



MÉMOIRE
PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GESTION DES ORGANISATIONS

PAR

ABOUBACAR CISSE

B.A.A.

Analyse des interactions entre les marchés primaire et secondaire de l'aluminium au Québec : une approche par l'analyse des flux de matières

JUILLET 2025

RÉSUMÉ

Dans un contexte mondial de transition vers une économie sobre en carbone, l'aluminium s'impose comme un matériau stratégique grâce à sa légèreté, sa durabilité et surtout sa recyclabilité quasi infinie. Le Québec, avec son électricité issue majoritairement de sources hydrauliques, détient un avantage considérable dans la production d'aluminium primaire à faible empreinte carbone. Toutefois, cette performance environnementale ne se reflète pas encore pleinement dans le développement du marché de l'aluminium secondaire, ni dans l'intégration systémique des flux de matières dans une logique d'économie circulaire.

Ce mémoire a pour objectif d'évaluer dans quelle mesure l'intégration des marchés de l'aluminium primaire et secondaire peut contribuer à renforcer la circularité de la filière au Québec. Pour ce faire, une approche méthodologique basée sur l'Analyse de Flux de Matières (AFM) est mobilisée, à l'aide du logiciel STAN. L'étude propose ainsi une cartographie complète et cohérente des flux physiques d'aluminium pour l'année 2019, depuis l'importation de la bauxite jusqu'à la gestion des rebuts post-consommation, en passant par les étapes de transformation et d'utilisation.

Les résultats révèlent une forte dépendance au marché international : environ 80 % de l'aluminium primaire produit est exporté sous forme brute, tandis que la capacité locale de recyclage des rebuts post-consommation reste très limitée. Les pertes de matière dans la chaîne de valeur sont principalement liées à l'insuffisance d'infrastructures de traitement, à l'exportation des déchets vers les États-Unis, et à la faible valorisation industrielle de l'aluminium recyclé dans la province. L'analyse met également en évidence un manque d'interconnexion entre les différents segments du cycle de vie de l'aluminium, freinant la transition vers une véritable économie circulaire.

Cette recherche apporte une contribution originale en combinant l'analyse quantitative des flux de matières avec une réflexion sur les politiques publiques, les incitatifs économiques et les obstacles structurels à surmonter. Elle propose des pistes concrètes pour renforcer l'intégration des marchés : développement de filières locales de recyclage, amélioration de la traçabilité des matériaux, stimulation de la demande en aluminium secondaire et renforcement de la gouvernance circulaire.

Toutefois, l'étude présente certaines limites, notamment liées à la disponibilité et à la qualité des données. Les incertitudes statistiques ont nécessité une réconciliation des données à l'aide de l'outil STAN, mais l'absence d'un système intégré de suivi en temps réel limite la précision de certaines estimations. De plus, l'analyse s'appuie principalement sur l'année 2019 en raison de l'homogénéité et de la cohérence des données disponibles à cette date, ce qui peut restreindre la portée temporelle des résultats. Ces limites soulignent l'importance de mettre en place des mécanismes de collecte de données plus robustes pour soutenir les futures démarches d'évaluation des flux de matières.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon père, **Monsieur Daouda Cissé**, véritable modèle de droiture et de persévérance, dont les conseils et le soutien m'ont guidé tout au long de ce parcours. À ma mère, **Hawa Fofana**, j'adresse mes remerciements les plus sincères pour ses bénédictions constantes, sa patience et ses encouragements inestimables.

Je remercie également mes frères, **Mohamed** et **Oumar**, pour leur appui indéfectible et leur présence rassurante à chaque étape de ma vie académique et personnelle.

« Ceux que nous avons aimés et qui nous ont quittés ne sont plus là où ils étaient, mais ils sont partout où nous sommes. » Victor Hugo.

C'est avec une pensée pleine d'émotion que je rends hommage à la mémoire de mon défunt père **Ibrahima** et de mon frère **Dodo**, dont l'absence physique n'a jamais diminué la force de leur présence dans mon cœur.

Je tiens également à remercier chaleureusement mon directeur de recherche, le **Professeur Rémi Morin Chassé**, pour son accompagnement rigoureux et bienveillant tout au long de ce travail. Sa disponibilité, ses conseils avisés et sa confiance ont été essentiels à la réussite de ce mémoire, tant sur le plan académique que personnel.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
REMERCIEMENTS.....	iv
TABLE DES MATIÈRES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES	viii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1	6
REVUE DE LITTÉRATURE	6
1.1 L'industrie de l'aluminium	6
1.2 Le métal aluminium	8
1.3 L'industrie québécoise de l'aluminium.....	10
1.3.1 Historique.....	10
1.3.2 L'industrie de l'aluminium au Québec aujourd'hui.....	11
1.4 Processus de production de l'aluminium	13
1.4.1 Processus de production de l'aluminium primaire	14
1.4.2 Production de l'aluminium secondaire	15
1.5 L'économie circulaire	23
1.5.1 Définitions du concept et champs d'application.....	23
1.5.2 La circularité dans l'industrie de l'aluminium.....	29
1.6 Intégration des marchés	32
1.6.1 Cadre théorique : définitions et principes	32
1.6.2 Intégration dans l'industrie de l'aluminium.....	34
1.7 L'analyse de flux de matière	38
1.7.1 Cadre théorique	38
1.7.2 Modélisation de l'AFM	39
1.7.3 L'AFM dans l'industrie de l'aluminium	43
CHAPITRE 2	50
2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE.....	50
2.1 But et objectif général de l'étude	50
2.2 Objectifs spécifiques.....	51
2.3 Limites méthodologiques.....	52

2.4	Sources et caractéristiques des données.....	53
2.4.1	Sources des données	53
2.4.2	Caractéristiques des données	54
2.5	Approche méthodologique.....	55
2.6	Présentation du cadre méthodologique choisi	57
2.7	Présentation de l'outil STAN	59
2.8	Incertitude et réconciliation des données	61
2.8.1	Évaluation de l'incertitude des données	62
2.8.2	Réconciliation des données.....	64
2.9	Procédure d'élaboration de l'AMF	72
2.9.1	Processus d'électrolyse	73
2.9.2	Processus de la première transformation	74
2.9.3	Processus de mise en forme et de fabrication.....	75
2.9.4	Processus d'utilisation	77
2.9.5	Processus de gestion des déchets	80
CHAPITRE 3	82	
3	RÉSULTATS.....	82
3.1	Résultats du processus d'électrolyse.....	84
3.2	Résultats du processus de la première transformation.....	86
3.3	Résultats du processus de mise en forme et de fabrication.....	88
3.4	Résultats du processus d'utilisations	92
3.5	Résultats du processus de gestion des déchets :	96
CHAPITRE 4	101	
4	DISCUSSION.....	101
	CONCLUSION.....	107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Valeurs des flux scénario 1	66
Tableau 2 : Valeurs des flux scénario 2	68
Tableau 3 : Valeurs des flux scénario 3	71
Tableau 4 : Flux entrants et flux sortants du processus d'électrolyse.....	74
Tableau 5 : Flux entrants et flux sortants du processus de la première transformation	75
Tableau 6 : Flux entrants et flux sortants du processus de la mise en forme et de la fabrication.....	76
Tableau 7: Flux entrants et flux sortants du processus d'utilisation	77
Tableau 8 : Flux entrants et flux sortants du processus de gestion des déchets	81
Tableau 9 : Valeurs des flux du processus d'électrolyse	85
Tableau 10: Valeurs des flux du processus de la première transformation	87
Tableau 11 : Valeurs des flux des processus de mise en forme et de fabrication.....	92
Tableau 12 : Utilisation finale des produits en aluminium aux États-Unis et au Canada	94
Tableau 13 : Valeur des flux de l'étape d'utilisation.....	96

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma descriptif des boucles du cycle de l'aluminium	22
Figure 2 : Le diagramme en papillon illustre l'importance de la stratégie de boucle circulaire	25
Figure 3 : Schéma simplifié de l'économie circulaire développé par l'Institut EDDEC	27
Figure 4 : Modèle d'économie circulaire de l'ADEME	29
Figure 5 : Modélisation de l'AMF selon Eurostat.....	41
Figure 6 : Schéma d'analyse de flux de matières pour la méthode Baccini et Brunner 1991	42
Figure 7: Analyse de flux de matière de l'aluminium mondial.....	45
Figure 8: Scénario 1 avant réconciliation	65
Figure 9: Scénario 1 après réconciliation	65
Figure 10: Scénario 2 avant réconciliation	66
Figure 11: Scénario 2 après réconciliation.....	67
Figure 12:Scénario 3 avant réconciliation	68
Figure 13: Scénario 3 après réconciliation	69
Figure 14 : Cartographie des flux d'aluminium au Québec pour l'année 2019.....	83
Figure 15 : Importations de produits semi-finis et de produits finis.....	89
Figure 16 : Exportations de produits semi-finis et produits finis	90
Figure 17 : Gisement des rebuts post-consommation au Québec.....	98

INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, la question du changement climatique a pris une ampleur croissante sur la scène mondiale, incitant les gouvernements, les entreprises et la société civile à repenser leurs modèles de production et de consommation. Ce tournant s'est notamment matérialisé par la COP21 de Paris en 2015, qui a conduit à la signature de l'Accord de Paris. Le réchauffement climatique, causé principalement par les émissions de gaz à effet de serre (GES), notamment le dioxyde de carbone (CO₂), représente une menace systémique qui affecte l'ensemble de la planète. L'urgence climatique, soulignée par des rapports scientifiques comme ceux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), a conduit à une prise de conscience mondiale, renforçant les engagements en faveur de la décarbonation des secteurs économiques. En réponse, les gouvernements ont mis en place des politiques visant à réduire ces émissions, avec un objectif central : atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, c'est-à-dire un équilibre entre les émissions de gaz à effet de serre émises et celles retirées de l'atmosphère, un engagement inscrit dans des accords internationaux comme l'Accord de Paris (IPCC, 2023).

La décarbonation désigne le processus de réduction des émissions de carbone dans les activités humaines, visant ainsi à limiter l'empreinte écologique et à atteindre les objectifs de neutralité carbone. En effet, ce processus est désormais considéré comme essentiel dans les pays et des entreprises, qui sont appelés à réduire leur dépendance aux énergies fossiles et à promouvoir l'utilisation d'énergies renouvelables. Contrairement à certaines idées reçues, la décarbonation n'est pas une entrave à la compétitivité des entreprises ; au contraire, dans un contexte global, les innovations « vertes » offrent des avantages stratégiques aux entreprises qui les adoptent (Bonenfant, 2023).

L'un des moteurs majeurs de cette transition vers une société décarbonée est la transition énergétique, qui implique le passage d'un système basé sur les combustibles fossiles à un système fondé sur des sources d'énergie renouvelables, telles que l'éolien, le solaire et l'hydraulique. Cette transformation est essentielle non seulement pour réduire les émissions de CO₂, mais aussi pour diminuer la dépendance aux ressources énergétiques non renouvelables, dont l'exploitation continue d'avoir des impacts environnementaux et géopolitiques considérables. Par ailleurs, en 2020, les investissements dans les énergies propres ont connu une augmentation de 40 %, reflétant non seulement un intérêt croissant pour la réduction des gaz à effet de serre, mais aussi des enjeux économiques et de sécurité énergétique (IEA, 2023).

Toutefois, la décarbonation ne se limite pas au secteur énergétique. Les industries lourdes, telles que la sidérurgie, la chimie et la production d'aluminium, représentent une part significative des émissions mondiales de GES. Par exemple, l'industrie de l'acier génère annuellement environ 7 à 9 % des émissions mondiales de GES, tandis que la production primaire de l'aluminium est un processus particulièrement énergivore (World Steel Association 2020). Elle nécessite d'importantes quantités d'électricité pour extraire l'aluminium du minerai de bauxite, mais surtout pour transformer l'alumine en aluminium métallique par le procédé d'électrolyse (Abdollahi et al., 2021).

Ces secteurs, bien qu'indispensables à la croissance économique, reposent sur des processus intensifs en énergie, dont l'impact environnemental est difficilement évitable à court terme sans une transformation radicale des technologies utilisées. Ainsi, l'enjeu central réside dans la capacité des industries lourdes à intégrer des solutions innovantes pour réduire leur empreinte carbone tout en maintenant leur compétitivité.

Cette situation interroge la cohérence entre la performance environnementale de la filière et les principes de l'économie circulaire, qui visent à limiter l'extraction de ressources vierges en favorisant la réutilisation et le recyclage des matériaux (Ellen MacArthur Foundation 2015). Or, malgré un potentiel important, la production secondaire d'aluminium reste marginale au Québec, tant en volume qu'en termes d'intégration dans les chaînes de valeur locales. Les flux d'aluminium recyclé sont peu visibles, peu structurés, et souvent exportés vers d'autres marchés plus matures, ce qui limite l'impact systémique du recyclage au sein même de l'économie québécoise.

Par ailleurs, l'articulation entre les marchés de l'aluminium primaire et secondaire demeure mal comprise, notamment du point de vue de leur complémentarité ou concurrence, des dynamiques de prix, et des cadres réglementaires et logistiques qui encadrent leur fonctionnement. Dans un contexte où les entreprises et les gouvernements cherchent à accroître la circularité des matériaux, il devient essentiel de mieux saisir les mécanismes d'intégration entre ces deux segments de marché. Une telle compréhension permettrait de dégager des leviers concrets pour renforcer l'usage de l'aluminium recyclé, tout en réduisant la dépendance aux ressources primaires, aux importations, et aux fluctuations géopolitiques.

Dès lors, se pose la question centrale suivante : dans quelle mesure l'intégration des marchés de l'aluminium primaire et secondaire au Québec peut-elle contribuer à renforcer la circularité de cette filière stratégique, et quels en sont les freins structurels, économiques et institutionnels ?

Pour répondre à cette question centrale, cette étude adopte une approche méthodologique basée sur l'analyse de flux de matières (AFM), combinée à une lecture

critique des mécanismes d'intégration des marchés et à une mise en perspective des enjeux de circularité propres à l'industrie québécoise de l'aluminium. Le mémoire est structuré de manière à progressivement construire une réponse approfondie à cette problématique, en mobilisant des données quantitatives et qualitatives issues de sources institutionnelles, industrielles et scientifiques.

Dans un premier temps, l'introduction présente le contexte global de la transition vers une société décarbonée et souligne le rôle stratégique de l'aluminium dans cette transformation, notamment à travers ses usages dans les secteurs du transport, de la construction ou encore des technologies vertes. Ce chapitre permet de situer le Québec dans l'économie mondiale de l'aluminium, en mettant en évidence la force de son industrie primaire et la faiblesse relative du recyclage local, ce qui soulève des enjeux majeurs en matière de circularité.

Le Chapitre 1 propose une revue de la littérature qui s'articule autour de quatre axes : (1) l'état des lieux de l'industrie de l'aluminium au Québec et des processus de production primaire et secondaire ; (2) les concepts fondamentaux de l'économie circulaire appliqués à la métallurgie ; (3) les principes d'intégration des marchés, avec une attention particulière portée à la complémentarité entre le marché du métal vierge et celui du métal recyclé ; et (4) la présentation théorique de l'analyse de flux de matières comme outil de quantification et de visualisation des échanges de matière dans un système donné.

Le chapitre 2 expose la méthodologie retenue. L'outil STAN (Substance Flow Analysis), développé pour représenter graphiquement les flux de matière et leurs incertitudes, est utilisé pour modéliser le cycle de vie complet de l'aluminium au Québec pour

l'année 2019. Cette modélisation inclut les étapes de production primaire (électrolyse), de transformation, de mise en forme, d'utilisation, de génération de déchets et de recyclage. Le traitement des données comprend également une étape de réconciliation statistique, indispensable pour garantir la cohérence des flux dans le respect du principe de conservation de la masse. L'approche méthodologique s'appuie sur une triangulation des sources de données (Statistique Canada, AluQuébec, AGECO, etc.) afin de renforcer la fiabilité des résultats.

Le chapitre 3 est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats. Dans un premier temps, les flux physiques de matière sont détaillés pour chaque étape du cycle de l'aluminium, ce qui permet d'identifier les pertes, les stocks, les flux d'importation et d'exportation ainsi que les quantités réellement recyclées. Dans un second temps, une analyse de l'intégration des marchés est menée à partir des résultats de l'AFM et de données économiques : elle met en lumière les interactions entre les marchés du primaire et du secondaire, les barrières à l'intégration (infrastructures, prix, logistique, politiques publiques), ainsi que les opportunités d'amélioration.

Enfin, une discussion critique (Chapitre 4) replace les résultats dans une perspective internationale et propose des pistes concrètes pour renforcer la circularité de la filière québécoise. L'objectif est de formuler des recommandations opérationnelles et structurantes à l'intention des décideurs publics et des acteurs industriels, tout en contribuant aux réflexions académiques sur l'optimisation des chaînes de valeur métallurgiques dans une économie bas carbone. Le mémoire se termine par une conclusion sommaire.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Dans ce chapitre nous proposons une revue de littérature portant sur les principaux concepts mobilisés dans ce mémoire. L'objectif est de poser les fondements théoriques et empiriques nécessaires à la compréhension des dynamiques de l'industrie de l'aluminium, en particulier dans le contexte québécois. La première section retrace les caractéristiques de l'industrie de l'aluminium, en mettant en évidence le rôle majeur du Québec dans la production mondiale d'aluminium primaire, ainsi que les limites actuelles du développement du marché secondaire. Ensuite, une analyse des principes de l'économie circulaire est faite pour permettre d'éclairer les opportunités offertes par une meilleure valorisation de l'aluminium recyclé. Enfin, les cadres théoriques relatifs à l'intégration des marchés et à l'analyse de flux de matières (AFM) sont mobilisés pour comprendre les interactions entre les segments primaires et secondaires, et évaluer la circularité du système.

1.1 L'industrie de l'aluminium

L'industrie de l'aluminium est un secteur stratégique de l'économie mondiale, en constante expansion, avec une production dépassant les 70 millions de tonnes métriques (Mt) en 2023, contre environ 15 Mt en 1980 (International Aluminium, 2021). Bien que relativement jeune avec moins de 150 ans d'existence, cette industrie a profondément transformé les chaînes d'approvisionnement mondiales et divers secteurs économiques.

Jusqu'au XIX^e siècle, l'aluminium était considéré comme un métal rare et précieux. Les premiers lingots produits étaient coûteux à fabriquer, à tel point qu'ils étaient surnommés « argent tiré de l'argile », témoignant de leur rareté (Hirsch et al., 2008).

Ce n'est qu'en 1886, grâce à la découverte du procédé Hall-Héroult que l'aluminium a pu être produit à moindre coût. Ce procédé, développé indépendamment par Charles Martin Hall aux États-Unis et Paul Héroult en France, repose sur une méthode électrolytique pour extraire l'aluminium de l'alumine, révolutionnant ainsi l'industrie (Davis, 2007).

Aux États-Unis, Hall s'est associé à Alfred Ephraim Hunt pour fonder la Pittsburgh Reduction Company, première usine de production industrielle d'aluminium en Amérique du Nord, qui deviendra plus tard Alcoa (Aluminum Company of America), aujourd'hui l'un des leaders mondiaux du secteur.

Depuis le début du XX^e siècle, l'industrie de l'aluminium a connu une croissance soutenue, marquée par des innovations technologiques qui ont amélioré les procédés de production, réduisant les coûts et augmentant l'efficacité énergétique. Cette évolution a permis de répondre à une demande mondiale croissante provenant de plusieurs secteurs clés tels que le Transport, la Construction, les Emballages, l'Électronique et bien d'autres secteurs industriels.

Un tournant majeur a été l'émergence de la Chine comme principal acteur mondial de l'industrie de l'aluminium. Depuis les années 2000, la Chine a investi massivement dans ses infrastructures industrielles et bénéficie d'un accès privilégié aux ressources énergétiques, en particulier au charbon, bien que cette source d'énergie reste controversée pour ses impacts environnementaux (IEA, 2023). Aujourd'hui, la Chine représente plus de 50 % de la production mondiale d'aluminium primaire, bouleversant ainsi la géopolitique du métal et influençant fortement les prix mondiaux, grâce à de faibles coûts de production et une grande disponibilité énergétique, bien que largement basée sur les énergies fossiles.

L'expansion rapide de l'industrie de l'aluminium pose des défis importants, notamment en matière de soutenabilité environnementale. La production primaire d'aluminium est extrêmement énergivore, et les émissions de gaz à effet de serre (GES) associées sont conséquentes. Ces enjeux mettent en lumière l'urgence d'adopter des modèles économiques basés sur l'économie circulaire pour réduire l'impact écologique de cette industrie (Habashi, 1998).

En 2023, la demande mondiale d'aluminium a dépassé 70 millions de tonnes, avec une croissance soutenue principalement due aux marchés émergents et à l'augmentation des besoins en infrastructures et en technologies (IEA, 2021). Ce métal, parfois qualifié de « matériau du futur », joue un rôle clé dans la transition énergétique, notamment pour la production de panneaux solaires, d'éoliennes et de batteries légères.

L'intégration de pratiques circulaires telles que le recyclage, l'optimisation des procédés industriels et la conception durable des produits constitue une réponse stratégique pour concilier les besoins croissants en aluminium et la préservation des ressources naturelles.

1.2 Le métal aluminium

L'aluminium, élément chimique de numéro atomique 13, est l'un des métaux les plus abondants sur Terre, représentant environ 8 % de la croûte terrestre sous forme de divers minéraux, principalement la bauxite (Habashi, 1969). Ce métal est connu pour ses propriétés uniques qui le rendent essentiel dans de nombreux secteurs industriels. Parmi celles-ci, on peut citer sa légèreté, avec une densité de $2,7 \text{ g/cm}^3$, qui est environ un tiers de celle de l'acier. Sa résistance à la corrosion, due à la formation d'une couche protectrice d'oxyde

d'aluminium (Al_2O_3) à sa surface, en fait un matériau durable et peu sujet à la dégradation environnementale.

En outre, l'aluminium est un excellent conducteur thermique et électrique, avec environ 60 % de la conductivité électrique du cuivre pour un poids nettement inférieur, ce qui en fait un choix privilégié pour les applications électriques et électroniques. Ces propriétés, combinées à sa malléabilité et à sa ductilité, permettent de le façonner facilement en feuilles, en fils ou en structures complexes, répondant aux besoins variés des industries modernes (Madgule et al., 2022).

Malgré ses avantages, la production d'aluminium est associée à des défis environnementaux majeurs. La production primaire, basée sur le procédé Hall-Héroult, nécessite d'importantes quantités d'énergie, principalement sous forme d'électricité. À l'échelle mondiale, environ 60 % de cette énergie provient encore de sources fossiles, ce qui fait de l'industrie de l'aluminium l'une des principales émettrices de gaz à effet de serre (IEA, 2023).

De plus, l'exploitation de la bauxite, principal minerai utilisé pour produire l'aluminium, entraîne des impacts environnementaux tels que la déforestation, la perte de biodiversité et la production de résidus solides appelés boues rouges (Ken Evans, 2016). Ces défis soulignent l'importance croissante de développer des technologies plus durables et d'intensifier les efforts de recyclage pour réduire l'empreinte écologique de l'industrie.

Le rôle stratégique de l'aluminium dans les économies modernes et dans la transition énergétique en fait un matériau essentiel pour les décennies à venir. L'innovation technologique, l'adoption de pratiques circulaires et le passage à des sources d'énergie

renouvelables sont des éléments clés pour relever les défis environnementaux et maximiser les opportunités offertes par ce métal polyvalent.

1.3 L'industrie québécoise de l'aluminium

1.3.1 Historique

L'industrie de l'aluminium au Québec trouve ses racines au début du XXe siècle, à une époque où la production de ce métal se développait rapidement à l'échelle mondiale. La spécificité de la région québécoise réside dans son utilisation précoce des ressources hydroélectriques pour alimenter les procédés énergivores nécessaires à l'extraction de l'aluminium. Ce choix stratégique s'explique par l'abondance de l'hydroélectricité dans la province, qui constitue un facteur clé du succès de l'industrie québécoise (Proulx et al., 2022).

L'industrie de l'aluminium au Québec s'est réellement imposée au niveau mondial avec l'arrivée d'Alcoa (Aluminum Company of America) en 1901. Cette société a été l'un des premiers acteurs à exploiter les ressources naturelles du Québec et à y développer des infrastructures de production d'aluminium. Cependant, c'est en 1925, avec la construction de l'usine d'Arvida par Alcan, que le Québec a marqué un tournant décisif dans son histoire industrielle. Arvida, aujourd'hui située dans la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean, a rapidement été érigée comme le plus grand centre de production d'aluminium au monde, ce qui a permis au Québec de se positionner comme un acteur incontournable dans ce secteur. Cette usine, qui employait des milliers de travailleurs, faisait appel à des technologies de pointe et à un approvisionnement énergétique bon marché, ce qui en faisait un modèle à l'échelle mondiale (Nammour et al., 1977).

Le choix stratégique d'implanter l'usine d'Arvida dans la région du Saguenay–Lac-Saint-Jean n'était pas un hasard. La région bénéficie de grandes réserves hydrauliques, notamment de la rivière Saguenay, qui ont fourni une énergie abondante et bon marché. L'utilisation de l'hydroélectricité pour alimenter les processus industriels a permis à la production d'aluminium québécois de se développer à une échelle impressionnante, avec une production en constante augmentation à partir des années 1940. La centrale hydroélectrique de Chute-à-Caron, mise en service dans les années 1930, a été l'une des premières à répondre aux besoins énergétiques des usines d'Alcan, notamment pour les électrolyseurs utilisés dans la transformation de l'alumine en aluminium. Cette infrastructure énergétique a été un des moteurs essentiels du développement de l'industrie de l'aluminium dans la province (Nammour et al., 1977).

1.3.2 L'industrie de l'aluminium au Québec aujourd'hui

De nos jours, le Québec demeure un acteur majeur sur le marché mondial de l'aluminium, en particulier en Amérique du Nord. En 2021, la province produisait près de 60 % de l'aluminium nord-américain et environ 90 % de la production canadienne, consolidant ainsi sa place en tant que leader mondial dans ce secteur. Le Québec est reconnu non seulement pour ses quantités de production, mais aussi pour la qualité de son aluminium, qui bénéficie de son approche énergétiquement responsable. L'utilisation massive de l'hydroélectricité, une source d'énergie renouvelable et à faible émission de carbone, permet de réduire significativement l'empreinte écologique du métal produit dans la province (Ministère de l'Économie, 2022).

En comparaison avec d'autres régions où la production d'aluminium repose encore sur des sources d'énergie fossiles, l'aluminium québécois se distingue par sa faible empreinte carbone, c'est-à-dire la quantité totale de gaz à effet de serre émise tout au long de son cycle de production, exprimée en équivalent CO₂. En effet, la production d'une tonne d'aluminium au Québec génère environ 2 tonnes de CO₂, contre une moyenne mondiale de 12 à 16 tonnes (Pineau, 2019). Cet avantage environnemental confère au métal québécois une compétitivité unique sur le marché international, particulièrement dans un contexte où les préoccupations environnementales prennent une place de plus en plus prépondérante dans les décisions d'achat des consommateurs.

L'industrie de l'aluminium au Québec est une source de revenus primordiale pour l'économie provinciale. En 2021, elle a généré environ 7,5 milliards de dollars canadiens de retombées économiques et représentait près de 6,5 % des exportations totales de la province. En outre, ce secteur est un important pourvoyeur d'emplois, en particulier dans les régions du Saguenay–Lac-Saint-Jean et de la Côte-Nord, où il emploie directement et indirectement plus de 30 000 personnes selon Statistique Canada. Ces chiffres témoignent de l'importance stratégique de cette industrie pour le tissu économique local et régional, et de son rôle en tant que moteur de croissance pour l'ensemble de la province.

Bien que le Québec soit à l'avant-garde en matière de production d'aluminium « propre », le secteur fait face à plusieurs défis environnementaux. L'un des plus importants est la gestion des boues rouges, un sous-produit toxique généré lors du raffinage de la bauxite. En outre, les émissions de gaz à effet de serre provenant des anodes en carbone utilisées dans le procédé Hall-Héroult continuent de constituer une problématique majeure pour l'industrie. Cependant, des efforts sont en cours pour réduire ces impacts, notamment à travers

l'innovation technologique. Le projet Elysis, par exemple, vise à remplacer les anodes en carbone par des anodes inertes, ce qui pourrait permettre d'éliminer les émissions directes de CO₂ produites lors de l'électrolyse de l'alumine (Svendsen, 2022).

Le Québec possède également un potentiel considérable dans le domaine de l'aluminium secondaire, un secteur encore sous-exploité par rapport à d'autres régions du monde. La production d'aluminium secondaire, qui consiste à recycler l'aluminium plutôt qu'à le produire à partir de bauxite, présente des avantages environnementaux considérables, notamment la réduction des émissions de CO₂. En développant davantage ce secteur, le Québec pourrait non seulement renforcer sa position sur le marché mondial de l'aluminium, mais aussi contribuer à la transition énergétique mondiale en réduisant la dépendance aux ressources primaires. Un modèle économique circulaire, qui privilégie le recyclage et la réutilisation des matériaux, serait bénéfique tant pour l'économie locale que pour l'environnement.

1.4 Processus de production de l'aluminium

L'aluminium est un métal central dans le développement industriel moderne, en raison de ses nombreuses applications dans des secteurs aussi variés que l'automobile, l'aéronautique, la construction, et l'électronique. Cependant, sa production est un processus complexe et énergivore, qui commence par l'extraction d'un minéral : la bauxite. Ce minéral, bien qu'abondant dans la croûte terrestre, ne se trouve pas sous sa forme métallique dans la nature et nécessite des étapes de transformation pour être converti en aluminium. La bauxite est donc l'élément de base de toute la chaîne de production, un matériau à la fois stratégique et symbolique des enjeux environnementaux associés à l'industrie de l'aluminium.

1.4.1 Processus de production de l'aluminium primaire

1.4.1.1 Extraction de la bauxite

La bauxite est le minerai qui permet d'obtenir de l'alumine, un oxyde d'aluminium (Al_2O_3) qui sera ensuite transformé en aluminium métallique par électrolyse. Elle se trouve dans des gisements localisés principalement dans les régions tropicales et subtropicales telles que l'Australie, la Guinée, le Brésil, et la Jamaïque, qui concentrent ensemble plus de 90 % des réserves mondiales de bauxite (Nappi, 2013). Le processus d'extraction se fait généralement à ciel ouvert en raison de la faible profondeur des gisements, ce qui en fait une méthode relativement économique, mais également très destructrice pour l'environnement. Cette méthode est responsable de la déforestation, de la perte de biodiversité, ainsi que de l'érosion des sols, des phénomènes qui ont des répercussions à long terme sur les écosystèmes locaux et globaux (Almeida & Nogueira, 2015).

1.4.1.2 Le procédé Bayer : De la bauxite à l'alumine

Une fois extraite, la bauxite subit une série de traitements avant de pouvoir être transformée en alumine, matière intermédiaire indispensable pour produire l'aluminium. L'un des principaux procédés de transformation est le procédé Bayer, inventé par Karl Bayer en 1888. Ce processus chimique repose sur la dissolution de la bauxite dans une solution de soude caustique (NaOH) sous haute pression et à des températures variant de 140 °C à 250 °C, ce qui permet de séparer l'alumine du reste des impuretés présentes dans le minerai (Rai & Worrell, 2012). Cette étape génère une quantité importante de résidus appelés « boues rouges », un sous-produit contenant des oxydes de fer, de titane et de silicium. Ces boues représentent un défi environnemental majeur en raison de leur nature toxique et de la difficulté de leur gestion. Elles sont souvent stockées dans des bassins de décantation, mais

des risques de fuites, de pollution des sols et des nappes phréatiques existent, posant ainsi des problèmes complexes de gestion des déchets (Kenneth Evans, 2016).

1.4.1.3 Le procédé Hall-Héroult : L'électrolyse de l'alumine

Une fois l'alumine obtenue, elle entre dans le processus d'électrolyse pour produire de l'aluminium métallique. Le procédé utilisé est le procédé Hall-Héroult, mis au point en 1886 par les scientifiques Charles Martin Hall et Paul Héroult. Ce procédé consiste à dissoudre l'alumine dans un bain de cryolite fondu (Na_3AlF_6), puis à faire passer un courant électrique à travers ce mélange pour décomposer l'alumine en aluminium liquide et en oxygène. L'aluminium, étant plus dense, se dépose au fond de la cuve où il est récupéré périodiquement, tandis que l'oxygène s'échappe sous forme de gaz. Ce procédé, bien que relativement simple, est extrêmement énergivore et nécessite entre 13 000 et 15 000 kWh d'électricité par tonne d'aluminium produite (Gruber & Miller, 2011). Cette consommation d'énergie élevée fait de l'industrie de l'aluminium l'un des secteurs les plus consommateurs d'électricité à l'échelle mondiale. Toutefois, dans des régions comme le Québec, où l'hydroélectricité est disponible en grande quantité à faible coût, ce facteur a favorisé le développement rapide de l'industrie de l'aluminium, tout en contribuant à la réduction de l'empreinte carbone relative à la production.

1.4.2 Production de l'aluminium secondaire

Le recyclage de l'aluminium est une alternative cruciale à la production primaire, surtout dans un contexte où les préoccupations environnementales et les enjeux de durabilité prennent de plus en plus d'importance. L'aluminium secondaire est produit en récupérant des déchets d'aluminium provenant de diverses sources : canettes, emballages, pièces

automobiles, produits électroniques, et autres objets en fin de vie. Ce matériau recyclé conserve toutes les propriétés de l'aluminium primaire, telles que sa légèreté, sa résistance et sa conductivité, ce qui le rend indispensable dans de nombreuses applications industrielles.

Le principal avantage de la production d'aluminium secondaire réside dans son efficacité énergétique. En effet, pour chaque tonne d'aluminium recyclé, l'énergie utilisée est réduite de près de 95 % par rapport à celle nécessaire pour produire de l'aluminium à partir de la bauxite (Blomberg & Söderholm, 2009). Ce gain en efficacité énergétique est d'autant plus significatif qu'il permet de limiter les émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à la transition vers une économie circulaire et durable.

Cependant, bien que le recyclage de l'aluminium présente de nombreux avantages écologiques et économiques, cette filière reste encore sous-exploitée (Green, 2007).

Le recyclage de l'aluminium est principalement tributaire de la collecte et du tri des déchets d'aluminium, un domaine où des améliorations substantielles sont nécessaires pour augmenter les taux de recyclage. Des initiatives sont en cours pour encourager les industries à optimiser la récupération de l'aluminium et à investir dans des technologies de recyclage plus performantes. De plus, la mise en place de politiques publiques favorisant le recyclage et la récupération des déchets d'aluminium pourrait considérablement augmenter la part de l'aluminium secondaire dans la production totale, renforçant ainsi l'économie circulaire et réduisant la dépendance à l'égard de l'extraction primaire.

1.4.2.1 Recyclage de l'aluminium

Le recyclage de l'aluminium représente une étape cruciale dans la gestion des ressources et la réduction de l'empreinte écologique de l'industrie. Contrairement à de

nombreux autres matériaux, l'aluminium peut être recyclé quasiment indéfiniment sans perte de qualité, ce qui en fait une ressource précieuse pour l'économie circulaire. En effet, une fois arrivé en fin de vie, l'aluminium peut être réintroduit dans l'économie par le biais de processus de collecte, de tri, de raffinage et de refonte. Ces étapes permettent non seulement de réduire les besoins en extraction de bauxite, mais aussi de minimiser les impacts environnementaux associés à la production d'aluminium primaire. Actuellement, environ 30 % de l'aluminium produit dans le monde provient du recyclage, et 75 % de l'aluminium produit depuis 1888 est encore en service sous forme de nouveaux produits (European Aluminium, 2020).

1.4.2.2 Processus de recyclage de l'aluminium

Le recyclage de l'aluminium repose sur un processus structuré en plusieurs étapes interdépendantes qui assurent une transformation optimale des déchets en nouvelles matières premières prêtes à l'emploi. Ce processus comprend trois phases principales : la collecte, le tri et la refonte.

Le processus de recyclage de l'aluminium commence lorsque le métal arrive en fin de vie, qu'il soit sous forme de produits obsolètes ou de rebuts industriels. Comme pour tout matériau recyclé, l'aluminium recueilli est rarement pur, mais se présente souvent sous forme d'alliages.

- **La collecte :**

La collecte est la première étape du recyclage de l'aluminium et consiste à récupérer les produits ou matières en fin de vie pour les diriger vers des centres de tri ou directement chez des recycleurs. Le taux de collecte désigne le pourcentage de l'aluminium récupéré pour

le recyclage et peut varier considérablement en fonction du type de déchets, des fluctuations des prix des matériaux, et de la disponibilité des infrastructures logistiques (Reck & Graedel, 2012).

En outre, la collecte de l'aluminium peut différer d'une région à l'autre, les taux étant souvent plus élevés dans les zones où des systèmes de recyclage sont bien établis, comme dans les pays européens. Selon le secteur industriel, les déchets d'aluminium collectés peuvent provenir de sources diverses. Ces sources incluent notamment les canettes usagées, les emballages alimentaires, les pièces automobiles, les produits électroniques, ainsi que les équipements de construction. Cette diversité nécessite des systèmes de collecte bien conçus et adaptés pour maximiser la récupération des matériaux et éviter leur dispersion dans l'environnement (Bertram et al., 2009).

Dans le cadre du recyclage de l'aluminium, deux types principaux de déchets sont identifiés (Julie & Maurice, 2017) :

Les rebuts pré-consommation : Ces déchets proviennent des processus industriels et incluent, par exemple, les chutes de production ou les produits non conformes résultant d'erreurs de fabrication. Ces rebuts, souvent caractérisés par une pureté élevée, présentent l'avantage d'être facilement recyclables sans nécessiter de traitement préalable complexe. Leur collecte est généralement organisée directement au sein des sites de production, ce qui facilite leur récupération.

Les déchets post-consommation : Ces matériaux proviennent de produits ayant atteint la fin de leur cycle de vie, tels que les canettes, les appareils ménagers ou les éléments de construction démantelés. Contrairement aux rebuts pré-consommation, ces déchets

nécessitent une collecte plus ciblée et des efforts supplémentaires pour trier, nettoyer et préparer les matériaux en vue du recyclage. Les systèmes de gestion des déchets municipaux, les programmes de consigne ou les initiatives de récupération industrielle jouent ici un rôle clé.

- **Le Tri :**

Le tri est une étape essentielle du recyclage de l'aluminium, permettant de séparer les matériaux recyclables des déchets non conformes ou contaminés. Cette étape vise à garantir la qualité des matières premières secondaires et à maximiser leur réutilisation dans le cycle de production. Bien que l'aluminium soit un matériau recyclable à l'infini sans perte significative de ses propriétés, le tri joue un rôle crucial pour minimiser les pertes et réduire les coûts associés à la revalorisation (Laurent-Brocq & Lilensten, 2023).

La diversité des sources d'aluminium collecté, allant des canettes aux équipements électroniques, complique le processus de tri. Les matériaux peuvent être contaminés par d'autres types de métaux, des plastiques, des revêtements ou des résidus organiques, ce qui nécessite des technologies de tri sophistiquées pour assurer une séparation efficace. Par exemple, la contamination inter-alliage est un problème majeur dans le recyclage de l'aluminium, car elle peut altérer la qualité des alliages produits et limiter leur réutilisation dans des applications spécifiques.

Plusieurs méthodes de tris sont identifiées par Capuzzi et Timelli (2018) dont :

Tri manuel : Le tri manuel reste une méthode utilisée dans certaines installations, notamment pour les gros objets ou les matériaux présentant des caractéristiques visuelles

distinctes. Bien que cette approche soit coûteuse et chronophage, elle permet une précision élevée dans certaines situations.

Tri mécanique : Les technologies mécaniques, telles que les séparateurs magnétiques et les trieurs à air, sont couramment utilisées pour éliminer les impuretés et séparer les matériaux légers des plus lourds.

Tri basé sur des technologies avancées : Les systèmes modernes de tri utilisent des technologies sophistiquées, comme :

- Les trieurs à capteurs : Ces machines détectent les propriétés spécifiques des matériaux, telles que leur composition chimique ou leur densité, en utilisant des rayons X, des lasers ou des infrarouges.
- Le tri par courant de Foucault : Cette méthode est particulièrement efficace pour séparer l'aluminium des autres métaux non ferreux grâce à des champs magnétiques à haute fréquence.
- L'intelligence artificielle (IA) : De plus en plus d'installations adoptent des systèmes d'IA capables de reconnaître et de trier les matériaux avec une grande précision en temps réel.
- Un tri efficace améliore la pureté de l'aluminium recyclé, réduit les coûts de traitement et augmente la valeur économique des matériaux recyclés. Par ailleurs, il permet d'éviter le gaspillage des ressources et de limiter l'impact environnemental du recyclage. Un aluminium trié avec soin

peut être réutilisé dans une large gamme d'applications, allant de la fabrication de nouvelles canettes à des pièces industrielles ou automobiles.

- **La refonte :**

La refonte est la dernière étape du processus de recyclage de l'aluminium, mais également une phase fondamentale dans le cycle de vie de ce matériau. Elle permet de transformer les rebuts d'aluminium collectés et triés en un produit réutilisable, adapté aux besoins spécifiques des industries.

Le produit final attendu de la refonte dépend directement des caractéristiques recherchées. Pour répondre aux spécifications techniques, diverses manipulations sont possibles.

Par exemple, l'ajout d'aluminium recyclé provenant d'un autre lot, d'éléments purs, d'alliages mères ou encore d'aluminium primaire est souvent nécessaire pour atteindre des propriétés spécifiques, telles que la composition chimique ou la résistance mécanique. Comme le montre la **Figure 1** d'AluQuébec, les rebuts collectés et triés peuvent suivre deux chemins principaux, soit l'affinage qui intervient lorsque les rebuts collectés présentent une composition hétérogène en alliage ou contiennent des impuretés telles que des oxydes, des résidus organiques ou des traces d'autres métaux, soit la refonte directe dans le cas où les rebuts collectés sont déjà homogènes et exempts de contaminants majeurs, ils peuvent être directement soumis à une refonte sans passer par l'étape d'affinage. Ce procédé est particulièrement adapté aux rebuts industriels provenant de sources contrôlées, comme

les chutes de production d'usines, où la composition est stable et connue (Julie & Maurice, 2017).

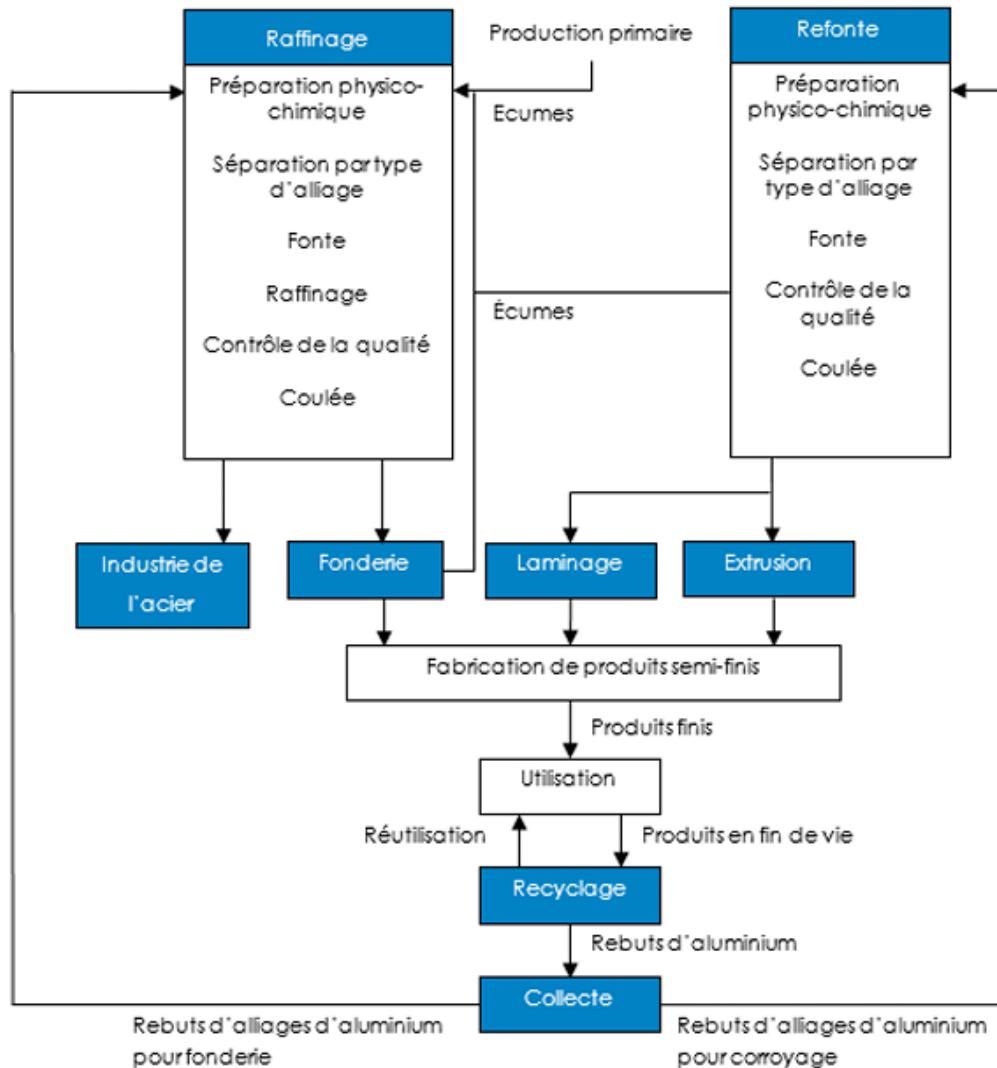


Figure 1 : Schéma descriptif des boucles du cycle de l'aluminium
Source : Julie et Maurice (2017)

1.5 L'économie circulaire

1.5.1 Définitions du concept et champs d'application

L'économie circulaire est un concept qui n'a pas de définition standard ou consensuelle, tant et si bien que Kirchherr et al. (2017) identifient pas moins de 114 définitions regroupées autour de 17 grandes dimensions. Cette pluralité de définitions témoigne de la diversité des approches et des interprétations du concept, qui peut varier selon les secteurs d'activité, les contextes géographiques, et les objectifs poursuivis. Certaines définitions se concentrent sur la réduction des déchets, d'autres sur l'optimisation de l'utilisation des ressources naturelles ou encore sur la création de modèles économiques durables. Cette variété met en lumière les défis liés à l'uniformisation du concept et à sa mise en pratique dans différents domaines, tout en soulignant l'importance de clarifier les objectifs et les stratégies de l'économie circulaire selon les spécificités de chaque contexte.

L'économie circulaire est un modèle économique qui se distingue de l'économie linéaire traditionnelle, où les ressources sont extraites, utilisées, puis jetées après consommation(Aurez et al., 2016). Dans un modèle circulaire, l'objectif principal est de maintenir la valeur des produits, des matériaux et des ressources dans l'économie le plus longtemps possible, tout en réduisant la production de déchets au minimum. Ce modèle repose sur trois principes fondamentaux selon la Fondation Ellen MacArthur, qui définit la base de l'économie circulaire :

Le principe de préservation: Ce principe vise à préserver le capital naturel renouvelable tout en minimisant l'exploitation des ressources non renouvelables. L'objectif

est de réduire la pression sur les écosystèmes en favorisant l'utilisation de ressources renouvelables et en limitant l'extraction de matières premières non renouvelables.

Le principe d'optimisation : L'optimisation consiste à maximiser le service rendu par les matières premières en adoptant des stratégies multiniveaux. Cela comprend l'optimisation de l'utilisation des ressources à travers la réutilisation, la réparation, le recyclage et le réusinage des produits afin de prolonger leur durée de vie et réduire leur impact environnemental.

Le principe d'efficience : Ce principe cherche à minimiser les pertes et les externalités négatives à toutes les étapes du cycle de vie des matières premières. Cela inclut la réduction des consommations énergétiques et des émissions de CO₂, ainsi que l'évitement des déchets inutiles, tout en garantissant l'efficacité maximale des processus de production, d'utilisation et de recyclage.

Ces principes sont schématisés dans la Figure 2 ci-dessous :

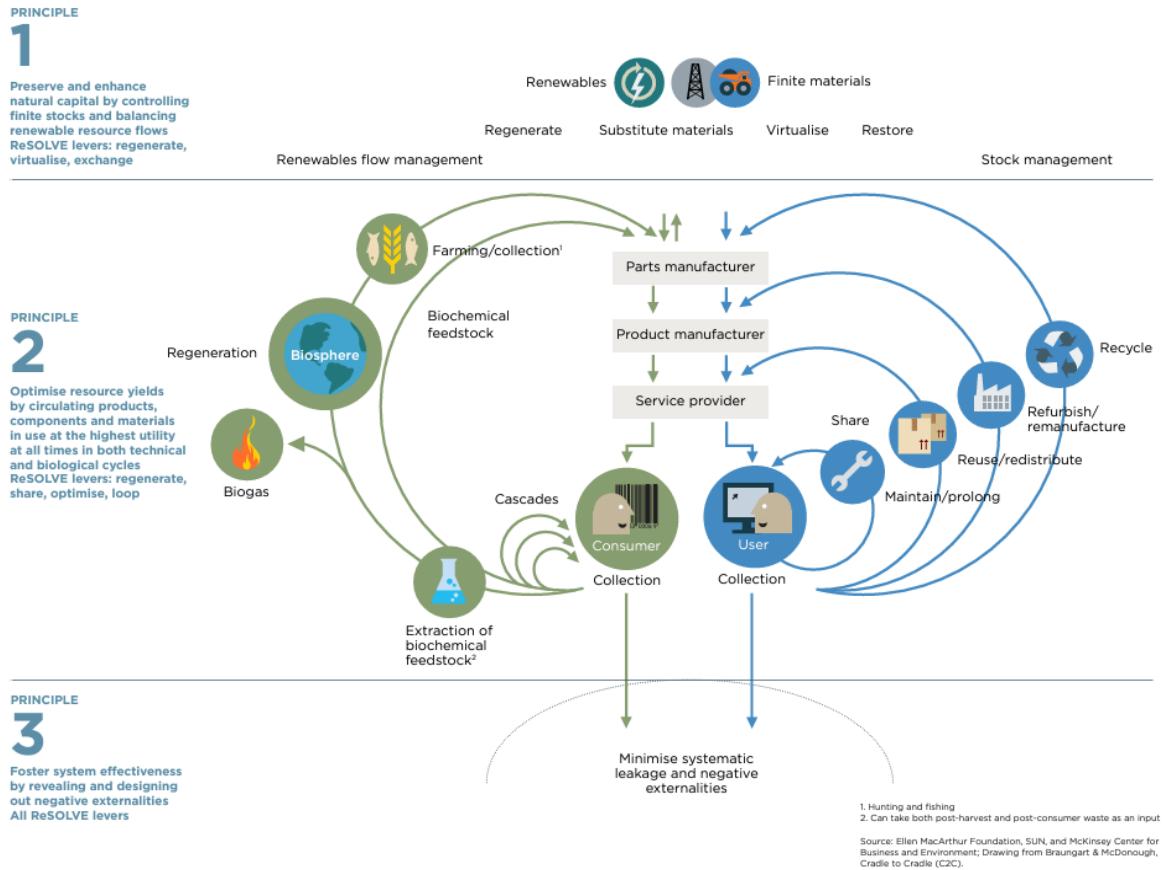


Figure 2 : Le diagramme en papillon illustre l'importance de la stratégie de boucle circulaire
Source : Ellen MacArthur Foundation (2015)

Une définition largement utilisée dans le contexte québécois est celle de l’Institut EDDEC (2018), qui présente l’économie circulaire comme :

« *Un système de production, d'échange et de consommation visant à optimiser l'utilisation des ressources à toutes les étapes du cycle de vie d'un bien ou d'un service, dans une logique circulaire, tout en réduisant l'empreinte environnementale et en contribuant au bien-être des individus et des collectivités.* » (EDDEC, 2018)

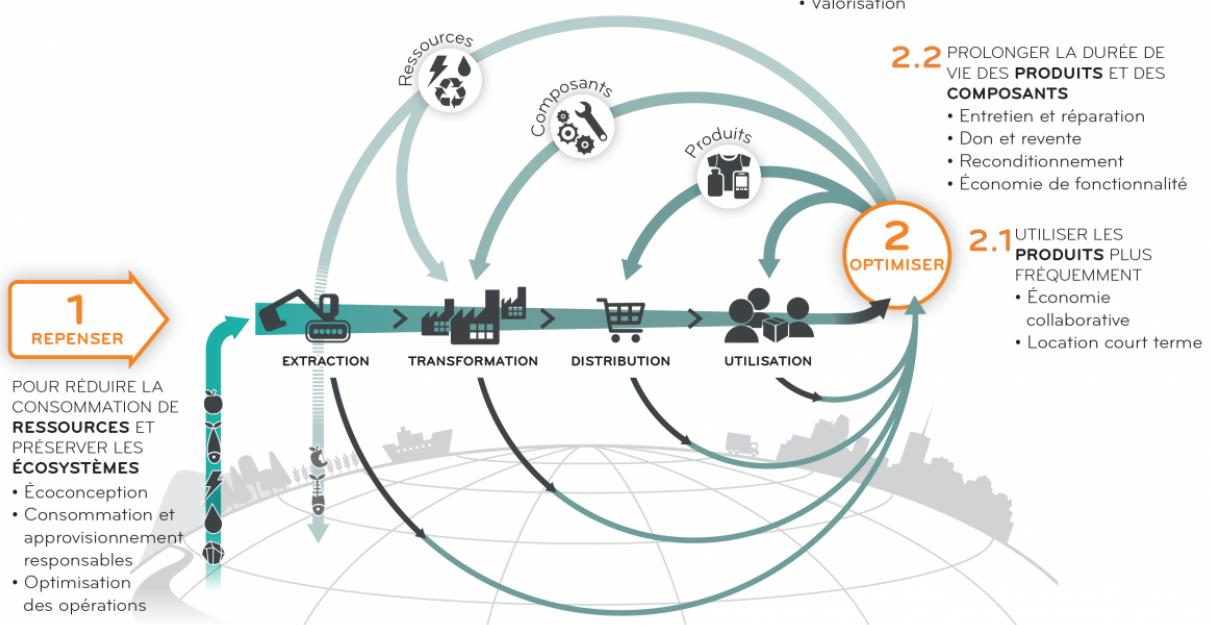
D'après cette définition, l'idée centrale de l'économie circulaire réside dans l'optimisation des ressources, ce qui se traduit par une réduction des pertes matérielles et énergétiques tout en générant de la valeur économique et sociale à travers le réemploi, la réutilisation et le recyclage des matériaux. Cette approche vise une gestion plus rationnelle des ressources, dans le but d'en prolonger le cycle de vie et d'en maximiser l'utilisation, tout en diminuant l'impact environnemental et en offrant des avantages sociaux, comme la création d'emplois durables et le renforcement des communautés locales (EDDEC, 2018).

Le modèle économique présenté par l'institut repose effectivement sur une hiérarchisation des stratégies qui permettent d'adapter les actions à mener selon les contextes et les types de ressources utilisées. Cette approche met en avant une démarche progressive, en commençant par les stratégies les plus directes visant à réduire la consommation de ressources vierges. Cela inclut des mesures visant à optimiser l'utilisation des matières premières, en privilégiant la réduction à la source.

Ensuite, comme on peut le voir dans la Figure 3, l'accent est mis sur les stratégies à « boucles courtes », qui cherchent à intensifier l'utilisation des produits existants, réduisant ainsi la nécessité de recourir à de nouvelles ressources. Cette étape est cruciale pour augmenter l'efficacité des ressources utilisées tout en répondant à la demande croissante.

Enfin, l'institut évoque les stratégies qui visent à prolonger la durée de vie des produits, puis celles qui donnent une nouvelle vie aux ressources, par exemple, à travers le recyclage ou la réutilisation. Cette hiérarchisation traduit une volonté d'établir un modèle économique qui réduit l'impact environnemental tout en intégrant des solutions durables à chaque étape du cycle de vie des produits.

L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE



© Institut EDDEC, 2018. En collaboration avec RECYC-QUÉBEC. Reproduction autorisée. Modification interdite.

Figure 3 : Schéma simplifié de l'économie circulaire développé par l'Institut EDDEC
Source : EDDEC (2018)

L'économie circulaire (EC) constitue un concept central dans la quête d'un développement durable, conciliant les impératifs économiques, sociaux et environnementaux. L'ADEME (2013), en tant qu'acteur clé des problématiques environnementales en France, a proposé une définition de l'EC qui fait aujourd'hui autorité. Selon cette agence, l'économie circulaire est « un système économique d'échange et de production 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 développant le bien-être des individus » (GELDRON, 2013b).

Cette définition présente plusieurs avantages notables. Premièrement, elle intègre explicitement les dimensions environnementale et sociale du développement durable, en soulignant la double nécessité de réduire l'impact écologique et d'améliorer le bien-être humain. Deuxièmement, elle introduit la notion de découplage, qui consiste à dissocier la croissance économique de l'épuisement des ressources naturelles. Cette idée fondamentale, reprise par Aurez et al. (2016) met l'accent sur une gestion plus efficace des ressources, en s'appuyant notamment sur le principe de Réduction, l'un des « 3R » largement promus dans le cadre des politiques environnementales internationales. Cette approche prône une diminution drastique des gaspillages, un impératif dans un contexte de transition vers une société sobre en ressources.

En complément de cette définition, l'ADEME a proposé un schéma visant à représenter les composantes essentielles de l'économie circulaire. Ce schéma identifie sept piliers regroupés autour de trois domaines d'action principaux :

1. L'offre et les acteurs économiques, qui englobent les entreprises et les producteurs impliqués dans la transformation des ressources et des produits ;
2. La demande et les comportements des consommateurs, qui mettent en avant l'importance des choix individuels dans la réduction des impacts environnementaux ;
3. La gestion des déchets, qui constitue un levier clé pour optimiser le cycle de vie des produits.

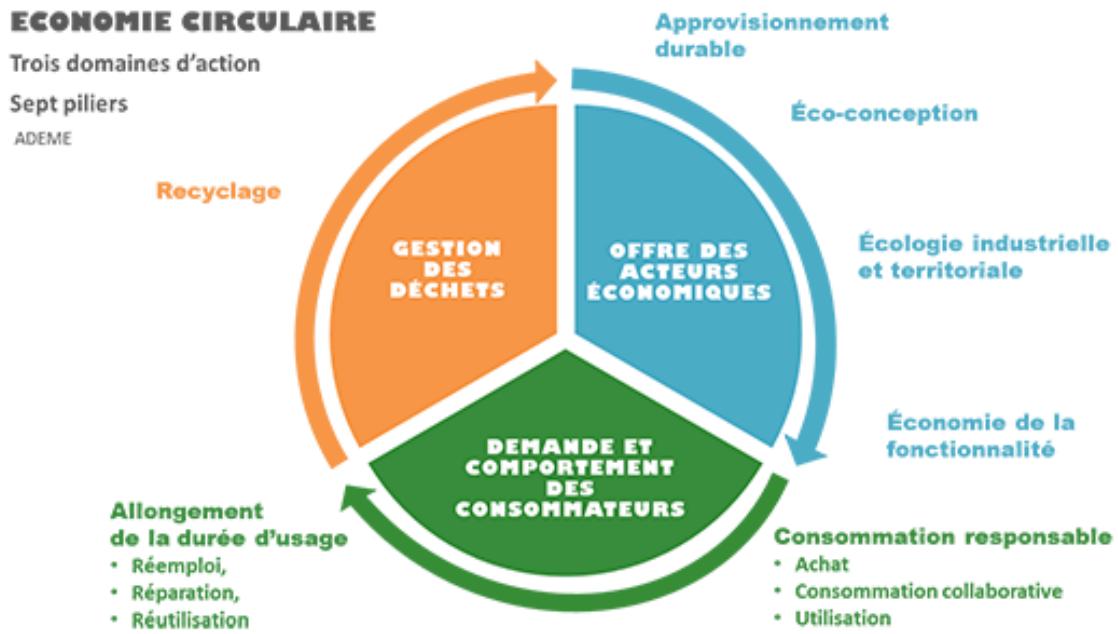


Figure 4 : Modèle d'économie circulaire de l'ADEME

Source : ADEME (2023)

Cependant, bien que pédagogique, cette représentation graphique a suscité des critiques, particulièrement parmi les experts en écologie industrielle et territoriale. Ces derniers reprochent au schéma de l'ADEME, repris dans la Figure 4, une simplification excessive des enjeux systémiques liés à l'économie circulaire. Selon eux, cette approche, bien que fonctionnelle pour illustrer les synergies interentreprises ou le développement local, ne parvient pas à saisir pleinement la complexité des interactions territoriales et industrielles propres à l'EC. (Aurez et al., 2016).

1.5.2 La circularité dans l'industrie de l'aluminium

L'économie circulaire appliquée à l'industrie de l'aluminium demeure un domaine où les études quantitatives sur les gains environnementaux potentiels sont encore rares. Parmi les travaux existants, l'analyse menée par la firme de consultation Material Economics (2018)

est l'une des plus complètes. Cette étude évalue les gains environnementaux associés à une transition circulaire pour plusieurs matériaux et secteurs, y compris l'aluminium (Stahel, 2016).

Material Economics a structuré son évaluation en trois catégories principales:

- La recirculation de la matière ;
- L'efficacité matérielle et
- Les modèles d'affaires circulaires.

Leurs projections indiquent qu'une réduction annuelle de 300 millions de tonnes de CO₂ équivalent pourrait être atteinte d'ici 2050 malgré une demande croissante pour l'aluminium. Cette réduction serait majoritairement attribuable à une meilleure recirculation de la matière. Cependant, comme c'est fréquemment le cas avec la littérature grise, cette étude présente un manque de transparence méthodologique. Les détails concernant leur méthode de quantification sont partiellement expliqués, ce qui limite la reproductibilité des résultats. Par exemple, l'étude ne précise pas comment elle intègre la problématique de la contamination inter-alliage, un enjeu majeur pour le recyclage de l'aluminium. De plus, les mécanismes spécifiques associés aux changements de modèle d'affaires et aux mesures d'amélioration de l'efficacité matérielle restent insuffisamment détaillés (Material Economics 2018).

La transition vers une économie circulaire dans l'industrie de l'aluminium représente une opportunité stratégique pour réduire l'empreinte écologique de ce secteur tout en maximisant la valeur économique des ressources utilisées. L'aluminium, par sa recyclabilité

infinie et ses propriétés durables, est au cœur de ce paradigme. Cependant, cette transition nécessite la mise en place de mécanismes systémiques et d'innovations technologiques pour surmonter les obstacles actuels (AluQuébec, 2023b).

L'un des leviers majeurs pour instaurer une circularité effective dans l'industrie de l'aluminium réside dans l'amélioration des capacités de recyclage. Cela inclut non seulement le recyclage des rebuts industriels (déchets pré-consommation), mais également la collecte et la valorisation des produits en fin de vie (déchets post-consommation). La généralisation des systèmes de collecte sélective et des technologies avancées de tri permettrait d'augmenter significativement les taux de recyclage et de garantir une qualité optimale des matériaux recyclés (Laurent-Brocq & Lilensten, 2023).

En parallèle, des stratégies de conception circulaire (design for recycling) peuvent être intégrées dans le développement des produits à base d'aluminium. Par exemple, la simplification des alliages ou la conception de produits facilement démontables faciliteraient leur recyclage en fin de vie. Cela nécessite une collaboration étroite entre les fabricants, les consommateurs et les entreprises de recyclage pour créer une boucle fermée (AluQuébec, 2023b).

Les gouvernements jouent un rôle central dans l'établissement de cadres favorisant la circularité. Au Québec, des politiques incitatives telles que des subventions pour l'utilisation de matériaux recyclés, des taxes sur les matières premières vierges ou des quotas de contenu recyclé obligatoire pourraient stimuler l'adoption de pratiques circulaires (Québec, 2021).

De plus, la standardisation des normes sur les matériaux recyclés et l'étiquetage clair des produits contenant de l'aluminium recyclé permettraient d'instaurer la confiance parmi les consommateurs et les entreprises. L'établissement d'un marché solide pour l'aluminium secondaire repose ainsi sur des actions concertées entre les pouvoirs publics et les acteurs de l'industrie (European Aluminium, 2018).

L'industrie québécoise de l'aluminium, en raison de son importance mondiale et de sa forte dépendance à l'hydroélectricité, dispose d'une base idéale pour devenir un modèle de circularité. En renforçant les infrastructures de recyclage, en développant des technologies innovantes et en intégrant des politiques publiques adaptées, le Québec peut s'imposer comme un leader mondial de la circularité dans l'industrie de l'aluminium (AluQuébec, 2023b).

Les perspectives offertes par une transformation circulaire de l'industrie ne se limitent pas à la réduction des impacts environnementaux. Elles incluent également des bénéfices économiques, tels que la création de nouveaux marchés pour les matériaux recyclés, et sociaux, en renforçant les chaînes d'approvisionnement locales et en favorisant l'emploi dans des secteurs innovants. Cette transition, bien que complexe, représente une réponse concrète aux défis environnementaux et économiques auxquels fait face cette industrie.

1.6 Intégration des marchés

1.6.1 Cadre théorique : définitions et principes

L'intégration des marchés est un concept central en économie, désignant le processus par lequel différents segments d'un marché, ou différents marchés interconnectés convergent

pour fonctionner comme une seule entité cohérente. Cette convergence peut être observée à travers des interactions économiques, commerciales, ou encore institutionnelles, favorisant une meilleure allocation des ressources et une réduction des inefficacités.

Dans le cadre de l'industrie de l'aluminium et de notre étude ici, l'intégration des marchés fait référence à la relation entre les segments de l'aluminium primaire et secondaire. Ces deux segments, bien qu'interconnectés, diffèrent par leur source d'approvisionnement, leurs coûts de production et leurs implications environnementales. Le marché de l'aluminium primaire repose principalement sur l'extraction de la bauxite et la production d'aluminium neuf par électrolyse, tandis que le marché secondaire dépend du recyclage des rebuts et de la refonte des matériaux usagés. Comprendre les principes sous-jacents à l'intégration de ces deux marchés est essentiel pour analyser les dynamiques de l'industrie et les implications pour l'économie circulaire.

L'intégration verticale est un élément central pour comprendre la structure organisationnelle et économique du secteur de l'aluminium. Comme l'explique Stuckey (1983), cette stratégie permet aux entreprises de consolider leur position en limitant l'entrée de nouveaux concurrents dans leur secteur. En intégrant des processus auparavant externalisés, les entreprises se protègent contre les menaces extérieures tout en optimisant leurs opérations.

Depuis les années 1960, la part de l'aluminium de seconde fusion dans la demande mondiale a connu une augmentation significative. Alors qu'elle ne représentait que 20 % de la demande en aluminium dans les pays occidentaux au début des années 1960, elle dépasse désormais 30 % à l'échelle mondiale. Ce développement, qui devrait se poursuivre, est

motivé par deux facteurs principaux. Premièrement, le recyclage de l'aluminium consomme beaucoup moins d'énergie que la production d'aluminium primaire, ce qui en fait une option plus respectueuse de l'environnement. Deuxièmement, certains pays, confrontés à une pénurie de ressources naturelles nécessaires à la production primaire, se tournent davantage vers le recyclage pour répondre à leurs besoins.

Porter (1982) définit l'intégration verticale comme « la combinaison de processus de production, de commercialisation, de vente et ou d'autres processus économiques distincts à l'intérieur des limites d'une seule entreprise ». Ce choix stratégique repose sur l'idée de privilégier les transactions internes administrées aux transactions marchandes traditionnelles, permettant ainsi à l'entreprise de mieux atteindre ses objectifs économiques.

1.6.2 Intégration dans l'industrie de l'aluminium

Dans le cadre de l'industrie de l'aluminium, Stuckey (1983) met en lumière les raisons pour lesquelles ce secteur adopte largement l'intégration verticale, au lieu d'un système basé sur des transactions interentreprises et des marchés de produits intermédiaires. En se fondant sur la théorie du cycle de vie des entreprises de Stigler (1951), il analyse deux types d'intégration verticale :

L'intégration en amont, qui englobe l'extraction et le traitement des matières premières nécessaires à la production d'aluminium, permet aux entreprises de contrôler les premières étapes de la chaîne de production. Ce contrôle en amont est essentiel dans une industrie où la disponibilité et les coûts des matières premières, telles que la bauxite et l'alumine, peuvent fluctuer de manière significative en raison de facteurs géopolitiques, économiques ou environnementaux. En internalisant ces activités, les entreprises peuvent

sécuriser leur approvisionnement, réduire les coûts liés à l'achat externe de matières premières, et garantir une qualité constante pour répondre aux exigences de leurs processus de production.

L'intégration en aval, quant à elle, couvre les étapes de transformation et de distribution des produits finis. Dans le secteur de l'aluminium, cette intégration est cruciale pour répondre aux besoins spécifiques des clients finals, qui exigent des produits de haute précision et conformes à des normes rigoureuses. En maîtrisant ces étapes, les entreprises peuvent non seulement améliorer leur réactivité aux demandes du marché, mais aussi capturer davantage de valeur ajoutée en offrant des produits finis ou semi-finis directement aux clients, sans passer par des intermédiaires. De plus, cette stratégie permet de mieux gérer la relation client et de renforcer la position de l'entreprise sur les segments de marché clé.

L'analyse de John Stuckey sur l'intégration verticale dans l'industrie de l'aluminium remet en question certaines hypothèses classiques concernant la dynamique de ce processus. Alors que la théorie du cycle de vie des entreprises de Stigler (1951) prévoit une réduction de l'intégration verticale au fur et à mesure que les marchés atteignent leur maturité, l'industrie de l'aluminium semble adopter une trajectoire différente. En effet, au lieu de se spécialiser et de réduire son intégration, cette industrie a continué d'intégrer en amont, consolidant ainsi son contrôle sur l'ensemble du processus de production, de l'extraction des matières premières à la production finale de l'aluminium.

L'une des raisons principales de cette tendance est l'énorme capital nécessaire pour entrer dans l'industrie et l'importance de sécuriser les approvisionnements. Les entreprises, conscientes de la volatilité des marchés des matières premières et des coûts de production,

cherchent à réduire leur dépendance vis-à-vis des fournisseurs externes en contrôlant directement les ressources stratégiques, comme la bauxite, l'alumine et même l'énergie. Cette approche permet aux acteurs du secteur d'assurer leur stabilité et de minimiser les risques liés aux fluctuations des prix des matières premières.

En outre, l'importance de garantir la qualité des intrants dans la production d'aluminium joue également un rôle déterminant. En maintenant un contrôle direct sur les premières étapes de la chaîne de production, les entreprises peuvent s'assurer de la constance de la qualité de leurs produits finis, tout en réduisant les coûts associés à l'achat de matières premières de sources externes. Cette intégration verticale en amont permet de renforcer la compétitivité des entreprises et leur résilience face aux incertitudes du marché.

Le modèle d'intégration verticale reste également pertinent dans un secteur où la concurrence est particulièrement intense. Le marché de l'aluminium étant dominé par un petit nombre d'acteurs majeurs, ces entreprises utilisent l'intégration verticale pour sécuriser leurs parts de marché et maximiser l'efficacité de leurs opérations. Ce phénomène de concentration, couplé à la structure oligopolistique du secteur, favorise l'adoption de cette stratégie comme un moyen pour les grandes entreprises de dominer la chaîne de valeur et d'établir des standards de production.

Même les nouveaux entrants dans l'industrie, confrontés à un environnement marqué par des barrières à l'entrée élevées, ont tendance à privilégier une certaine forme d'intégration verticale pour réussir. En allouant des ressources substantielles à l'acquisition ou au contrôle des processus de production en amont, ces entreprises cherchent à réduire les

risques inhérents à l'approvisionnement et à s'assurer une part du marché face aux géants déjà établis.

L'évolution de l'industrie au fil des décennies montre que, loin de se diriger vers une désintégration progressive, l'intégration verticale continue de dominer. En 1982, les cinq plus grands producteurs d'aluminium mondiaux ont non seulement conservé un haut niveau d'intégration verticale, mais ont renforcé cette tendance, en contradiction avec les prédictions de la théorie du cycle de vie. Cette observation met en lumière la persistance de l'intégration verticale, non seulement comme une réponse aux défis immédiats du marché, mais aussi comme un choix stratégique visant à assurer la pérennité et la compétitivité des entreprises dans un secteur en constante évolution.

Cette réalité complexe soulève la question de la pertinence de la théorie du cycle de vie comme explication unique de l'intégration verticale. Si cette théorie demeure valable dans certaines industries, elle ne semble pas s'appliquer de manière générale à l'industrie de l'aluminium. Comme l'indique Stuckey, il peut être plus facile d'expliquer pourquoi l'intégration verticale devient dominante à un moment donné, mais cela ne suffit pas à expliquer pourquoi elle persiste dans certains secteurs, même après la maturation du marché.

Ainsi, l'intégration verticale dans l'industrie de l'aluminium doit être comprise à travers une combinaison de facteurs stratégiques, structurels et environnementaux, qui vont au-delà des principes de la théorie du cycle de vie des entreprises.

Dans le prolongement de cette analyse des dynamiques d'intégration entre les marchés de l'aluminium primaire et secondaire, il devient essentiel d'approfondir la compréhension des flux physiques qui structurent la filière québécoise. La section suivante

est ainsi consacrée à l'analyse des flux de matières (AFM), une approche méthodologique rigoureuse permettant de représenter et de modéliser les échanges physiques d'aluminium au sein d'un système défini. Après une brève présentation du cadre théorique et des fondements méthodologiques de l'AFM, nous exposerons les modèles d'analyse développés jusqu'ici dans la littérature, avant de détailler l'application spécifique de cette méthode au contexte québécois.

1.7 L'analyse de flux de matière

1.7.1 Cadre théorique

L'analyse de flux de matière (AFM) est une méthodologie clé pour comprendre et quantifier les flux et les stocks de matériaux au sein d'un système donné, qu'il soit industriel, territorial ou global. Reposant sur les principes fondamentaux de la conservation de la matière, cette approche permet de suivre les intrants, les stocks et les extrants de matériaux dans un système, tout en évaluant leurs impacts environnementaux et économiques.

L'AFM s'inscrit dans le cadre plus large de l'analyse des systèmes industriels et contribue à éclairer la transition vers des modèles d'économie circulaire. Selon Brunner et Rechberger (2004), cette méthode constitue un outil précieux pour identifier les inefficacités dans les chaînes de valeur, quantifier les pertes et explorer les opportunités de recyclage ou de substitution de matières premières. L'approche systémique adoptée par l'AFM permet de relier les dimensions techniques, économiques et environnementales, offrant ainsi une vision globale et intégrée des dynamiques de flux de matière (Brunner & Rechberger, 2004).

Un des concepts centraux de l'AFM est la distinction entre flux et stocks. Les flux de matière représentent les mouvements de matériaux dans et hors d'un système (par exemple, l'importation de bauxite ou l'exportation de lingots d'aluminium), tandis que les stocks désignent les matières retenues temporairement dans des infrastructures, des produits ou des déchets (Lauinger et al., 2021). Cette distinction est cruciale pour comprendre la durabilité des systèmes industriels.

En pratique, l'AFM s'appuie sur des données quantitatives et des modèles d'équilibre matière. Les flux sont généralement exprimés en termes de masse (tonnes) sur une période donnée et analysés à travers des outils tels que les matrices de comptabilité ou les graphiques de Sankey.

Dans un contexte de transition écologique, l'AFM est particulièrement utile pour analyser les chaînes de production intensives en ressources. Dans le cadre de ce mémoire, son application à l'industrie comme celle de l'aluminium permet non seulement de mieux comprendre les interactions entre la production primaire et secondaire, mais également d'identifier les leviers potentiels pour une meilleure circularité et une réduction des impacts environnementaux (Barles, 2014).

1.7.2 Modélisation de l'AFM

L'Analyse des flux de matières (AFM) s'appuie sur différentes approches méthodologiques pour étudier les flux de matériaux au sein d'un système. Deux perspectives dominantes dans la modélisation des flux de matières sont l'approche descendante (top-down) élaborée par le guide pratique Eurostat (2001) et l'approche ascendante (Bottom-up) qui a été développée par Peter Baccini et Paul H. Brunner en 1991 dans leur livre Metabolism

of the Anthroposphere. Ces deux approches sont complémentaires et permettent de comprendre les dynamiques des flux de manière plus précise et détaillée.

1.7.2.1 Approche descendante (Top-Down) selon Eurostat (2001)

L'approche descendante, telle qu'élaborée par Eurostat dans son guide pratique de 2001, est une méthode qui se fonde sur des données agrégées provenant de sources statistiques à grande échelle. Cette approche permet d'analyser les flux de matières en partant d'une vision globale, en décomposant les systèmes industriels à une échelle macroéconomique. L'idée centrale est de modéliser les flux à partir des grands agrégats économiques (comme la production industrielle nationale ou les bilans de matières) et de les affiner progressivement. Dans le cadre de l'AFM, cette approche est utilisée pour estimer les flux de matières au sein d'une économie à partir de données globales, telles que les importations, les exportations, ou la consommation d'énergie et de ressources. L'un des principaux avantages de cette méthode est sa capacité à fournir une vue d'ensemble des flux à l'échelle nationale ou régionale, en se basant sur des statistiques agrégées qui offrent un aperçu des tendances et des relations globales (Eurostat, 2001).

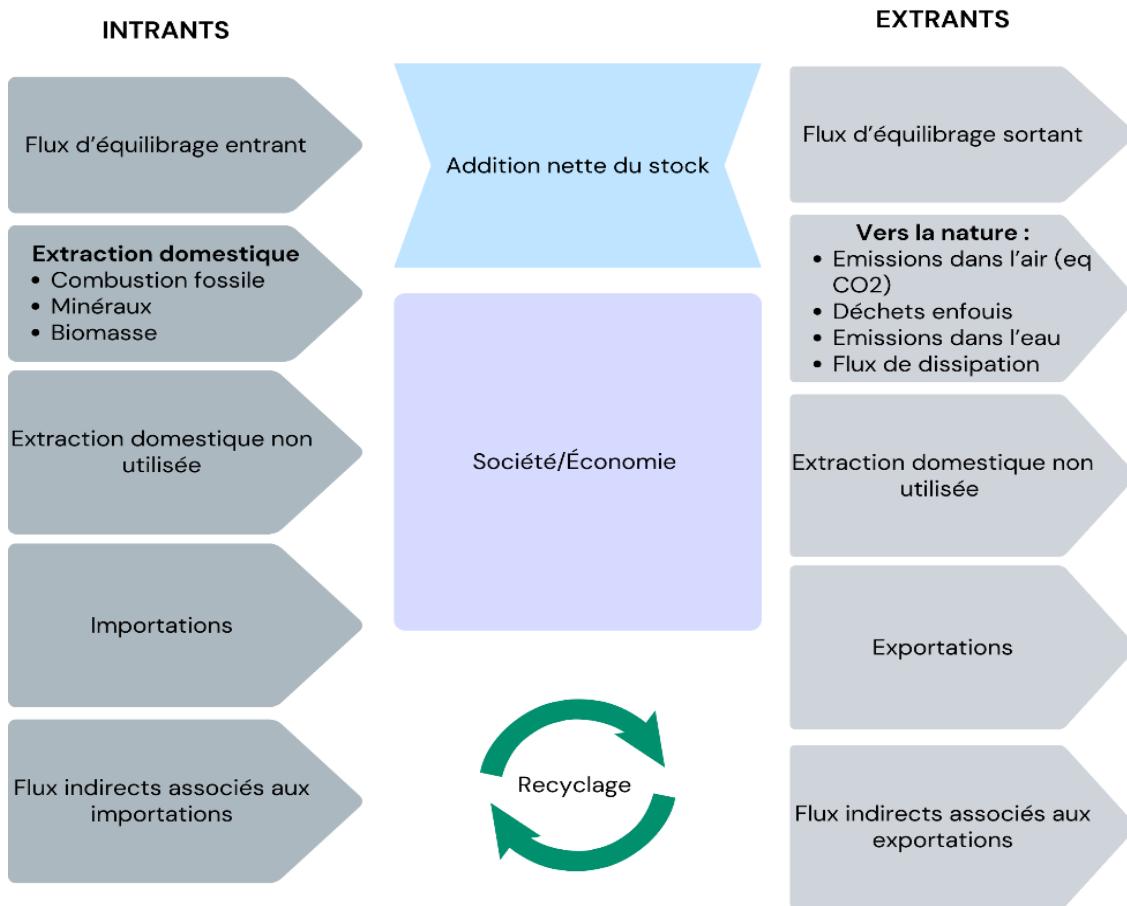


Figure 5 : Modélisation de l'AMF selon Eurostat
Source : Eurostat (2001)

1.7.2.2 Approche ascendante (Bottom-Up) selon Baccini et Brunner (1991)

L'approche ascendante, développée par Baccini et Brunner en 1991, est plus précise et détaillée (voir Figure 6). Elle consiste à partir des flux de matières au niveau des unités de production spécifiques, comme les entreprises, les installations de recyclage ou les usines de transformation, pour remonter progressivement jusqu'à une analyse à l'échelle régionale ou nationale. Dans cette approche, les données sont collectées de manière détaillée à partir de sources locales et spécifiques, permettant une modélisation plus fine des flux de matières.

L'avantage de l'approche Bottom-up est qu'elle permet une compréhension détaillée du cycle de vie des matières, de leur extraction à leur traitement et recyclage. Elle fournit des informations sur la localisation, les types de flux et les quantités précises de matières qui circulent à l'échelle microéconomique. De plus, elle permet de mettre en évidence les inefficacités, les pertes ou les opportunités d'amélioration dans les processus industriels spécifiques.

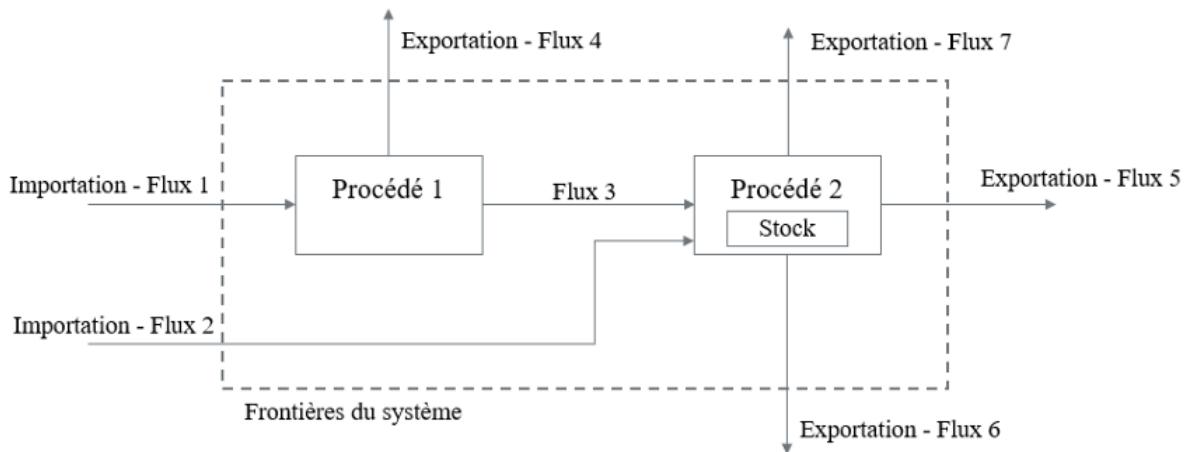


Figure 6 : Schéma d'analyse de flux de matières pour la méthode Baccini et Brunner 1991
Source : Baccini et Brunner (1991)

1.7.2.3 Synergie entre les approches Top-Down et Bottom-Up

Dans le cadre de l'AFM, une combinaison des deux approches est souvent utilisée pour pallier les limites de chacune. Tandis que l'approche top-down offre une vue d'ensemble et permet de comprendre les flux à une échelle large, l'approche Bottom-up apporte la précision nécessaire pour identifier les détails spécifiques des processus industriels. Ensemble, ces deux approches permettent une modélisation plus complète et plus robuste des flux de matières, à la fois à une échelle globale et locale (Brunner & Rechberger, 2004).

En résumé, la modélisation des flux de matières selon les approches top-down et Bottom-up permet de combiner les avantages de chaque méthode. Tandis que l'approche descendante est utile pour établir un cadre général et macroéconomique des flux, l'approche ascendante apporte la précision nécessaire pour comprendre les interactions au niveau des processus spécifiques. Cette combinaison d'approches permet ainsi de mieux gérer les flux de matières dans l'industrie, en particulier dans des contextes complexes comme celui de l'aluminium, où les interactions entre les flux primaires et secondaires sont cruciales (Allwood et al., 2010).

1.7.3 L'AFM dans l'industrie de l'aluminium

Jonathan M. Cullen et Julian M. Allwood, dans leur article « Mapping the Global Flow of Aluminum: From Liquid Aluminum to End-Use Goods », réalisent une cartographie inédite des flux mondiaux d'aluminium. Leur analyse suit le parcours de l'aluminium pur, depuis sa sortie des usines d'aluminium à travers le monde jusqu'aux produits finis. Ce travail constitue une base précieuse pour des études sur l'efficacité énergétique, les impacts environnementaux et, dans notre cas précis, l'analyse des interactions entre les flux primaires et secondaires de l'aluminium(Cullen & Allwood, 2013).

L'étude propose un diagramme de Sankey, un outil visuel particulièrement adapté pour représenter les flux de manière intuitive et détaillée. Ce type de diagramme met en évidence les volumes et directions des flux tout en permettant d'identifier les pertes et inefficacités dans le système.

L'analyse des résultats de cette étude révèle deux aspects majeurs qui interpellent sur la gestion actuelle de l'industrie de l'aluminium :

Perte significative dans les processus de production :

Plus de la moitié de l'aluminium primaire produit ne parvient pas à l'étape des produits finis, se perdant sous forme de rebuts au cours des différents processus de fabrication. Cela soulève des préoccupations importantes concernant l'efficience des procédés industriels. Cette réalité constitue également une opportunité pour des améliorations substantielles, tant sur le plan technologique que sur celui de l'efficacité énergétique.

Défi lié à la qualité et à la pureté des matériaux recyclés :

Une quantité importante d'aluminium primaire est nécessaire pour produire de l'aluminium secondaire exploitable. Cette contrainte découle principalement de la faible pureté et de la diversité des alliages présents dans les rebuts collectés pour le recyclage. Ce constat met en lumière la nécessité d'optimiser les processus de tri et de purification pour renforcer la qualité des matériaux recyclés et réduire ainsi la dépendance aux ressources primaires.

Les auteurs identifient cinq (5) étapes clés de la chaîne de valeur de l'aluminium qui permettent de suivre le tracer de l'aluminium à travers l'économie :

Électrolyse/Fusion : Transformation de l'alumine en aluminium liquide par la voie de l'électrolyse et fusion des rebuts d'aluminium pour produire des alliages.

Coulée : L'aluminium liquide est coulé en brames, billettes et lingots, parfois refondus en aval.

Mise en forme : Laminage, extrusion et coulée en forme pour créer des produits intermédiaires.

Fabrication : Fabrication de composants spécifiques pour divers secteurs industriels.

Utilisation finale : Intégration dans des biens de consommation et équipements industriels avant recyclage ou élimination.

Ces cinq étapes sont reprises dans la Figure 7.

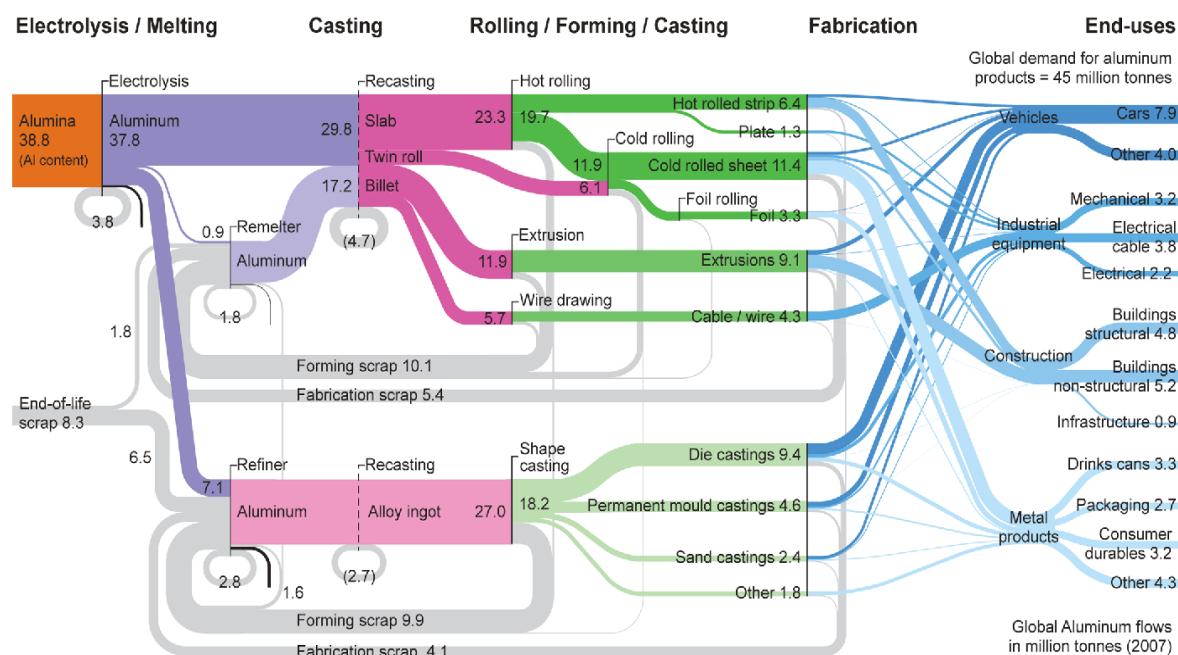


Figure 7: Analyse de flux de matière de l'aluminium mondial
Source : Cullen et Allwood (2013)

Un rôle particulièrement intéressant est attribué aux stocks et aux flux d'aluminium dans leur étude pour cartographier les mouvements de ce matériel. Dans le cadre de l'analyse des matériaux, les notions de stocks et de flux jouent un rôle central pour comprendre les dynamiques d'utilisation et de gestion des ressources. Ces concepts sont particulièrement pertinents dans l'industrie de l'aluminium, où les enjeux environnementaux, économiques et technologiques s'entrelacent pour façonner les trajectoires de production, de consommation et de recyclage.

Les stocks d'aluminium représentent les quantités de ce matériau accumulées dans divers réservoirs au fil du temps : bâtiments, véhicules, produits électroniques ou encore emballages. Ces stocks constituent une « banque de matériaux » qui peut être mobilisée pour réduire la dépendance aux ressources primaires grâce au recyclage. En revanche, une mauvaise gestion de ces stocks peut conduire à des pertes irréversibles, limitant ainsi le potentiel de circularité.

Les flux d'aluminium, quant à eux, concernent les mouvements du matériau à travers les différentes étapes du cycle de vie, depuis l'extraction de la bauxite jusqu'à la fin de vie des produits. L'analyse des flux permet d'évaluer non seulement les quantités mobilisées, mais aussi les pertes à chaque étape, les contributions des flux secondaires et l'impact des infrastructures de recyclage.

L'étude combinée des stocks et des flux offre une vision intégrée de l'utilisation de l'aluminium dans une économie donnée. Cette approche est essentielle pour identifier les leviers permettant d'optimiser l'efficacité des systèmes industriels, réduire les émissions de gaz à effet de serre et promouvoir une économie circulaire dans le secteur.

1.7.3.1 Les stocks d'aluminium

Les stocks d'aluminium constituent un indicateur clé pour comprendre les potentiels de récupération et de circularité de ce métal dans un système économique. Ils regroupent l'ensemble de l'aluminium en circulation dans la société, qu'il soit présent sous forme de biens en usage, de produits en fin de vie ou de déchets non récupérés. Depuis le début de l'histoire de l'industrie de l'aluminium, 75 % de l'aluminium qui ont été produits sont encore en circulation(Schlesinger, 2007).

Ces stocks varient considérablement selon les régions et les cycles économiques. Dans les économies industrialisées, le développement précoce des infrastructures a conduit à une accumulation importante d'aluminium dans des stocks actifs. Ces régions bénéficient ainsi d'un potentiel de récupération élevé lorsque ces produits atteignent leur fin de vie. Ils atteignaient en moyenne 540kg/personne aux USA en 2013, contre 240kg/personne en France, avec une moyenne mondiale entre 90 et 120 kg/personne (Sverdrup et al., 2015).

Les caractéristiques des stocks influencent directement la durabilité des flux d'aluminium. Une étude de Liu et Müller (2013) a montré que le vieillissement des infrastructures, notamment dans les secteurs du bâtiment et des transports, augmentera considérablement la disponibilité de l'aluminium recyclé au cours des prochaines décennies. Environ 40 % du stock d'aluminium en utilisation provient du secteur de la construction suivi par celui du transport.

1.7.3.2 Les flux d'aluminium

Les flux d'aluminium représentent les mouvements du métal dans l'ensemble de son cycle de vie, depuis l'extraction et la production jusqu'à l'utilisation, la mise au rebut et le recyclage. Ces flux sont généralement analysés à l'aide de l'Analyse de Flux de Matières (AFM), qui fournit une vue systémique des gains et pertes tout au long de la chaîne de valeur.

- Les flux primaires :

Ces flux concernent l'aluminium produit directement à partir de la bauxite. La production primaire demeure essentielle pour répondre à la demande mondiale, notamment dans les régions où les stocks secondaires sont insuffisants. Une fois produit, l'aluminium subit un premier alliage avec d'autres éléments également issus de la première fusion, tels

que le silicium ou le cuivre, avant d'être orienté vers deux filières distinctes que sont la filière de corroyage (Dediée à la production d'alliages corroyés pour le laminage ou l'extrusion) et la filière de fonderie (Destinée à la production d'alliages coulés pour diverses applications industrielles)(Laurent-Brocq & Lilensten, 2023).

Les flux globaux d'aluminium en 2007 révèlent qu'un total de 45,7 millions de tonnes a été consommé cette année-là. Parmi cette quantité, 71 % correspondaient à des alliages pour corroyage, tandis que 29 % étaient des alliages pour fonderie. La répartition de la demande par secteur était la suivante : le secteur du transport (25 %), les équipements industriels (21 %), la construction (25 %) et les autres produits métalliques (29 %)(Cullen & Allwood, 2013).

- Les flux secondaires :

Les flux secondaires proviennent du recyclage de l'aluminium. Ils incluent : le recyclage pré-consommation désigne la récupération et la réutilisation des déchets générés lors des processus de fabrication ou des chutes de production, avant que le produit final ne soit utilisé par le consommateur. Ces rebuts, souvent constitués de matériaux homogènes et de grande pureté, offrent un potentiel de recyclage exceptionnellement élevé. En raison de leur qualité et de leur composition uniforme, ils sont généralement recyclés en interne au sein des mêmes installations de production, minimisant ainsi les pertes et réduisant les besoins en aluminium primaire. À l'échelle mondiale, environ 40 % de l'aluminium coulé devient des chutes au cours des différentes étapes de fabrication, telles que la découpe, le laminage ou l'usinage. Ces chutes représentent une quantité considérable, estimée à 35 millions de tonnes par an (Cullen & Allwood, 2013). Cependant, grâce à leur forte capacité de recyclage, ces

matériaux contribuent significativement à la chaîne d'approvisionnement circulaire de l'aluminium, en limitant la dépendance à l'extraction de la bauxite et à la production primaire, tout en réduisant l'impact environnemental global de l'industrie. Ce processus joue un rôle clé dans la transition vers une économie circulaire plus durable.

Le recyclage post-consommation, quant à lui, concerne les déchets d'aluminium générés après l'utilisation des produits par les consommateurs, tels que les emballages usagés, les pièces automobiles hors d'usage, ou les matériaux de construction en fin de vie. Ce type de recyclage est crucial pour une gestion durable de l'aluminium, car il permet de réintégrer dans la chaîne de production des matériaux qui seraient autrement perdus ou mis en décharge.

Cependant, le recyclage post-consommation présente des défis plus complexes que le recyclage pré-consommation. Les déchets post-consommation sont souvent contaminés ou mélangés à d'autres matériaux, ce qui nécessite des processus de collecte, de tri, de nettoyage et parfois de désassemblage avant leur refonte ou raffinage. De plus, la composition chimique (alliage) des produits en fin de vie est souvent variée, ce qui complique la production d'alliages de haute qualité à partir de ces matériaux.

Le recyclage post-consommation joue un rôle de plus en plus important à l'échelle mondiale, notamment pour répondre à la demande croissante d'aluminium tout en réduisant la dépendance à la production primaire. Au niveau mondial les principales sources de déchets sont les domaines du transport (6,3 millions de tonnes), des emballages (5,3 millions de tonnes) puis de la construction (3,2 millions de tonnes) (Raabe et al., 2022).

CHAPITRE 2

2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

Après avoir établi le cadre théorique et les enjeux liés à la circularité de l'aluminium dans le chapitre précédent, ce chapitre présente les objectifs spécifiques de la recherche ainsi que la démarche méthodologique adoptée. Il s'agit tout d'abord de préciser l'objectif général de l'étude et les questions de recherche auxquelles elle cherche à répondre, en lien avec la problématique formulée en introduction. La seconde partie du chapitre est consacrée à la présentation de l'approche méthodologique retenue, en mettant l'accent sur l'utilisation de l'analyse de flux de matières (AFM) comme outil principal pour modéliser les dynamiques de production, de consommation, de perte et de recyclage de l'aluminium au Québec. Ce chapitre détaille également les sources de données mobilisées et les limites inhérentes à l'analyse. L'ensemble de cette section vise à assurer la rigueur scientifique de l'étude et à garantir la transparence du processus de recherche.

2.1 But et objectif général de l'étude

L'objectif général de cette étude est d'analyser les conditions et les mécanismes d'intégration entre les marchés de l'aluminium primaire et secondaire au Québec, dans une perspective de renforcement de l'économie circulaire. Plus précisément, il s'agit de comprendre comment ces deux segments historiquement dissociés tant sur le plan des structures industrielles que des logiques économiques peuvent être articulés de manière complémentaire afin de réduire la dépendance aux matières premières vierges, d'optimiser la gestion des ressources, et de minimiser les externalités environnementales. En prenant appui sur une analyse des flux de matières et sur une approche systémique du secteur, cette

recherche vise à identifier les leviers économiques, institutionnels et logistiques permettant de favoriser une intégration plus efficiente des matériaux recyclés dans la chaîne de valeur régionale. Ce faisant, elle entend contribuer à une réflexion plus large sur la transition vers une industrie de l'aluminium, plus circulaire, plus résiliente, et plus durable au Québec.

2.2 Objectifs spécifiques

Pour atteindre ce but général, deux objectifs spécifiques ont été définis. Le premier objectif consiste à dresser une cartographie détaillée des flux physiques de matières dans l'industrie québécoise de l'aluminium. Cela inclut la quantification des flux d'aluminium primaire (issu de l'extraction de la bauxite et de l'électrolyse) et d'aluminium secondaire (provenant du recyclage des rebuts et des produits en fin de vie), l'identification des principales sources et destinations des flux, y compris les intrants, les extrants et les pertes potentielles, ainsi que l'analyse des points de friction ou d'inefficience dans la gestion des flux, tels que le gaspillage de matériaux recyclables ou la sous-utilisation de l'aluminium secondaire. Cette cartographie permettra d'avoir une vue d'ensemble sur les interactions physiques entre les deux segments et de détecter les opportunités pour renforcer leur synergie.

Le deuxième objectif porte sur une brève analyse des relations économiques qui existent entre les segments primaire et secondaire, notamment en termes de coûts de production (avec une comparaison des coûts énergétiques et matériels entre l'aluminium primaire et secondaire), de prix des matières premières et recyclée (notamment l'influence des fluctuations des prix mondiaux de la bauxite et de l'alumine sur la compétitivité du marché secondaire).

2.3 Limites méthodologiques

Comme toute démarche scientifique, l'approche méthodologique adoptée dans le cadre de cette étude comporte certaines limites qu'il convient de reconnaître afin de mieux encadrer l'interprétation des résultats obtenus.

Tout d'abord, les données utilisées pour modéliser les flux de matières dans l'industrie de l'aluminium au Québec proviennent de sources secondaires, notamment les rapports d'organismes publics (Statistique Canada, MEIE), de publications sectorielles (AluQuébec, Groupe AGECO) et d'études universitaires. Bien que ces sources soient réputées pour leur fiabilité, leur degré d'actualisation ou de désagrégation sectorielle peut varier, ce qui peut introduire des marges d'erreur dans les calculs, notamment dans l'estimation des flux secondaires ou des rebuts post-consommation.

Ensuite, la modélisation par Analyse de Flux de Matières (AFM) repose sur le respect du principe de conservation de la masse, une hypothèse simplificatrice qui ne prend pas en compte certaines pertes dispersives ou formes d'accumulation non mesurées. Certains processus complexes, comme le recyclage de rebuts composites ou contaminés, ont dû être représentés de manière agrégée ou simplifiée, faute de données détaillées. Par ailleurs, la conversion de données exprimées en unités monétaires ou en nombre de produits en unités physiques (kilotonnes) nécessite l'utilisation de coefficients d'estimation qui peuvent introduire des imprécisions supplémentaires.

De plus, l'utilisation du logiciel STAN pour la réconciliation des données repose sur l'attribution d'un degré d'incertitude à chaque flux. Or, ces incertitudes sont souvent estimées de manière qualitative ou selon des plages standard, faute de valeurs statistiques précises

dans les sources disponibles. Cela peut affecter la pondération de certains flux dans les ajustements automatiques réalisés par le logiciel.

Enfin, la présente analyse s'inscrit dans une perspective territoriale centrée sur le Québec et une année de référence (2019). De ce fait, les dynamiques temporelles (évolution des marchés, innovations technologiques, changements de politiques publiques) ne sont pas prises en compte de manière prospective, ce qui limite la portée temporelle des conclusions.

Malgré ces limites, l'AFM reste un outil robuste pour visualiser, quantifier et interpréter les flux de matières à l'échelle régionale. Les résultats doivent toutefois être interprétés avec prudence, notamment en ce qui concerne leur généralisation à d'autres contextes géographiques ou temporels.

2.4 Sources et caractéristiques des données

2.4.1 Sources des données

Les données mobilisées dans cette étude proviennent de plusieurs sources complémentaires afin d'assurer une analyse exhaustive et rigoureuse des flux de matières dans l'industrie québécoise de l'aluminium. Tout d'abord, les données industrielles sont issues des rapports et études publiés par AluQuébec (2025), qui fournit des statistiques détaillées sur la production d'aluminium primaire, les capacités de recyclage et les initiatives de circularité au Québec. En complément, des études menées par des organismes spécialisés tels que le Groupe AGECO et STIQ (Sous-traitance Industrielle Québec) offrent des analyses approfondies sur la gestion des rebuts d'aluminium, la structure du marché et les perspectives d'intégration entre les marchés primaire et secondaire.

Ensuite, les données gouvernementales jouent un rôle clé dans la compréhension du cadre réglementaire et économique de l'industrie. Statistique Canada et le ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie du Québec (MEIE) fournissent des indicateurs clés sur les flux commerciaux d'aluminium, notamment les importations, les exportations et la consommation intérieure.

2.4.2 Caractéristiques des données

Les données utilisées pour réaliser l'Analyse de Flux de Matières (AFM) seront uniformisées en unités physiques, principalement en kilotonnes (kt), afin d'assurer une quantification précise des flux de matière circulant entre les différentes étapes du cycle de vie de l'aluminium au Québec. Cette conversion est essentielle pour garantir une cohérence dans l'analyse et permettre des comparaisons directes entre les différentes sources de données.

Trois types de données ont été identifiés :

- **Les données en flux massique** : Elles sont directement exprimées en kilogrammes, tonnes ou kilotonnes et concernent les volumes d'aluminium produits, transformés, recyclés ou exportés. Aucune conversion n'est nécessaire.

- **Les données exprimées en nombre de produits** : Ces données concernent les objets manufacturés contenant de l'aluminium (véhicules, canettes, équipements, etc.). Pour les convertir en kilotonnes, il est nécessaire d'estimer la quantité moyenne d'aluminium par unité de produit et de multiplier cette valeur par le nombre total d'unités.

- **Les données exprimées en quantité monétaire :** Ces données correspondent aux valeurs financières des transactions d'aluminium. La conversion en unités physiques se fait en utilisant le prix moyen de l'aluminium par tonne sur la période étudiée, permettant ainsi d'estimer la quantité de matière correspondant aux valeurs monétaires rapportées.

2.5 Approche méthodologique

Cette section présente l'approche adoptée pour développer le modèle d'Analyse de Flux de Matières (AFM) appliqué à l'aluminium au Québec. Elle décrit les étapes de modélisation ainsi que les principales activités intégrées dans le périmètre d'analyse. Ce périmètre couvre l'ensemble du cycle de vie de l'aluminium, incluant l'importation des matières premières, la transformation industrielle, la consommation, la gestion des déchets et le recyclage.

L'objectif principal de cette modélisation est de représenter de manière détaillée les flux d'aluminium primaire et secondaire au Québec. Cela permet de visualiser les circuits empruntés par la matière, de mesurer les quantités échangées à chaque étape du cycle de vie et de localiser les pertes ou inefficiencies dans le système. Grâce à cette représentation systémique, il devient possible d'identifier les goulots d'étranglement, d'évaluer les volumes perdus ou récupérables, et de quantifier les marges d'amélioration possibles dans une logique d'économie circulaire.

L'outil STAN (Substance Flow Analysis) est utilisé pour réaliser cette modélisation. Il permet de représenter graphiquement les processus industriels et les flux de matière qui les

relient, tout en assurant la cohérence des données grâce au respect du principe de conservation de la masse traduit par l'équation suivante :

$$\mathbf{I} + \mathbf{P} - \mathbf{C} - \mathbf{E} = \Delta \mathbf{S} \quad (1)$$

Où :

\mathbf{I} = Importations

\mathbf{P} = Production locale

\mathbf{C} = Consommation totale d'aluminium

\mathbf{E} = Exportations

$\Delta \mathbf{S}$ = Variation de stock d'aluminium.

Les données utilisées dans le modèle proviennent de sources statistiques officielles, de rapports industriels, d'inventaires environnementaux et d'estimations basées sur des ratios techniques (par exemple, le rapport entre la masse d'alumine et celle d'aluminium produit). Ces données sont traitées et intégrées dans le modèle STAN sous forme de flux entrants, sortants et de variations de stock.

L'utilisation de STAN permet également d'associer à chaque flux une incertitude, exprimée généralement en pourcentage ou en valeur absolue. Cette prise en compte des incertitudes est essentielle pour mieux comprendre la fiabilité des données, identifier les zones de faiblesse informationnelle, et orienter les efforts futurs d'amélioration de la traçabilité et de la précision

2.6 Présentation du cadre méthodologique choisi

L'analyse des flux de matières et de l'intégration des marchés de l'aluminium primaire et secondaire au Québec nécessite une définition claire du cadre géographique, temporel et du système d'étude afin de garantir la pertinence des résultats obtenus.

Sur le plan géographique, cette recherche se concentre exclusivement sur le territoire québécois. Cette délimitation est justifiée par l'importance stratégique de l'industrie de l'aluminium au Québec, qui représente environ 90 % de la production canadienne d'aluminium primaire. Le cadre géographique inclut l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur de l'aluminium présents dans la province : les producteurs d'aluminium primaire, les entreprises de recyclage, les fournisseurs de matières premières et les utilisateurs finals.

Le cadre temporel retenu pour cette étude couvre l'année 2019, principalement en raison de la disponibilité, de la fiabilité et de l'homogénéité des données pour cette période. En effet, l'année 2019 constitue la dernière année complète pour laquelle des données sectorielles cohérentes et croisées (production, consommation, exportation, recyclage) sont accessibles à partir de source officielle et scientifiques. Par ailleurs, cette période précède les perturbations économiques majeures causées par la pandémie de COVID-19, ce qui permet d'étudier les flux dans des conditions économiques plus représentatives d'un fonctionnement «normal» des marchés. Le choix de l'année 2019 assure ainsi une meilleure cohérence méthodologique et analytique, essentielle pour l'élaboration rigoureuse du modèle de flux de matières.

Le système d'étude, quant à lui, est structuré autour des flux de matières physiques et des interactions économiques entre les segments primaire et secondaire de l'industrie de

l'aluminium. Il inclut les étapes et processus clés suivants adoptés par Cullen et Allwood (2013) pour cartographier les flux mondiaux d'aluminium :

- **Électrolyse/Fusion** : Cette étape comprend deux volets principaux.

Premièrement, la transformation de l'alumine en aluminium liquide par le procédé d'électrolyse, un processus énergivore, mais essentiel dans la production d'aluminium primaire. Deuxièmement, la fusion des rebuts d'aluminium pour produire des alliages destinés à des applications spécifiques, intégrant ainsi les matériaux recyclés dans le processus industriel.

- **Coulée** : Une fois l'aluminium transformé en liquide, il est coulé en brames,

billettes et lingots. Ces semi-produits servent soit directement dans la fabrication de produits finis, soit sont refondus en aval pour d'autres usages industriels. Cette étape est cruciale pour garantir la qualité et la spécificité des matériaux requis par les industries utilisatrices.

- **Mise en forme** : Cette étape inclut le laminage, l'extrusion et la coulée en

formes précises. Elle permet de produire des produits intermédiaires sous forme de tôles, de profilés ou d'autres formats destinés à des applications variées. La mise en forme constitue un lien essentiel entre la production primaire et la fabrication.

- **Fabrication** : Les produits intermédiaires sont transformés en composants

spécifiques pour répondre aux besoins d'industries diverses, telles que l'automobile, l'aéronautique, la construction ou encore les biens de consommation. Cette étape implique des technologies avancées pour produire des composants répondant à des exigences de performance, de durabilité et de précision.

- **Utilisation finale** : Les composants manufacturés sont intégrés dans des biens de consommation ou des équipements industriels. Après une période d'utilisation qui varie selon les applications, ces produits atteignent la fin de leur vie utile, ouvrant la voie à leur gestion en tant que déchets.
- **Gestion des déchets en fin de vie** : Cette dernière étape englobe les activités de collecte, de tri et de gestion des produits usagés. Elle met l'accent sur le recyclage, qui consiste à remettre les matières dans le cycle de vie pour produire de nouveaux matériaux ou produits.

Les flux de matières circulent d'une étape à l'autre du cycle de vie de l'aluminium, à la fois à l'intérieur du périmètre d'analyse défini par l'AFM (le Québec) et au-delà, en s'étendant vers l'extérieur du système (Vers les autres provinces ou vers l'extérieur du Canada). Ces échanges externes se manifestent sous forme d'importations et d'exportations de matières premières, de produits semi-finis ou finis, mais également par des pertes vers l'environnement.

2.7 Présentation de l'outil STAN

L'outil STAN constitue un levier méthodologique central pour répondre aux objectifs de ce mémoire, qui visent à cartographier les flux d'aluminium primaire et secondaire au Québec, à identifier les pertes dans le système et à évaluer le potentiel de circularité de l'industrie. En appliquant le principe de la conservation de la masse, STAN permet de représenter de manière rigoureuse et visuelle l'ensemble du cycle de vie de l'aluminium, depuis l'importation des matières premières jusqu'à la gestion des rebuts post-consommation (Cencic & Rechberger, 2008).

Grâce à sa capacité à intégrer des données hétérogènes (flux physiques, stocks, incertitudes) dans un cadre cohérent, STAN facilite le repérage des déséquilibres, la quantification des pertes et l'évaluation des possibilités de recyclage local. Il permet ainsi d'identifier les goulots d'étranglement dans l'intégration des marchés de l'aluminium primaire et secondaire, tout en mettant en lumière les marges d'amélioration pour renforcer l'économie circulaire.

Développé par l'Université de Vienne, STAN est un logiciel spécialisé permettant de représenter visuellement et de quantifier les flux de substances et de matériaux dans un système donné. L'outil STAN a été largement mobilisé dans la littérature scientifique pour réaliser des analyses de flux de matières (AFM) dans des contextes variés (Cencic & Rechberger, 2008).

Par exemple, Allesch et Brunner (2017) utilisent l'outil pour concevoir des systèmes de gestion des déchets. Leur étude établit un système de flux de matières comprenant tous les intrants, stocks et extrants pertinents des déchets, produits, résidus et émissions, permettant une évaluation complète du système de gestion des déchets en Autriche.

En Chine, Tien et al. (2013) utilise STAN pour suivre les flux d'additifs présents dans les déchets électroniques, tels que les retardateurs de flamme, en Chine. L'étude a permis d'identifier les voies de dispersion de ces substances et d'évaluer les risques environnementaux associés.

Dans le cadre québécois, Compaore (2017) dans son étude modélise les flux et stocks de cuivre au Québec en 2014 à l'aide de STAN, avec une analyse d'incertitude. Elle visait à

identifier les pertes de matière et à soutenir la mise en place de stratégies de circularité à l'échelle provinciale.

L'outil STAN repose sur les principes fondamentaux de l'Analyse de Flux de Matières (AFM), notamment la conservation de la masse, selon laquelle chaque flux de matière entrant dans un système doit être égal à la somme des flux sortants et des stocks accumulés. Il permet également la modélisation des stocks et flux, distinguant ainsi les flux entrants, les flux sortants et les stocks intermédiaires au sein du périmètre d'analyse. Une autre fonctionnalité clé de STAN est la représentation graphique des flux, facilitant la visualisation des mouvements de matières sous forme de diagrammes de Sankey et permettant d'illustrer clairement les quantités de matériaux circulant dans le système. Cet outil prend en charge les unités physiques (tonnes, kilogrammes, etc.), ce qui est essentiel pour garantir la cohérence et la comparabilité des données dans cette étude.

STAN est utilisé dans le cadre de ce mémoire en tenant compte des principales étapes du cycle de vie de l'aluminium, notamment la production d'aluminium primaire (électrolyse), la première transformation (Coulée), la Deuxième et troisième transformation (Usinage et fabrication), l'utilisation dans différents secteurs économiques (transport, construction, aéronautique, etc.) et la gestion des déchets (rebuts post-consommation, recyclage, exportations des déchets, pertes vers l'environnement).

2.8 Incertitude et réconciliation des données

L'analyse des flux de matières repose sur la collecte, le traitement et l'interprétation de données provenant de diverses sources, chacune présentant un certain niveau d'incertitude. Ces incertitudes peuvent découler de limitations liées aux méthodes de mesure, aux modèles d'estimation utilisés ou encore aux approximations nécessaires pour combler

des lacunes dans les données disponibles (Cencic & Rechberger, 2008). Ainsi, l'évaluation de l'incertitude constitue une étape essentielle pour garantir la fiabilité des résultats et renforcer la robustesse de l'Analyse de Flux de Matières (AFM).

2.8.1 Évaluation de l'incertitude des données

Les données utilisées dans cette étude proviennent de plusieurs sources, chacune présentant un degré de précision, de représentativité et de cohérence variable. Pour assurer une évaluation rigoureuse de l'incertitude associée à l'analyse des flux de matières (AFM), ces données sont classées selon leur mode d'obtention, en tenant compte des recommandations méthodologiques issues de la littérature scientifique.

En particulier, l'approche suivie s'inspire des travaux de Laner et al. (2014), qui proposent une évaluation systématique de l'incertitude dans les analyses de flux de matières. Selon ces auteurs, la qualité des données peut être appréciée à travers cinq dimensions clés : l'exactitude (accuracy), la précision (precision), la temporalité (time-related representativeness), la couverture géographique (spatial representativeness), et la couverture technologique (technological representativeness). À partir de ces critères, ils suggèrent de pondérer chaque flux en fonction de la fiabilité de ses données d'entrée, ce qui permet de quantifier de manière transparente et reproductible l'incertitude globale du modèle.

Cette méthodologie est particulièrement pertinente dans le cas présent, où les données sont issues d'un mélange de sources primaires (enquêtes industrielles, statistiques gouvernementales, rapports internes) et secondaires (littérature scientifique, estimations ou extrapolations).

Ainsi, les données mesurées directement auprès des organismes spécialisés et de rapports industriels tels que AluQuébec, Statistique Canada, et le ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie du Québec (MEIE). Elles sont généralement obtenues par des relevés directs (ex. volumes de production, quantités exportées ou importées) et sont considérées comme les plus fiables, avec une incertitude relativement faible. Considérant ce niveau de précision, l'outil STAN identifie une marge d'erreur à utiliser dans le cadre des analyses générées, celle-ci se situe à $\pm 2\%$ à 5 %. Les marges d'erreurs sont plus ou moins élevées selon la précision de certaines catégories de sources, telle que suggéré dans la documentation de l'outil (Patrício et al., 2015).

Les données estimées à partir de modèles avec certaines variables, notamment les flux de matières issus du recyclage ou les taux de récupération post-consommation, sont estimées à l'aide de modèles empiriques ou de coefficients issus de la littérature scientifique. Ces estimations entraînent une incertitude modérée (± 10 à 20 %), en raison des hypothèses sous-jacentes et des marges d'erreur des modèles.

Les données extrapolées ou issues de la littérature : lorsque les données spécifiques au Québec ne sont pas disponibles, certaines valeurs sont dérivées d'études réalisées dans des contextes similaires (ex. États-Unis, Europe). L'incertitude associée à ces extrapolations est plus élevée (± 15 à 30 %), en raison des différences structurelles entre les marchés.

Données manquantes ou approximations : dans certains cas, certaines valeurs doivent être approximées en raison de l'absence de données officielles. Ces approximations sont effectuées en s'appuyant sur des tendances historiques ou des ratios établis dans d'autres

études. L'incertitude pour ces données est significative ($>30\%$), ce qui nécessite une vigilance accrue lors de leur intégration dans l'analyse.

Les marges d'erreurs peuvent apparaître faibles ou élevées, suivant le contexte. Toutefois, elles proviennent de l'outil et sont appliquées dans ce type d'analyse. L'identification de la précision des données apparaît comme importante, considérant que, dans ce type d'analyse, les données provenant de différentes sources doivent être réconciliées.

2.8.2 Réconciliation des données

La réconciliation des données est un processus analytique utilisé pour ajuster des données quantitatives issues de différentes sources afin de rétablir la cohérence d'un système, tout en respectant les lois physiques ou les contraintes logiques, comme le principe de conservation de la masse dans le cas des flux de matières.

La réconciliation des données est une étape essentielle dans l'analyse des flux de matières, notamment lorsque les informations proviennent de diverses sources avec des niveaux d'incertitude variables. Afin d'illustrer concrètement ce processus, nous présentons trois scénarios typiques où la réconciliation est nécessaire pour assurer la cohérence des flux d'entrée et de sortie.

Les scénarios suivants proviennent de la documentation de l'outil STAN et permettent d'illustrer, de façon générale, des cas types nécessitant une réconciliation (Cencic & Rechberger, 2008) .

Scénario 1 :

Nous supposons que le flux d'entrée (importation) est parfaitement connu et mesuré avec précision, tandis que le flux de sortie (exportation) comporte une incertitude. Avant réconciliation, le flux d'entrée est de 200 kt, sans incertitude, tandis que le flux de sortie est de 210 kt avec une incertitude de ± 10 kt. La Figure 8 illustre le flux avant la réconciliation.

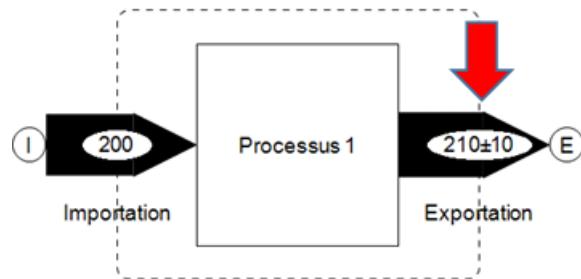


Figure 8: Scénario 1 avant réconciliation

Cette situation génère une incohérence, car selon le principe de conservation de la masse, le flux entrant et le flux sortant devraient être égaux en l'absence d'accumulation de stock. Le logiciel STAN ajuste alors le flux incertain pour rétablir l'équilibre. Puisque seul le flux de sortie comporte une incertitude, il est modifié pour s'aligner sur le flux d'entrée. Après réconciliation (voir Figure 9), le flux d'entrée reste inchangé à 200 kt, tandis que le flux de sortie est réduit à 200 kt, supprimant ainsi l'écart de 10 kt.

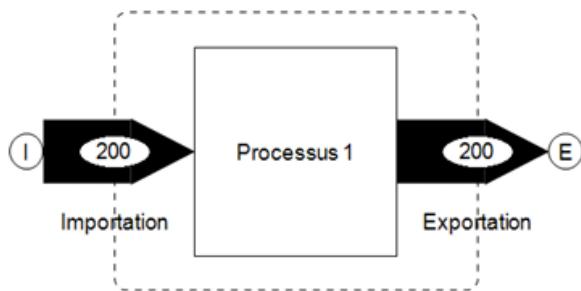


Figure 9: Scénario 1 après réconciliation

Tableau 1: Valeurs des flux scénario 1

Paramètre	Avant réconciliation	Après réconciliation
Flux d'entrée (kt)	200 (précis)	200 (inchangé)
Flux de sortie (kt)	210 ± 10	200
Écart net observé (kt)	+10	0
Ajustement effectué	Aucun sur le flux d'entrée	-10 kt sur le flux de sortie

Scénario 2 :

Les flux d'entrée et de sortie sont tous deux incertains. Contrairement au premier cas, où seul un flux était ajusté, ici, la correction est appliquée aux deux flux de manière équilibrée. Avant réconciliation, le flux d'entrée est de 200 kt avec une incertitude de ± 10 kt, et le flux de sortie est de 210 kt avec une incertitude de ± 10 kt également comme présenté à la figure 10.

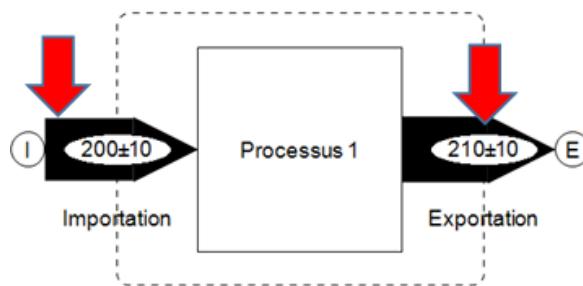


Figure 10: Scénario 2 avant réconciliation

Étant donné que les deux valeurs sont issues de sources différentes et comportent une marge d'erreur similaire, elles doivent être ajustées pour minimiser l'écart total tout en respectant la loi de conservation de la masse. Le logiciel STAN modifie simultanément les

deux flux en appliquant une correction proportionnelle à leur incertitude. Après réconciliation, le flux d'entrée et le flux de sortie sont tous deux ajustés à 205 kt, avec une correction symétrique de ± 7 kt (voir figure 11).

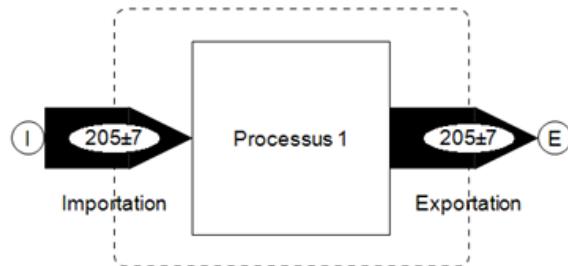


Figure 11: Scénario 2 après réconciliation

Concrètement, si un processus est alimenté par un flux d'entrée mesuré X_1 et qu'il en ressort un flux de sortie mesuré X_2 , mais que ces deux valeurs ne sont pas identiques (dans notre exemple $X_1 = 200$ et $X_2 = 210$), STAN ajuste l'un des deux flux (ou les deux) pour les rendre strictement égaux, de même que les incertitudes σ liées aux mesures.

Dans ce contexte, la réconciliation s'effectue selon les règles simples suivantes :

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2}{2} \quad (2)$$

Pour un nombre n de flux : $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$

et

$$\sigma(\bar{X}) = \frac{\sigma_i}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Ainsi :

$$\bar{X} = \frac{200 + 210}{2} = 205 \text{ et } \sigma(\bar{X}) = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7$$

Tableau 2 : Valeurs des flux scénario 2

Paramètre	Avant réconciliation	Après réconciliation
Flux d'entrée (kt)	200 ± 10	205 ± 7
Flux de sortie (kt)	210 ± 10	205 ± 7
Écart net observé (kt)	+10	0
Ajustement effectué	+5 kt sur le flux d'entrée	-5 kt sur le flux de sortie

Scénario 3 :

Les niveaux d'incertitude diffèrent entre les flux d'entrée et de sortie, influençant ainsi la manière dont les corrections sont appliquées. Avant réconciliation, le flux d'entrée est de 200 kt avec une incertitude de ± 5 kt tandis que le flux de sortie est de 210 kt avec une incertitude de ± 10 kt(voir Figure 12). Étant donné que le flux d'entrée est plus précis que le flux de sortie, l'ajustement doit être principalement appliqué au flux le plus incertain.

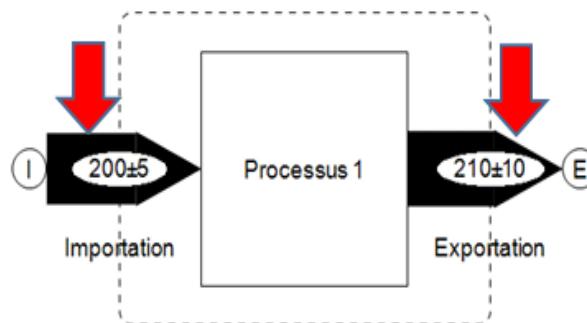


Figure 12: Scénario 3 avant réconciliation

Après réconciliation, les nouvelles valeurs sont 202,5 kt pour le flux d'entrée et 202,5 kt pour le flux de sortie.

La correction est répartie de manière asymétrique : le flux d'entrée est légèrement modifié (+2,5 kt), tandis que le flux de sortie est réduit plus significativement (-7,5 kt) afin d'atteindre un équilibre tout en respectant la fiabilité des données.

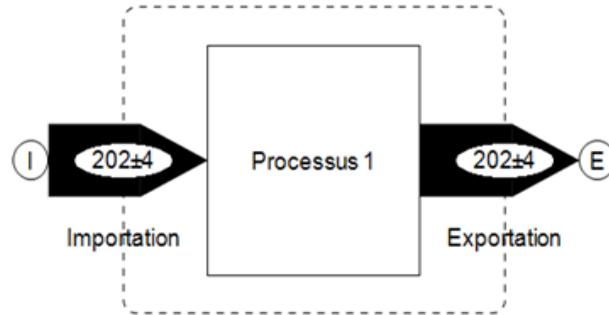


Figure 13: Scénario 3 après réconciliation

Concrètement, considérons un processus simple comportant un flux d'entrée $X1$ et un flux de sortie $X2$, tous deux mesurés mais comportant des incertitudes. Plutôt que d'ajuster complètement un flux à l'autre (comme dans le Scénario 2), STAN calcule une valeur réconciliée \bar{X} qui minimise l'erreur globale en pondérant l'ajustement selon les incertitudes des mesures. Mathématiquement, cette réconciliation est exprimée par :

$$\bar{X} = X1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \times (X2 - X1) \quad (4)$$

Ou

$$\bar{X} = X2 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \times (X2 - X1) \quad (5)$$

où :

- \bar{X} est la valeur réconciliée du flux (même pour l'entrée et la sortie, car elles doivent être égales dans un système sans accumulation),
- $X1$ est la valeur mesurée du flux d'entrée,
- $X2$ est la valeur mesurée du flux de sortie,
- σ_1 et σ_2 sont les écarts-types respectifs associés aux mesures de $X1$ et $X2$.

Dans les deux cas, la logique reste la même : plus un flux est incertain (grande valeur de σ), moins il influence le résultat réconcilié. Autrement dit, la valeur réconciliée est plus proche de la mesure la plus fiable, c'est-à-dire celle dont l'incertitude est la plus faible.

L'écart-type de la valeur réconciliée \bar{X} , qui représente l'incertitude résiduelle après ajustement, est alors calculé par la formule suivante :

$$\sigma(\bar{X}) = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 \times \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (6)$$

Dans notre exemple, le flux d'entrée mesuré est de $X1=200$ kt avec un écart-type ou incertitude de $\sigma_1=5$, et le flux de sortie est de $X2=210$ kt avec un écart-type de $\sigma_2=10$. En appliquant la formule de réconciliation, on obtient :

$$\bar{X} = 200 + \frac{25}{25 + 100} \times (210 - 200) = 202 \quad (7)$$

La valeur réconciliée du flux, utilisée comme valeur de référence dans le modèle, est donc de 202 unités. L'incertitude associée à cette estimation devient :

$$\sigma(\bar{X}) = \sqrt{\frac{25 \times 100}{125}} \approx 4,47 \quad (8)$$

Dans ce scénario, l'incertitude associée aux flux est supposée constante et fixée de manière arbitraire à une valeur approximative de 5 kt, ce qui permet d'uniformiser l'échelle d'ajustement sans privilégier un flux par rapport à un autre.

Tableau 3 : Valeurs des flux scénario 3

Paramètre	Avant réconciliation	Après réconciliation
Flux d'entrée (kt)	200 ± 5	$202,5 \pm \text{ajustés}$
Flux de sortie (kt)	210 ± 10	$202,5 \pm \text{ajustés}$
Écart net observé (kt)	+10	0
Ajustement effectué	+2,5 kt sur le flux d'entrée	-7,5 kt sur le flux de sortie

L'analyse de ces trois scénarios met en évidence l'impact des incertitudes sur la cohérence des flux de matières et la nécessité de la réconciliation des données. Selon la précision des sources et la redondance des informations disponibles, le logiciel STAN applique des ajustements variés.

Il convient de mentionner que la réconciliation des données effectuée précédemment est partielle. Néanmoins, le système étudié comporte plusieurs processus et flux entrants et sortants qui seront réconciliés de manière globale au moyen du logiciel STAN. Cette réconciliation est effectuée automatiquement par le logiciel STAN à l'aide de ses modules de calcul (module Cencic 2012 et module Kelly 2011).

2.9 Procédure d'élaboration de l'AMF

Dans le cadre de cette étude, l'approche méthodologique adoptée repose sur la procédure de conception d'une Analyse de Flux de Matières (AFM) élaborée par Brunner et Rechberger (2004). Cette méthodologie offre une structure rigoureuse pour analyser les flux et les stocks de matières au sein d'un système défini. L'approche comprendra les étapes suivantes :

- Sélection des substances (Selection of Substances) qui consiste à identifier les matières et substances clés qui seront incluses dans l'analyse. Dans le contexte de notre étude, la substance pertinente est l'aluminium (Al), qui transitera dans le système sous différentes formes qui incluent la bauxite, l'alumine, l'aluminium primaire, les rebuts industriels, ainsi que les déchets post-consommation recyclables en gros l'aluminium.
- Définition du système dans l'espace et le temps (System Definition in Space and Time). Le périmètre spatial de l'étude est limité à l'industrie de l'aluminium au Québec, en tenant compte des intrants et extrants dans l'industrie. La définition temporelle couvrira la période de l'année 2019. Cette

étape permet de structurer le système en distinguant les frontières géographiques et temporelles, ainsi que les processus inclus dans l'analyse.

- Identification des flux, stocks et processus pertinents (Identification of Relevant Flows, Stocks, and Processes) qui vise à recenser les flux physiques (entrée, sortie, recyclage) et les stocks de matières existants dans les différentes étapes de la chaîne de valeur ainsi que les processus clés par lesquels transissent ses stocks et flux.
- Détermination des flux massiques, des stocks et des concentrations (Determination of Mass Flows, Stocks, and Concentrations)
- Évaluation des flux et stocks totaux de matières (Assessment of Total Material Flows and Stocks) qui est la dernière étape consistant à compiler les données pour établir un bilan global des flux et stocks de matières.

2.9.1 Processus d'électrolyse

Le processus d'électrolyse consiste à transformer la matière première alumine en aluminium liquide et représente dans notre étude la première étape du cycle de vie de l'aluminium. Le **Tableau 4** détail les flux entrants en l'occurrence l'alumine et les flux sortants qui sont l'aluminium liquide et les pertes vers l'environnement. Pour déterminer la quantité d'alumine (Al_2O_3) nécessaire à la production de l'aluminium, nous utilisons le rapport des masses molaires entre ces deux dernières. La masse molaire de l'alumine est de 102 g/mol, tandis que l'aluminium qu'elle contient représente $2 \times 27 \text{ g/mol} = 54 \text{ g/mol}$. Le rapport massique entre l'alumine et l'aluminium est donc :

$$\frac{M_{Al_2O_3}}{M_{Al}} = \frac{102}{54} \approx 1,89 \quad (9)$$

Ainsi, pour produire 1 tonne d'aluminium, il faut environ 1,89 tonne d'alumine (Cassayre, 2006; Molin, 2015; Roger, 2022).

Tableau 4 : Flux entrants et flux sortants du processus d'électrolyse

Catégories	Flux	Sources de données
Flux entrants	Importations d'alumine	Statistique Canada (2019)
	Alumine produite	AluQuébec (2023a)
Flux sortants	Pertes vers l'environnement	STAN
	Aluminium liquide	AluQuébec (2023a)

2.9.2 Processus de la première transformation

La première transformation de l'aluminium regroupe les procédés industriels permettant de convertir l'aluminium liquide issu de l'électrolyse en produits tels que les brames, billettes et lingots.

Les principaux flux entrants dans ce processus comprennent l'aluminium liquide issu de l'électrolyse, qui constitue la matière première principale de la première transformation, les importations d'aluminium primaire, bien que relativement faible, permettant de répondre aux besoins du marché québécois lorsque la production locale est insuffisante, les rebuts post-consommation, récupérés à partir de produits en fin de vie et refondus pour être réintégrés

dans le circuit de production, ainsi que les rebuts internes de la première et de la deuxième transformation, issus des pertes de production et recyclés en interne dans les fonderies.

Les flux sortants incluent principalement les exportations d'aluminium primaire, puisque plus de 80 % de l'aluminium produit au Québec en 2019 a été exporté sous forme brute, ce qui représente le flux dominant de cette étape. Une partie de la production reste toutefois destinée au marché québécois et alimente diverses industries telles que le transport, la construction et l'emballage. Enfin, les rebuts non recyclés qui peuvent être envoyés en décharge ou en incinération.

Tableau 5 : Flux entrants et flux sortants du processus de la première transformation

Catégories	Flux	Sources de données
Flux entrants	Aluminium Liquide	AluQuébec (2023a)
	Importations d'aluminium primaire	Statistique Canada (2019)
	Rebuts post-consommation	Groupe AGEKO (2023)
Flux sortants	Exportations de lingots et de billettes	Statistique Canada (2019)
	Lingots et billettes	Statistique Canada (2019)
	Pertes vers l'environnement	STAN (par calcul)

2.9.3 Processus de mise en forme et de fabrication

Le processus de mise en forme et de fabrication constitue une étape clé dans la transformation de l'aluminium, où les produits semi-finis issus de la première transformation

sont convertis en matériaux adaptés aux divers secteurs industriels. Cette étape regroupe deux grandes catégories d'activités : les procédés de mise en forme et les opérations de fabrication, qui permettent d'intégrer l'aluminium dans des produits finis destinés aux marchés locaux et internationaux.

Les produits issus de la première transformation, tels que les brames, billettes et lingots, sont acheminés vers des sites spécialisés où ils subissent différentes opérations de mise en forme en fonction de leur usage final.

À l'issue de ces procédés, l'aluminium est converti en produits semi-ouvrés adaptés aux besoins des manufacturiers.

Les matériaux en aluminium mis en forme sont utilisés dans divers processus de fabrication pour produire une large gamme de biens de consommation et d'équipements industriels.

Tableau 6 : Flux entrants et flux sortants du processus de la mise en forme et de la fabrication

Catégories	Flux	Sources de données
Flux entrants	Lingots et billettes	AluQuébec (2023a)
	Importations de produits semi-finis et manufacturés	Statistique Canada (2019)
Flux sortants	Exportations de produits finis et semi-finis	Statistique Canada (2019)
	Produits finis et semi-finis	Groupe AGEKO (2023)

2.9.4 Processus d'utilisation

L'étape d'utilisation marque la phase où les produits finis en aluminium, issus des processus de transformation, sont intégrés dans l'économie et consommés dans divers secteurs d'activités, les flux intervenants à cette étape sont représentés dans le Tableau 7. Cette phase est essentielle pour comprendre la distribution sectorielle de l'aluminium, mais aussi pour estimer le stock d'aluminium en circulation dans l'économie québécoise, un indicateur clé pour analyser le potentiel de récupération et de recyclage à long terme.

Les produits issus de la deuxième et de la troisième transformation sont utilisés à des proportions variables selon les secteurs industriels. Selon une étude menée par le Groupe AGEKO (2023), trois grands secteurs dominent la consommation d'aluminium au Québec : le secteur du transport (25 %), le secteur de la construction (21 %) et l'industrie aéronautique (17 %).

Les 37 % restants de la consommation se répartissent entre les biens de consommation (emballages, électroménagers, équipements électroniques), les infrastructures électriques et d'autres secteurs industriels.

Tableau 7: Flux entrants et flux sortants du processus d'utilisation

Catégories	Flux	Sources de données
Flux entrants	Produits finis (Production)	Groupe AGEKO (2023)
	Importations de biens	Statistique Canada (2019)
Flux sortants	Rebuts post-consommation	Groupe AGEKO (2023)
	Stock	Estimation (équation 10)

L'analyse du stock d'aluminium en circulation permet d'estimer la quantité totale d'aluminium présente dans les infrastructures, véhicules, bâtiments et autres équipements en circulation au Québec. Cette donnée est cruciale pour anticiper les volumes futurs de rebuts post-consommation disponibles pour le recyclage. Des études internationales fournissent des points de comparaison intéressants. Sverdrup et al. (2015) ont estimé le stock d'aluminium en utilisation dans plusieurs économies développées similaires au Canada : États-Unis : 540 kg/personne, Pays-Bas : 500 kg/personne, Allemagne : 410 kg/personne, Australie : 370 kg/personne, Japon : 320 kg/personne, France : 240 kg/personne, Royaume-Uni : 220 kg/personne. Bien que le stock exact d'aluminium en circulation au Québec ne soit pas précisément documenté, ces chiffres permettent d'estimer une fourchette plausible pour l'économie québécoise, compte tenu de la similarité des niveaux de développement économique et industriel. Cette approche méthodique permet d'estimer les réserves et les ajouts aux réserves d'aluminium en phase d'utilisation au Québec. L'équation (3) permet de résumer la méthodologie, suivant Compaore (2017) qui , dans son étude sur l'analyse des flux de matières du cuivre au Québec, utilise une méthode similaire pour déterminer le stock de cuivre et la variation du stock de cuivre au Québec.

$$\text{Stock}_{Qc} = \frac{\text{St}_{USA} + \Delta\text{St}_{USA} \times (\text{A}_{Etu} - \text{A}_{Ref}) + \text{St}_{Gr} + \Delta\text{St}_{Gr} \times (\text{A}_{Etu} - \text{A}_{Ref})}{2} \times \text{Pop}_{Qc} \quad (10)$$

Où Stock_{Qc} correspondant au stock estimé d'aluminium au Québec ; St_{USA} et St_{Gr} respectivement les stocks d'aluminium par habitant au États-Unis et en Allemagne ; ΔSt_{USA} et ΔSt_{Gr} la variation (ou addition) du stock au États-Unis (0,03 tonne/personne.an) et en Allemagne (0,032 tonne/personne.an) quantifiée par l'USGS. A_{Etu} est l'année d'étude de

notre projet (2019) et A_{Ref} est l'année de référence des données (2015). Pop_{Qc} représente la population du Québec en 2019 (8 429 200 habitants).

C'est cette méthode qui sera utilisé dans le cadre de ce mémoire.

Une étude de Rauch (2009) établit une relation linéaire entre le stock d'aluminium en utilisation et le Produit Intérieur Brut (PIB) d'une économie. Il propose une estimation selon la formule suivante :

$$\text{Stock d'aluminium} = 13,5 \times \text{PIB} \times 106 \quad (11)$$

Bien que cette formule représente une méthode indirecte utile pour estimer les quantités d'aluminium circulant dans une économie, elle ne sera pas retenue dans le cadre de ce mémoire.

D'une part, cette approche présente un caractère trop approximatif, reposant sur une généralisation linéaire qui ne tient pas compte des spécificités sectorielles, technologiques ou territoriales propres au Québec.

D'autre part, le recours au PIB comme variable explicative soulève des limites méthodologiques, dans la mesure où cet indicateur agrégé ne reflète pas nécessairement l'intensité matérielle réelle d'une économie, ni la structure particulière de la consommation d'aluminium, notamment dans un contexte fortement exportateur comme celui du Québec.

2.9.5 Processus de gestion des déchets

La gestion des déchets d'aluminium représente une étape cruciale dans le cycle de vie du métal, influençant directement le niveau de circularité de l'industrie québécoise. Cette phase comprend la collecte, le tri, le recyclage et l'élimination des déchets issus de l'utilisation finale des produits en aluminium. Les flux de matières associés à cette étape sont principalement constitués de rebuts post-consommation, provenant de diverses sources.

Les déchets d'aluminium post-consommation au Québec en 2020 proviennent principalement de trois grandes catégories de produits en fin de vie, les canettes en aluminium (Collectés notamment via le système de consigne), environ 37 kt, les véhicules hors d'usage dont les pièces en aluminium (moteurs, carrosseries, composants) environ 77 kt ainsi que les déchets de démolition et de construction qui représenteraient près de 15 kt (Danielle, 2023).

Selon l'étude de Danielle (2023) pour AluQuébec, le taux de récupération moyen des rebuts post-consommation au Québec est d'environ 85 %. Ce pourcentage reflète l'efficacité relative des systèmes de collecte et de tri en place, bien que des disparités existent selon les types de déchets et leur destination.

Malgré ce taux de récupération relativement élevé, une problématique majeure persiste dans le manque d'infrastructures adaptées au recyclage des rebuts post-consommation. Une étude menée par le Groupe AGEKO met en évidence une capacité de recyclage limitée au Québec, notamment en raison d'une insuffisance des installations spécialisées pour traiter l'aluminium en fin de vie. Cette situation entraîne une forte dépendance aux marchés étrangers, principalement aux États-Unis, pour la revalorisation des déchets d'aluminium.

Un exemple frappant de cette dépendance est celui des canettes en aluminium collectées au Québec. Bien que leur taux de récupération soit élevé grâce au système de consigne, la totalité des canettes recyclées est exportée aux États-Unis pour y être traitée. Cette exportation systématique s'explique par l'absence d'installations locales capables d'assurer le recyclage de ces déchets à grande échelle.

Tableau 8 : Flux entrants et flux sortants du processus de gestion des déchets

Catégories	Flux	Sources de données
Flux entrants	Rebuts post-consommation	Groupe AGEKO (2023)
	Importations de rebuts	Statistique Canada (2019)
Flux sortants	Pertes vers l'environnement (Enfouissement et incinération)	Groupe AGEKO (2023)
	Exportation de rebuts	Statistique Canada (2019)
	Rebuts recyclés	Groupe AGEKO (2023)

Les données qui seront intégrées au modèle seront présentées en détail dans la section suivante.

CHAPITRE 3

3 RÉSULTATS

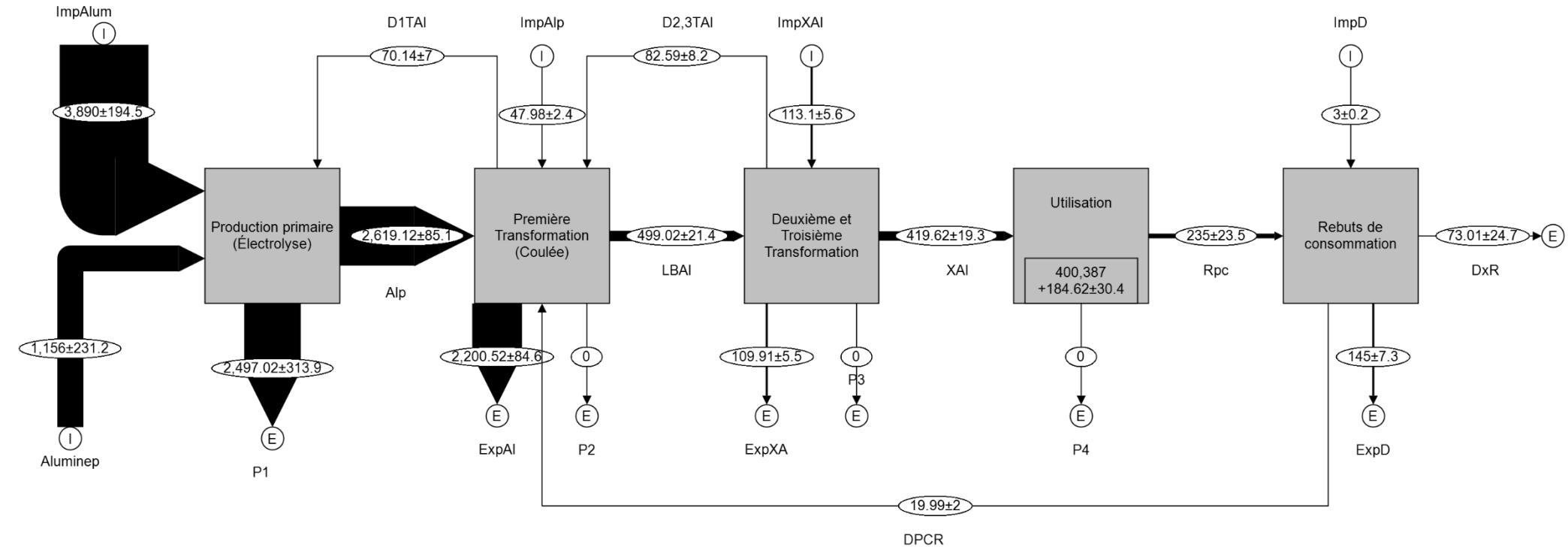
La Figure 14 présente une cartographie des flux et des stocks d'aluminium au Québec, élaborée à l'aide de l'outil STAN et sur la base des données collectées pour l'année 2019.

Les différentes étapes du cycle de vie de l'aluminium y sont représentées dans des carrés gris, illustrant les principales phases par lesquelles passent les flux d'aluminium. Ces flux sont de trois types, représentés sous forme de flèches distinctes : les flux avec un « I » entouré correspondent aux importations, ceux avec un « E » entouré concernent les exportations, tandis que les autres flux circulent à l'intérieur du système. Les nombres situés au-dessus des flèches indiquent la valeur des flux en gigagrammes (Gg) ou kilotonnes (kt), où $1 \text{ Gg} = 1 \text{ kt}$. Les incertitudes associées sont également exprimées dans ces unités et apparaissent après le signe « \pm ». Par exemple, le flux d'aluminium primaire exporté est de $2167 \pm 108,35 \text{ kt}$, ce qui signifie que, bien que l'estimation centrale soit de 2167 kt, la quantité réelle exportée pourrait se situer entre 2275,35 kt et 2058,65 kt, selon la marge d'incertitude de 5 %.

La taille des flèches reflète l'importance des flux en termes de masse. Ainsi, dans le processus de production primaire, on observe que la quantité d'alumine importée ($3890 \pm 194,5 \text{ kt}$) pour la production d'aluminium primaire est nettement plus élevée que la quantité d'alumine produite localement au Québec ($1156 \pm 231,2 \text{ kt}$).

Il est important de noter que toutes les valeurs de flux indiquées ci-dessous concernent uniquement la masse physique de l'aluminium.

Figure 14 : Cartographie des flux d'aluminium au Québec pour l'année 2019



Légende :

Alp: Aluminium primaire, **Aluminep** : Alumine produite, **D1TAI** : Rebuts de la première transformation, **D2,3TAI** : Rebuts de la deuxième et troisième transformation, **DPCR** : Rebuts post-consommation recyclés, **DxR** : Rebuts non recyclés, **ExpAlp** : Exportations d'aluminium primaire, **ExpD** : Exportations de rebuts post-consommation, **ExpXA** : Exportations de produits semi-finis et produits finis, **ImpAlp** : Importations d'aluminium primaire, **ImpAlum** : Alumine importée, **ImpD** : Importations de rebuts post-consommation, **ImpXA** : Importations de produits semi-finis et produits finis, **LBAI** : Lingots et billettes d'aluminium, **P1** : Pertes vers l'environnement du processus d'électrolyse, **P2** : Pertes vers l'environnement du processus de la première transformation, **P3** : Pertes vers l'environnement du processus de la deuxième et troisième transformation, **P4** : Pertes vers l'environnement, **Rpc** : Rebuts post-consommation, **XAI** : Produits semi-finis et produits finis

3.1 Résultats du processus d'électrolyse

Le processus d'électrolyse constitue une étape clé dans la production d'aluminium primaire. La matière première utilisée est l'alumine, extraite de la bauxite. Or, le Québec ne possède pas de gisements de bauxite exploitables, ce qui signifie que l'approvisionnement en alumine dépend entièrement des importations d'alumine et de l'alumine produite à partir de la bauxite en provenance de pays producteurs comme la Guinée, le Brésil ou l'Australie.

En 2019, la production québécoise d'aluminium primaire du Québec s'élevait à 2,67 millions de tonnes selon Statistique Canada (2019), répartie entre les huit usines d'aluminium en activité dans la province. Pour assurer cette production, une partie de l'alumine est importée ($\text{ImpAlum} = 3890 \pm 194,5 \text{ kt}$) et une quantité d'alumine est produite localement ($\text{AlumineP} = 1156 \pm 231,2 \text{ kt}$), et ce volume peut être déterminé à l'aide du rapport massique entre l'alumine et l'aluminium.

$$\text{AlumineP} = \text{P}_{\text{Alumine}} - \text{ImpAlum} \quad (12)$$

L'alumine requise pour le processus d'électrolyse est calculée selon la formule suivante :

$$\text{P}_{\text{Alumine}} = \text{RM} \times \text{P}_{\text{Aluminium}} \quad (13)$$

Avec :

$\text{P}_{\text{Alumine}}$: Flux d'alumine entrant dans le processus d'électrolyse (en millions de tonnes)

$P_{\text{Aluminium}}$: Flux d'aluminium produit (en millions de tonnes)

RM: Rapport massique de conversion de l'alumine en aluminium,
déterminé par la relation suivante :

$$RM = \frac{M_{Al_2O_3}}{M_{Al}} = \frac{102}{54} \approx 1,89 \quad (14)$$

Outre l'aluminium primaire produit (Alp), le processus d'électrolyse génère également des pertes environnementales sous forme de rejets dans l'air, le sol et l'eau, désignés par P1. Ces pertes sont prises en compte dans l'évaluation globale des flux entrants et sortants.

Le Tableau 9 présente une synthèse détaillée des flux de matières avant et après réconciliation des données, mettant en évidence les ajustements nécessaires pour garantir la cohérence des bilans de masse.

Tableau 9 : Valeurs des flux du processus d'électrolyse

Catégories	Flux	Quantité avant réconciliation (Mt)	Quantité après réconciliation (Mt)	Sources de données
Flux entrants	ImpAlumine	$3890 \pm 5\%$	$3890 \pm 5\%$	Statistique Canada (2019)
	Aluminep	$1156 \pm 20\%$	$1156 \pm 20\%$	Par calcul (équation 12)
Flux sortants	P1	Pas connu	$2497 \pm 12,57\%$	Par calcul STAN
	Alp	$2670 \pm 5\%$	$2619.1 \pm 3.25\%$	AluQuébec (2023a)

3.2 Résultats du processus de la première transformation

Le processus de première transformation inclut les activités des fonderies et des raffineries de l'industrie de l'aluminium au Québec. À cette étape, l'aluminium liquide issu du procédé d'électrolyse est coulé sous diverses formes (lingots, billettes, plaques, etc.) constituant la production d'aluminium primaire locale ($\text{Alp} = 2617.74 \pm 86.29 \text{ kt/a}$) destiné d'une part à l'exportation pour près de 80 % de la production 2019, et d'autre part à l'industrie québécoise.

En plus de l'aluminium produit localement, le Québec importe également une certaine quantité ($\text{ImpAlp} = 47,9 \pm 2,4 \text{ kt/a}$) d'aluminium primaire, bien que ces volumes restent relativement modestes en comparaison de la production nationale.

Les flux entrants du processus de première transformation comprennent donc l'aluminium liquide produit localement (Alp), ainsi que les importations d'aluminium primaire (ImpAlp). À ces flux s'ajoutent également les rebuts de la première transformation (D1Tal) générés lors des opérations de coulée et de transformation, qui sont en grande partie recyclés en interne afin d'être réintroduits dans le processus. Par ailleurs, les rebuts post-consommation (DPCR) collectés dans l'économie québécoise viennent compléter ces flux et sont destinés au recyclage.

En ce qui concerne les flux sortants, la majeure partie de l'aluminium transformé au Québec est destinée à l'exportation sous forme brute en lingots ou en billettes ($\text{ExpAlp} = 2201,4 \pm 85,1 \text{ kt/a}$). En effet, près de 80 % de la production québécoise d'aluminium primaire en 2019 a été exportée sans subir de transformation supplémentaire sur le territoire. Le reste ($\text{LBAl} = 496,8 \pm 31,9 \text{ kt/a}$) est utilisé localement par les industries québécoises pour la fabrication de produits semi-ouvrés et finis.

Le **Tableau 10** présente une synthèse des flux de matières associés à la première transformation.

Tableau 10: Valeurs des flux du processus de la première transformation

Catégorie	Flux	Quantité avant réconciliation (Mt)	Quantité après réconciliation (Mt)	Sources de données
Flux entrants	Alp	$2670 \pm 5\%$	$2619.1 \pm 3.25\%$	AluQuébec (2023a)
	ImpAlp	$48 \pm 5\%$	$47.98 \pm 5\%$	Statistique Canada (2019)
	DPCR	$20 \pm 10\%$	$19.98 \pm 10\%$	Groupe AGECO (2023)
	D1TAl	$70 \pm 10\%$	$70.14 \pm 9,97\%$	Groupe AGECO (2023)
Flux sortants	ExpAlp	$2167 \pm 5\%$	$2200.5 \pm 3,84\%$	Statistique Canada (2019)
	LBAL	$485 \pm 10\%$	$499 \pm 4,27\%$	AluQuébec (2023a)
	P2	Pas connu	0	Par calcul STAN

L'analyse des flux de matières dans le processus de première transformation met en évidence une caractéristique structurelle majeure de l'industrie québécoise de l'aluminium : une faible rétention de l'aluminium sur le marché local. En effet, la grande majorité de l'aluminium produit au Québec est exportée sous forme brute, sans transformation avancée, ce qui limite la création de valeur ajoutée au sein de l'économie québécoise. Cette dynamique renforce la dépendance aux marchés internationaux, exposant ainsi l'industrie à la volatilité des prix mondiaux de l'aluminium et aux fluctuations de la demande extérieure.

Le fait que près de 80 % de la production québécoise d'aluminium primaire soit exportée directement indique une sous-utilisation des capacités de transformation locale. Toutefois, l'aluminium est un matériau stratégique dans plusieurs secteurs industriels clés tels que le transport, la construction, l'aéronautique et l'emballage. Une meilleure intégration entre la production d'aluminium primaire et les industries de transformation québécoises permettrait de renforcer la compétitivité du secteur, d'accroître la création d'emplois et de générer davantage de retombées économiques sur le territoire.

3.3 Résultats du processus de mise en forme et de fabrication

Cette étape regroupe l'ensemble des opérations permettant de transformer l'aluminium en produits semi-finis et finis destinés aux différents secteurs industriels. Après la première transformation, l'aluminium sous forme de lingots, billettes, plaques ou bobines ($LBAI = 485 \pm 48,5$ kt/a) est acheminé vers des sites spécialisés où il subit divers procédés mécaniques et thermiques pour lui conférer les formes et propriétés requises. La mise en forme inclut principalement l'extrusion, le laminage, le tréfilage et le moulage, qui permettent d'adapter l'aluminium aux exigences techniques des industries utilisatrices. La fabrication concerne quant à elle l'assemblage des produits semi-finis pour aboutir à des produits finis prêts à être intégrés dans les chaînes de production industrielle.

Les marchandises semi-finies issues de la deuxième transformation sont en grande partie assemblées pour former des produits finis ou d'autres produits semi-finis selon les besoins des industries. Ce processus génère des rebuts industriels de l'ordre de 32 kt/a qui sont recyclés à l'interne et des pertes vers l'environnement (P3) qui peuvent être considérées comme négligeables, ce qui témoigne d'une forte efficacité dans la gestion des matériaux et des procédés industriels.

Cette capacité de rétention du métal dans la région est particulièrement notable, car une grande partie de l'aluminium de la deuxième transformation reste dans le circuit industriel québécois de la troisième transformation de l'aluminium.

Le Québec importe annuellement $113 \pm 5,65$ kt/a de produits finis et semi-finis en aluminium sous diverses formes, destinés à compléter l'offre locale pour répondre aux besoins spécifiques des industries manufacturières. Parmi ces importations, 7 % concernent les tiges, câbles et fils d'aluminium, 12 % les barres et profilés, 3 % les tuyaux et tubes, et 78 % les bandes, plaques, feuilles et papier d'aluminium. Ces proportions reflètent la diversité des usages de l'aluminium dans l'industrie et l'importance des produits laminés dans la chaîne d'approvisionnement.

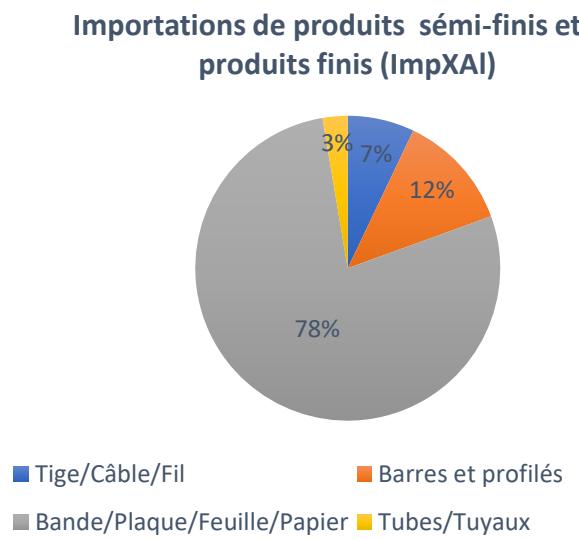


Figure 15 : Importations de produits semi-finis et de produits finis

Source : Statistique Canada

En parallèle, le Québec exporte, selon le modèle, $110 \pm 5,5$ kt/a de produits transformés, dont 84 % de tiges, câbles et fils d'aluminium, 3 % de barres et profilés, 1 % de tuyaux et tubes, et 12 % de bandes, plaques, feuilles et papier d'aluminium. Sur ce volume exporté, 65 kt/a sont destinés aux autres provinces canadiennes, tandis que le reste est expédié à l'international. Cette

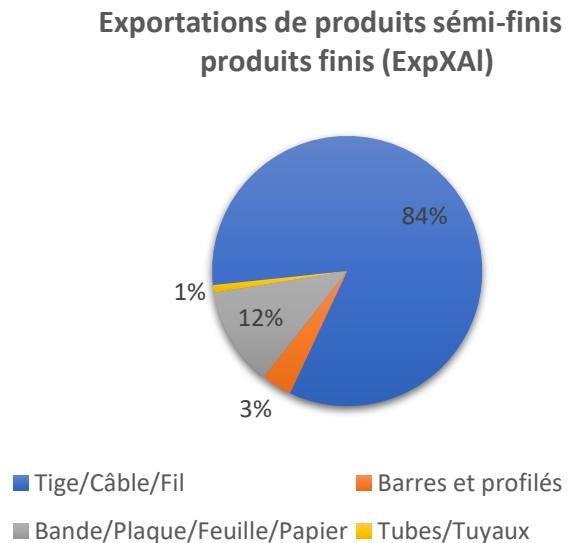


Figure 16 : Exportations de produits semi-finis et produits finis

Source : Statistique Canada

balance commerciale souligne un certain niveau de spécialisation dans certaines catégories de produits, notamment les fils et câbles d'aluminium, qui représentent la majorité des exportations.

L'aluminium issu de la deuxième transformation subit ensuite une troisième transformation auprès des manufacturiers de différents secteurs industriels. Parmi les principaux secteurs consommateurs, le transport absorbe environ 122 kt/a, suivi du secteur de la construction avec 102 kt/a, et du secteur aéronautique avec 83 kt/a. Le reste est utilisé dans d'autres secteurs stratégiques tels que l'industrie automobile, le secteur électrique et d'autres industries manufacturières.

L'industrie de la troisième transformation génère 51 kt/a de rebuts industriels, qui, comme ceux de la deuxième transformation, sont recyclés en interne avec des pertes quasi nulles.

En termes de flux de matériaux, la quantité totale d'aluminium entrant dans le processus de mise en forme et de fabrication est estimée à $596 \pm 59,6$ kt/a, prenant en compte la production locale et les importations. Après transformation, la répartition de l'aluminium dans l'industrie québécoise montre qu'environ 75 % sont destinés à des applications industrielles spécifiques, tandis que 25 % sont réexportés sous forme de produits manufacturés.

Cette structure reflète une intégration industrielle forte, mais également une dépendance partielle aux marchés extérieurs. Un autre aspect important est l'efficacité des procédés de transformation. L'analyse des rendements montre que les pertes directes dans le processus de transformation sont inférieures à 1 %, ce qui indique une forte maîtrise des procédés industriels et un contrôle strict des flux de matières. De plus, les rebuts générés en cours de transformation sont presque intégralement recyclés en interne, réduisant ainsi la demande en aluminium primaire et améliorant l'efficience du système global.

Enfin, l'analyse des tendances sur les cinq dernières années révèle une augmentation progressive de l'utilisation de l'aluminium recyclé dans les industries manufacturières québécoises.

Tableau 11 : Valeurs des flux des processus de mise en forme et de fabrication

Catégorie	Flux	Quantité avant réconciliation (Mt)	Quantité après réconciliation (Mt)	Sources de données
Flux entrants	LBA1	485 ± 5 %	499 ± 4,27 %	AluQuébec (2023a)
	ImpXAl	113 ± 5 %	113 ± 4,96 %	Statistique Canada (2019)
	D2,3TA1	83 ± 10 %	82.6 ± 9,93 %	Groupe AGEKO (2023)
Flux sortants	ExpXAl	110 ± 5 %	109.9 ± 4,97 %	Statistique Canada (2019)
	XAl	421 ± 5 %	419.62 ± 4,59 %	AluQuébec (2023a)
	P3	Négligeable	0	Par calcul STAN

3.4 Résultats du processus d'utilisations

Les produits finis issus de la deuxième et de la troisième transformation sont acheminés vers le marché pour être consommés à des proportions variables selon les secteurs d'activité et les industries. L'aluminium est un matériau clé dans plusieurs domaines stratégiques de l'économie québécoise, où il est utilisé pour ses propriétés de légèreté, de résistance à la corrosion et de conductivité thermique et électrique.

Selon une étude du groupe AGECO, les principaux secteurs consommateurs d'aluminium au Québec sont le transport (25 % de la consommation totale), la construction (21 %) et l'aéronautique (17 %). Ces secteurs, à forte intensité technologique et industrielle, sont les principaux moteurs de la demande pour l'aluminium transformé au Québec. D'autres secteurs comme l'industrie automobile, l'électrification des infrastructures, l'électronique et les biens de consommation contribuent également à la demande, bien que dans des proportions moindres. Cette répartition sectorielle de la consommation revêt une importance stratégique dans une perspective de circularité : en effet, les secteurs du transport et de la construction, de par leur volume de consommation et la durée de vie des produits, génèrent également d'importants flux de rebuts post-consommation.

Le Tableau 12 illustre la répartition de l'utilisation de l'aluminium en Amérique du Nord (États-Unis et Canada) en 2019 et 2018 par secteur industriel, selon les données de l'USGS. En 2019, le secteur du transport se démarque comme le principal consommateur d'aluminium, représentant plus du tiers de la demande totale avec environ 4560 kt. Ce volume inclut la fabrication de divers moyens de transport tels que les automobiles, les aéronefs, les wagons ferroviaires et d'autres véhicules.

Derrière le transport, l'industrie des contenants et emballages occupe la deuxième place avec une consommation d'environ 2220 kt, soit 17,8 % du total. Ce segment regroupe notamment la production de canettes, de barquettes alimentaires et d'autres types d'emballages légers et recyclables.

Tableau 12 : Utilisation finale des produits en aluminium aux États-Unis et au Canada

Industrie	2019		2018	
	Quantité (en milliers de tonnes métriques)	Pourcentage du Total	Quantité (en milliers de tonnes métriques)	Pourcentage du Total
Contenants et emballages	2220	17,8 %	2170	17 %
Bâtiment et construction	1530	12,3 %	1570	12,3 %
Transport	4560	36,5 %	4520	35,4 %
Électricité	879	7 %	880	6,9 %
Biens de consommation durables	833	6,7 %	860	6,8 %
Machines et équipements	818	6,5 %	852	6,7 %
Autres marchés	346	2,8 %	356	2,8 %
Exportations	1300	10,4 %	1550	12,1 %
Total général	12 486	100 %	12 800	100 %

Le secteur du bâtiment et de la construction suit avec une demande estimée à 1530 kt, représentant 12,3 % de la consommation totale.

Vient ensuite le secteur de l'électricité, qui représente environ 879 kt, soit 7 % de la consommation totale.

Le secteur des biens de consommation durables suit avec une demande de 833 kt, soit 6,7 % de la consommation totale.

L'industrie des machines et équipements consomme quant à elle 818 kt, représentant 6,5 % de la demande totale. Ce segment englobe les équipements industriels, les machines-outils et d'autres composants nécessitant un matériau à la fois résistant et facilement façonnable.

Les autres marchés, regroupant des applications plus spécifiques comme l'aérospatiale, la défense et certaines industries de niche, représentent un volume plus modeste de 346 kt, soit 2,8 % de la consommation globale.

Enfin, une part significative de l'aluminium nord-américain est destinée à l'exportation, avec un volume de 1300 kt, correspondant à 10,4 % de l'offre totale. Ces exportations concernent aussi bien des produits semi-finis que des produits finis destinés aux marchés internationaux.

Le stock d'aluminium déterminé par l'équation (10) est de 4 003 kt. Ce stock représente la quantité totale d'aluminium en circulation dans l'économie québécoise, répartie entre les différentes applications industrielles et infrastructures. L'analyse des flux entrants et sortants de ce processus permet d'évaluer la dynamique de consommation et la répartition de l'aluminium dans les secteurs économiques du Québec.

Tableau 13 : Valeur des flux de l'étape d'utilisation

Catégorie	Flux	Quantité avant réconciliation (Mt)	Quantité après réconciliation (Mt)	Sources de données
Flux entrants	RPC	235 ± 10 %	235 ± 10 %	Groupe AGEKO (2023)
	ImpD	3 ± 5 %	3 ± 5 %	Statistique Canada (2019)
Flux sortants	ExpD	145 ± 5 %	145 ± 5 %	Statistique Canada (2019)
	DPCR	20 ± 10 %	19.98 ± 10 %	AluQuébec (2023a)
	Élimination (DxR)	-	73 ± 33,79 %	Par calcul STAN

3.5 Résultats du processus de gestion des déchets :

Le processus de gestion des déchets d'aluminium au Québec s'inscrit dans une dynamique plus large d'économie circulaire et de réduction de l'impact environnemental de l'industrie. Il représente également la dernière étape du cycle de vie de l'aluminium. Bien que l'aluminium soit un matériau recyclable à près de 100 % sans perte de ses propriétés, son cycle de récupération et de réintégration dans la chaîne de production présente encore plusieurs lacunes au Québec. La gestion de ces déchets repose sur deux grands axes : les rebuts industriels générés lors des processus de fabrication et les rebuts post-consommation issus des produits en fin de vie.

L'aluminium mis en circulation dans l'économie québécoise suit divers parcours, dont certains conduisent à la production de déchets. Ces déchets se divisent en plusieurs catégories.

Les rebuts industriels (pré-consommation) sont générés tout au long des étapes de transformation de l'aluminium, notamment lors des processus de première (environ 70 kt), deuxième (environ 32 kt) et troisième (environ 51 kt) transformation. Ces pertes incluent les chutes de production issues des opérations de laminage, d'extrusion et de fonderie, les copeaux et limailles résultant des procédés d'usinage, ainsi que les pièces défectueuses ou hors normes qui ne **répondent pas aux critères de qualité des manufacturiers. Ces rebuts sont généralement bien récupérés, car ils sont directement réintroduits dans le circuit de production sous forme de métal secondaire.**

Les rebuts post-consommation, quant à eux, sont issus de produits en fin de vie contenant de l'aluminium. Contrairement aux rebuts industriels, ces déchets posent plus de défis en matière de collecte, de tri et de traitement. La production de rebuts post-consommation s'élève à 235 kt, dont 68 % sont récupérés pour être recyclés, soit environ 159 kt. Sur cette quantité récupérée pour le recyclage, le Québec en recycle seulement 20 kt.

Ils proviennent principalement des secteurs suivants : le secteur de l'emballage (canettes, contenants alimentaires, feuilles d'aluminium), le secteur des transports (véhicules légers, avions, trains et pièces usagées), le secteur de la construction et de la démolition (fenêtres, portes, structures, câblages électriques) ainsi que des équipements électroniques et industriels (ordinateurs, électroménagers, composants électriques). Ces rebuts nécessitent des filières de tri et de traitement spécifiques avant de pouvoir être réintroduits dans le cycle de production.

Le secteur du transport est l'un des plus performants en matière de recyclage de l'aluminium au Québec. Le taux de récupération de l'aluminium des véhicules automobiles est estimé à 95 % (73 kt) entre 2020 et 2021, un chiffre relativement élevé comparé aux biens durables, dont le taux de récupération est de 33 % selon AGEKO. Les canettes, quant à elles, ont un taux de récupération de 69 %. Toutefois, un problème majeur subsiste, la quasi-totalité des

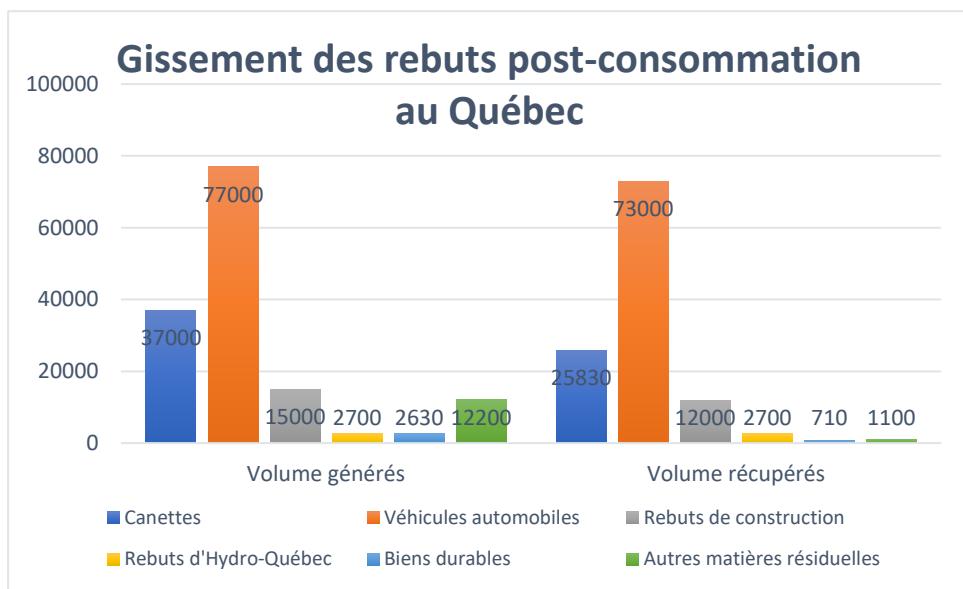


Figure 17 : Gisement des rebuts post-consommation au Québec

Source : Groupe AGEKO

canettes collectées est envoyée aux États-Unis pour être recyclée, en raison du manque d'infrastructures de traitement locales. Cette dépendance au marché américain réduit la capacité du Québec à boucler la boucle du recyclage sur son propre territoire. D'autres rebuts, comme ceux issus de la construction-démolition et d'autres matières résiduelles, sont également représentés à la Figure 17.

En plus des rebuts post-consommation produits au Québec, une petite quantité de rebuts est importée, de l'ordre de 3 kt en 2019.

Bien que l'aluminium présente un fort potentiel de recyclage, plusieurs défis freinent son intégration optimale dans une économie circulaire. Le premier enjeu majeur est la dépendance aux marchés étrangers pour le recyclage. Le Québec ne dispose pas d'installations de recyclage de grande capacité pour l'aluminium post-consommation, ce qui oblige à exporter une partie importante des rebuts, notamment vers les États-Unis. Cette dépendance aux infrastructures étrangères limite la valeur ajoutée que le Québec pourrait tirer du recyclage local et expose l'industrie aux fluctuations du marché international.

Le deuxième défi repose sur le manque d'incitatifs pour le tri et la collecte. Bien que certaines industries aient mis en place des mécanismes de récupération efficaces, le tri des déchets d'aluminium post-consommation reste insuffisant dans plusieurs secteurs. Par exemple, l'absence d'un système efficace de collecte des déchets d'aluminium dans le secteur de la construction réduit considérablement le taux de récupération.

Un autre enjeu important est la complexité des alliages et la contamination des matériaux. L'aluminium utilisé dans divers secteurs contient souvent des alliages spécifiques qui compliquent le recyclage. Certains composants peuvent contenir des éléments indésirables (peintures, vernis, plastiques), nécessitant des procédés de purification avancés avant de pouvoir être réintégrés dans le circuit de production. Compte tenu de tous ces défis, le Québec a exporté en 2019 environ 145 kt de rebuts d'aluminium, dont 59 kt vers les États-Unis.

Afin d'améliorer la gestion des déchets d'aluminium et de renforcer son intégration dans une économie circulaire, plusieurs mesures peuvent être envisagées. Le développement d'infrastructures locales de recyclage est une priorité, avec des investissements nécessaires dans des fonderies et des centres de tri spécialisés pour traiter l'aluminium post-consommation sur

place. Encourager la mise en place d'installations de refonte capables de traiter les alliages complexes serait également bénéfique.

- Le renforcement des politiques de récupération et d'incitation au recyclage est une autre piste d'amélioration. L'extension du système de consigne à d'autres types de contenants en aluminium et l'instauration de réglementations favorisant la récupération des déchets de construction contenant de l'aluminium permettraient d'accroître significativement les taux de recyclage.
- L'amélioration des mécanismes de traçabilité et de gestion des déchets industriels pourrait également optimiser la récupération des matériaux. Mettre en place des outils de suivi pour assurer un meilleur contrôle des flux d'aluminium usagé et sensibiliser les industries aux bonnes pratiques en matière de récupération et de réintégration des rebuts dans la production seraient des leviers pertinents pour renforcer l'économie circulaire.
- Enfin, la valorisation des rebuts issus du secteur des transports et de la construction nécessite des filières spécifiques pour récupérer et revaloriser l'aluminium provenant des véhicules hors d'usage et du bâtiment. Encourager la séparation des matériaux sur les chantiers et structurer la filière de récupération du métal dans l'automobile et l'aviation pourraient considérablement améliorer les performances du recyclage.

CHAPITRE 4

4 DISCUSSION

L'analyse des flux de matières (AFM) réalisée à l'aide de l'outil STAN a fourni un aperçu complet du cycle de vie de l'aluminium au Québec, depuis l'entrée des matières premières jusqu'à la gestion des déchets en fin de vie. Le modèle a révélé plusieurs dynamiques clés qui façonnent l'économie de l'aluminium de la province, en particulier la dépendance écrasante à l'égard de la production primaire, l'intégration limitée de l'aluminium secondaire et la sous-utilisation du potentiel de recyclage post-consommation.

L'un des résultats les plus frappants est le rôle dominant joué par la production d'aluminium primaire. L'importation d'alumine ($3890 \pm 194,5$ kt) et sa transformation en aluminium métal soulignent la forte position de la province en tant que producteur mondial d'aluminium. Cependant, cette prédominance s'accompagne d'une lourde empreinte environnementale, étant donné les besoins énergétiques importants et les émissions de gaz à effet de serre associés à la production primaire même lorsqu'elle est alimentée par l'hydroélectricité. Cette constatation renforce la nécessité de renforcer le rôle de l'aluminium secondaire, qui consomme jusqu'à 95 % d'énergie en moins et émet moins de polluants par tonne produite.

Parallèlement, les flux internes de déchets industriels (70 kt en fabrication primaire, 32 kt en fabrication secondaire et 51 kt en fabrication tertiaire) révèlent un système en boucle fermée relativement efficace au sein des processus industriels du Québec. Ces déchets de pré-consommation sont bien gérés et largement réintégrés dans le cycle de production. Cependant, le contraste est saisissant lorsqu'on le compare aux flux post-consommation : bien que 235 kt de déchets d'aluminium post-consommation soient générés chaque année, seuls 159 kt sont récupérés

et seulement 20 kt sont recyclés localement. Ce déséquilibre met en évidence à la fois les inefficacités structurelles du système de gestion des déchets et l'absence d'infrastructures de recyclage suffisantes dans la province.

En bref, si les pratiques industrielles sont prometteuses en termes de circularité interne, le système dans son ensemble reste fondamentalement linéaire. L'exportation de volumes importants d'aluminium recyclable vers les États-Unis (145 kt en 2019) mine non seulement la capacité du Québec à développer sa propre économie circulaire, mais entraîne également une perte de valeur économique et une vulnérabilité accrue aux marchés extérieurs.

L'un des principaux objectifs de cette recherche était d'évaluer le niveau d'intégration entre les marchés de l'aluminium primaire et secondaire au Québec. Les résultats de l'AMF, combinés aux données sur les infrastructures, les flux commerciaux et les pratiques industrielles, montrent que l'intégration reste relativement faible.

D'un point de vue technique, la récupération et la réutilisation de l'aluminium dans les installations de production indiquent un certain degré d'intégration verticale. Cependant, au niveau du système, la production secondaire reste marginale. Le manque d'installations de refonte spécialisées, capables de traiter des alliages complexes et des déchets contaminés, limite considérablement la capacité d'augmenter la production secondaire. En outre, une grande partie de l'aluminium récupéré sur les véhicules et les biens de consommation en fin de vie est expédiée à l'étranger en raison de l'absence d'infrastructures de tri et de refonte.

Un autre obstacle réside dans l'inadéquation entre les types d'aluminium requis par les fabricants et ceux disponibles à partir de sources recyclées. De nombreuses applications industrielles nécessitent de l'aluminium de haute pureté ou des compositions d'alliage spécifiques,

qu'il est difficile d'obtenir à partir de déchets de post-consommation sans technologies de tri et d'affinage avancées. Cette contrainte technique s'ajoute aux obstacles économiques et logistiques qui réduisent l'attrait de l'aluminium secondaire pour les utilisateurs industriels.

Les facteurs politiques et commerciaux jouent également un rôle. Au Québec, les incitations économiques au recyclage local restent faibles. Il n'existe pas de régime significatif de responsabilité des producteurs ou de programme de consignation étendue qui encouragerait des taux plus élevés de collecte et de tri post-consommation. En revanche, la forte demande mondiale d'aluminium en particulier dans les secteurs de l'automobile, de l'aérospatiale et de la construction fait qu'il est plus rentable pour les entreprises de recyclage d'exporter les matériaux récupérés que de les traiter localement.

Par conséquent, la configuration actuelle du marché renforce une structure duale : un secteur de l'aluminium primaire dominant et intégré à l'échelle mondiale, et un secteur secondaire fragmenté et sous-développé qui opère principalement à la marge. Il est essentiel de remédier à cette fragmentation pour améliorer la circularité des matériaux et réduire l'impact environnemental du secteur.

La comparaison du système québécois de l'aluminium avec des points de repère internationaux offre de précieuses indications. Des pays comme l'Allemagne, la Norvège et le Japon ont fait des progrès considérables dans l'intégration des marchés de l'aluminium primaire et secondaire grâce à une combinaison d'innovations technologiques, de cadres réglementaires et de coordination industrielle.

L'Allemagne, par exemple, qui a largement recours à la conception de produits recyclables, associée à une législation stricte en matière de quotas de recyclage et d'investissements dans les

infrastructures, a atteint des taux de recyclage de l'aluminium post-consommation supérieurs à 80 %. La Norvège, l'un des principaux producteurs d'aluminium alimenté par l'hydroélectricité comme le Québec, a donné la priorité à la production secondaire locale en investissant dans des technologies avancées de tri et de fusion, renforçant ainsi sa circularité sans compromettre la compétitivité industrielle.

Le Japon offre un autre cas instructif : avec des ressources naturelles nationales limitées, il a mis en place un système de recyclage très efficace basé sur la participation des consommateurs, des protocoles de tri stricts et une infrastructure industrielle robuste. Ces modèles montrent que l'alignement des politiques, la coordination industrielle et la préparation technologique sont des piliers essentiels pour boucler la boucle.

En revanche, le système actuel du Québec présente des responsabilités fragmentées, des incitations économiques insuffisantes et des lacunes infrastructurelles. Ces lacunes expliquent pourquoi une province dotée d'une capacité de production primaire aussi importante et d'une énergie propre abondante reste à la traîne en termes de circularité de l'aluminium. La comparaison suggère que l'avenir du Québec ne réside pas dans la reproduction en gros de modèles étrangers, mais dans l'adaptation d'éléments clés à son contexte local, en particulier en termes de politiques, d'infrastructures et de coordination du marché.

Le passage à une économie circulaire dans l'industrie de l'aluminium au Québec présente à la fois des opportunités majeures et des contraintes importantes. Du côté des opportunités, la base industrielle existante, l'expertise en métallurgie et l'accès à une énergie propre représentent des atouts formidables. Si la production secondaire était augmentée, elle pourrait générer de la

valeur économique, réduire les émissions et créer des emplois qualifiés tout en réduisant la dépendance à l’égard des marchés internationaux volatils.

En outre, le discours public fort sur la durabilité et la décarbonisation offre un contexte favorable aux interventions politiques. Des initiatives telles que l’extension du système de consigne à un plus grand nombre de produits en aluminium, l’obligation d’un contenu recyclé minimum dans la fabrication et le soutien à la R&D pour les technologies de séparation des alliages pourraient accélérer rapidement la circularité.

Cependant, plusieurs contraintes doivent être prises en compte. Tout d’abord, le coût en capital de la mise en place d’une infrastructure de recyclage locale est élevé et les bénéfices peuvent ne pas être immédiats. Deuxièmement, le manque de coordination entre les parties prenantes, gouvernements, industries, gestionnaires de déchets et consommateurs entrave le changement systémique. Enfin, l’inertie des pratiques existantes, en particulier dans les secteurs orientés vers l’exportation, peut s’opposer au changement à moins que des incitations économiques fortes ne soient mises en place.

Un autre problème est celui de la disponibilité des données et de la traçabilité. Bien que cette étude offre une image détaillée des flux actuels, un suivi continu et une collecte de données en temps réel sont nécessaires pour guider les décisions futures. La mise en œuvre d’outils numériques et de cadres réglementaires permettant de suivre l’aluminium depuis sa production jusqu’à sa fin de vie pourrait améliorer considérablement la gestion des matériaux.

Les résultats de cette recherche ont des implications importantes pour les acteurs politiques et industriels. Pour les décideurs politiques, la priorité devrait être d’établir une stratégie globale d’économie circulaire pour l’aluminium, avec des objectifs clairs, des mesures réglementaires et

des instruments financiers. Les investissements publics dans les infrastructures, combinés à des instruments fondés sur le marché (tels que les marchés publics écologiques ou la tarification du carbone), pourraient favoriser la transformation du secteur.

Pour les acteurs industriels, en particulier dans le secteur de la production primaire, il est nécessaire de diversifier les opérations et d'investir dans des capacités secondaires. La création de coentreprises avec des entreprises de recyclage, l'investissement dans des technologies de tri spécifiques aux alliages et la participation à des initiatives de conception circulaire peuvent offrir des avantages concurrentiels et réduire les risques à long terme.

Enfin, la société civile et le monde universitaire ont un rôle à jouer dans la sensibilisation, le développement de nouveaux modèles d'entreprise et l'application équitable des principes de l'économie circulaire dans les régions et les communautés.

CONCLUSION

Ce travail de recherche s'inscrit dans une perspective de circularité et environnementale visant à comprendre les dynamiques actuelles de l'industrie québécoise de l'aluminium à travers le prisme de l'économie circulaire. À l'heure où les impératifs de transition énergétique et de décarbonation des systèmes industriels deviennent de plus en plus pressants, le cas du Québec qui se distingue par une production d'aluminium primaire fortement décarbonée grâce à son hydroélectricité mérite une attention particulière. Toutefois, cette performance énergétique remarquable cache une dépendance structurelle au marché de l'aluminium primaire et un développement encore limité de la filière de l'aluminium secondaire. C'est à ce niveau que s'insère la problématique centrale de cette étude : comment renforcer l'intégration des marchés de l'aluminium primaire et secondaire au Québec dans une logique de circularité et de durabilité ? Cette question, à la fois économique et environnementale, vise à éclairer les opportunités et les contraintes liées à une meilleure gestion des flux de matières et à une réorganisation du marché en faveur du recyclage et de la valorisation des rebuts d'aluminium.

Pour répondre à cette problématique, une méthodologie a été adoptée, fondée principalement sur l'analyse de flux de matières (AFM), en s'appuyant sur l'outil de modélisation STAN. Ce choix méthodologique permet de représenter de manière systémique les flux physiques d'aluminium dans le territoire québécois, en distinguant les apports (imports, production), les utilisations (transformation, consommation), les pertes et les opportunités de récupération (recyclage, stock). Le modèle repose sur une combinaison de données primaires et secondaires, issues de bases statistiques publiques, de rapports industriels et de la littérature scientifique. La modélisation s'est concentrée sur l'année 2019.

Les résultats obtenus mettent en lumière plusieurs constats majeurs. D'abord, le système québécois d'aluminium repose très fortement sur l'importation d'alumine et sur l'exportation massive d'aluminium primaire, ce qui reflète une forme de dépendance structurelle aux chaînes d'approvisionnement mondiales. Le recyclage, bien que présent, reste marginal en volume et peu intégré dans les circuits industriels à grande échelle. La production d'aluminium secondaire au Québec est largement sous-développée comparée à d'autres juridictions ayant mis en place des politiques incitatives fortes, comme la Norvège ou l'Allemagne. Par ailleurs, l'AFM révèle des pertes importantes à différentes étapes du cycle de vie du métal, notamment lors de la phase de consommation et de gestion des déchets, où les rebuts d'aluminium ne sont pas toujours acheminés vers les filières de recyclage appropriées. Enfin, l'analyse des flux souligne des goulots d'étranglement logistiques et des asymétries d'informations entre les différents segments de la chaîne de valeur, qui freinent une meilleure intégration des marchés primaire et secondaire.

En termes de contributions, ce mémoire propose plusieurs apports, tant empiriques que théoriques. Sur le plan empirique, il s'agit de l'une des premières tentatives de modélisation systémique du cycle de l'aluminium au Québec à l'aide de l'outil STAN, ce qui fournit un outil d'aide à la décision pour les acteurs publics et privés. Cette cartographie des flux permet d'identifier les leviers d'intervention prioritaires pour optimiser la circularité du métal.

Sur le plan théorique, ce travail renforce la littérature sur l'économie circulaire appliquée à un secteur industriel à forte intensité matérielle, en démontrant comment une approche d'intégration des marchés peut contribuer à la résilience des chaînes de valeur locales. La distinction analytique entre marché primaire et marché secondaire, ainsi que la mise en évidence des conditions de leur articulation, constituent également une contribution à la réflexion sur les systèmes industriels durables.

En somme, cette recherche met en lumière l'importance stratégique d'une transition vers un système de production et de consommation plus circulaire dans l'industrie de l'aluminium québécoise. Si le Québec dispose d'atouts indéniables, notamment une énergie propre, une expertise industrielle reconnue et une base de production solide, des efforts importants restent à déployer pour structurer un marché secondaire performant, capable de réduire la dépendance aux ressources primaires et de générer des gains économiques et environnementaux. Pour y parvenir, une action concertée est nécessaire : politiques publiques incitatives, investissements dans les infrastructures de recyclage, mécanismes de traçabilité des rebuts, incitations à l'écoconception, et sensibilisation des consommateurs. C'est à cette condition que le Québec pourra faire de l'aluminium un véritable vecteur de circularité industrielle, au service d'un modèle économique plus sobre et résilient.

Liste de références

- Abdollahi, J., Emrani, N., Chahkandi, B., Montazeri, A., Aghlmand, R., & Gheibi, M. (2021). Environmental impact assessment of aluminium production using the life cycle assessment tool and multi-criteria analysis.
- ADEME. (2023). Plans de transition sectoriels - Aluminium *ADEME*.
<https://presse.ademe.fr/2023/03/la-de-m-e-publie-le-plan-de-transition-sectoriel-de-l-industrie-de-la-aluminium-en-france.html>
- Allesch, A., & Brunner, P. H. (2017). Material Flow Analysis as a Tool to improve Waste Management Systems: The Case of Austria. *Environmental Science & Technology*, 51(1), 540-551. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04204>
- Allwood, J. M., Cullen, J. M., & Milford, R. L. (2010). Options for Achieving a 50% Cut in Industrial Carbon Emissions by 2050. *Environmental Science & Technology*, 44(6), 1888.
- Almeida, C. M. V. B., & Nogueira, T. G. (2015). Environmental Impacts of Bauxite Mining in Brazil. *Environmental Science & Policy*, 51, 175-182.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.04.010>
- AluQuébec. (2023a). Flux des rebuts aluminium post-industriels et post-consommation au Québec. <https://aluquebec.com/alu-competences/fiches/flux-des-rebut-d-aluminium-post-industriels-et-post-consommation-au-quebec/>
- AluQuébec. (2023b). L'aluminium, au cœur de l'économie circulaire *AluQuébec*.
https://aluquebec.com/media/3j3j5mhg/aluquebec_memoire_economie_circulaire_vdm_2_30420_vf_fin.pdf
- AluQuébec. (2025). <https://aluquebec.com/publications/etudes/>
- Aurez, V., Bourg, D., Stahel, W., & Georgeault, L. (2016). *Économie circulaire : Système économique et finitude des ressources*. De Boeck Supérieur.
<https://books.google.ca/books?id=-i88EAAAQBAJ>
- Baccini, P., & Brunner, P. H. (1991). *Metabolism of the anthroposphere : analysis, evaluation, design*. Mit Press. <https://mitpress.mit.edu/9780262549547/metabolism-of-the-anthroposphere/>

- Barles, S. (2014). L'écologie territoriale et les enjeux de la dématérialisation des sociétés : l'apport de l'analyse des flux de matières. *Développement durable et territoires*. <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.10090>
- Bertram, M., Buxmann, K., & Furrer, P. (2009). Analysis of greenhouse gas emissions related to aluminium transport applications. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(1), 62-69. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0058-0>
- Blomberg, J., & Söderholm, P. (2009). The economics of secondary aluminium supply: An econometric analysis based on European data. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(8), 455-463. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.03.001>
- Bonenfant, R. (2023). Comment concilier décarbonation et compétitivité de l'industrie ? *Responsabilité & Environnement*, (110), 78-81, 104-105, 107.
- Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2004). Practical Handbook of Material Flow Analysis. *Waste Management*, 25(1), 112-113. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.11.002>
- Capuzzi, S., & Timelli, G. (2018). Preparation and Melting of Scrap in Aluminum Recycling: A Review. *Metals*, 8(4), 249. <https://www.mdpi.com/2075-4701/8/4/249>
- Cassayre, L. (2006). Production of aluminium by electrolysis
Production d'aluminium par électrolyse. *La Revue de l'électricité et de l'électronique*, 1, 89-96. <https://hal.science/hal-04269964>
- Cencic, O., & Rechberger, H. (2008). *Material flow analysis with software STAN*. EnviroInfo.
- Compaore, U. L. (2017). *Analyse de flux de matière du cuivre au Québec pour le développement de stratégies de circularité* [Mémoire de maîtrise]. École Polytechnique de Montréal. <https://publications.polymtl.ca/2829/>
- Cullen, J. M., & Allwood, J. M. (2013). Mapping the Global Flow of Aluminum: From Liquid Aluminum to End-Use Goods. *Environmental Science & Technology*, 47(7), 3057.
- Danielle, C. (2023). *Flux des rebuts d'aluminium post-industriels et post-consommation au Québec*. <https://aluquebec.com/alu-competences/fiches/flux-des-rebutsd-aluminium-post-industriels-et-post-consommation-au-quebec/>
- Davis, J. R. (2007). *Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM International.

- EDDEC, I. (2018). *Economie circulaire*. Repéré le 23 décembre 2024 à <https://www.quebeccirculaire.org/static/concept-et-definition.html>
- Ellen MacArthur Foundation (2015). *Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe>
- EuropeanAluminium. (2018). VISION 2050. <https://european-aluminium.eu/blog/vision2050/>
- Eurostat. (2001). Economy-wide material flow accounts and derived indicators A methodological guide. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines/-/ks-34-00-536>
- Evans, K. (2016). The Environmental Impact of Red Mud in Aluminum Production. *Waste Management*, 51(1), 121-129. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.010>
- Evans, K. (2016). The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(4), 316-331. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0060-x>
- GELDRON, A. (2013b). FICHE THECNIQUE ECONOMIE CIRCULAIRE : NOTIONS Version modifiée Octobre 2014 *Direction Economie circulaire et déchets ADEME Angers*
- Green, J. A. S. (2007). *Aluminum recycling and processing for energy conservation and sustainability*. ASM International.
- Groupe AGEKO. (2023). Portrait du recyclage et de la valorisation des rebuts d'aluminium post-consommation.
- Gruber, P. W., & Miller, T. R. (2011). The Carbon Footprint of Primary Aluminum Production in the Global Market. *Journal of Cleaner Production*, 19(3), 276-285. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.10.012>
- Habashi, F. (1969). *Principles of extractive metallurgy*. Gordon and Breach Métallurgie extractive Québec.
- Hirsch, J. r., Skrotzki, B., & Gottstein, G. n. (2008). *Aluminium alloys : their physical and mechanical properties*. Wiley-VCH.

- IEA. (2023). World Energy Outlook 2023. *IEA, Paris.* <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023?language=fr>,
- International Aluminium, I. (2021). *The Global Aluminium Cycle: from Bauxite to Recycling.* International Aluminium Institute.
- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. *IPCC, Geneva, Switzerland,* 35-115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Julie, B., & Maurice, D. (2017). Recyclage. *AluQuébec et Cei Al.* <https://aluquebec.com/media/pxzhao5/ceial-recyclage.pdf>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation & Recycling, 127,* 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Laner, D., Rechberger, H., & Astrup, T. (2014). Systematic Evaluation of Uncertainty in Material Flow Analysis. *Journal of Industrial Ecology, 18*(6), 859-870. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jiec.12143>
- Lauinger, D., Billy, R. G., Vásquez, F., & Müller, D. B. (2021). A general framework for stock dynamics of populations and built and natural environments. *Journal of Industrial Ecology, 25*(5), 1136-1146. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jiec.13117>
- Laurent-Brocq, M., & Lilensten, L. (2023). Récupération et recyclage de l'aluminium - Stratégie. *Techniques de l'Ingénieur.* <https://doi.org/10.51257/a-v2-m2345>
- Liu, G., & Müller, D. B. (2013). Centennial evolution of aluminum in-use stocks on our aluminized planet. *Environmental science & technology, 47*(9), 4882-4888. <https://doi.org/10.1021/es305108p>
- Madgule, M., Sreenivasa, C., & Borgaonkar, A. (2022). Aluminium metal foam production methods, properties and applications- a review. *Materials Today: Proceedings, 77.* <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.287>
- Material Economics (2018). *THE CIRCULAR ECONOMY – A POWERFUL FORCE FOR CLIMATE MITIGATION.* Finnish Innovation Fund Sitra. <https://materialeconomics.com/node/14>

Ministère de l'Économie, d. l. I. e. d. l. É. (2022). *L'avantage carbone québécois : le cas de l'aluminium primaire.*

<https://www.economie.gouv.qc.ca/bibliotheques/secteurs/environnement/empreinte-carbone-des-produits/lavantage-carbone-quebecois-le-cas-de-laluminium-primaire/>

Molin, A. (2015). *Étude expérimentale sur les mécanismes de dissolution de l'alumine.*

<https://constellation.uqac.ca/id/eprint/3725/>. WorldCat.

Nammour, R., Roy, R., & Quebec Min Ind CommerceDir Generale Rech PlanificationEtudes, I. (1977). *L'industrie de l'aluminium au quebec.*

Nappi, C. (2013). Bauxite Mining in Guinea: Past, Present and Future. *The Extractive Industries and Society*, 1(1), 92-103. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2014.01.002>

Patrício, J., Kalmykova, Y., Rosado, L., & Lisovskaja, V. (2015). Uncertainty in material flow analysis indicators at different spatial levels. *Journal of Industrial Ecology*, 19(5), 837-852.

Pineau, P.-O., Gauthier, P., Whitmore, J., Normandin, D., Beaudoin, L. et Beaulieu, J. (2019). *Portrait et pistes de réduction des émissions industrielles de gaz à effet de serre au Québec : Volet 1.* HEC Montréal. https://www.hec.ca/resultat/resultats-recherche-mots-cles.html?q=.+Portrait+et+pistes+de+r%C3%A9duction++des+%C3%A9missions+industrielles+de++gaz+%C3%A0+effet+de+serre+au+Qu%C3%A9bec&client=default_collection#gsc.tab=0&gsc.q=.%20Portrait%20et%20pistes%20de%20r%C3%A9duction%20%20des%20%C3%A9missions%20industrielles%20de%20gaz%20%C3%A0%20effet%20de%20serre%20au%20Qu%C3%A9bec&gsc.page=1

Porter, M. l. E. (1982). *Choix stratégiques et concurrence : techniques d'analyse des secteurs et de la concurrence dans l'industrie.* Economica.

Proulx, M.-U., Brassard, D., & Bouchard-Tremblay, M. (2022). Structuration au Québec de l'industrie mondiale de l'aluminium en mouvement. *Cahiers d'histoire de l'aluminium*, 68(1), 6. <https://doi.org/10.3917/cha.068.0006>

Québec, G. d. (2021). Stratégie québécoise de développement de l'aluminium - 2021-2024. https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/economie/publications-adm/politique/PO_strategie_aluminium_2021-2024_MEI.pdf

Raabe, D., Ponge, D., Uggowitzer, P. J., Roscher, M., Paolantonio, M., Liu, C., Antrekowitsch, H., Kozeschnik, E., Seidmann, D., Gault, B., De Geuser, F., Deschamps, A., Hutchinson,

C., Liu, C., Li, Z., Prangnell, P., Robson, J., Shanthraj, P., Vakili, S., ... Pogatscher, S. (2022). Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys. *Progress in Materials Science*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100947>

Rai, S., & Worrell, E. (2012). Reducing Emissions from Primary Aluminum Production: Technological Options. *Energy Policy*, 41(1), 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.10.050>

Rauch, J. N. (2009). Global mapping of Al, Cu, Fe, and Zn in-use stocks and in-ground resources. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(45), 18920-18925. <https://doi.org/doi:10.1073/pnas.0900658106>

Reck, B. K., & Graedel, T. E. (2012). Challenges in Metal Recycling. *Science*, 337(6095), 690-695. <https://doi.org/doi:10.1126/science.1217501>

Roger, T. (2022). *Modélisation mathématique de la formation d'agrégats et de la dissolution de l'alumine dans le bain d'électrolyse*. <https://constellation.uqac.ca/id/eprint/9332/>. WorldCat.

Schlesinger, M. E. (2007). *Aluminum recycling*. CRC Press/Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/b16192>

Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435-438. <https://doi.org/10.1038/531435a>

Statistique Canada. (2019). L'application Web sur le commerce international de marchandises du Canada. <https://doi.org/https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/71-607-x/71-607-x2021004-fra.htm>

Stigler, G. J. (1951). The Division of Labor is Limited by the Extent of the Market. *Journal of Political Economy*, 59(3), 185-193. <http://www.jstor.org/stable/1826433>

Stuckey, J. A. (1983). *Vertical integration and joint ventures in the aluminium industry*. Harvard University Press.

Svendsen, A. (2022). Elysis Moves Toward Commercialization of Inert Anodes. *Light metal age*, 80(1), 32-33.

Sverdrup, H. U., Ragnarsdottir, K. V., & Koca, D. (2015). Aluminium for the future: Modelling the global production, market supply, demand, price and long term development of the

global reserves. *Resources, Conservation & Recycling*, 103, 139-154.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.06.008>

Tien, H., Heise, S., Seguí, X., Casal, J., Darbra, R. M., Suciu, N., Capri, E., Trevisan, M., Schuhmacher, M., Nadal, M., & Rovira, J. (2013). Tracking Global Flows of E-Waste Additives by Using Substance Flow Analysis, with a Case Study in China. Dans B. Bilitewski, R. M. Darbra, & D. Barceló (Éds.), *Global Risk-Based Management of Chemical Additives II: Risk-Based Assessment and Management Strategies* (pp. 313-348). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/698_2012_196

World Steel Association (2020). *Steel's contribution to a low carbon future and climate resilient societies. worldsteel position paper*