantités des flux et stock de cuivre à l'intérieur des frontières du système (la production, les importations et exportations, les pertes en tant que déchets ou émissions, le recyclage, etc). Chaque boîte représente une étape de la chaîne du cuivre. Les flux avec un “I” entouré représentent les importations, les flux avec un “E” entouré concernent les exportations, les autres flux circulent à l'intérieur du système. Les nombres au-dessus des flèches donnent la valeur des flux en Gigagramme ou kilotonne (1Gg= 1kt) et l'incertitude est exprimée sous forme de pourcentage. Par exemple les flux et stocks avec une incertitude de $\pm 10\%$ ou encore un écart type de 10% de la valeur moyenne indiquent que la valeur réelle se situe dans l'intervalle $[\mu - 10\% \mu ; \mu + 10\% \mu]$. Ainsi, un flux de $(1 \pm 10\% \text{ t/a})$ montre que la valeur réelle du flux se situe entre 0,9 t/a et 1,1 t/a. Les flèches en bleu indiquent une valeur calculée par le logiciel en tenant compte de la conservation de masse, les flux en rouge sont sujets d'hypothèses définies à la section 4.1, les flèches en pointillée représentent les pertes dans l'environnement. Les processus en jaune (production de métal primaire et transformation métallique) possèdent des sous-systèmes permettant de mettre en exergue les grands joueurs (HORNE, CCR, NEXAN) intervenant dans ces différents processus au Québec. En résumé, les flux les plus importants prennent place dans les premières étapes du cycle de vie du cuivre, notamment aux étapes de production de métal primaire et de transformation métallique. Ces deux secteurs font en sorte que les exportations à ces deux étapes sont les principaux flux qu'on trouve dans le système. Cependant, les capacités de l'industrie de transformation et de production de métal primaire au Québec ne peuvent pas combler la demande en cuivre. D'importants volumes d'importation de cuivre sont alors observés aux étapes de production de métal primaire (soit un total 256 kt/an) et de transformation métallique (soit un total 115 kt/a). On peut également observer une grande quantité de métal en stock (2 263 kt) dans la phase d'utilisation, qui correspond au métal présent dans les biens de consommation, les infrastructures, les véhicules, les bâtiments, etc. Chaque étape du cycle de vie du cuivre est détaillée par la suite enfin de mieux cerner la circulation des flux au sein de la province du Québec. Il faut noter que toutes les valeurs de flux indiquées ci-dessous concernent uniquement la valeur physique de la

matière à l'étude (cuivre). Par exemple en mentionnant 37 kt/a de cathode de cuivre cela signifie qu'il s'agit de 37 kt de cuivre contenu dans les cathodes de cuivre sur une période d'une année.

$$\sum U_{imp}$$

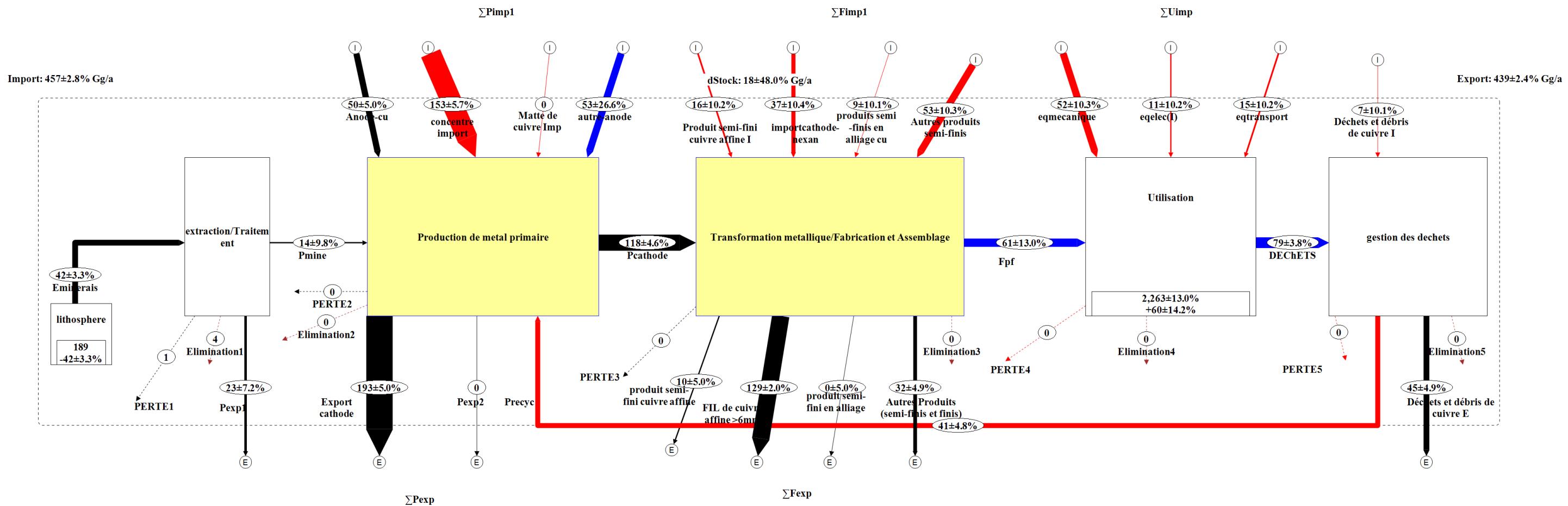


Figure 5.1: Flux et stocks de cuivre au Québec en 2014

5.2 Étape d'extraction et de traitement du minerai de cuivre

Du minerai de cuivre est extrait du sous-sol Québécois puis transformé en concentré dont la teneur moyenne en cuivre est de 26 %. Les différentes compagnies minières qui assurent ces processus d'extraction et de concentration sont détaillées dans le tableau 2.2. Il n'y a pas d'importation dans cette étape car il est désavantageux (cout élevés) d'importer du minerai dont la teneur en cuivre se situe entre 0,6 à 5%. L'expression mathématique qui définit les relations entrées/sorties de cette étape est :

$$P_{\text{Entrée-1}} = \sum E_{\text{Minerais}} \quad (5-1)$$

$$P_{\text{Sortie-1}} = P_{\text{Mine}} + P_{\text{Exp1}} + \sum \text{Pertes} \quad (5-2)$$

Ou $P_{\text{entree-1}}$ représente les flux entrants dans la première étape du cycle (extraction et de concentration) ; il concerne uniquement dans ce cas de figure le minerai de cuivre (E_{minerais}). P_{sortie} est égale aux flux de cuivre qui sortent de l'étape d'extraction et de concentration tels que la production du concentré de cuivre des sociétés minières restant au Québec (P_{mine}), l'exportation nette de concentré de cuivre vers diverse zone (P_{exp1}) et les différentes pertes ($\sum \text{Pertes}$). Les pertes de cuivre dans l'environnement (sol, air et eau) soient 1kt/a et les pertes de cuivre sur site ou hors site sous forme de déchets soit 4 kt/a (enfouissement...). L'équation (5-3) répond à la loi de la conservation de la masse et tient compte uniquement de la valeur moyenne.

$$P_{\text{Entrée-1}} = P_{\text{Sortie-1}} = 42 \text{ kt/a} \quad (5-3)$$

En considérant l'écart type dans le bilan de masse on obtient un ordre de grandeur des flux en entrée et en sortie susceptible d'être acceptable selon l'intervalle :

$$39 \text{ kt/a} \leq (P_{\text{Entrée-1}} = P_{\text{Sortie-1}}) \leq 45 \text{ kt/a} \quad (5-4)$$

Les différentes valeurs des flux Entrés/Sortis (E/S) sont répertoriées dans le tableau 5.1. Il présente le nom du flux, le flux brut (avant réconciliation de données), le flux réconcilié (après réconciliation des données), la contribution de chaque flux par rapport au total d'entrée ou sortie ainsi que le code de couleurs décrit à la section 4.2.1 . Il faut remarquer (tableau 5.1) que les écarts types réconciliés des flux entrants et sortants du système sont en couleur verte, cela montre une qualité élevée de la donnée collectée. Le minerai de cuivre extrait et les concentrés de cuivre présentent une très forte

contribution. Comme tous les écarts types sont faibles on peut donc affirmer une confiance des valeurs de flux en entrée et en sortie à cette première étape du cycle de vie du cuivre.

Tableau 5.1 : Récapitulatif des valeurs des flux à l'étape 1 du cycle de vie du cuivre au Québec

	Nom du flux	Flux Brut [kt/a]	Flux réconcilié [kt/a]	Contribution du flux
Entrée	E _{minerais}	40,8±3.8%	42±3.3%	100%
	P _{Mine}	14,6±10.2%	14±9.8%	33%
	P _{exp1}	26,1±10%	23±7.2%	55%
Sortie	PERTE1	0,6	1	2%
	Elimination1	4,4	4	10%

Il est aussi judicieux de déterminer le taux de rétention du cuivre (ε_1) dans le périmètre Québécois à l'étape d'extraction/concentration. Il peut être défini comme le rapport entre la masse utile de cuivre en sortie du système, et celle fournie en entrée. Étant à la première étape du cycle, ce taux de rétention est donc le rapport entre la production du concentré de cuivre des mines (P_{Mine}) et du minerai de cuivre en entrée E_{minerais}. Le taux de rétention est formulé de la manière suivante :

$$\varepsilon_1 = \frac{P_{\text{Mine}}}{E_{\text{Minerais}}} \quad (5-5)$$

Le taux de rétention de la ressource de cuivre dans cette première étape est de 0.33 t/t ce qui veut dire qu'il y'a environ 0.33 t de concentré de cuivre par tonne de minerais de cuivre qui sont utilisés au Québec. Le reste (67%) est perdu dans l'environnement ou exporté hors Québec. Bien que les besoins en matière première (concentré de cuivre) de la fonderie ne soient comblés, les industries minières traitent tout le minerai de cuivre extrait au Québec mais la majorité du produit obtenu (concentré de cuivre) est attribué aux exportations à cause des opportunités du marché extérieur (rentabilité financière).

5.3 Étape de production de métal primaire

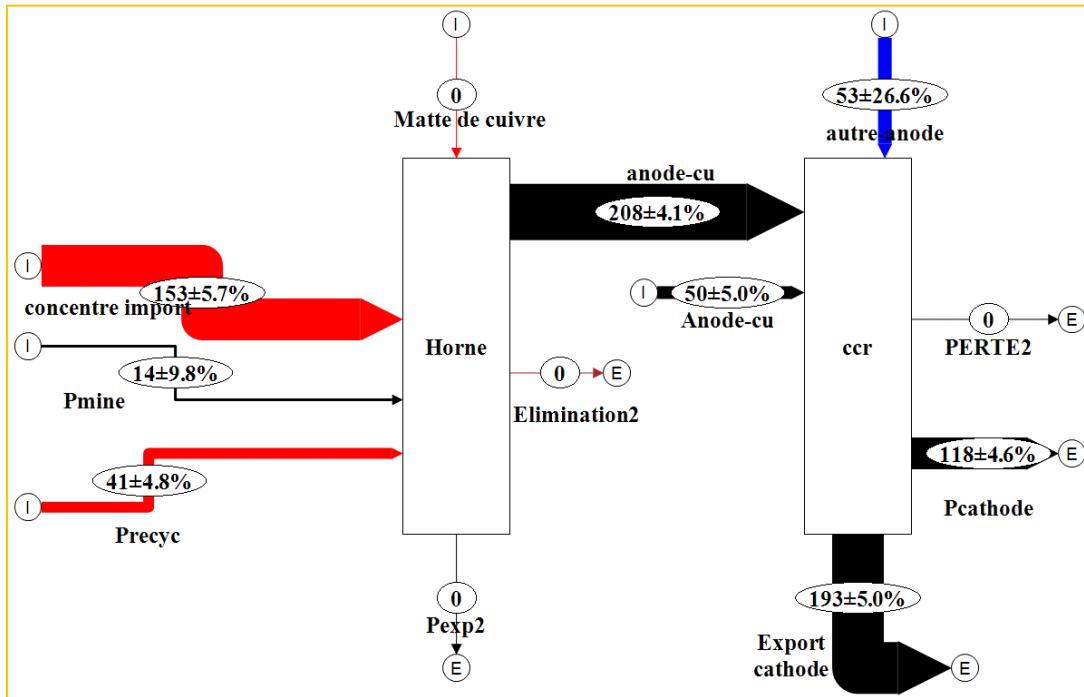


Figure 5.2: Sous système de l'étape de Production de métal primaire

La production du cuivre inclue celle des anodes et des cathodes de cuivre. Au Québec, les concentrés de cuivre provenant des mines soient $14\pm9,8\%$ kt/a (33% du cuivre extrait) sont vendus à la Fonderie Horne à un coût de 7,63 \$/kg, le reste est exporté vers diverse zone ($P_{exp1}=23 \pm 7,2\%$ kt/a) à un cout de 7,09 \$/kg. Il faut remarquer aussi que cette même compagnie importe environ $153 \pm 5.7\%$ kt/a (figure 5.2) de concentré à un coût de 17,52 \$/kg. Les coûts d'importation représentent plus de 2 fois les coûts d'exportation (hors Québec) et d'expédition (vers la fonderie Horne) de concentré de cuivre. Si la fonderie Horne achetait tout le concentré de cuivre provenant des mines Québécoise elle économiserait en moyenne 228 k\$/a; ce qui n'est pas négligeable. Il s'agit bien évidemment d'une condition et non d'une affirmation sur base d'une année de référence. Les concentrés de cuivre subissent une fusion à une température de 1200°C dans un réacteur pour former une matte dont la teneur en cuivre est de 70%. La matte est transférée dans le convertisseur Noranda pour être enrichie ; le cuivre ainsi obtenu est acheminé dans des fours de pyro-affinage où l'on élimine les impuretés restantes par oxydation et scorification. Le cuivre est finalement rendu pur à 99,1% et moulé en anodes ($208\pm4,1\%$ kt/a). Les anodes de cuivre sont récupérées par l'Affinerie CCR, de Montréal-Est, pour une dernière étape de transformation. Le cuivre sera purifié à 99,99

% puis vendu sur le marché sous forme de cathode de cuivre ($118 \pm 4,6\%$ kt/a restent au Québec et $193 \pm 5\%$ kt/a sont exportées). Les exportations de cathodes de cuivre sont aussi élevées (soit 62% du total des cathodes produites par l'affinerie CCR). On note également que la fonderie Horne récupère du cuivre et des métaux précieux à partir de matières recyclées ($41 \pm 4,8\%$ kt/a). En résumé, des expressions mathématiques sont établies pour mettre en évidence la relation des flux en entrée et en sortie de l'étape de production de métal primaire (voir les équations 5-6 et 5-7). Dans cette étape, nous faisons l'hypothèse que ces compagnies n'entreposent pas leur production de cuivre pour une période dépassant l'année ; c'est à dire pas d'accumulation de stock.

$$P_{\text{Entrée-2}} = P_{\text{Mine}} + P_{\text{Recyc}} + \sum P_{\text{Imp1}} \quad (5-6)$$

$$P_{\text{Sortie-2}} = P_{\text{cathode}} + P_{\text{Exp2}} + \sum \text{Pertes} \quad (5-7)$$

Ou $P_{\text{Entrée-2}}$ représente tous les flux d'entrées de cuivre dans la deuxième étape du cycle (production métal primaire) incluant : la production du concentré de cuivre des compagnies minières (P_{mine}), les importations nette de cuivre sous forme d'anode, de concentré, et de matte ($\sum P_{\text{Imp1}}$), et le cuivre récupéré à partir des matières recyclées (P_{recyc}). Les flux sortants de l'étape de production $P_{\text{Sortie-2}}$ sont composés de la production de cathode de cuivre qui est transformée uniquement par les sociétés Québécoise (P_{cathode}), les exportations nettes de cuivre sous forme de cathode et de matte (P_{exp2}) et les différentes pertes de cuivre par émission et par enfouissement ($\sum \text{Pertes}$). L'équation 5-8 indique que la conservation de masse est vérifiée et les étapes suivantes (transformation métallique et fabrication) peuvent être poursuivies.

$$P_{\text{Entrée-2}} = P_{\text{Sortie-2}} = 311 \text{ kt/a} \quad (5-8)$$

Avec l'écart type réconcilié le bilan de ce processus élémentaire devient :

$$282 \text{ kt/a} \leq (P_{\text{Entrée-2}} = P_{\text{Sortie-2}}) \leq 340 \text{ kt/a} \quad (5-9)$$

Les différentes valeurs des flux entrés/sortis (E/S) sont présentées dans le tableau 5.2. On peut remarquer dans ce tableau que la majorité des flux sont en verts excepté le flux « autre anode » qui est en orange. Ce flux présente un écart type de $\pm 26.6\%$ (qualité faible) et une contribution de 17% du total des flux en entrée (taille moyenne). Cette faible qualité est due à la méconnaissance du flux brut (autre anode) ; il est calculé par le logiciel afin d'équilibrer le bilan en appliquant la loi

de conservation de la masse. Ce flux « autre anode » peut être plus raffiné si l'affinerie CCR s'implique davantage. Tous les autres flux en entrée et en sortie du processus ont un écart type faible ; il n'est donc pas nécessaire d'apporter des améliorations sur ces données.

Tableau 5.2 : Récapitulatif des valeurs des flux à l'étape 2 du cycle de vie du cuivre au Québec

	Nom du flux	Flux brut [kt/a]	Flux réconcilié [kt/a]	Contribution des flux
Entrée	Anode-cu importée	49,8±5%	50±5%	16%
	Precyc	40,5±5%	41±4.8%	13%
	Pmine	14,6±10.2%	14±9.8%	5%
	concentré import	145,6±10%	153±5.7%	49%
	autre-anode	Pas connu ¹⁷	53±26.6%	17%
	Matte de cuivre Imp	0,1	0	
Sortie	Pcathode	122,6±5%	118±4.6%	38%
	Export cathode	192,9±5%	193±5%	62%
	Perte2 (environnement)	0,08	négligeable	
	Pexp2	0,46	négligeable	
	Élimination2	0,04	négligeable	

¹⁷ La valeur brute du flux n'est pas connue, elle est estimée en appliquant la loi de la conservation de la masse et le résultat se trouve dans la colonne 4 et à la ligne 6 du tableau 5.2

Les flux bruts et réconcilié sont presque identiques, aucune variation aberrante n'est identifiée après la réconciliation des données. Le taux de rétention du cuivre (ε_2) dans le périmètre Québécois à l'étape de production est de 0.44 t/t ce qui veut dire qu'il y'a environ 0.44 t de cathode par tonne de cuivre en entrée sous forme de concentré, d'anodes et de matte de cuivre. Une fois de plus, le produit raffiné obtenu après transformation du concentré de cuivre est en majorité exporté du Québec. Le cuivre récupéré à partir des matières recyclées (P_{recyc}) n'est pas pris en compte dans le calcul du taux de rétention de la ressource dans cette étape car le recyclage se fait à l'intérieur de la fonderie, ce n'est donc pas un apport de marché.

$$\varepsilon_2 = \frac{P_{Cathode}}{P_{Mine} + P_{Imp}} \quad (5-10)$$

En considérant que 200 kilotonnes (la somme de P_{recy} , P_{Mine} et **concentre Import**) de concentré de cuivre et de fondant sont introduits dans le réacteur (ou four) de la fonderie HORNE, la quantité de chaleur disponible par an est environ 160 000 GJ selon l'équation 4-7. Cette chaleur peut être récupérée par un moteur Stirling couplé à un générateur pour fournir une puissance électrique à la sortie d'une centrale électrique. Elle peut aussi être utilisée directement pour combler les besoins en chaleur. En appliquant par exemple un rendement global de 30%, l'énergie électrique potentiellement récupérable annuellement serait de 48 000 GJ soit 13 GWh (avec une incertitude de 25%).

5.4 Étape de transformation métallique et de fabrication/assemblage

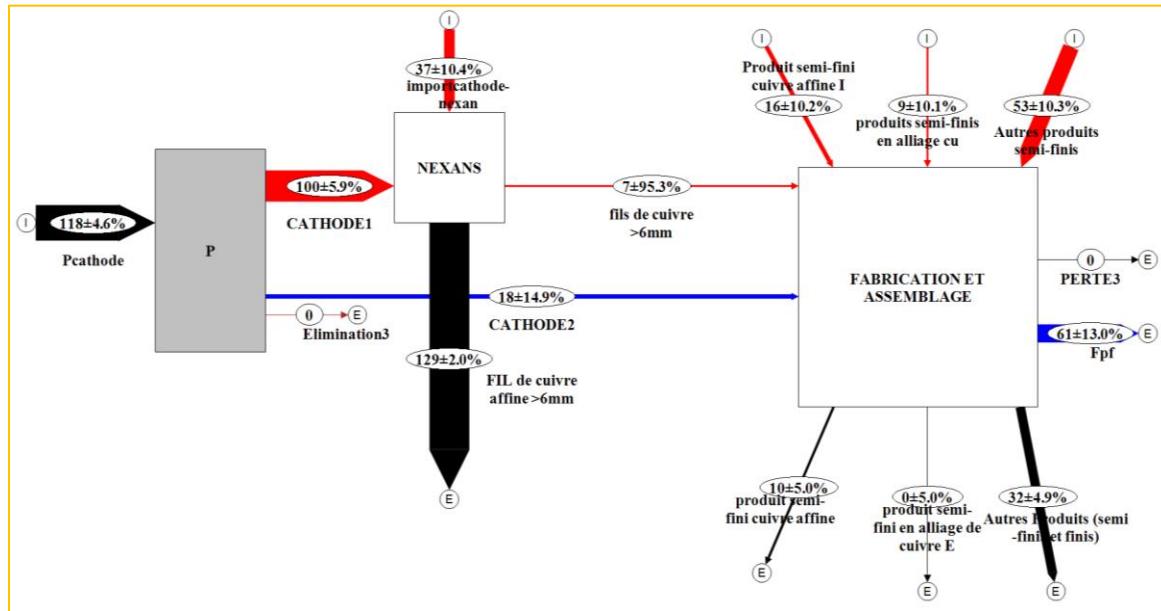


Figure 5.3: Sous système du processus de transformation métallique, fabrication et assemblage

Cette étape est composée des processus de transformation métallique et de fabrication/assemblage. A partir du cuivre raffiné des produits semi-finis et finis sont fabriqués au Québec. Toutes les marchandises semi-finies sont assemblées pour former soit des produits finis ou encore d'autres produits semi-finis. La transformation métallique est principalement la production de feuille, de barre, de tube, de connecteur et de fil de cuivre ou alliage. Quant à l'assemblage, il s'agit essentiellement des produits finis (véhicules, groupe électrogène...). Un focus sur l'entreprise Nexans¹⁸ est fait dans cette étape du cycle comme étant un sous-système dans le modèle AFM (figure 5.3). En effet, cette compagnie achète plus de 84% des cathodes expédiée à l'intérieur du Québec par l'affinerie CCR et occupe une place importante sur le marché mondial en tant que fournisseur de fils machine de cuivre. Le reste des cathodes (18 ± 14,9% kt/a) est acheminé vers le processus de fabrication/assemblage. Les produits semi-finis contenant du cuivre sont principalement destinés à l'exportation et il s'agit principalement des fils de cuivre affiné (la section transversale excède 6 mm) fabriqué par Nexans (129 ± 2% kt/a de cuivre soit 83 % du total des sorties du processus de

¹⁸Nexans Entreprise de Production de fil machine http://www.nexans.ca/eservice/Canada-fr_CA/navigatepub_0_18095/Pour_plus_d_information_sur_la_Metallurgie_Fil_Mac.html

transformation métallique) et seulement 25 kt de fils de cuivre sont envoyés vers le processus de fabrication/assemblage. En désagrégant le flux entrant « produit semi fini en cuivre affiné » dont sa valeur est $16\pm10,2\%$ kt/a (figure 5.3) ; on garde toujours à l'esprit que toutes les valeurs représentent la quantité de cuivre contenu dans le produit et non celle du produit lui-même. La province produit des fils de cuivre, exporte la majorité, utilise une quantité qui ne peut combler ces besoins et se retrouve dans l'obligation d'importer cette même marchandise. En effet, le taux de rétention du cuivre à l'étape de la transformation métallique est de 18%. Le Québec transforme une grande quantité de métal primaire (cathode de cuivre) mais retient moins la matière (cuivre) à l'intérieur de son périmètre à cette étape du cycle. Les trois quarts du cuivre du processus de fabrication et d'assemblage proviennent de l'étranger avec 78 kt (somme des importations des 3 catégories de produits), le reste résulte du secteur de la transformation métallique (25 kt). Les flux d'importation et d'exportation de cuivre dans le processus de fabrication/assemblage sont subdivisées en 3 catégories de produits (produits semi finis en cuivre affinée, des produits semi-finis en alliage de cuivre et les autres produits semi-finis en cuivre). Les différentes marchandises dans chacune des catégories sont spécifiées en annexe A. Les sorties sous forme de pertes à l'environnement et d'élimination sont négligeables. Le Québec utilise environ 61 kt de cuivre contenu dans les produits finis. On observe aussi que 32 kt de cuivre ont été exportés en 2014 selon le flux sortant « autres produits semi finis et finis en cuivre » et se trouve principalement dans :

- de la machinerie industrielle (coupeuses de tous types pour la pâte à papier, machines et appareils de levage-chargement-déchargement ou de manutention, machines et appareils pour la production du froid, chasse-neige etc.), qui représente 63 % du total des exportations de cuivre du flux sortant « autres produits semi finis et finis en cuivre » ;
- des appareils électriques (conducteurs électriques, interrupteurs-sectionneurs-commutateurs électriques, transformateurs électriques, etc.), 23 % du total des exportations du flux sortant « autres produits semi finis et finis en cuivre » ;
- du transport (camions à moteur diesel/semi-diesel, automobiles, remorques et semi-remorques pour le transport de marchandises, etc.), 14% du total des exportations du flux sortant « autres produits semi finis et finis en cuivre ».

Selon Bihouix la capacité technologique ou économique à repérer les différents métaux ou à les séparer est donc limitée (Bihouix, 2015). En décomposant ainsi le flux de la catégorie « produits

semi fini en alliage Cu» dont tous les produits sont désignés en annexe A-2, on constate que le cuivre en terme de quantité exportée est majoritairement présent dans les tubes et tuyaux en alliage (66% du total des exportations de produits en alliage de cuivre 0,42 kt/a), barres-tiges-profilés en alliage (12%), fils en alliage (11%) et le reste des produits en alliage de cuivre représente 11% (figure 5.4). Étant donné qu'il est souvent difficile de récupérer le métal contenu dans les alliages à cause de leur faible teneur (séparation complexe), alors on pourrait concevoir idéalement ces marchandises avec moins d'alliage (écoconception).

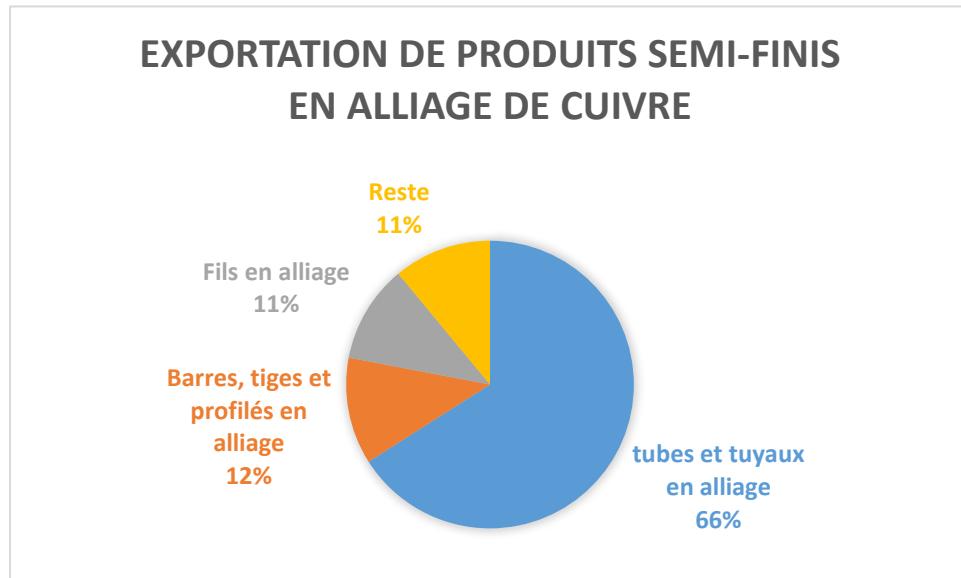


Figure 5.4: Proportion du cuivre présent dans les produits semi-finis en alliage de cuivre

Les équations mathématiques (5-11 et 5-12) montrent les relations entre les flux entrants et sortants dans cette étape :

$$F_{\text{Entrée}} = P_{\text{cathode}} + \sum F_{\text{Imp}} \quad (5-11)$$

$$F_{\text{Sortie}} = F_{\text{PF}} + \sum F_{\text{Exp}} + \sum \text{Pertes} \quad (5-12)$$

$F_{\text{Entrée}}$ représente tous les flux entrants dans l'étape de transformation métallique et de fabrication/assemblage ; il s'agit principalement des cathodes qui sont livrées aux compagnies de la transformation métallique majoritairement à Nexan Canada (P_{cathode}) et des importations nettes de cuivre. F_{sortie} représente tous les flux sortants de l'étape de fabrication regroupant les produits finis qui sont directement utilisés au Québec (F_{PF}), des exportations nettes de produits semi-finis et finis et les pertes de cuivre dans l'environnement. L'applicabilité du bilan massique est ainsi prouvée (équation 5-13).

$$F_{\text{Entrée}} = F_{\text{Sortie}} = 233 \text{ kt/a} \quad (5-13)$$

En tenant compte des écarts type réconciliés, l'ordre de grandeur des flux physiques de tous les intrants et sortants à cette phase du cycle se réduit à l'inégalité suivante :

$$216 \text{ kt/a} \leq (F_{\text{Entrée}} = F_{\text{Sortie}}) \leq 250 \text{ kt/a} \quad (5-14)$$

Le tableau 5.3 renseigne que les écarts types réconciliés des flux entrant et sortant sont faibles ($\sigma < 11\%$) excepté celui du flux Fpf (produits finis fabriqués et utilisés au Québec). On pourrait penser que la donnée qu'il faut raffiner davantage dans cette étape est celle du flux Fpf dont la valeur est calculée automatiquement par le logiciel STAN ($11\%\mu \leq \sigma \leq 25\%\mu$ et $20\% < C \leq 50\%$). Cependant, en regroupant tous les flux d'importations et tous les flux d'exportations par application des formules 4-19 (valeur moyenne) et 4-20 (incertitude en pourcentage) on obtient la figure 5.5. Tous les flux en importation ont une contribution de près de 49% par rapport au total des flux d'entrées avec une incertitude de 20,5% (faible qualité due aux hypothèses émises sur les données en importation) il devient la principale cause de l'incertitude observée du flux Fpf. En effet, cette affirmation se justifie par le fait que le flux P_{cathode} (cathodes de cuivres produites par l'affinerie CCR) représente la plus grande contribution ($C=50\%$) des flux en entrée avec une faible incertitude (4,6%), les flux d'exportations représentent la plus grande contribution ($C=73\%$) des flux en sortie et dont l'incertitude est faible, il reste donc à évaluer la qualité de l'ensemble des flux d'importation. Se rendre auprès des milliers de fabricants de produits semi-finis et finis au Québec pour connaître avec exactitude les quantités de produits importées, exportées, produites avec leurs teneurs en cuivre est une solution pour réduire l'incertitude.

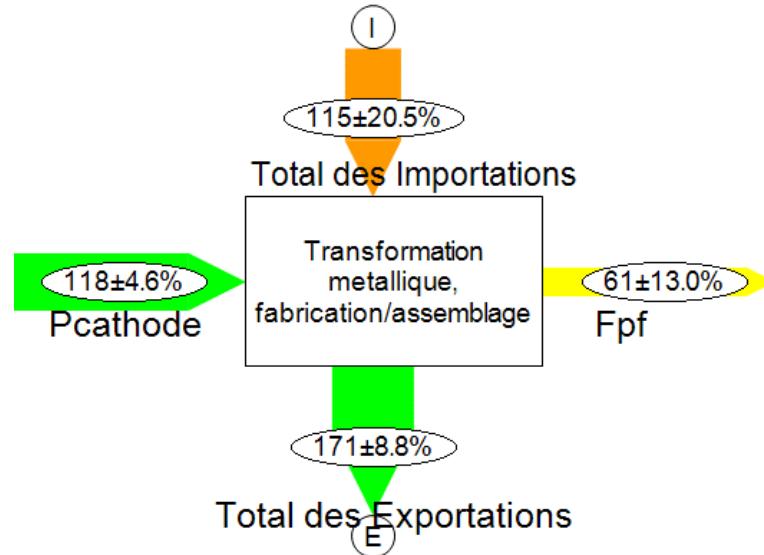


Figure 5.5 : Schéma simplifié de l'étape de transformation, de fabrication/assemblage représentant le regroupement des flux d'importation et d'exportation.

Tableau 5.3 : Récapitulatif des valeurs des flux à l'étape 3 du cycle de vie du cuivre au Québec

	Nom du flux	Flux brut [kt/a]	Flux réconcilié [kt/a]	Contributions des flux
Entrée	Pcathode	122,6±5%	118±4.6%	50%
	Produits semi-finis en alliage cu	9,2±10%	9±10.1%	4%
	Produit semi-fini cuivre affiné I	16,8±10%	16±10.2%	7%
	Import cathode-Nexan	38,9±10%	37±10.4%	16%
	Autres produits semi-finis	58,3±10%	53±10.3%	23%
Sortie	Produit semi-fini cuivre affiné E	9,92±5%	10±5%	4%
	Produit semi-fini en alliage de cuivre E	0,4±5%	0,4±5%	0,1%
	Fpf	Pas connu	61±13%	26%
	Fil de cuivre affine >6mm	128±2%	129±2%	55%
	Autres produits semi-finis	31,4±5%	32±4.9%	14%
	PERTE3	0,01	0	
	Élimination3	0,29	0	

5.5 Étape d'utilisation

Les produits finis (annexe A-4) sont utilisés en entrée de l'étape d'utilisation et génèrent des flux de déchets à gérer en sortie. En effet, l'étape d'utilisation est caractérisée par un grand stock et des entrées de produits finis via l'étape de fabrication/d'assemblage et des échanges de marchandises (importations). Les produits finis fabriqués dans la province (61 kt/a) et les importations de produits finis (78 kt/a) représentent des intrants d'une différence de taille d'environ 17 kt/a; le Québec seul ne peut combler la demande des utilisateurs car 56% du cuivre contenu dans les produits finis provient de l'extérieur. La plupart des produits importés rentrent dans le système via d'autres provinces ou pays. Le cuivre importé est principalement contenu dans :

- des équipements mécaniques et industriels, 57 kt, correspondant à 68 % de toutes les importations en utilisation;
- des appareils électriques (transformateurs électriques, groupes électrogène, appareils électromécaniques à moteur électrique incorporé etc), 12 kt soit 14 % du total des importations de cuivre au Québec se retrouve dans cette étape;
- des équipements de transport, 15 kt (automobiles à moteur à piston, camions à moteur à piston à allumage par étincelles, tracteurs, etc.), à 18 % du total des importations de cuivre.

Un stock d'environ 2 263 kt (équation 4-8) de cuivre est présent dans les biens ou produits finis utilisés aujourd'hui au Québec. Sa répartition dans les divers secteurs économiques est présentée à la figure 5.6. 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 (soit 1018 kt). Le deuxième contributeur au stock de cuivre en utilisation est celui des biens de consommation et autres équipements avec 31 % du total (soit 702 kt). Les secteurs des transports et de la machinerie contribuent chacun à 12 % du stock total (soit 272 kt chacun). Ce stock ne peut, bien sûr, pas être mobilisé immédiatement car il faut tenir compte des durées de vie des biens des différents secteurs. 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. On note pour 2014 une augmentation nette du stock de métal à l'étape d'utilisation de 60 kt/a, ce qui représente une augmentation annuelle de près de 2 % du stock en utilisation.

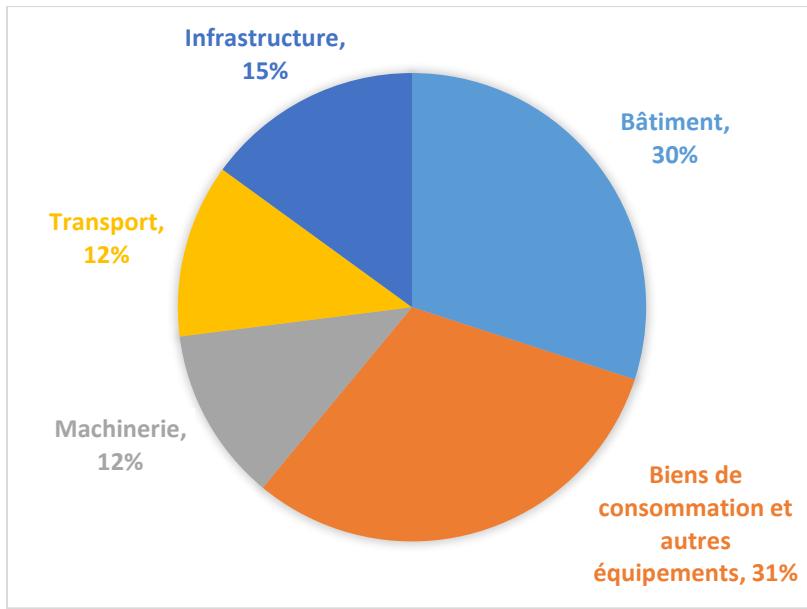


Figure 5.6: Répartition du stock de cuivre par secteur dans l'étape d'utilisation au Québec en 2014 (adapté d'ICSG, (2015)). Le stock total en utilisation est estimé à 2 263 kt

La formulation mathématique des flux d'entrée et sortie à l'étape d'utilisation est:

$$U_{\text{Entrée}} = \sum U_{\text{Imp}} + F_{\text{PF}} \quad (5-15)$$

$$U_{\text{Sortie}} = \text{Déchets} + \sum \text{Pertes} + \Delta S \quad (5-16)$$

où $U_{\text{Entrée}}$ représente tous les flux en entrée de l'étape d'utilisation. Il s'agit en effet, des produits finis qui sont uniquement fabriqués au Québec (F_{PF}) et tous les produits finis importées au Québec ($\sum U_{\text{Imp}}$). Les flux sortants sont principalement les déchets engendrés, et l'ensemble des pertes. On considère aussi la variation de stock en utilisation qui est calculée selon l'équation 4-9 (positive si ajout au stock, négative si on puise dans le stock). Elle est positive dans cette étape du cycle et égale à $+60 \pm 14,2\%$ après réconciliation des données. Pour équilibrer le bilan par rapport à la moyenne des flux, il faut tenir compte de cette variation ; d'où l'équation ci-dessous est vraie.

$$U_{\text{Entrée}} = U_{\text{Sortie}} = 139 \text{ kt/a} \quad (5-17)$$

En tenant compte des incertitudes, la conservation de masse peut être vérifiée sous forme d'intervalle par la relation suivante :

$$123 \text{ kt/a} \leq (U_{\text{Entrée}} = U_{\text{Sortie}}) \leq 155 \text{ kt/a} \quad (5-18)$$

Le tableau 5.4 indique que les écarts types réconciliés des flux entrants et sortants sont faible ($\sigma < 11\%$) excepté celui du flux Fpf dont l'explication décrit à la section (5.4). Le regroupement des flux d'importations est représenté dans la figure 5.7 en appliquant les formules 4-19 (valeur moyenne des flux) et 4-20 (incertitude en pourcentage). L'ensemble des flux en importation contribue à 56% du total des intrants avec une incertitude de 17.7% (la qualité est moyenne due aux hypothèses émises sur les données en importation). L'écart type de 14,2% lié à l'addition au stock de cuivre montre aussi que cette donnée est de qualité moyenne car sa valeur est basée sur des études faites hors Québec (France et aux Etats Unies).

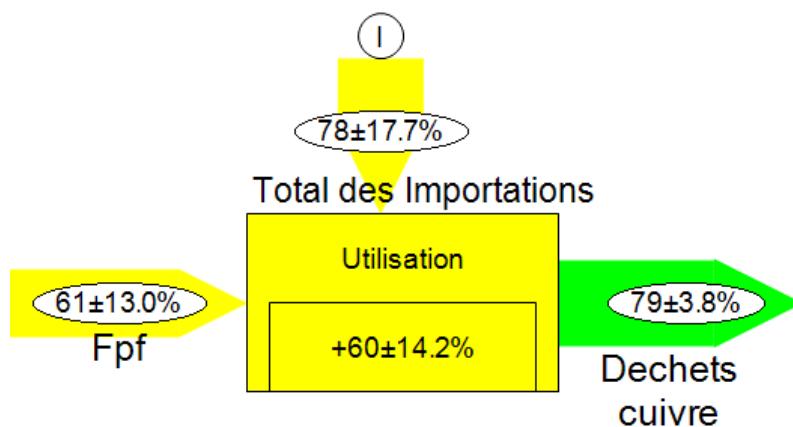


Figure 5.7: Schéma simplifié de l'étape d'utilisation représentant le regroupement de tous les flux d'importation.

Tableau 5.4 : Récapitulatif des valeurs des flux à l'étape 4 du cycle de vie du cuivre au Québec

	Nom du flux	Flux Brut [kt/a]	Flux réconcilié [kt/a]	Contributions des flux
Entrée	eqmecanique(I)	56,9±10%	52±10.3%	37%
	Fpf	Non connue	61±13%	44%
	eqelec(I)	11,5±10%	11±10.2%	8%
	eqtransport(I)	15±10%	15±10.2%	11%
Sortie	Déchets cuivre	Pas connu ¹⁹	79±3.8%	57%
	Perte4	0,065	négligeable	
	Élimination4	0,049	négligeable	

5.6 Étape de gestion des déchets

Cette étape sous-entend les activités comme l'enfouissement ultime, la réutilisation ou le recyclage du métal en vue de boucler le cycle. Au Québec, une connaissance plus détaillée des types de déchets est nécessaire pour comprendre plus clairement la question des déchets. La quantité totale de débris de cuivre produite est calculée par le logiciel STAN. Les importations et exportations de débris de cuivre proviennent de la base de données STACAN. Cette étape est caractérisée par deux grands flux sortants (plus de 40 kt/a chacun) recyclés vers l'étape de métallurgie primaire et vers les exportations pour un recyclage hors Québec (taux de recyclage d'environ 50% au Québec). Il faut souligner également une importation de déchets de cuivre qui sont repartis ensuite vers les flux sortants. La quantité qui finit dans les sites d'enfouissement est négligeable par rapport aux autres

¹⁹ La valeur brute du flux n'est pas connue, elle est estimée en appliquant la loi de la conservation de la masse et le résultat se trouve dans la colonne 4 et à la ligne 5 du tableau 5.2 (79±3.8% kt/a)

flux et estimée à 0,4 kt/a (flux brut), soit environ 0,5 % de la quantité totale de cuivre à recycler (somme des flux Precy = 41 kt/a et déchets et débris de cuivre E = 45 kt/a). La répartition des débris de cuivre selon leur nature (déchets solides, municipales, toxique...) n'est pas détaillée (manque de ratio pour tenir compte de la réalité Québécoise). Néanmoins le flux de déchet de cuivre produit par les utilisateurs pour cette étape est quantifié et reparti par secteur d'activité dans la figure 5.8 et par application de l'équation 4-10. Les biens de consommation courants (ordinateur, téléphone...) et le transport (véhicule léger, lourd...) représentent plus de 70% du total envoyé vers l'étape de gestion des déchets.

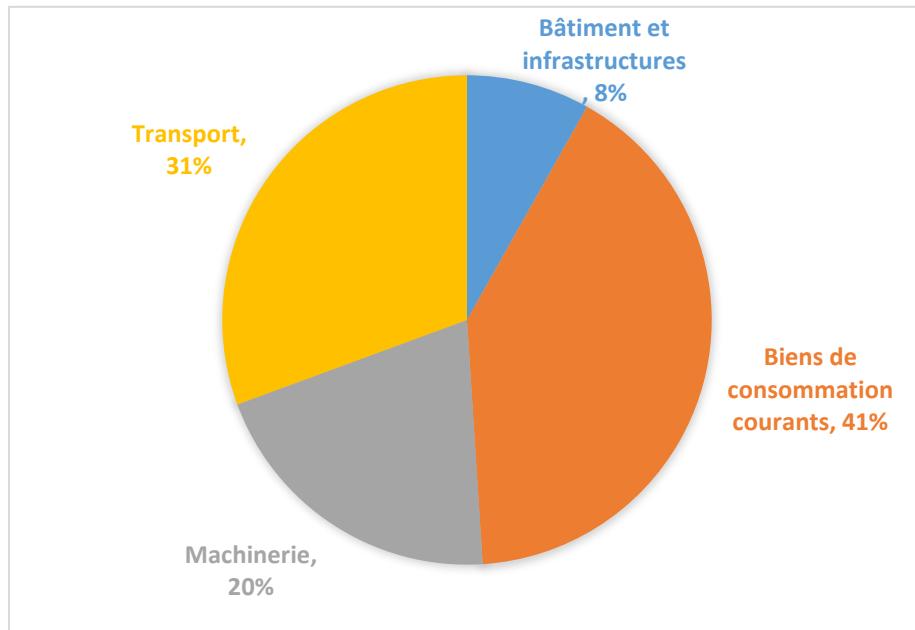


Figure 5.8: Répartition du flux annuel de cuivre géré à l'étape de gestion des déchets (79 kt/an) par secteur au Québec en 2014 (calculé à partir des stocks en utilisation et des durées de vie de chaque catégorie de produit).

Les expressions mathématiques qui découlent de ces résultats sont :

$$D_{Entree} = Dechets + D_{Imp} \quad (5-19)$$

$$D_{Sortie-1} = P_{Recyc} + D_{Exp} + \sum Pertes \quad (5-20)$$

La conservation de la masse est aussi applicable dans cette étape et donne :

$$D_{Entree} = D_{Sortie} = 86 \text{ kt/a} \quad (5-21)$$

Avec les écarts types, l'équation 5-21 devient bornée et peut s'établir de la manière suivante :

$$82 \text{ kt/a} \leq (D_{\text{Entree}} = D_{\text{Sortie}}) \leq 90 \text{ kt/a} \quad (5-22)$$

Tableau 5.5: Récapitulatif des valeurs des flux à l'étape 5 du cycle de vie du cuivre au Québec

	Nom du flux	Flux brut [kt/a]	Flux réconcilié [kt/a]	Contributions des flux
Entrée	Déchets et débris de cuivre I	7,3±10%	7±10.1%	8%
	Déchets cuivre		79±3.8%	92%
Sortie	Precyc	40,5±5%	41±4.8%	48%
	PERTE5	négligeable	négligeable	
	Déchets et débris de cuivre E	44,1±5%	45±4.9%	52%
	Élimination5	0,41	négligeable	

Les pertes dans chaque processus sont négligeables et sont principalement les pertes dues à un enfouissement sur site ou hors site. À chaque étape du cycle, les flux mesurés et calculés principalement les valeurs moyennes et les écarts types sont presque identiques avant et après réconciliation. Les incertitudes sont faibles dans cette étape néanmoins ces valeurs peuvent tendre vers une parfaite qualité si les incertitudes des étapes précédentes sont réduites.

Par ailleurs, les importations totales de cuivre au Québec (I) sont de $456\ 750 \pm 2,8\%$ t/a et d'une addition au stock total (Dstock) de $17926 \pm 48\%$ t/a. Les exportations totales de cuivre (E) sont de $438\ 824 \pm 4,8\%$ t/a. La population totale (Pop) au Québec selon l'ISQ en 2014 est de 8 214 503²⁰

²⁰ Institut de la Statistique Québec http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/population-demographie/structure/qc_1971-20xx.htm

habitants ; la demande effective de cuivre par capita (D) peut s'exprimer selon l'expression suivante :

$$D = \frac{I+Dstock-E}{Pop} \quad (5-23)$$

A partir de la relation 5-23 et en tenant compte des incertitudes la quantité de cuivre par habitant au Québec sur l'année 2014 est estimée à $4,36 \pm 30\%$ kg/hbt.

Les pertes totales (tableau 5.6) du système sont estimées à 6,32 kt/a soit une perte par habitant de 0,76 kg/hbt sur l'année 2014. Cette perte représente environ 17% de la demande effective de cuivre par habitant et est dû à l'utilisation du cuivre dans les usages dispersifs (non récupérables).

Tableau 5.6: Pertes de cuivre à chaque étape du cycle

	Étape 1	Étape 2	Étape 3	Étape 4	Étape 5	Total
Perte	5 kt	0,5 kt	0,3 kt	0,114 kt	0,41 kt	6,32 kt

CHAPITRE 6 DISCUSSION

Ce travail montre de manière descriptive les différentes quantités de cuivre en entrée et en sortie à chaque étape du cycle. Il faut rappeler que l'idée principale est de savoir par quel moyen comptabiliser les flux et les stocks de cuivre entre les activités (et acteurs) de la chaîne de valeur au Québec dans le but de supporter le développement de stratégies de circularité. L'outil STAN utilisé dans cette étude a permis d'établir une cartographie du cuivre de la province en fonction des données collectées et des incertitudes estimées ou calculées tout en respectant la loi de conservation de la masse. Cette étude permet de dire que le Québec transforme en moyenne 7 fois plus de cuivre qu'il en extrait (soit 311 kt de cathodes de cuivre produites sur 42 kt de cuivre extrait). Le total des importations de matières premières correspond à 256 kt de cuivre ou 82 % de la production québécoise de cathodes. Cette province regorge d'un potentiel de ressource en cuivre qui est majoritairement exportée à l'étape d'extraction/concentration (environ 55% de concentré de cuivre) contrairement aux États Unis qui retiennent plus le concentré de cuivre à l'étape d'extraction/concentration (seulement 29% du concentré de cuivre [13] est exporté). Les exportations de cuivre raffiné sont encore plus élevées à l'étape de production de métal primaire (soit 62% des cathodes produites par CCR sont exportées). Tout ceci ne favorise pas une circularité à court terme du métal au sein de la province dans les deux premières étapes du cycle de vie du cuivre puisque le principe fondamental de la circularité est d'assurer le moins d'extraction possible en allongeant la durée de vie des produits de manière permanente. Plus le cuivre est exporté plus il faut en extraire afin de satisfaire la demande. Il est donc important de réguler en amont les ressources de cuivre afin d'adopter les meilleures stratégies de circularité. On remarque bien que les pertes sont négligeables dans les premières étapes du cycle de vie. Néanmoins, ces pertes peuvent s'accumuler et devenir abondantes au fil du temps. Une étude faite par Golev et Lebre [58] affirme qu'une mauvaise gestion des rejets, une fermeture prématurée et des stratégies d'extraction inefficaces risquent d'amplifier les pertes minérales. En effet, l'essence de la circularité est de permettre à toute substance et élément assemblé (produits ou biens) de demeurer en vie. Alors ces moyens passent par une méthode plus efficace des processus de traitement ; en gros maximiser le rendement à la source (traitement du minerai, production de métal primaire et transformation métallique). Il est donc possible de minimiser le rejet de cuivre dans les sites d'enfouissement en passant par des méthodes efficaces de tamisage, de concassage, de broyage, de filtrage et de séchage du minerai... Ainsi on pourra récupérer le maximum de cuivre présent dans le minerai et minimiser les résidus de cuivre qui sont entreposés

sur site. Les pessimistes diront que nous sommes loin de la circularité du cuivre car il y'a des quantités énormes de cuivre qui se retrouve dans les sites d'enfouissement. Dans le cas du cuivre, on estime à 225 millions de tonnes la quantité dans le monde qui serait présente dans les lieux d'enfouissement [59]. Certains chercheurs comme Krook et al [60] proposent donc des remèdes théoriques (transformation semi-mobile ou stationnaire) qui consisteraient à récupérer le cuivre présent dans ces sites. Le célèbre physicien Albert Einstein [61] disait « La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi ». Au regard de cette citation, il faudrait faire en sorte que la technique de récupération du métal dans les lieux d'enfouissement fonctionne même si personne ne sait le pourquoi mais maîtrise le comment. En réalité, une meilleure écoconception des produits semi-finis ou finis en cuivre affinée ou en alliage de cuivre doit absolument être prise en compte à l'étape de transformation métallique de fabrication/d'assemblage. Bihouix [62] appuie cette affirmation en témoignant que les fabricants doivent, dès la conception de leurs produits, veiller à ce que ceux-ci soient réparables, réutilisables, faciles à identifier et démanteler, recyclables en fin de vie, utilisant le moins possible de ressources rares et irremplaçables et contenant le moins de composantes électroniques possibles. En bref, une meilleure écoconception des produits est une stratégie indispensable pour allonger leur durée de vie et contribuer à leur circularité. Vu le stock de cuivre à l'étape d'utilisation, on peut penser que la mine de cuivre de demain sera partout présente autour de nous (plus besoin d'exploration mais seulement de l'exploitation). L'urbaniste James Jacobs [63] avait prédit depuis 1961 que «les villes étaient les mines du futur». Ceci semble vrai mais ces mines s'étendent aussi vers les zones rurales car une large part du cuivre se trouve dans la grande variété des équipements électriques (câbles électriques, moteurs, génératrices...), les infrastructures et le transport (ex. : chemins de fer, bâtiments abandonnés...). Le défi est de pouvoir l'exploiter avec des technologies propres et durables.

Se poser la question de la mise en applicabilité de ces stratégies spécifiquement pour le cuivre ne rentre pas dans le cadre de ce travail. Une étude sur les freins et leviers des stratégies pourrait apporter des réponses appropriées à cette interrogation. Néanmoins, quelles que soient les stratégies de circularité choisies et leurs modes de déploiement, leur mise en œuvre nécessitera l'implication de plusieurs acteurs comme, le gouvernement, les consommateurs, les associations sectorielles et l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur, les organisations facilitant la circularité des

ressources (organismes de réemploi, industries de réusinage et de recyclage, etc.). Une étude ultérieure sur la dynamique des flux et des stocks devrait être menée pour mieux comprendre quand les stocks seront disponibles et en quelle quantité et qualité, pour supporter la planification des stratégies de circularité à long terme. Les biens mis en service pour le consommateur diffèrent d'un fabricant à l'autre du point de vue de la quantité de cuivre utilisée (concentration), du rendement et de la durée de vie. Par exemple un moteur électrique de la marque Schneider diffère de celui de Siemens ; cela définit la limite de ce travail créant ainsi une incertitude dans les données.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Cette étude a permis de quantifier les différents flux qui circulent au sein de la province du Québec sur l'année 2014 et nécessitant l'application d'un modèle statique. Les données collectées sont toutes ponctuelles sans intervalles de confiance. En réalité, il y'a toujours une certaine erreur sur toutes valeurs mesurées ou observées. Présenter les résultats sous forme d'intervalle est cruciale en AFM en témoignent certains auteurs comme Lassen et Hansen[28]. Ce travail tient compte de cette règle en combinant les données de plusieurs sources différentes et en se fixant une échelle de mesure sur la qualité des données. Les principales conclusions qui peuvent être tirées des résultats sont :

- Le Québec est un exportateur net de cuivre (520 kt/an), notamment des cathodes et des 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 provient de 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 plus de 2200 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 recyclé dans la province et l'autre moitié est exportée pour être recyclée ailleurs.

- Les pertes totales de cuivre via l'élimination représentent environ 6 kt/a, dont 4,4 kt/a éliminés à l'étape d'extraction et de concentration, ce qui représente plus de 10 % du cuivre extrait par l'activité minière au Québec.

Comme tout projet, la prise de conscience des contraintes majeures est primordiale. En effet, la collecte des données est une grande contrainte à laquelle il a fallu faire face dans le cadre de cette étude. Les données sont très souvent difficiles à acquérir par manque de ressource (base de données) ou même à cause de la confidentialité que prônent les différentes compagnies. Des démarches administratives auprès des dites entreprises peuvent retarder l'avancement du projet. En effet il est aujourd'hui plus facile d'obtenir des données monétaires que physiques de procédés ou de transformations.

Du point de vue social, ce travail permet une évolution des activités des organisations pour l'application des stratégies de circularités du cuivre (recyclage, réemploi, économie de partage ou de fonctionnalité...) et un changement de mentalité vis à vis de l'utilisation de ce métal dans la province par une bonne gestion de la ressource et une prise de décision politique. Comptabiliser la quantité de cuivre qui est stockée, qui se retrouve dans les déchets ou qui est perdue mène à des décisions économiques rentables car les déchets et débris de cuivre d'une entreprise peuvent être utilisés par une autre compagnie comme matière première (Synergie industrielle). En effet, ces échanges de produits constituent un marché favorable qui engendre un impact positif sur l'économie. La réalisation d'une AFM dynamique et exploratoire permettra de faire des projections et de prendre des décisions claires et précises avec évidemment une participation effective des entreprises avisées et des gouvernements. Il est aussi possible d'utiliser d'autres outils d'analyse de flux de matière tels que Simbox, Umberto ou Gabi pour comparer les résultats et valider la méthode de réconciliation des données. En outre, la réalisation d'une étude technico-économique des stratégies de circularité telles que la mine urbaine, le recyclage, l'écoconception apportera plus de précision sur la faisabilité de l'économie circulaire.

RÉFÉRENCES

- [1] P. Bihouix et B. de Guillebon, "Quel futur pour les métaux?," vol. 299 p., 2010.
- [2] ICSG, "The World Copper Factbook 2014," 2015. [En ligne]. Disponible: <http://copperalliance.org/wordpress/wp-content/uploads/2012/01/ICSG-Factbook-2014.pdf>
- [3] M. Bonnin *et al.*, "Development and validation of a dynamic material flow analysis model for French copper cycle," vol. 91, n°. 8, p. 1390-1402, 2013. [En ligne]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2013.03.016>
- [4] A. L. Lavoisier, *Oeuvres: Traité élémentaire de chimie. T. 1* vol. 1: Imprimerie impériale, 1864.
- [5] W. Leontief, "LEONTIEF, Structure of the American Economy, 1919-1929," éd: Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1941.
- [6] P. Duvigneaud, "L'écosystème Bruxelles," p. 45-47, 1975.
- [7] A. Rauhut et D. Balger, "Verbrauch und Verbleih von Cadmium in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1973," vol. 30, p. 269-272, 1976.
- [8] P. Baccini et P. H. Brunner, *Metabolism of the Anthroposphere*: Springer-Verlag, 1991.
- [9] P. H. Brunner et H. Rechberger, *Practical handbook of material flow analysis* vol. 9, 2004.
- [10] J. Moore, M. Kissinger et W. E. Rees, "An urban metabolism and ecological footprint assessment of Metro Vancouver, Journal of Environmental Management" vol. 124, p. 51-61, Jul 2013.
- [11] A. Bourgogne, "La Bourgogne comptabilise ses flux de matières". Repères, périodique d'Alterre Bourgogne, éd, 2013, p. p. 2-12.
- [12] A. Morris, "L'analyse de flux de matières au Québec: méthodes et enjeux d'opérationnalisation dans une perspective d'économie circulaire," Université de Sherbrooke, Mémoire 2016.
- [13] M. Wang, W. Chen et X. Li, "One year substance flow analysis of copper cycle in U. S," communication présentée à Advances in Intelligent Systems and Computing, Karlsruhe, Germany, 2015, p. 1265-1272. [En ligne]. Disponible: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-47241-5_106
- [14] T. Graedel *et al.*, "The contemporary European copper cycle: The characterization of technological copper cycles," vol. 42, n°. 1, p. 9-26, 2002.
- [15] S. Spatari *et al.*, "The contemporary European copper cycle: 1 year stocks and flows," vol. 42, n°. 1, p. 27-42, 2002.
- [16] A. Kapur *et al.*, "The contemporary copper cycle of Asia," vol. 5, n°. 2, p. 143-156, 2003.
- [17] T. Graedel, "The contemporary European copper cycle: introduction," vol. 42, éd: Elsevier, 2002, p. 5-7.

- [18] P. REPELLIN, DURET, B. BARLES, S, "Comptabilité des flux de matières dans les régions et les départements. Guide méthodologique," La Défense : Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie – CGDD (coll. « Repères »), p. 114, 2014.
- [19] M. Bonnin, "Optimisation multicritère pour une gestion globale des ressources: application au cycle du cuivre en France," Institut National Polytechnique de Toulouse, 2013.
- [20] W. Q. Chen et T. E. Graedel, "Anthropogenic Cycles of the Elements: A Critical Review," vol. 46, n°. 16, p. 8574-8586, Aug 2012.
- [21] D. Laner, H. Rechberger et T. Astrup, "Systematic Evaluation of Uncertainty in Material Flow Analysis," vol. 18, n°. 6, p. 859-870, 2014. [En ligne]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12143>
- [22] " Le petit Larousse illustré ", 1995a.
- [23] A. E. Björklund, "Survey of approaches to improve reliability in LCA," The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 7, n°. 2, p. 64, 2002.
- [24] A. Ciroth, G. Fleischer et J. Steinbach, "Uncertainty calculation in life cycle assessments - A combined model of simulation and approximation," International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 9, n°. 4, p. 216-226, 2004.
- [25] H. Rechberger, O. Cencic et R. Frühwirth, "Uncertainty in material flow analysis," Journal of Industrial Ecology, vol. 18, n°. 2, p. 159-160, 2014. [En ligne]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12087>
- [26] T. Graedel *et al.*, "Multilevel cycle of anthropogenic copper," vol. 38, n°. 4, p. 1242-1252, 2004.
- [27] J. Hedbrant et L. Sörme, "Data vagueness and uncertainties in urban heavy-metal data collection," Water, Air, & Soil Pollution, vol. 1, n°. 3, p. 43-53, 2001.
- [28] C. Lassen *et al.*, *Paradigm for substance flow analyses*. 2000,
- [29] B. P. Weidema et M. S. Wesnaes, "Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators," Journal of cleaner production, vol. 4, n°. 3-4, p. 167-174, 1996.
- [30] O. Cencic et H. Rechberger, "Material flow analysis with software STAN," Journal of Environmental Informatics and Industrial Ecology, vol. 18, n°. 1, p. 3, 2008.
- [31] C. Ott et H. Rechberger, "The European phosphorus balance," *Resources Conservation and Recycling*, vol. 60, p. 159-172, 2012.
- [32] H. P. Bader *et al.*, "Copper flows in buildings, infrastructure and mobiles: A dynamic model and its application to Switzerland," communication présentée à Clean Technologies and Environmental Policy, 2011, p. 87-101. [En ligne]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1007/s10098-010-0278-4>
- [33] C. Zeltner *et al.*, "Sustainable metal management exemplified by copper in the USA," *Regional Environmental Change*, vol. 1, n°. 1, p. 31-46, 1999.
- [34] M. Schaffner, H. P. Bader et R. Scheidegger, "Modeling the contribution of point sources and non-point sources to Thachin River water pollution," *Science of the Total Environment*, vol. 407, n°. 17, p. 4902-4915, Aug 2009.

- [35] F. Gottschalk, R. W. Scholz et B. Nowack, "Probabilistic material flow modeling for assessing the environmental exposure to compounds: Methodology and an application to engineered nano-TiO₂ particles," *Environmental Modelling & Software* , vol. 25, n°. 3, p. 320-332, 2010.
- [36] S. Gloser, M. Soulier et L. A. T. Espinoza, "Dynamic Analysis of Global Copper Flows. Global Stocks, Postconsumer Material Flows, Recycling Indicators, and Uncertainty Evaluation," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, n°. 12, p. 6564-6572, Jun 2013.
- [37] C. L. Tsai et U. Krogmann, "Material Flows and Energy Analysis of Glass Containers Discarded in New Jersey, USA," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, n°. 1, p. 129-142, 2013.
- [38] J. Clavreul *et al.*, "Stochastic and epistemic uncertainty propagation in LCA," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, n°. 7, p. 1393-1403, 2013.
- [39] R. Viertl, *Statistical methods for fuzzy data*: John Wiley & Sons, 2011.
- [40] D. Dubois *et al.*, "A fuzzy constraint-based approach to data reconciliation in material flow analysis," communication présentée à *International Journal of General Systems*, Vol. 43, p 787-809, 2014.
- [41] H. Reisinger *et al.*, "Lead, Cadmium and Mercury Flow Analysis–Decision Support for Austrian Environmental Policy," *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, vol. 61, n°. 5-6, p. 63-69, 2009.
- [42] H. Andersson *et al.*, "WP4 Background paper-Identification of sources and estimation of inputs to the Baltic Sea," 2012.
- [43] P. Chancerel *et al.*, "Assessment of precious metal flows during preprocessing of waste electrical and electronic equipment," vol. 13, n°. 5, p. 791-810, 2009.
- [44] D. H. Meadows *et al.*, "The limits to growth," 1972.
- [45] E. M. Foundation. (2015a) Towards the Circular Economy. In Ellen MacArthur Foundation. [En ligne]. Disponible: http://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/EMF_CE_Report_AW_French_summary-2.pdf
- [46] EDDEC. (2015) L'économie circulaire. [En ligne]. Disponible: <http://instituteddec.org/l'institut/quest-ce-que-leconomie-circulaire/>
- [47] L. Muchova, P. Eder et A. Villanueva, "End-of-waste criteria for copper and copper alloy scrap: technical proposals," European Union 2011.
- [48] R. Ayres, L. Ayres et I. Råde, "The Life Cycle of Copper, its Co-Products and By-Products, report commissioned by the MMSD (Mining, Minerals and Sustainable Development) project of IIED (International Institute for Environment and Development)," Livre Electronique, 2002.
- [49] P. Bihouix et B. de Guillebon, "Quel futur pour les métaux," EDP Sciences, vol. 299, 2010.
- [50] C. Jamet *et al.*, "Etudes & Documents–Matières mobilisées par l'économie française–Comptes de flux pour une gestion durable des ressources. Tech. Rep. 6," 2009.

- [51] MERN. (2016) Statistiques minières par substance : Le cuivre - Expéditions du Québec et prix [En Ligne]. Disponible: <https://www.mern.gouv.qc.ca/mines/statistiques/substance/cuivre.jsp>
- [52] A. H. Tanimoto *et al.*, "Material flow accounting of the copper cycle in Brazil," vol. 55, n°. 1, p. 20-28, 2010. [En ligne]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.03.007>
- [53] S. Pauliuk, T. Wang et D. B. Müller, "Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries," Resources, Conservation and Recycling, vol. 71, p. 22-30, 2013.
- [54] UNEP, "Assessing mineral resources in society: Metal stocks & recycling rates," Technical report, United Nations Environment Programme, 2011.
- [55] M. Ruhrberg, "Assessing the recycling efficiency of copper from end-of-life products in Western Europe," Resources, Conservation and Recycling, vol. 48, n°. 2, p. 141-165, 2006.
- [56] D. B. Müller, T. Wang et B. Duval, "Patterns of Iron Use in Societal Evolution §," éd: ACS Publications, 2010.
- [57] M. G. Morgan, M. Henrion et M. Small, *Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*: Cambridge university press, 1992.
- [58] A. Golev, E. Lebre et G. Corder, "The contribution of mining to the emerging circular economy," Gouvernement du Québec, 2016. [En ligne]. Disponible: <http://mern.gouv.qc.ca/publications/energie/strategie/plan-action.pdf>
- [59] T. E. Graedel, "The prospects for urban mining," Bridge, vol. 41, n°. 1, p. 43-50, 2011.
- [60] J. Krook, N. Svensson et M. Eklund, "Landfill mining: A critical review of two decades of research," Waste management, vol. 32, n°. 3, p. 513-520, 2012.
- [61] A. Einstein et M. Solovine, *La relativité*: Payot, 1964.
- [62] P. Bihouix. (2015) Du mythe de la croissance "verte" à un monde post-croissance. [En ligne]. Disponible: <http://rue89bordeaux.com/2015/09/du-mythe-de-la-croissance-verte-a-un-monde-post-croissance/>
- [63] J. Jacobs, "The Death and Life of Great American Cities," 1961.

ANNEXES

ANNEXE A : CLASSIFICATION DES DIFFÉRENTES MARCHANDISES SELON LE CODE SH ET LA TENEUR EN CUIVRE

ANNEXE A-1: Catégorie 1- Tous les Produits semi-finis en cuivre affiné (importation et exportation) pris en compte à l'étape de transformation métallique et assemblage

Code SH	Marchandises	% Cu
740811	Fils de cuivre affiné, la plus grande dimension de la section transversale excède 6 mm	99%
740819	Fils de cuivre affiné, la plus grande dimension de la section transversale <=6mm	99%
741110	Tubes et tuyaux, en cuivre affiné	99%
740710	Barres, tiges et profilés en cuivre affiné	99%
740319	Ouvrages en cuivre affiné sous forme brute	99%
740610	Poudres de cuivre à structure non lamellaire	80%
741991	Ouvrages en cuivre, coulés, moulés, estampés ou forgés	99%
741510	Pointes, clous, punaises & crampons en cuivre	95%
741910	Chaînes et chaînettes et leurs parties, en cuivre	95%
741300	Torons, câbles, tresses & art similaires, en cuivre non isolés pour l'électricité	95%
282749	Oxychlorures et hydroxychlorures, métalliques, a/q de cuivre	73%
740311	Cathodes et sections de cathodes en cuivre, sous forme brute	99%
740620	Poudres et paillettes de cuivre à structure lamellaire	80%

Code SH	Marchandises	% Cu
741011	Feuilles et bandes minces en cuivre affiné, sans support	99%
741210	Accessoires de tuyauterie, en cuivre affiné	99%
740919	Tôles, feuilles et bandes en cuivre affiné, non enroulées, épaisseur >0,15mm	99%
741533	Vis, boulons et écrous, en cuivre	95%
741021	Feuilles et bandes minces en cuivre affiné, sur support	99%
740911	Tôles, feuilles et bandes en cuivre affiné, enroulées, épaisseur >0,15mm	99%
741521	Rondelles en cuivre, y compris les rondelles destinées à faire ressort	95%
740319	Ouvrages en cuivre affiné sous forme brute	99%
741539	Articles en cuivre filetés tels que vis, boulons et écrous	95%
741300	Torons, câbles, tresses et articles similaires, en cuivre non isolés pour l'électricité	95%
740313	Billettes en cuivre, sous forme brute	99%
283325	Sulfates de cuivre	40%
282550	Oxydes et hydroxydes de cuivre	73%
282741	Oxychlorures et hydroxychlorures de cuivre	59%

ANNEXE A-2: Catégorie 2- tous les produits semi-finis en alliage de cuivre (importation et exportation) à l'étape de transformation métallique et assemblage

Code SH	Marchandises	% Cu
740329	Alliages de cuivre sous forme brute, a/q les alliages mères du n° 745	80%
740322	Alliages de cuivre à base de cuivre-étain, sous forme brute	80%
740323	Alliages de cuivre à base de cuivre-zinc sous forme brute	80%
741129	Tubes et tuyaux en alliages de cuivre	91%
741121	Tubes et tuyaux, en alliages à base de cuivre-zinc	91%
740729	Barres, tiges et profilés en alliages de cuivre	91%
740721	Barres, tiges et profilés en alliages de cuivre-zinc	91%
740829	Fils en alliages de cuivre	91%
740822	Fils en alliages à base de cuivre-nickel ou de cuivre-nickel-zinc	91%
741022	Feuilles et bandes minces en alliages de cuivre, sur support	91%
741012	Feuilles et bandes minces en alliages, de cuivre, sans support	91%
740821	Fils en alliages à base de cuivre-zinc	91%
741122	Tubes et tuyaux, en alliages à base de cuivre-nickel ou cuivre-nickel-zinc	91%
740990	Tôles, feuilles et bandes alliages à base de cuivre	91%
740929	Tôles, feuilles et bandes à base de cuivre-zinc, non enroulées épaisseur >0,15mm	91%
740921	Tôles, feuilles et bandes à base de cuivre-zinc, enroulées, épaisseur >0,15mm	91%

Code SH	Marchandises	% Cu
740940	Tôles, feuilles et bandes alliages à base cuivre-ni/cuivre-ni-zinc épais >0,15mm	91%
740931	Tôles, feuilles et bandes alliages à base de cuivre-étain, enroulées, épaisseur >0,15mm	91%
740939	Tôles, feuilles et bandes alliages à base de cuivre-étain, non enroulées, épaisseur >0,15mm	91%

ANNEXE A-3: Catégorie 3-Tous les autres produits semi finis et finis (importation et exportation) considérés à l'étape de transformation métallique et de fabrication/assemblage

Code SH	Marchandises	% Cu
870710	Carrosseries pour voitures de tourisme	1%
870790	Carrosseries pour tracteurs, autobus, camions et véhicules à usages spéciaux	1%
870891	Radiateurs et leurs parties, pour véhicules automobiles	1%
854239	Circuits intégrés électroniques, incluant hybrides et monolithiques	10%
854519	Électrodes en charbon, pour usages électriques	1%
854511	Électrodes en charbon, des types utilisés pour fours	1%
854110	Diodes, autres que les photodiodes et les diodes émettrices de lumière	10%
854130	Thyristors, diacs et triacs, autres que les dispositifs photosensibles	10%
854121	Transistors, a/q les photo-transi à pouvoir de dissipation inférieur à 1 W	10%

Code SH	Marchandises	% Cu
854239	Circuits intégrés électroniques, incluant hybrides et monolithiques, nda	10%
850131	Moteurs et génératrices à CC, d'une puissance n'excédant pas 750 W	15%
850151	Moteurs à courant alternatif, polyphasés, d'une puissance n'excédant pas 750 W	15%
850110	Moteurs, d'une puissance n'excédant pas 37,5 W	15%
850152	Moteurs à courant alternatif, polyphasés, excédant 750 W mais n'excédant pas 75 kW	15%
854411	Fils pour bobinages, isolés, même laqués/oxydés anodiquement, en cuivre	40%
854519	Électrodes en charbon, pour usages électriques, nda	1%
850153	Moteurs à courant alternatif, polyphasés, d'une puissance excédant 75 kW	15%
850132	Moteurs et génératrices à CC, d'une puissance > 750 W mais <=75 kW	15%
850140	Moteurs à courant alternatif, monophasés, nda	15%
850134	Moteurs et génératrices à CC, d'une puissance excédant 375 kW	15%
850133	Autres moteurs & génératrices à CC, d'une puissance >75 kW mais <=375 kW	15%
850120	Moteurs universels, à courant alternatif/continu, d'une puissance excédant 37,5 W	15%
842131	Filtres d'entrée d'air, pour moteurs à allumage par étincelles ou par compression	2%
848140	Soupapes de trop-plein ou de sûreté	4%

Code SH	Marchandises	% Cu
848210	Roulements à billes	1%
841330	Pompes à carburant, à huile ou à liquide de refroidissement pour moteurs à allumage par étincelles ou par compression	4%
848280	Roulements à billes ou rouleaux, nda, y compris les roulements combinés	1%
848120	Valves pour transmissions oléohydrauliques ou pneumatiques	4%
848130	Clapets et soupapes de retenue	4%
848250	Roulements à rouleaux cylindriques, nda	1%
840820	Moteurs diesel pour la propulsion de véhicules du Chapitre 87	1%
840734	Moteurs à piston alternatif, propulsion des véhicules, cylindrée > 100 cm ³	1%
841221	Moteurs hydrauliques à mouvement rectiligne (cylindres)	5%
841229	Moteurs hydrauliques, nda	5%
841231	Moteurs pneumatiques à mouvement rectiligne (cylindres)	5%
841239	Moteurs pneumatiques, nda	5%
840710	Moteurs pour l'aviation à piston alternatif ou rotatif, à allumage par étincelles	2%
848360	Embrayages et organes d'accouplement, y compris les joints d'articulation	2%
870422	Camions à mot diesel/semi-diesel, d'un poids en charge max > 5 ton, <=20 ton	1%

Code SH	Marchandises	% Cu
870423	Camions à moteur diesel/semi-diesel, d'un poids en charge maximal >20 tonnes	1%
870310	Véhicules conçus pour se déplacer sur neige, pour transport de personnes sur terrain de golf, véhicule similaire	1%
871150	Motocycles à moteur à piston alternatif, d'une cylindrée excédant 800 cm ³	1.3%
870210	Autobus à moteur diesel ou semi-diesel, de plus de neuf places assises	1%
870324	Automobiles, à moteur à piston alternatif d'une cylindrée excédant 3 000 cm ³	1.5%
870333	Automobiles, à moteur diesel/semi-diesel d'une cylindrée excédant 2 500 cm ³	1.5%
870120	Tracteurs routiers pour semi-remorques (tracteurs pour camions)	1%
870290	Autobus, nda, avec capacité de plus de neuf places assises	1%
870432	Camions à moteur à piston à allumage par étincelles d'un poids, char max > 5 ton	1%
870130	Tracteurs à chenilles	2%
871639	Remorques et semi-remorques, nda, pour le transport de marchandises	1%
870323	Automobiles, à moteur à piston alternatif d'une cylindrée >1 500 cm ³ mais <=3 000 cm ³	1.5%
871631	Remorques et semi-remorques, citernes	1.3%
870590	Véhicules automobiles à usages spéciaux, nda	1%
870390	Automobiles, nda, à turbine à gaz	1.5%

Code SH	Marchandises	% Cu
870911	Chariots automobiles électriques, utilisés dans les usines et entrepôts	2%
871640	Remorques et semi-remorques, nda	1.3%
871680	Brouettes, poussettes, pousse-pousse, et autres véhicules non auto	1.3%
870410	Tombereaux automoteurs conçus pour être utilisés en dehors du réseau routier	2%
871390	Véhicules pour invalides (fauteuils roulants), avec moteur ou autre mécanique de propulsion	1%
870919	Chariots automobiles non électriques	1%
871620	Remorques et semi-remorques, pour usages agricoles	1.3%
870322	Automobiles, à moteur à piston alternatif d'une cylindrée >1 000 cm ³ mais <=1 500 cm ³	1.5%
870510	Camions-grues	1%
871200	Bicyclettes et autres cycles, y compris les triporteurs, sans moteur	1%
870190	Tracteurs, nda, actionnés par un moteur à combustion interne	1%
870321	Automobiles, à moteur à piston alternatif d'une cylindrée n'excédant pas 100 cm ³	1.3%
870431	Camions à mot à piston à allumage par étincelles d'un poids, char max <=5 ton	1%
870332	Automobiles, à moteur diesel/semi-diesel un cylindre >1 500 cm ³ mais <=2 500 cm ³	1.5%
871610	Remorques et semi-remorques pour l'habitation ou le camping	1.3%

Code SH	Marchandises	% Cu
871310	Véhicules pour invalides (fauteuils roulants), sans mécanisme de propulsion	1%
870490	Camions, nda	1.5%
871140	Motocycle à moteur à piston alternatif, une cylindrée >500 cm ³ mais <=800 cm ³	1.3%
870520	Derricks automobiles pour le sondage ou le forage	2%
871190	Motocycles équipés d'un moteur auxiliaire	1.3%
871120	Motocycle à moteur à piston alternatif, une cylindrée >50 cm ³ mais <=250 cm ³	1.3%
870540	Camions-bétonnières	1%
870421	Camions à mot diesel/semi-diesel, d'un poids en charge max <=5 tonnes	1%
871130	Motocycle à moteur à piston alternatif, une cylindrée >250 cm ³ mais <=500 cm ³	1.3%
871110	Motocycles à moteur à piston alternatif, d'une cylindrée n'excédant pas 50 cm ³	1.3%
870110	Motoculteurs	2%
870530	Voiture de lutte contre l'incendie	1%
870331	Automobiles, à moteur diesel/semi-diesel d'une cylindrée <=1 500 cm ³	1.5%
880240	Avions et autres véhicules aériens, nda, poids à vide excédant 15 000 kg	2%

Code SH	Marchandises	% Cu
880230	Avions et & au véhicules aériens, nda, pds à vide > 2 000 kg mais <=15 000 kg	2%
880212	Hélicoptères, d'un poids à vide excédant 2 000 kg	2%
880211	Hélicoptères, d'un poids à vide n'excédant pas 2 000 kg	2%
880220	Avions et autres véhicules aériens, nda, d'un poids à vide <=2 000 kg	2%
890392	Bateaux à moteur, autres qu'à moteur hors-bord	0.1%
890590	Docks flottants et autres bateaux à fonction spéciale	0.1%
890510	Bateaux-drageurs	0.5%
890391	Bateaux à voile, même avec moteur auxiliaire	0.1%
890110	Paquebots, bateaux de croisières, etc, conçus pour le transport de personnes	0.5%
860900	Cadres et conteneurs, spécialement conçus et équipés pour un ou plusieurs modes de transport	1.3%
860719	Essieux et roues et leurs parties	1%
860400	Véhicules pour l'entretien ou le service des voies ferrées, même auto-propulsés	0.5%
860691	Wagons pour le transport sur rail, couverts et fermés	0.5%
850423	Transformateurs à diélectrique liquide, d'une puissance excédant 1000 kVA	15%
852550	Appareils d'émission pour la radiodiffusion ou la télévision	3%
854460	Conducteurs électriques, pour tensions excédant 100 V, nda	40%

Code SH	Marchandises	% Cu
850650	Piles et batteries de piles, au lithium	1%
852560	Appareils d'émission incorporant un appareil de réception	3%
854449	Conducteurs électriques, pour tensions n'excédant pas 100 V, nda	40%
852691	Appareils de radionavigation	2%
853931	Lampes et tubes fluorescents, à cathode chaude	1%
850440	Convertisseurs statiques, électriques, nda	15%
854442	Conducteurs électriques, tensions <= 100 V, munis de pièces de connexion	40%
853650	Interrupteurs, sectionneurs et commutateurs électriques pour une tension<=100 volts, nda	15%
853690	Appareils pour la coupure, la protection des circuits électriques <=100 V, nda	15%
851629	Appareils électriques pour le chauffage des locaux, du sol, nda	4.6%
853110	Avertisseurs électriques pour la protection contre le vol ou l'incendie	1%
853669	Fiches & prises de courant électriques, pour une tension n'excédant pas 100 V	15%
852580	Caméras de télévision, appareils photographiques numériques et caméscopes	3%
853810	Tableaux, panneaux, etc, du n° 85.37, dépourvus de leurs appareils	15%
850433	Transformateurs électriques, puissance excédant 16 kVA mais <= 500 kVA, nda	15%

Code SH	Marchandises	% Cu
851712	Téléphones pour réseaux cellulaires et pour autres réseaux sans fil	3%
853229	Condensateurs électriques fixes, nda	7%
850819	Aspirateurs, à moteur électrique incorporé, nda	5%
853180	Appareils électriques de signalisation acoustique ou visuelle, nda	1%
850421	Transformateurs à diélectrique liquide, d'une puissance n'excédant pas 650 kVA	15%
853649	Relais électriques pour une tension excédant 60 V mais pas 100 V	15%
850811	Aspirateurs domestique, moteur électrique incorpore, puis <= 1.500 W, volume réservoir <= 20 L	5%
851680	Résistances chauffantes, électriques	4.6%
850422	Transformateurs à diélectrique liquide, une puissance >650 kVA mais < 1000 kVA	15%
851822	Haut-parleurs multiples montés dans la même enceinte	3%
851840	Amplificateurs électriques d'audiofréquence	3%
850434	Transformateurs électriques, d'une puissance excédant 500 kVA, nda	15%
853620	Disjoncteurs pour une tension n'excédant pas 100 volts	15%
851521	Machine & appareil pour le soudage des métaux par résistance entièrement ou partiellement automatiques	5%
853630	Appareils pour la protection des circuits électriques pour une tension <=100 V, nda	15%

Code SH	Marchandises	% Cu
850860	Aspirateurs, nda	5%
851531	Mach & app pour le soudage des métaux à l'arc ou au jet de plasma automatique	5%
854420	Câbles coaxiaux et autres conducteurs électriques coaxiaux	40%
850431	Transformateurs électriques, d'une puissance n'excédant pas 1 kVA, nda	15%
850161	Machines génératrices à CA (alternateurs), d'une puissance n'excédant pas 75 kVA	15%
853939	Lampes à décharge, autres qu'à rayons ultraviolets, nda	1%
854233	Circuits intégrés électroniques, amplificateurs	10%
850231	Groupes électrogènes, à énergie éolienne	15%
854590	Articles en graphite/autre carbone avec ou sans métal, pour usages électrique, nda	1%
851529	Machines et appareils pour le soudage des métaux par résistance électrique, nda	5%
850432	Transformateurs électriques, puissance excédant 1 kVA mais n'excédant pas 16 kVA, nda	15%
851679	Appareils électrothermiques, pour usage domestique, nda	4.6%
850239	Groupes électrogènes, nda	15%
853641	Relais électriques pour une tension n'excédant pas 60 volts	15%
850132	Moteurs et génératrices à courant continu, d'une puissance > 750 W mais <=75 kW	15%

Code SH	Marchandises	% Cu
854232	Circuits intégrés électroniques, mémoires	10%
852851	Moniteurs pour système automatique de traitement de l'info du n° 84.71	10%
853210	Condensateurs de puissance pour 50/60 Hz et puissance réactive \geq 0,5 kvar	7%
853949	Lampes et tubes à rayons ultraviolets ou infrarouges, nda	1%
851420	Fours fonctionnant par induction ou par pertes diélectriques industriels	15%
851989	Appareils d'enregistrement et de reproduction du son, nda	3%
852692	Appareils de radiotélécommande	2%
851830	Écouteurs, même combinés avec un microphone	3%
850710	Accumulateurs électriques au plomb, des types utilisés pour le démarrage	1%
851930	Platines tourne-disques	3%
850212	Groupes électrogènes à moteur diesel, d'une puissance > 75 kVA mais ≤ 375 kVA	15%
853929	Lampes & tubes à incandescence, exclus ceux à rayons ultraviolet ou infrarouge, nda	1%
850760	Accumulateurs électriques au lithium-ion, incluant séparateurs, même rectangle/carré	1%
852861	Projecteurs, pour système automatique de traitement de l'information du n° 84.71	1%
852190	Appareils d'enregistrement ou de reproduction vidéophoniques, nda	3%

Code SH	Marchandises	% Cu
851519	Machines et appareils pour le brasage fort ou tendre électriques, nda	5%
850780	Accumulateurs électriques, incluant séparateurs, même rectangle/carré, nda	1%
851631	Appareils électrothermiques pour la coiffure, sèche-cheveux	2%
850720	Accumulateurs électriques au plomb, nda	1%
853222	Condensateurs électriques fixes électrolytiques à l'aluminium, nda	7%
851821	Haut-parleur unique monté dans son enceinte	3%
851829	Haut-parleurs, nda	3%
850211	Groupes électrogènes à moteur diesel, d'une puissance n'excédant pas 75 kVA	15%
851310	Lampes électriques portatives, destinées à fonctionner de leur propre source d'énergie	1%
852791	Appareils récepteurs radio combinés à appareils d'enregistrement ou de reproduction du son, nda	3%
850133	Autres moteurs & génératrices à CC, d'une puissance >75 kW mais <=375 kW	15%
850730	Accumulateurs électriques au nickel-cadmium	1%
851633	Appareils électrothermiques pour sécher les mains	2%
851718	Postes téléphoniques d'usager, nda; visiophones	3%
850680	Piles et batteries de piles électriques, nda	1%
853321	Résistances électriques fixes, pour une puissance n'excédant pas 20 W	7%

Code SH	Marchandises	% Cu
853224	Condensateurs fixes à diélectrique en céramique, multicouches, nda	7%
853221	Condensateurs électriques fixes au tantale, nda	7%
854320	Générateurs de signaux	1%
851660	Fours, cuisinières, réchauds, grils et rôtissoires, électriques, nda	1%
853225	Condensateurs fixes à diélectrique en papier ou en matière plastique, nda	7%
853331	Résistances électriques variables bobinées, pour une puissance <=20 W	7%
853921	Lampes et tubes halogènes, au tungstène	1%
851539	Machines et appareils pour le soudage des métaux à l'arc ou au jet de plasma, nda	5%
853310	Résistances électriques fixes au carbone, agglomérées ou à couche	7%
851650	Fours à micro-ondes	4.6%
850980	Appareils électromécaniques à moteur électrique incorporé, usage domestique, nda	5%
853941	Lampes et tubes à rayons ultraviolets ou infrarouges; lampes à arc	1%
851671	Appareils électrothermiques pour la préparation du café ou du thé, usage domestique, nda	5%
852792	Appareils récepteurs radio, non combinés à un appareil d'enregistrement ou de reproduction du son mais combinés à un appareil d'horlogerie	3%

Code SH	Marchandises	% Cu
850163	Alternateurs, d'une puissance excédant 375 kVA mais n'excédant pas 750 kVA	15%
852841	Moniteurs à tube cathodique, pour système automatique de traitement de l'info du n° 84.71	10%
853922	Lampes et tubes à incandescence d'une puis <=200 W & d'une tension > 100 V	1%
850940	Broyeurs et mélangeurs pour aliments; presse-fruits et légumes, usage domestique	5%
853510	Fusibles et coupe-circuit à fusibles, pour une tension excédant 100 volts	15%
850220	Groupes électrogènes, à moteur à piston à allumage par étincelles	15%
854020	Tubes pour caméras de télévision et autres tubes à photocathode	10%
853223	Condensateurs fixes à diélectrique en céramique, à une seule couche, nda	7%
851640	Fers à repasser électriques	2%
850750	Accumulateurs électriques au nickel-hydrure métallique	1%
852719	App récepteur radio pouvant fonctionner sans source d'énergie extérieure, nda	3%
852729	Appareils récepteurs de radiodiffusion pour les véhicules automobiles, nda	3%
851711	Postes téléphoniques d'usagers par fil à combinés sans fil	3%

Code SH	Marchandises	% Cu
850213	Groupes électrogènes à moteur diesel, d'une puissance excédant 375 kVA	15%
850610	Piles et batteries au bioxyde, de manganèse	1%
850740	Accumulateurs électriques au nickel-fer	1%
852210	Lecteurs phonographiques	1%
851672	Grille-pain électrothermique, pour usage domestique	5%
851511	Fers et pistolets à braser électriques	5%
850240	Convertisseurs rotatifs électriques	15%
841112	Turboréacteurs, d'une poussée excédant 25 KN	2%
848180	Robinets, valves et articles similaires, nda	4%
841111	Turboréacteurs, d'une poussée n'excédant pas 25 KN	2%
847150	Unités de machines automatiques de traitement de l'information; unités de traitement autres que celles du no. 8471.41 ou 8471.49, contenant ou non dans un même boîtier un ou deux des types d'unités suivants: unités de mémoire, unités d'entrée ou unités de sortie	2%
842952	Pelles mécaniques et excavateurs dont la superstructure effectue une rotation 360	2%
847989	Machines et appareils mécaniques ayant une fonction propre, nda	2%
841182	Turbines à gaz, nda, d'une puissance excédant 500 kW	5%
840734	Moteurs à piston alternatif, propulsion des véhicules, cylindrée > 100 cm ³	1.3%

Code SH	Marchandises	% Cu
841181	Turbines à gaz, nda, d'une puissance n'excédant pas 500 kW	5%
847130	Mach automatique de traitement de l'information portative, pds <= 10 kg,	2%
842951	Chargeuses et chargeuses-pelleteuses, à chargement frontal	2%
841370	Pompes, centrifuges, pour liquides, nda	4%
841480	Compresseurs à l'air ou gaz, hottes	4%
841950	Échangeurs de chaleur	3%
841510	Machines et appareils pour le conditionnement de l'air, formant un seul corps, conçus pour être fixés sur une fenêtre, un mur, un plafond ou sur le sol	3%
842240	Machines & appareils à empaqueter ou emballer les marchandises, nda	2%
841869	Matériel, machines et appareils pour la production du froid, nda	2%
847180	Autres unités de machines automatiques de traitement de l'information	2%
842230	Machines/appareils à remplir, fermer, capsuler et étiqueter contenants et gazéifier les boissons	2%
845710	Centres d'usinage pour le travail des métaux	2%
842139	Appareils pour la filtration ou l'épuration des gaz, nda	3%
841360	Pompes volumétriques rotatives, pour liquides, nda	4%
841459	Ventilateurs, nda	3%
847141	Machines automatiques de traitement de l'information, comportant, sous une même enveloppe, au moins une unité centrale de traitement	10%

Code SH	Marchandises	% Cu
	et, qu'elles soient ou non combinées, une unité d'entrée et une unité de sortie (sauf portatives d'un poids ≤ 10 kg et celles se présentant sous systèmes et à l'exclusion des unités périphériques) ...	
842720	Chariots de manutention, autopropulsés, nda	2%
844331	Machines qui assurent au moins deux des fonctions suivantes: impression, copie ou transmission de télécopie, aptes à être connectées à une machine automatique de traitement de l'information ou à un réseau	3%
842890	Machines et appareils de levage, chargement, déchargement ou manutention, nda.	2%
847160	Unités d'entrée ou sortie, a/s unités de mémoire sous une même enveloppe	10%
841381	Autres pompes pour liquides, nda	4%
844332	Machines qui assurent seulement une des fonctions impression, copie ou transmission de télécopie, aptes à être connectées à une machine automatique de traitement de l'information ou à un réseau	10%
841582	Machines et appareils pour le conditionnement de l'air, avec dispositif de réfrigération mais sans soupape d'inversion du cycle thermique	3%
841350	Pompes volumétriques alternatives, nda	4%
842129	Appareils pour la filtration ou l'épuration des liquides, nda	2%
847982	Machines et appareils à mélanger, malaxer, concasser, broyer, cribler, tamiser, homogénéiser, émulsionner ou brassier, nda.	2%
841981	Appareils et dispositifs pour la préparation de boissons chaudes ou la cuisson ou le chauffage des aliments (sauf appareils domestiques)	5%

Code SH	Marchandises	% Cu
842790	Chariots de manutention munis d'un dispositif de levage, non autopropulsés	2%
847149	Machines automatiques de traitement de l'information se présentant sous forme de systèmes	10%
847710	Machines à mouler par injection pour le travail du caoutchouc ou des matières plastiques ou pour la fabrication de produits en ces matières	2%
847720	Extrudeuses, pour le caoutchouc ou les matières plastiques, nda	2%
842123	Appareils pour la filtration des huiles minérales et carburants pour les moteurs à allumage par étincelles ou par compression	2%
848071	Moules pour le moulage par injection ou par compression pour caoutchouc ou plastiques	2%
841410	Pompe à vide	4%
842121	Appareils pour la filtration ou l'épuration, des eaux	2%
841810	Réfrigérateurs et congélateurs-conservateurs combinés, avec portes extérieures séparées	3%
846221	Machines à rouler, cintrer, plier, dresser ou planer, à commande numérique, pour le travail des métaux	2%
843680	Machines et appareils pour l'agriculture, la sylviculture, l'horticulture ou l'apiculture, nda.	2%
844313	Machines et appareils à imprimer offset, nda	2%
841850	Meubles pour la conservation et l'exposition de produits, incorporant un équipement pour la production du froid (sauf réfrigérateurs et con-	3%

Code SH	Marchandises	% Cu
	gélateurs-conservateurs combinés, à portes extérieures séparées, réfrigérateurs ménagers, meubles congélateurs-conservateurs du type coffre d'une capacité <= 800 l ou du type armoire d'une capacité <= 900 l)	
842489	Machines et appareils mécaniques, même à main, à projeter, disperser ou pulvériser des matières liquides ou en poudre, nda.	2%
844180	Machines et appareils pour le travail de pâte à papier/papier/carton, nda	2%
841451	Ventilateurs de table, de sol, muraux, plafonniers, de toitures ou de fenêtres, à moteur électrique incorporé, d'une puissance <= 125 W	4.6%
847780	Machines et appareils pour le travail du caoutchouc ou des matières plastiques ou pour la fabrication de produits en ces matières nda. dans le chapitre 84	2%
844130	Machines pour la fabrication de boîtes, caisses, tubes, tambours ou contenants similaire. (autrement que par moulage) en pâte à papier, papier ou carton (sauf installations de séchage et machines à coudre)	2%
842211	Machines à laver la vaisselle de type ménager	2.3%
842649	Bigues, grues ou chariots-grues autopropulsés, nda	2%
847190	Autres machines de traitement de l'information, nda	2%
843850	Machines et appareils pour le travail des viandes	5%
841320	Pompes actionnées à la main, a/q celles des n°s 8413.11 ou 8413.19	4%
841460	Hottes, dont le plus grand côté horizontal n'excède pas 120 cm	4.6%
841430	Compresseurs des types utilisés dans les équipements frigorifiques	4%
842119	Centrifugeuses, nda	2%

Code SH	Marchandises	% Cu
847420	Machines et appareils à concasser, broyer ou pulvériser les pierres ou minérais, etc	2%
842691	Grues conçus pour être montés sur un véhicule routier	2%
843320	Faucheuses à foin, y compris les barres de coupe à monter sur tracteur	2%
846510	Machines-outils pour le travail du bois, des matières plastiques dures, etc. pouvant effectuer différents types d'opérations d'usinage, sans changement d'outils entre ces opérations	2%
842611	Ponts roulants et poutres roulantes, sur supports fixes	2%
842710	Chariots de manutention, autopropulsés à moteur électrique	2%
843410	Machines à traire	2%
845961	Machines à fraiser, nda, à commande numérique, pour l'enlèvement du métal	2%
847290	Machines et appareils de bureau, nda	3%
842511	Palans à moteur électrique	2%
841581	Machines et appareils pour le conditionnement de l'air, avec dispositif de réfrigération et soupape d'inversion du cycle thermique	3%
845129	Machines à sécher, nda, autres que les machines du n° 84.50	2.3%
842911	Bouteurs (bulldozers) et bouteurs biais, (angledozers) à chenilles	2%
846729	Outils, nda, pour emploi à la main, à moteur électrique incorporé	5%
843880	Machines et appareils pour la préparation ou la fabrication industrielle d'aliments ou de boissons, nda	5%

Code SH	Marchandises	% Cu
846592	Machines à dégauchir ou à raboter, machines à fraiser ou à moulurer, pour le travail du bois, du liège, de l'os, du caoutchouc durci, des matières plastiques dures ou matières dures similaires	2%
843330	Râteaux-faneurs et autres appareils de fenaison	2%
847910	Machines et appareils pour travaux public, bâtiment ou travaux analogues	2%
847050	Caisses enregistreuses	3%
842810	Ascenseurs et monte-charge	2%
847950	Robots industriels, non dénommés ni compris ailleurs	2%
846241	Machines (y comprises les presses), à poinçonner ou à gruger, y comprises. les machines combinées à poinçonner et à cisailler, à commande numérique, pour le travail des métaux	2%
843229	Scarificateurs, cultivateurs, les extirpateurs et les sarcleuses	2%
845811	Tours horizontaux, à commande numérique, pour l'enlèvement de métal	2%
843810	Machines et appareils pour la boulangerie/pâtisserie ou pour la fabrication des pâtes alimentaires	5%
846591	Machines à scier, pour le travail du bois, des matières plastiques dures, etc. (autres que pour emploi à la main)	2%
844316	Machines et appareils à imprimer, flexographiques	2%
843340	Presses à paille ou à fourrage, y compris les presses ramasseuses	2%
846711	Outils pneumatiques rotatifs, pour emploi à la main	5%

Code SH	Marchandises	% Cu
846291	Presses hydrauliques pour travailler le métal	2%
847410	Machines et appareils à trier, cribler, séparer ou laver les matières minérales solides (les poudres et les pâtes) (à l'exclusion des centrifugeuses et des filtres presses)	2%
847740	Machines à mouler sous vide et autres machines à thermoformer pour le travail du caoutchouc ou des matières plastiques ou pour la fabrication de produits en ces matières	2%
840310	Chaudières pour le chauffage central, nda	1%
842959	Excavatrices, nda, autopropulsés	2%
848620	Machines et appareils pour la fabrication des dispositifs à semi-conducteur	2%
846210	Machines à forger ou à estamper, moutons, marteau-pilon et martinets, pour le travail des métaux	2%
847730	Machines à mouler par soufflage, pour le caoutchouc ou les matières plastiques, nda	2%
846150	Machines à scier ou à tronçonner par l'enlèvement du métal	2%
841440	Compresseurs d'air montés sur châssis à roues et remorquables	4%
842410	Extincteurs, même chargés	2%
843820	Machines et appareils pour la confiserie ou pour la fabrication du cacao ou du chocolat	5%
846021	Machines à rectifier à 0,01 mm près à c/n, nda, pour l'enlèvement du métal	2%

Code SH	Marchandises	% Cu
843041	Machines de sondage ou de forage, nda, autopropulsées	2%
847759	Machines pour mouler ou former le caoutchouc ou les matières plastiques, nda	2%
842920	Niveleuses ou niveleuses-régleuses autopropulsées	2%
843420	Machines et appareils de laiterie	5%
845931	Aléseuse-fraiseuses, nda, à commande numérique, pour l'enlèvement du métal	2%
843221	Hères à disques (pulvérisateurs)	2%
841583	Machines et appareils pour le conditionnement de l'air comprenant un ventilateur à moteur, sans dispositif de réfrigération mais bien des dispositifs propres à modifier la température et l'humidité de l'air, nda	3%
841319	Pompes pour liquides, avec dispositif mesurleur ou conçues pour en comporter, nda	4%
843031	Haveuses et abatteuses pour charbons et minerais, autopropulsées	2%
842542	Crics et vérins, nda, hydrauliques	2%
844110	Coupeuses de tous types pour la pâte à papier, du papier ou du carton	2%
842420	Pistolets aérographes et appareils similaires	2%
845430	Machines à couler (mouler) pour métallurgie, acierie ou fonderie	2%
846789	Outils pour emploi à la main, hydrauliques ou à moteur non électrique incorporé, nda	5%
841939	Séchoirs autres que les appareils domestiques, non électriques, nda	2%

Code SH	Marchandises	% Cu
842549	Crics et vérins, nda	2%
842833	Appareils élévateurs, transporteurs ou convoyeurs pour marchandises, à action continue, à bande ou à courroie	2%
845690	Machines-outils travaillant par enlèvement de toute matière, opérant par procédés électrochimiques, par faisceaux d'électrons ou par faisceaux ioniques	2%
843351	Moissonneuses-batteuses	2%
843359	Machines pour la récolte de produits agricoles, nda	2%
845020	Machines à laver le linge, d'une capacité excédant 10 kg	5%
845530	Cylindres de laminoirs pour métaux	2%
843240	Épandeurs de fumier et distributeurs d'engrais	2%
845011	Machines à laver le linge, automatiques, d'une capacité n'excédant pas 10kg	5%
843020	Chasse-neige, non autopropulsés	2%
843780	Machines et appareils de minoterie ou pour traitement des céréales ou légumes secs	5%
842539	Treuils ou cabestans, a/q à moteur électrique, nda	2%
842531	Treuils ou cabestans, nda, à moteur électrique	2%
843230	Semoirs, plontoirs et repiqueurs	2%
846593	Machines à meuler, à poncer ou à polir, pour le travail du bois, du liège, de l'os, du caoutchouc durci, des matières plastiques dures ou matières dures similaires	2%

Code SH	Marchandises	% Cu
846229	Machines (incluant les presses), à rouler, cintrer, plier, dresser ou planer, pour le travail des métaux (autres qu'à commande numérique)	2%
843629	Machines et appareils pour l'aviculture, nda	2%
845150	Machines et appareils à enrouler, dérouler, plier, couper ou denteler les tissus	5%
843069	Machines et appareils de construction, nda, non autopropulsés	2%
844339	Autres machines à imprimer, nda	2%
844313	Machines et appareils à imprimer offset, nda	2%
846420	Machines à meuler ou à polir pour le travail de la pierre, des produits céramiques, du béton, de l'amiante-ciment ou de matières minérales similaires, ou pour le travail à froid du verre	2%
841840	Meubles congélateurs du type armoire, d'une capacité n'excédant pas 900 l	3%
847689	Machines automatiques de vente de produits, nda	2%
846490	Machines-outils pour le travail de la pierre, du béton, de l'amiante-ciment ou de matières minérales similaires, ou pour le travail à froid du verre	2%
840682	Turbines à vapeur d'une puissance n'excédant pas 40 MW, nda	1%
843311	Tondeuses à gazon, à moteur, dispositif de coupe tourne dans un plan horizontal	2%
846410	Machines à scier pour le travail de la pierre, des produits céramiques, du béton, de l'amiante-ciment ou de matières minérales similaires, ou pour le travail à froid du verre	2%

Code SH	Marchandises	% Cu
846599	Machines-outils pour le travail du bois, du liège, de l'os, du caoutchouc durci, des matières plastiques dures ou matières dures similaires	2%
846390	Machines-outils pour le travail des métaux, des carbures métalliques frittés ou des cermets, sans enlèvement de matière	2%
841121	Turbopropulseurs, d'une puissance n'excédant pas 1.100 kW	2%
843860	Machines et appareils pour la préparation des fruits ou des légumes	5%
841520	Machines et appareils pour le conditionnement de l'air, utilisé dans véhicule automobile	3%

ANNEXE A-4: Toutes les importations de produits finis considérées à l'étape d'utilisation

Code SH	Produits	Colonne1
870120	Tracteurs routiers pour semi-remorques (tracteurs pour camions)	1%
870323	Automobiles, à moteur à piston alternatif d'une cylindrée >1 500 cm ³ mais <=3 000 cm ³	1.50%
870423	Camions à moteur diesel/semi-diesel, d'un poids en charge maximal >20 tonnes	1%
870190	Tracteurs, nda, actionnés par un moteur à combustion interne	1%
870324	Automobiles à moteur à piston alternatif d'une cylindrée excédant 3 000 cm ³	1.50%
870210	Autobus à moteur diesel ou semi-diesel, de plus de neuf places assises	1%

Code SH	Produits	Colonne1
870333	Automobiles à moteur diesel/semi-diesel d'une cylindrée excédant 2 500 cm ³	1.50%
870310	Véhicules pour se déplacer sur la neige, d'une capacité de transport de personnes inférieure à 10 places; véhicules pour le transport de personnes sur les terrains de golf et similaires	1%
871200	Bicyclettes et autres cycles, y compris les triporteurs, sans moteur	1%
870422	Camions à mot diesel/semi-diesel, d'un poids en charge max > 5 ton, <=20 ton	1%
870321	Automobiles, à moteur à piston alternatif d'une cylindrée n'excédant pas 10 cm ³	1.30%
870290	Autobus, nda, avec capacité de plus de neuf places assises	1%
871150	Motocycles à moteur à piston alternatif, d'une cylindrée excédant 800 cm ³	1.30%
870590	Véhicules automobiles à usages spéciaux, nda	1%
870410	Tombereaux automoteurs conçus pour être utilisés en dehors du réseau routier	2%
870510	Camions-grues	1%
871140	Motocycle à moteur à piston alternatif, une cylindrée >500 cm ³ mais <=800 cm ³	1.30%
870530	Voiture de lutte contre l'incendie	1%
871680	Brouettes, poussettes, pousse-pousse, et autres véhicules non auto	1.30%

Code SH	Produits	Colonne1
870431	Camions à mot à piston à allumage par étincelles d'un poids, char max <=5 ton	1%
871130	Motocycle à moteur à piston alternatif, une cylindrée >250 cm ³ mais<=500 cm ³	1.30%
870332	Voitures de tourisme et autres véhicules automobiles principalement conçus pour le transport de moins de 10 personnes, y compris les voitures du type «break» et les voitures de course, uniquement à moteur diesel, d'une cylindrée > 1 500 cm ³ mais <= 2 500 cm ³	1.50%
870421	Camions à mot diesel/semi-diesel, d'un poids en charge max <=5 tonnes	1%
871120	Motocycle à moteur à piston alternatif, une cylindrée >50 cm ³ mais <=250 cm ³	1.30%
870432	Camions à mot à piston à allumage par étincelles d'un poids, char max > 5 ton	1%
871390	Fauteuils roulants et autres véhicules pour invalides, avec mécanisme de propulsion (sauf automobiles et bicyclettes munies de dispositifs spéciaux)	1%
870322	Automobiles à moteur à piston alternatif d'une cylindrée >1 000 cm ³ mais <=1 500 cm ³	1.50%
870130	Tracteurs à chenilles	2%
871190	Motocycles équipés d'un moteur auxiliaire	1.30%
870540	Camions-bétonnières	1%

Code SH	Produits	Colonne1
871310	Véhicules pour invalides (fauteuils roulants), sans mécanisme de propulsion	1%
870390	Automobiles, nda, à turbine à gaz	1.50%
870919	Chariots automobiles non électriques	1%
870911	Chariots automobiles électriques, utilisés dans les usines et entrepôts	2%
871110	Motocycles à moteur à piston alternatif, d'une cylindrée n'excédant pas 50 cm ³	1.30%
870110	Motoculteurs	2%
870490	Camions, nda	1.50%
870331	Automobiles à moteur diesel/semi-diesel d'une cylindrée <= 500 cm ³	1.50%
880240	Avions et autres véhicules aériens, nda, poids à vide excédant 15 000 kg	2%
880212	Hélicoptères, d'un poids à vide excédant 2 000 kg	2%
880230	Avions et & autres véhicules aériens, nda, poids à vide > 2 000 kg mais <= 15 000 kg	2%
880211	Hélicoptères, d'un poids à vide n'excédant pas 2 000 kg	2%
880220	Avions et autres véhicules aériens, nda, d'un poids à vide <= 2 000 kg	2%
890392	Bateaux à moteur, autres qu'à moteur hors-bord	0.13%
890391	Bateaux à voile, même avec moteur auxiliaire	0.13%

Code SH	Produits	Colonne1
890690	Autres bateaux, nda, et bateaux de sauvetage autres qu'à rames	0.13%
890400	Remorqueurs et bateaux pousseurs	0.50%
890590	Docks flottants et autres bateaux à fonction spéciale	0.13%
890800	Bateaux et autres engins flottants à dépecer	0.13%
860400	Véhicules pour l'entretien ou le service des voies ferrées, même autopropulsés	0.50%
860210	Locomotives, diesel-électrique	0.50%
851762	Appareils pour la réception, la conversion et la transmission ou la régénération de la voix, d'images ou d'autres données, y compris les appareils de commutation et de routage	3%
850231	Groupes électrogènes, à énergie éolienne	15%
852349	Supports optiques, nda	2%
852560	Appareils d'émission incorporant un appareil de réception	3%
852691	Appareils de radionavigation	2%
852580	Caméras de télévision, appareils photographiques numériques et caméscopes	3%
852550	Appareils d'émission pour la radiodiffusion ou la télévision, sans appareil de réception	3%
852610	Appareils de radiodétection et de radiosondage (radar)	2%
851822	Haut-parleurs multiples montés dans la même enceinte	3%

Code SH	Produits	Colonne1
851671	Appareils électrothermiques pour la préparation du café ou du thé, usage domestique, nda	5%
851660	Fours, cuisinières, réchauds, grils et rôtissoires, électriques, nda	1%
850940	Broyeurs et mélangeurs pour aliments; presse-fruits et légumes, usage domestique	5%
852692	Appareils de radiotélécommande	2%
850423	Transformateurs à diélectrique liquide, d'une puissance excédant 100 kVA	15%
851830	Écouteurs, même combinés avec un microphone	3%
851712	Téléphones pour réseaux cellulaires et pour autres réseaux sans fil	3%
852872	Appareils récepteurs de télévision en couleurs, même incorporant un appareil récepteur de radiodiffusion ou un appareil d'enregistrement ou de reproduction du son ou des images, conçus pour incorporer un dispositif d'affichage ou un écran vidéo	3%
851629	Appareils électriques pour le chauffage des locaux, du sol, etc,	4.60%
851718	Postes téléphoniques d'usager, nda; visiophones	3%
851679	Appareils électrothermiques, pour usage domestique, nda	4.60%
850431	Transformateurs à sec, puissance <= 1 kVA	15%
853180	Appareils électriques de signalisation acoustique ou visuelle, nda	1%

Code SH	Produits	Colonne1
850220	Groupes électrogènes, à moteur à piston à allumage par étincelles	15%
851840	Amplificateurs électriques d'audiofréquence	3%
850213	Groupes électrogènes à moteur diesel, d'une puissance excédant 375 kVA	15%
851810	Microphones et leurs supports	3%
853931	Lampes et tubes fluorescents, à cathode chaude	1%
851821	Haut-parleur unique monté dans son enceinte	3%
851310	Lampes électriques portatives, destinées à fonctionner au moyen de leur propre source d'énergie	1%
853922	Lampes et tubes à incandescence d'une puis <=200 W & d'une tension > 100 V	1%
850980	Appareils électromécaniques à moteur électrique incorporé, usage domestique, nda	5%
850811	Aspirateurs domestique, moteur électrique incorporé, puis <= 1.500 W, volume réservoir <= 20 L	5%
852869	Projecteurs, nda	1%
852190	Appareils d'enregistrement ou de reproduction vidéo-phoniques, nda	3%
852861	Projecteurs, pour système automatique de traitement de l'information du n° 84.71	1%

Code SH	Produits	Colonne1
850422	Transformateurs à diélectrique liquide, une puissance >650 kVA mais < 100 kVA	15%
853110	Avertisseurs électriques pour la protection contre le vol ou l'incendie	1%
851521	Machines et appareils pour le soudage des métaux par résistance, entièrement ou partiellement automatiques	5%
854320	Générateurs de signaux	1%
851761	Stations de base	3%
851650	Fours à micro-ondes	4.60%
853921	Lampes et tubes halogènes, au tungstène	1%
851672	Grille-pain électrothermique, pour usage domestique	5%
850434	Transformateurs électriques, d'une puissance excédant 500 kVA, nda	15%
850432	Transformateurs à sec, puissance > 1 kVA mais <= 16 kVA	15%
852799	Récepteurs de radiodiffusion, ne pouvant fonctionner qu'avec une source d'énergie, non combinés à un appareil d'enregistrement ou de reproduction du son et non combinés à un appareil d'horlogerie, nda	3%
854160	Cristaux piézo-électriques montés	10%
850211	Groupes électrogènes à moteur diesel, d'une puissance n'excédant pas 75 kVA	15%
851829	Haut-parleurs, nda	3%

Code SH	Produits	Colonne1
850433	Transformateurs électriques, puissance excédant 16 kVA mais <= 500 kVA, nda	15%
850819	Aspirateurs, à moteur électrique incorporé, nda	5%
850421	Transformateurs à diélectrique liquide, d'une puissance n'ex-cédant pas 650 kVA	15%
853949	Lampes et tubes à rayons ultraviolets ou infrarouges, nda	1%
853929	Lampes & tubes à incandescence, exclus ceux à rayons ultra-violet ou infrarouge, nda	1%
851989	Appareils d'enregistrement et de reproduction du son, nda	3%
850212	Groupes électrogènes à moteur diesel, d'une puissance > 75 kVA mais <=375 kVA	15%
851632	Appareils électrothermiques pour la coiffure, nda	2%
851930	Platines tourne-disques	3%
851531	Machines et appareils pour le soudage des métaux à l'arc ou au jet de plasma, entièrement ou partiellement automatiques	5%
851633	Appareils électrothermiques pour sécher les mains	2%
852791	Appareils récepteurs radio combinés à appareils d'enregistrement ou de reproduction du son, nda	3%
851539	Machines et appareils pour le soudage des métaux à l'arc ou au jet de plasma, non automatiques	5%
851631	Appareils électrothermiques pour la coiffure, sèche-cheveux	2%
850239	Groupes électrogènes, nda	15%

Code SH	Produits	Colonne1
851519	Machines et appareils pour le brasage fort ou tendre électriques, nda	5%
853939	Lampes à décharge, autres qu'à rayons ultraviolets, nda	1%
851640	Fers à repasser électriques	2%
851711	Postes téléphoniques d'usagers par fil à combinés sans fil	3%
850860	Aspirateurs, nda	5%
854310	Accélérateurs de particules, nda dans Chapitre	10%
851420	Fours fonctionnant par induction ou par pertes diélectriques industriels	15%
853941	Lampes et tubes à rayons ultraviolets ou infrarouges; lampes à arc	1%
851529	Machines et appareils pour le soudage des métaux par résistance électrique, nda	5%
852719	App récepteur radio pouvant fonctionner sans source d'énergie extérieure, nda	3%
851020	Tondeuses à moteur électrique incorporé	2%
851511	Fers et pistolets à braser électriques	5%
841112	Turboréacteurs, d'une poussée excédant 25 KN	2%
841111	Turboréacteurs, d'une poussée n'excédant pas 25 KN	2%
842952	Pelles mécaniques, autopropulsées, dont la superstructure peut effectuer une rotation de 360°	2%

Code SH	Produits	Colonne1
847989	Machines et appareils mécaniques ayant une fonction propre, nda	2%
842951	Chargeuses et chargeuses-pelleteuses, à chargement frontal	2%
841510	Machines et appareils pour le conditionnement de l'air, formant un seul corps ou du type "split-system" [systèmes à éléments séparés], du type mural ou pour fenêtres	3%
842240	Machines & appareils à empaqueter ou emballer les marchandises, nda	2%
841869	Matériel, machines et appareils pour la production du froid, nda	2%
847180	Autres unités de machines automatiques de traitement de l'information	2%
845710	Centres d'usinage pour le travail des métaux	2%
842139	Appareils pour la filtration ou l'épuration des gaz, nda	3%
841459	Ventilateurs, nda	3%
842720	Chariots de manutention, autopropulsés, nda	2%
845610	Machines-outils opérant par laser ou autre faisceau de lumière ou de photons	2%
844331	Machines qui assurent au moins deux des fonctions suivantes: impression, copie ou transmission de télécopie, aptes à être connectées à une machine automatique de traitement de l'information ou à un réseau	3%

Code SH	Produits	Colonne1
842890	Machines et appareils de levage, chargement, déchargement ou de manutention, nda	2%
844332	Machines qui assurent seulement une des fonctions impression, copie ou transmission de télécopie, aptes à être connectées à une machine automatique de traitement de l'information ou à un réseau	10%
841582	Machines et appareils pour le conditionnement de l'air, avec dispositif de réfrigération, nda	3%
842129	Appareils pour la filtration ou l'épuration des liquides, nda	2%
847982	Machines et appareils pour mélanger, malaxer, concasser, broyer ayant une fonction pro, nda	2%
841981	Appareils et dispositifs pour la préparation de boissons chaudes ou la cuisson ou le chauffage des aliments (sauf appareils domestiques)	5%
842790	Chariots de manutention munis d'un dispositif de levage, non autopropulsés	2%
847149	Autres machines automatiques de traitement de l'info, prés sous forme de systèmes	10%
847710	Mach à mouler par injection le caoutchouc ou les matières plastiques, nda	2%
847720	Extrudeuses, pour le caoutchouc ou les matières plastiques, nda	2%
842123	Appareils pour la filtration des huiles min dans les moteurs à allumage par étincelle ou compression	2%

Code SH	Produits	Colonne1
848071	Moules pour le moulage par injection ou par compression pour caoutchouc ou plastiques	2%
842121	Appareils pour la filtration ou l'épuration, des eaux	2%
841810	Combinaisons de réfrigérateurs congélation munis de portes extérieures séparées	3%
846221	Machines à rouler, cintrer, plier, dresser ou planer, à commande numérique, pour le travail des métaux	2%
843680	Machines et appareils pour l'agriculture, la sylviculture, l'horticulture ou l'apiculture	2%
844313	Machines et appareils à imprimer offset, nda	2%
841850	Meubles [coffres, armoires, vitrines, comptoirs] pour la conservation et l'exposition de produits, incorporant un équipement pour la production du froid (sauf réfrigérateurs et congélateurs-conservateurs combinés, à portes extérieures séparées, réfrigérateurs ménagers, meubles congélateurs-conservateurs du type coffre d'une capacité <= 800 l ou du type armoire d'une capacité <= 900 l)	3%
842489	Machines et appareils mécaniques, même à main, à projeter, disperser ou pulvériser des matières liquides ou en poudre, nda	2%
844180	Machines et appareils pour le travail de pâte à papier/papier/carton, nda	2%
841451	Ventilateurs de table, de sol, muraux, plafonniers, de toitures ou de fenêtres, à moteur électrique incorporé, d'une puissance <= 125 W	4.60%

Code SH	Produits	Colonne1
847780	Machines et appareils pour le travail du caoutchouc ou des matières plastiques ou pour la fabrication de produits en ces matières nda. dans le chapitre 84	2%
844130	Machines pour la fabrication de boîtes, caisses, tubes, tambours ou contenants similaires. (autrement que par moulage)	2%
847930	Presses pour la fabrication de panneaux de particules, de fibres de bois ou autres matières ligneuses et autres machines et appareils pour le traitement du bois ou du liège	5%
842211	Machines à laver la vaisselle de type ménager	2.3%
842649	Bigues, grues ou chariots-grues autopropulsés, nda	2%
847190	Autres machines de traitement de l'information, nda	2%
843850	Machines et appareils pour le travail des viandes	5%
841460	Hottes, dont le plus grand côté horizontal n'excède pas 120 cm	4.6%
842119	Centrifugeuses, nda	2%
847420	Machines et appareils à concasser, broyer ou pulvériser les matières minérales solides	2%
842691	Grues conçus pour être montés sur un véhicule routier	2%
843320	Faucheuses à foin, y compris les barres de coupe à monter sur tracteur	2%
846510	Machines-outils pour le travail du bois, des matières plastiques dures, etc. pouvant effectuer différents types d'opérations d'usinage, sans changement d'outils entre ces opérations	2%

Code SH	Produits	Colonne1
842611	Ponts roulants et poutres roulantes, sur supports fixes	2%
842710	Chariots de manutention, autopropulsés à moteur électrique	2%
843410	Machines à traire	2%
845961	Machines à fraiser, nda, à commande numérique, pour l'enlèvement du métal	2%
847290	Machines et appareils de bureau, nda	3%
842511	Palans à moteur électrique	2%
841581	Machines et appareils pour le conditionnement de l'air, avec dispositif de réfrigération et soupape d'inversion du cycle thermique (pompes à chaleur réversibles)	3%
845129	Machines à sécher, nda, autres que les machines du n° 84.50	2.3%
842911	Bouteurs (bulldozers) et bouteurs biais, (angledozers) à chaînes	2%
846729	Outils, nda, pour emploi à la main, à moteur électrique incorporé	5%
843880	Machines et appareils pour la préparation ou la fabrication industrielle d'aliments ou de boissons	5%
846592	Machines à dégauchir ou à raboter; machines à fraiser ou à moulurer, pour le travail du bois, des matières plastiques dures, etc.	2%
843330	Râteaux-faneurs et autres appareils de fenaison	2%

Code SH	Produits	Colonne1
847910	Machines et appareils pour travaux public, bâtiment ou travaux analogues	2%
847050	Caisses enregistreuses	3%
842810	Ascenseurs et monte-charge	2%
847950	Robots industriels, non dénommés ni compris ailleurs	2%
846241	Machines à poinçonner ou à gruger, y compris les machines combinées à poinçonner et à cisailler, à commande numérique, pour le travail des métaux	2%
843229	Scarificateurs, cultivateurs, les extirpateurs et les sacleuses	2%
845811	Tours horizontaux, à commande numérique, pour l'enlèvement de métal	2%
843810	Machines et appareils pour la fabrication industrielle des produits de boulangerie, pâtisserie ou biscuiterie ou pour la fabrication industrielle des pâtes alimentaires	5%
846591	Machines à scier, pour le travail du bois, des matières plastiques dures, etc. (autres que pour emploi à la main)	2%
844316	Machines et appareils à imprimer, flexographiques	2%
843340	Presses à paille ou à fourrage, y compris les presses ramasseuses	2%
846711	Outils pneumatiques rotatifs, pour emploi à la main	5%
846291	Presses hydrauliques pour travailler le métal	2%

Code SH	Produits	Colonne1
847410	Machines et appareils à trier, cribler, séparer ou laver les matières minérales solides	2%
847740	Machines à mouler sous vide et autres machines à thermoformer pour le travail du caoutchouc ou des matières plastiques ou pour la fabrication de produits en ces matières	2%
840310	Chaudières pour le chauffage central, nda	1%
842959	Excavatrices, nda, autopropulsés	2%
848620	Machines et appareils pour la fabrication de dispositifs à semi-conducteur ou des circuits intégrés électroniques	2%
846210	Machines à forger ou à estamper, moutons, marteau-pilon et martinets, pour le travail des métaux	2%
845730	Machines à stations multiples, pour le travail des métaux	2%
847730	Machines à mouler par soufflage pour le travail du caoutchouc ou des matières plastiques ou pour la fabrication de produits en ces matières	2%
846150	Machines à scier ou à tronçonner par l'enlèvement du métal	2%
842410	Extincteurs, même chargés	2%
843820	Machines et appareils pour la fabrication industrielle des produits de confiserie ou pour la fabrication industrielle du cacao ou du chocolat	5%
846021	Mach à rectifier à 0,01 mm près à c/n, nda, pour l'enlèvement du métal	2%
843041	Machines de sondage ou de forage, nda, autopropulsées	2%

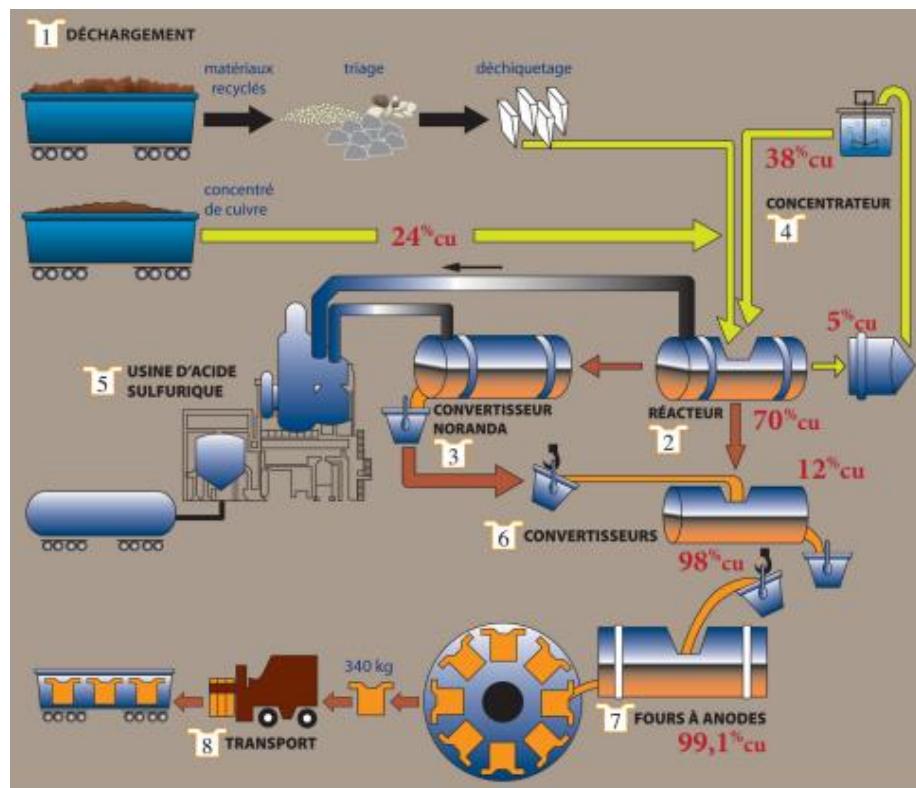
Code SH	Produits	Colonne1
847759	Mach pour mouler ou former le caoutchouc ou les matières plastiques, nda	2%
842920	Niveleuses ou niveleuses-régleuses autopropulsées	2%
843420	Machines et appareils de laiterie	5%
845931	Aléseuse-fraiseuses, nda, à commande numérique, pour l'enlèvement du métal	2%
843221	Herses à disques (pulvériseurs)	2%
841583	Machines et appareils pour le conditionnement de l'air comprenant un ventilateur à moteur, sans dispositif de réfrigération mais bien des dispositifs propres à modifier la température et l'humidité de l'air	3%
843031	Haveuses et abatteuses pour charbons et minerais, autopropulsées	2%
842542	Crics et vérins, nda, hydrauliques	2%
844110	Coupeuses de tous types pour la pâte à papier, du papier ou du carton	2%
842420	Pistolets aéographes et appareils similaires	2%
845430	Machines à couler (mouler) pour métallurgie, acierie ou fonderie	2%
846789	Outils pour emploi à la main, hydrauliques ou à moteur non électrique incorporé, nda	5%
841939	Séchoirs autres que les appareils domestiques, non électriques, nda	2%

Code SH	Produits	Colonne1
842549	Crics et vérins, nda	2%
842833	Appareils élévateurs, transporteurs ou convoyeurs pour marchandises, à action continue, à bande ou à courroie	2%
845690	Machines-outils travaillant par enlèvement de toute matière et opérant par procédés électrochimiques, par faisceaux d'électrons, par faisceaux ioniques ou par jet de plasma ; machines à découper par jet d'eau	2%
843351	Moissonneuses-batteuses	2%
843359	Machines pour la récolte de produits agricoles, nda	2%
845020	Machines à laver le linge, d'une capacité excédant 10 kg	5%
845530	Cylindres de laminoirs pour métaux	2%
843240	Épandeurs de fumier et distributeurs d'engrais	2%
845011	Machines à laver le linge, automatiques, d'une capacité n'excédant pas 10kg	5%
843020	Chasse-neige, non autopropulsés	2%
843780	Machines et appareils de minoterie ou pour traitement des céréales ou légumes secs	5%
842539	Treuils ou cabestans, a/q à moteur électrique, nda	2%
842531	Treuils ou cabestans, nda, à moteur électrique	2%
843230	Semoirs, plantoirs et repiqueurs	2%
846593	Machines à meuler, à poncer ou à polir, pour le travail du bois, des matières plastiques dures, etc.	2%

Code SH	Produits	Colonne1
846229	Machines à rouler, cintrer, plier, dresser ou planer, pour le travail des métaux (autres qu'à commande numérique)	2%
843629	Machines et appareils pour l'aviculture, nda	2%
845150	Machines et appareils à enrouler, dérouler, plier, couper ou denteler les tissus	5%
843069	Machines et appareils de construction, nda, non autopropulsés	2%
844339	Autres machines à imprimer, nda	2%
844313	Machines et appareils à imprimer offset, nda	2%
846420	Machines à meuler ou à polir pour le travail de la pierre, des produits céramiques, du béton, de l'amiante-ciment ou de matières minérales similaires, ou pour le travail à froid du verre	2%
841840	Meubles congélateurs du type armoire, d'une capacité n'excédant pas 900 l	3%
847689	Machines automatiques de vente de produits, nda	2%
843311	Tondeuses à gazon à moteur, dont le dispositif de coupe tourne dans un plan horizontal	2%
846410	Machines à scier pour le travail de la pierre, des produits céramiques, du béton, de l'amiante-ciment ou de matières minérales similaires ou pour le travail à froid du verre	2%
846599	Machines-outils pour le travail du bois, des matières plastiques dures, nda	2%
846390	Machines-outils pour le travail des métaux, des carbures métalliques frittés ou des cermets, sans enlèvement de matière	2%

Code SH	Produits	Colonne1
841121	Turbopropulseurs, d'une puissance n'excédant pas 1.100 kW	2%
843860	Machines et appareils pour la préparation des fruits ou des légumes	5%

ANNEXE B : LES ÉTAPES DE L'AFFINAGE DU CUIVRE AU QUÉBEC



source-Fonderie

HORNE

1 DÉCHARGEMENT

Le système de recyclage permet de récupérer la quasi-totalité des métaux précieux et du cuivre contenus dans les quelque 100 000 tonnes métriques de matériaux recyclés reçues annuellement. Dès l'arrivée à l'usine, un système de contre-vérification est mis en branle pour s'assurer que les matériaux reçus sont conformes aux autorisations. Après l'échantillonage, le triage et le déchiquetage, les lots des matériaux recyclés, selon leur taille, leur nature et leur teneur, sont acheminés au réacteur Noranda. Les quelque 740 000 tonnes de concentré de cuivre et autres matériaux contenant du cuivre et des métaux précieux, combinées aux matériaux recyclés, sont échantillonées et acheminées par convoyeurs vers le réacteur.

2 LE RÉACTEUR OU LE SMELTAGE EN CONTINU

La fusion s'effectue dans le réacteur où le concentré et le fondant sont chauffés à une température de 1200°C. Après avoir atteint une teneur de 70 % cuivre, la matte est transférée dans le convertisseur Noranda. L'enrichissement en oxygène de l'air utilisé génère suffisamment de chaleur

pour éliminer pratiquement le besoin en combustibles.

3 LE CONVERTISSEUR NORANDA

Mis en opération en 1997, le convertisseur Noranda fonctionne sous un principe semi-continu. Il transforme la matte du réacteur pour l'amener à une teneur en cuivre de 98 %. Le cuivre ainsi produit est transféré dans les convertisseurs pour une autre étape de transformation.

4 LE CONCENTRATEUR

Le concentrateur reçoit la scorie produite par le réacteur et le convertisseur Noranda. Après concassage, elle est réduite en fines particules dans les broyeurs, puis est pompée vers les cellules de flottation. On récupérera le cuivre en le séparant mécaniquement de ses impuretés.

5 L'USINE D'ACIDE SULFURIQUE

L'usine d'acide sulfurique comprend trois sections : dans la première, les gaz humides sont nettoyés, refroidis et asséchés; dans la deuxième (gaz secs), l'anhydride sulfureux est transformé en anhydride sulfurique, lequel est absorbé dans la dernière section (acide fort) afin de produire de l'acide sulfurique. Plus de

600 000 tonnes métriques d'acide sont produites annuellement.

6 LES CONVERTISSEURS

Le cuivre du convertisseur Noranda est transféré dans les convertisseurs, où l'on élimine la plus grande partie des impuretés par oxydation et scorification.

7 LES FOURS À ANODES

Le gaz naturel est utilisé pour enlever l'excès d'oxygène dans le cuivre provenant des convertisseurs. Rendu pur à 99,1 %, ce cuivre est finalement mis en anodes de 340 kg.

8 LE TRANSPORT

Les anodes de cuivre sont transportées, par wagons ou par camions, vers l'affinerie CCR, de Montréal-Est, pour une dernière étape de transformation. Le cuivre sera purifié à 99,99 % et vendu sur le marché.

ANNEXE C: STRATÉGIE DE CIRCULARITÉS COMMUNES AUX MÉTAUX ET AUX PRODUITS CONTENANTS LES MÉTAUX SELON EDDEC

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

		<p>Utilisation des laitiers comme amendement agricole et agrégat (ex. : Les Minéraux Harsco, Contrecœur)</p> <p>Séquestration de CO₂ avec les sous-produits de l'industrie métallurgique (ex. : CTTÉI, Sorel-Tracy)</p> <p>Céramiques de stockage d'énergie thermique à partir des laitiers (ex. : Eco-Tech Ceram, France)</p> <p>Récupération des métaux (précieux) dans les boues anodiques (ex. : Afinerie CCR, Montréal-Est)</p>
Transformation métallique et fabrication	11	Écoconception des produits : minimisation des alliages et des usages dispersifs, produits durables, réparables, recyclables
	12	Impression 3D : fabrication de pièces métalliques optimisant le processus de fabrication et stimulant la réparation
	13	Économie de fonctionnalité : vente de l'usage du produit plutôt que du produit lui-même
Utilisation	14	Atelier de réparation d'objets par les usagers (ex. : <i>Repair Café</i> , 29 pays)
	15	<p>Échanges d'objets et d'outils entre particuliers</p> <p><u>Exemples :</u></p> <p>Bibliothèque d'outils - dons et locations par les membres (ex. : La Remise, Montréal)</p> <p>Plateforme de location de produits et services entre particuliers (ex. : Maxloc, Québec)</p> <p>Plateforme gratuite d'échange d'objets entre particuliers (Mutum, France)</p>
Fin de vie	16	Recyclage des métaux (ex. : Fonderie Horne, ArcelorMittal, AIM)
	17	Recyclage des alliages : R&D pour défaire les alliages, organiser des filières de récupération, applications dans lesquelles les alliages conservent leur fonction
	18	Recyclage des usages dispersifs : applications dans lesquelles les usages dispersifs conservent leur fonction

Stratégies de circularité propres aux produits contenant les métaux		
Fils et câbles électriques	19	Écoconception de fils modulaires pour en faciliter le réemploi ou le recyclage
	20	Recyclage de câbles et fils (ex. : Nexans et Recycâbles, France)
Électroménagers (petits et gros)	21	Mise en marché de petits électroménagers réparables (ex. : Seb, France)
	22	Économie de fonctionnalité pour les électroménagers
Équipements mécaniques et industriels	23	Modularité des procédés industriels, facilitant le réemploi des équipements
Téléphones mobiles et ordinateurs portables	24	Écoconception de téléphones mobiles (ex. : Fair Phone, Pays-Bas ; PuzzlePhone, Finlande)
	25	Portail de réparation de téléphones intelligents et tablettes (ex. : Oureparer.com, France)
	26	Rachat de téléphones usagés (ex. : Vodafone et Mazuma, Royaume-Uni)
	27	Vente du service de téléphonie plutôt que du téléphone
	28	Reconditionnement et réemploi des ordinateurs (ex. : Insertech Angus, Montréal)
29 Recyclage des téléphones mobiles et ordinateurs portables		
Bâti (bâtiments et infrastructures)	30	Écoconception des poutres en acier permettant leur réemploi
	31	Entretien des bâtiments et remise en état de bâtiments existants
	32	Plateforme pour l'usage temporaire et transitoire des bâtiments vacants (ex. : Entremise, Montréal)
	33	Déconstruction sélective (ex. : déconstruction des édifices, Japon ; échangeur Turcot, Montréal ; recyclage de fenêtres par Saint-Gobain, France)

Véhicules (voitures, camions, autobus, transport maritime, ferroviaire, aéronautique)	34	Écoconception des véhicules (ex. : véhicules plus légers et résistants, ArcelorMittal ; voiture modulaire eMOC, Barcelone)
	35	Utilisation du fer comme combustible (ex. : batterie aluminium-air de Phinergy, Israël)
	36	Économie de partage dans les transports Transport en commun Plateforme de covoiturage (ex. : Amigo Express, Québec ; Blablacar, France) Service d'auto-partage (ex. : Communauto, Auto-Mobile, Québec) Location de voitures entre usagers (ex. : Getaround, Turo, ZipCar, États-Unis ; CarNextDoor, Australie)
	37	Service d'auto-partage par le manufacturier (ex. : Car2Go, Québec) Location de trains d'atterrissement (ex. : Héroux-Devtek, Longueuil) Location de moteurs (ex. : Pratt & Whitney, Longueuil)
	38	Conversion de véhicules à essence en véhicules électriques (ex. : GranTuned, Montréal)
	39	Programme de reprise des véhicules (ex. : Renault, France) Démantèlement et recyclage de trains (ex. : Véolia, France) Recyclage des automobiles (ex. : Total Métal Récupération, Laval)
Batteries Li-ion	40	Stockage d'énergie avec des batteries Lithium-ion usagées provenant de véhicules électriques
	41	Recyclage des batteries Lithium-ion (ex. : Retriev Technologies, Colombie-Britannique ; Xtrata – Glencore, Ontario; Recupyl, Singapour; Umicore, Belgique)

ANNEXE D : SCHEMA SYNTHÉTIQUE DES PROCÉDÉS CLASSIQUES DE TRAITEMENT MINÉRAL

