

MÉTAUX ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE AU QUÉBEC

Rapport de l'étape 3.2 : Analyse technico-économique des stratégies de circularité

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

Février 2018

Équipe de travail

Coordination et résultats de la modélisation:

- Kathleen Vaillancourt, ESMIA Consultants, Montréal

Direction :

- Olivier Bahn, professeur, Département des sciences de la décision, HEC Montréal

Recherche et analyse :

- Julien Aoun, stagiaire, École Polytechnique Montréal
- Neilly Ibrahim, stagiaire, École Polytechnique Montréal
- Théo Lacaze, stagiaire, ESMIA Consultants, Montréal

Collaboration :

- Pierre Baptiste, professeur, génie industriel et mathématique, Polytechnique Montréal
- Manuele Margni, professeur, CIRAI, génie industriel et mathématique, Polytechnique Montréal
- Normand Mousseau, professeur, département de physique, Université de Montréal
- Oumarou Savadogo, professeur, génie métallurgique, Polytechnique Montréal
- Richard Simon, professeur, génies civil, géologique et des mines, Polytechnique Montréal

SOMMAIRE

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

Suite à la documentation des meilleures pratiques existantes dans le monde, ainsi qu'un processus de sélection réalisé sur la base de plusieurs critères, 13 stratégies de circularité ont été retenues pour faire l'objet d'une analyse sur les freins et les leviers, d'une analyse technico-économique et d'une analyse du cycle de vie conséquente, et ce, dans un contexte spécifiquement québécois. Ce rapport d'étape présente l'évaluation du potentiel de circularité de ces 13 stratégies d'un point de vue technico-économique dans une perspective de long terme.

Le travail a essentiellement été réalisé en deux phases. Une première phase a permis de documenter et d'intégrer la chaîne de valeur des trois métaux dans le modèle technico-économique NATEM (North American TIMES Energy Model). La chaîne de valeur des trois métaux est présentée à la Section 3. Le modèle ainsi complété permet de mesurer et optimiser les flux de métaux et autres matériaux, ainsi que la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à ces industries¹. La modélisation des activités minières, de première transformation et de transformation métallique existantes au Québec actuellement, et leurs projections dans le temps, représente ainsi le travail préalable à l'analyse proprement dite des stratégies de circularité. La seconde phase a servi à documenter et analyser les stratégies selon : a) une revue de littérature visant à quantifier les paramètres technico-économiques de chacune des stratégies dans le contexte du Québec, sous forme de fiche technique, et b) une modélisation des stratégies les mieux documentées et leurs variantes à l'aide du modèle technico-économique NATEM. L'ensemble de ces informations est présenté à la Section 4.

Au final, le rapport fournit une synthèse du potentiel de circularité relatif à chacune des stratégies en termes de quantité : quelle est la quantité de métaux remise en circulation et combien de tonnes de minerai est-il possible d'éviter d'extraire avec la mise en œuvre de la stratégie? Suivant cette synthèse, un indice de potentiel a été attribué à chacune des stratégies (fort, moyen, faible). Ensuite, le rapport fournit une synthèse de la faisabilité technico-économique relative à chacune des stratégies de circularité: est-ce que la stratégie est économiquement optimale? La discussion entourant la faisabilité technico-économique de circularité réfère ici à la rentabilité (pour une entreprise) ou à l'optimalité économique (pour un sous-ensemble de l'économie québécoise) de mettre en place une stratégie en fonction des connaissances existantes au sujet des technologies ou des options disponibles. L'optimalité économique étant définie comme le coût minimal pour satisfaire des demandes en produits et services, dans un sous-ensemble de l'économie québécoise, selon la rationalité économique des modèles d'optimisation TIMES décrite à l'Annexe A. Le modèle ne mesure cependant pas les impacts de nature macroéconomique comme le produit intérieur brut et l'emploi. Suivant cette synthèse, un potentiel de faisabilité a été attribué à chacune des stratégies (fort, moyen, faible).

¹ Le modèle NATEM est décrit à l'Annexe A, les paramètres technico-économiques associés à chacune des trois filières sont présentés à l'Annexe B et les résultats du profil de la consommation énergétique et des émissions de GES du scénario de référence sont présentés à l'Annexe C.

Le Tableau S-1 contient le résumé global de ces analyses.

Tableau S-1. Sommaire de l'évaluation du potentiel de circularité des stratégies

		Faisabilité technico-économique (coût)		
		Fort	Moyen	Faible
Potentiel de circularité (quantité)	Fort	Stratégie 5 - Fabrication additive * Stratégie 6d - Recyclage de la ferraille Stratégie 8a - Recyclage du lithium des batteries Stratégie 12b - Écoconception des véhicules – Matériaux plus légers	Stratégie 13 - Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées	Stratégie 3 – Mines urbaines Stratégie 4a - Récupération métaux précieux des boues anodiques Stratégie 6b - Recyclage du fer des trains Stratégie 11 - Déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures
	Moyen	Stratégie 4c - Séquestration du CO ₂ à partir de laitiers	Stratégie 2 - Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure Stratégie 7c - Recyclage du cuivre des câbles	Stratégie 10 - Écoconception des poutres en acier
	Faible	Stratégie 1- Développement technologique pour une extraction plus efficace Stratégie 6c - Recyclage du fer des voitures	Stratégie 4b - Récupération d'énergie thermique des laitiers Stratégie 7d - Recyclage du cuivre des circuits-imprimés Stratégie 12a - Écoconception des véhicules – Autopartage	Stratégie 6a - Recyclage du fer des avions Stratégie 7a - Recyclage du cuivre des ordinateurs Stratégie 7b - Recyclage du cuivre des cellulaires Stratégie 8b - Recyclage du lithium du verre Stratégie 9 - Modularités des équipements mécaniques et industriels

* Le potentiel de circularité de cette stratégie reste à être démontré globalement pour le secteur des métaux au Québec. Ici, le potentiel a plutôt été déterminé dans une perspective à long terme en fonction de la croissance anticipée de l'utilisation de la fabrication additive à l'échelle mondiale, du retard accumulé au Québec, et de l'impact probable des nombreuses applications possibles de la fabrication additive sur l'allègement des pièces, les économies de carburants et la réduction des émissions de GES.

Les limites de l'analyse sont nombreuses, un certain nombre de données n'ont pu être obtenues pendant la durée du projet et de nombreuses hypothèses ont été effectuées. Des pistes de recherche correspondantes ont été proposées à la fin du rapport, lesquelles permettraient de mieux évaluer le potentiel de circularité de chacune des stratégies. Malgré toutes ces incertitudes, l'évaluation comparative et qualitative obtenue au final représente une contribution pertinente pour l'identification des stratégies les plus prometteuses pour le Québec.

Finalement, suivant l'amélioration des informations nécessaires à l'évaluation des stratégies, il serait intéressant d'analyser des scénarios, à l'aide du modèle NATEM, visant à minimiser la quantité de minerais extraits et incluant toutes les stratégies. Ces scénarios permettraient ainsi de mieux prioriser les stratégies, que lors de leur analyse individuelle. De plus, une telle approche permettrait de déterminer le potentiel global de circularité pour le Québec, découlant de la mise en œuvre complète de toutes les stratégies pour les trois métaux à l'étude, et plus intéressant encore, de déterminer si ce potentiel permettrait de contrer le besoin d'augmenter l'extraction primaire des métaux pour satisfaire l'augmentation de la demande.

AVERTISSEMENT

Ce rapport présente des résultats qui se veulent avant tout préliminaires. Ils sont issus d'un projet de recherche de nature exploratoire impliquant de nombreux développements méthodologiques. Alors que l'effort a principalement été consacré à l'élaboration d'une méthodologie innovante pour l'analyse économique de stratégie de circularité de métaux, toutes les hypothèses et les données utilisées pour illustrer cette méthode n'ont pas nécessairement fait l'objet d'une validation en bonne et due forme, notamment par les pairs ou par l'industrie. De même, seul un nombre restreint de scénarios a été défini en fonction des données disponibles, et les résultats n'ont pas fait l'objet d'une analyse de sensibilité approfondie.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux	viii
Liste des figures	x
Liste des abréviations et sigles	xi
1 Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 Objectif et approche	1
1.3 Organisation du rapport.....	2
2 Approche méthodologique	3
2.1 Documentation de la chaîne de valeur des trois métaux et scénario de référence	4
2.2 Fiche technico-économique des stratégies de circularité.....	4
2.3 Modélisation technico-économique des stratégies de circularité	4
3 Chaîne de valeur des trois métaux.....	6
3.1 Réserves et ressources	6
3.2 De l'extraction à la transformation métallique.....	7
3.2.1 Fer et acier	8
3.2.1.1 Portrait au Québec.....	8
3.2.1.2 Procédés.....	8
3.2.2 Cuivre.....	10
3.2.2.1 Portrait au Québec.....	11
3.2.2.2 Procédés.....	11
3.2.3 Lithium	13
3.2.3.1 Portrait au Québec.....	14
3.2.3.2 Procédés.....	14
3.3 Demande domestique et internationale	15
4 Stratégies de circularité	17
4.1 Stratégie 1 - Développement technologique pour une extraction plus efficace.....	18
4.1.1 Rappel des freins et leviers.....	18
4.1.2 Fiche technico-économique	20
4.1.3 Modélisation technico-économique.....	22
4.1.4 Analyse et discussion	22
4.2 Stratégie 2- Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure.....	23
4.2.1 Rappel des freins et leviers.....	23
4.2.2 Fiche technico-économique	25
4.2.3 Modélisation technico-économique.....	29
4.2.4 Analyse et discussion	29

4.3	Stratégie 3- Mines urbaines.....	29
4.3.1	Rappel des freins et leviers.....	29
4.3.2	Fiche technico-économique	30
4.3.3	Modélisation technico-économique.....	31
4.3.4	Analyse et discussion.....	31
4.4	Stratégie 4- Recyclage et symbiose industrielle.....	32
4.4.1	Rappel des freins et leviers.....	32
4.4.2	Fiche technico-économique	33
4.4.2.1	Récupération des métaux précieux des boues anodiques.....	33
4.4.2.2	Récupération d'énergie thermique des laitiers.....	37
4.4.2.3	Séquestration du CO ₂ à partir de laitiers.....	39
4.4.3	Modélisation technico-économique.....	42
4.4.3.1	Récupération de métaux précieux des boues anodiques	42
4.4.3.2	Récupération d'énergie thermique des laitiers.....	42
4.4.3.3	Séquestration du CO ₂ à partir de laitiers.....	43
4.4.4	Analyse et discussion.....	43
4.4.4.1	Récupération métaux précieux des boues anodiques	43
4.4.4.2	Récupération d'énergie thermique des laitiers.....	44
4.4.4.3	Séquestration du CO ₂ à partir de laitiers.....	44
4.5	Stratégie 5- Fabrication additive	45
4.5.1	Rappel des freins et leviers.....	45
4.5.2	Fiche technico-économique	46
4.5.3	Modélisation technico-économique.....	49
4.5.4	Analyse et discussion.....	50
4.6	Stratégie 6- Recyclage du fer	52
4.6.1	Rappel des freins et leviers.....	52
4.6.2	Fiche technico-économique	53
4.6.2.1	Recyclage des avions.....	53
4.6.2.2	Recyclage des trains.....	54
4.6.2.3	Ferraille	56
4.6.2.4	Voitures.....	56
4.6.3	Modélisation technico-économique.....	56
4.6.4	Analyse et discussion.....	58
4.7	Stratégie 7- Recyclage du cuivre.....	59
4.7.1	Rappel des freins et leviers.....	59
4.7.2	Fiche technico-économique	59
4.7.2.1	Recyclage des ordinateurs	60
4.7.2.2	Recyclage des cellulaires.....	61
4.7.2.3	Recyclage des câbles	63
4.7.2.4	Recyclage des circuits imprimés.....	63

4.7.3	Modélisation technico-économique.....	64
4.7.4	Analyse et discussion.....	66
4.8	Stratégie 8- Recyclage du lithium	67
4.8.1	Fiche technico-économique	68
4.8.2	Rappel des freins et leviers.....	67
4.8.2.1	Recyclage des batteries lithium-ion	68
4.8.2.2	Recyclage des contenants en verre.....	72
4.8.3	Modélisation technico-économique.....	72
4.8.4	Analyse et discussion.....	74
4.9	Stratégie 9- Modularités des équipements mécaniques et industriels.....	74
4.9.1	Rappel des freins et leviers.....	75
4.9.2	Fiche technico-économique	76
4.9.3	Modélisation technico-économique.....	77
4.9.4	Analyse et discussion.....	77
4.10	Stratégie 10- Écoconception des poutres en acier	77
4.10.1	Rappel des freins et leviers	77
4.10.2	Fiche technico-économique	79
4.10.3	Modélisation technico-économique	79
4.10.4	Analyse et discussion.....	79
4.11	Stratégie 11- Déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures.....	79
4.11.1	Rappel des freins et leviers	79
4.11.2	Fiche technico-économique	81
4.11.3	Modélisation technico-économique	82
4.11.4	Analyse et discussion.....	83
4.12	Stratégie 12- Écoconception des véhicules	83
4.12.1	Rappel des freins et leviers	83
4.12.2	Fiche technico-économique	84
4.12.2.1	Autopartage	84
4.12.2.2	Utilisation de matériaux plus légers.....	89
4.12.3	Modélisation technico-économique	92
4.12.3.1	Autopartage.....	92
4.12.3.2	Utilisation de matériaux plus légers.....	93
4.12.4	Analyse et discussion.....	95
4.13	Stratégie 13- Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées	95
4.13.1	Rappel des freins et leviers	95
4.13.2	Fiche technico-économique	97
4.13.3	Modélisation technico-économique	103
4.13.4	Analyse et discussion.....	106
5	Discussion.....	107
6	Limites et pistes de recherche	118
7	Conclusion	121

Références	123
Annexe A – Description du modèle technico-économique NATEM	141
A.1 La famille de modèles TIMES	141
A.2 La structure du modèle NATEM	142
Annexe B – Paramètres technico-économiques pour la chaîne de valeur des trois métaux	144
B.1 Les paramètres technico-économiques de la filière du fer et de l’acier	144
B.2 Les paramètres technico-économiques de la filière du cuivre	147
B.3 Les paramètres technico-économiques de la filière du lithium	150
Annexe C – Résultats du scénario de référence.....	152
C.1 Consommation d’énergie finale	152
C.2 Source d’énergie	154
C.3 Émissions de GES	155

LISTE DES TABLEAUX

Tableau S-1. Sommaire de l'évaluation du potentiel de circularité des stratégies.....	ii
Tableau 3-1. Réserves et ressources disponibles au Québec pour chaque métal en 2011	6
Tableau 3-2. Demandes utiles annuelles pour les produits semi-finis à l'horizon 2050.....	15
Tableau 3-3. Production et exportations nettes des produits de la chaîne de valeur en 2011	16
Tableau 4-1. Stratégies de circularité sélectionnées pour l'analyse technico-économique	17
Tableau 4-2. Freins et leviers – Développement technologique pour une extraction plus efficace	19
Tableau 4-3. Paramètres – Développement technologique pour une extraction plus efficace ...	21
Tableau 4-4. Freins et leviers – Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure	24
Tableau 4-5. Paramètres - Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure	28
Tableau 4-6. Freins et leviers – Mines urbaines.....	30
Tableau 4-7. Exportations de déchets, débris et alliages de cuivre du Québec.....	31
Tableau 4-8. Freins et leviers – Recyclage et symbiose industrielle	32
Tableau 4-9. Paramètres – Récupération des métaux précieux des boues anodiques	35
Tableau 4-10. Paramètres – Récupération d'énergie thermique des laitiers	38
Tableau 4-11. Paramètres – Séquestration du CO ₂ à partir des laitiers.....	41
Tableau 4-12. Freins et leviers – Fabrication additive.....	46
Tableau 4-13. Paramètres – Fabrication additive dans l'industrie aéronautique américaine	48
Tableau 4-14. Freins et leviers – Recyclage du fer	53
Tableau 4-15. Paramètres – Recyclage des avions.....	54
Tableau 4-16. Paramètres – Recyclage des trains.....	55
Tableau 4-17. Paramètres – Recyclage de la ferraille	56
Tableau 4-18. Paramètres – Recyclage des ordinateurs	60
Tableau 4-19. Paramètres – Recyclage des cellulaires.....	62
Tableau 4-20. Paramètres – Recyclage des câbles.....	63
Tableau 4-21. Paramètres – Recyclage des circuits imprimés	64
Tableau 4-22. Freins et leviers – Recyclage du lithium	68
Tableau 4-23. Paramètres – Recyclage des batteries lithium-ion.....	71
Tableau 4-24. Paramètres – Recyclage des contenants de verre	72
Tableau 4-25. Freins et leviers – Modularité des équipements mécaniques et industriels	76
Tableau 4-26. Freins et leviers – Écoconception des poutres en acier	78
Tableau 4-27. Freins et leviers – Déconstruction sélective des bâtiments.....	80
Tableau 4-28. Taux de réutilisation des matériaux d'un projet de déconstruction sélective.....	82
Tableau 4-29. Analyse économique d'un projet de déconstruction sélective	82
Tableau 4-30. Freins et leviers – Écoconception des véhicules	84
Tableau 4-31. Paramètres – Écoconception des véhicules – Autopartage	87
Tableau 4-32. Nombre de voitures partagées.....	89
Tableau 4-33. Nombre de voitures non achetées.....	89
Tableau 4-34. Paramètres – Écoconception des véhicules – Utilisation de matériaux plus légers	91
Tableau 4-35. Évolution de la quantité de métaux dans les véhicules – Autopartage	93
Tableau 4-36. Évolution de la quantité de métaux dans les véhicules – d'utilisation de matériaux plus légers et autopartage	95

Tableau 4-37. Freins et leviers – Stockage d’énergie avec des batteries lithium-ion usagées	96
Tableau 4-38. Paramètres – Stockage d’énergie avec des batteries lithium-ion usagées	100
Tableau 4-39. Paramètres – Capacité moyenne des batteries lithium-ion au Québec	102
Tableau 4-40. Paramètres – Coûts des systèmes de stockage avec batteries	103
Tableau 4-41. Quantité de lithium recyclé utilisé pour le stockage d’énergie en 2050.....	106
Tableau 5-1. Évaluation du potentiel de circularité des stratégies relativement aux métaux remis en circulation, ainsi que la quantité de métaux potentiellement non extraits	108
Tableau 5-2. Évaluation de la faisabilité technico-économique de circularité des stratégies	113
Tableau 5-3. Sommaire concernant le potentiel de circularité des stratégies et la faisabilité technico-économique	117
Tableau B-1. Hypothèses de coûts utilisées pour la production du fer et de l'acier.....	145
Tableau B-2. Paramètres des technologies impliquées dans la production du fer et de l'acier .	146
Tableau B-3. Hypothèses de coûts utilisées pour la production du cuivre	148
Tableau B-4. Paramètres des technologies impliquées dans la production du cuivre en 2011..	149
Tableau B-5. Quantité de matière nécessaire pour produire une unité de cathode de cuivre ..	150
Tableau B-6. Hypothèses de coûts utilisées pour la production du lithium	150
Tableau B-7. Paramètres des technologies impliquées dans la production du fer et de l'acier .	151

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1. Approche générale	3
Figure 3-1. La représentation schématique des parcours de production de fer et d'acier	9
Figure 3-2. La représentation schématique des parcours de production du cuivre	12
Figure 3-3. La représentation schématique des parcours de production du lithium	15
Figure 4-1. Technologies utilisées pour l'extraction de fer	22
Figure 4-2. Électricité produite à partir de laitier et consommée dans le secteur industriel	42
Figure 4-3. Source de l'électricité consommée dans le secteur industriel	43
Figure 4-4. Technologies utilisées pour satisfaire la demande de transport aérien des passagers	50
Figure 4-5. Utilisation de matières premières pour la production d'acier recyclé	57
Figure 4-6. Utilisation de matières premières, production d'acier et autres métaux recyclés et minerais non extraits	58
Figure 4-7. Source de matières premières pour la production d'acier	58
Figure 4-8. Utilisation de matières premières pour la production de cuivre recyclé	65
Figure 4-9. Utilisation de matières premières, production de cuivre et autres métaux recyclés et minerais non extraits	65
Figure 4-10. Source de matières premières pour la production des cathodes de cuivre	66
Figure 4-11. Utilisation de matières premières pour la production de lithium recyclé	73
Figure 4-12. Utilisation de matières premières, production de lithium et autres métaux recyclés et minerais non extraits	73
Figure 4-13. Source de matières premières pour la production du lithium	74
Figure 4-14. Nombre de véhicules dans la stratégie d'autopartage	93
Figure 4-15. Nombre de véhicules dans la stratégie d'utilisation de matériaux plus légers et d'autopartage	94
Figure 4-16. Consommation d'énergie dans la stratégie d'utilisation de matériaux plus légers et d'autopartage	94
Figure 4-17. Stockage d'électricité solaire décentralisée par année selon le type de système..	104
Figure 4-18. Stockage d'électricité solaire décentralisée par période en 2050 selon le type de système	105
Figure 4-19. Pénétration d'électricité solaire décentralisée dans les secteurs résidentiel et commercial	105
Figure A-1. Principaux intrants et extrants des modèles TIMES	142
Figure A-2. Représentation simplifiée du système énergétique de référence	143

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

Ag	Argent
Al	Aluminium
Au	Or
an	Année
ARPE	Association pour le recyclage des produits électroniques
°C	Degré Celsius
¢/kWh	Cent par kilowatt-heure
CAFE	Corporate Average Fuel Economy
CanESS	Canadian Energy System Simulator
CTTÉI	Centre de transfert technologique en écologie industrielle
CH ₄	Méthane
Co	Cobalt
CO ₂	Dioxyde de carbone
CO ₂ -éq	Dioxyde de carbone équivalent
Cu	Cuivre
Δ	Delta
D3E	Déchet d'équipement électrique et électronique
EFOM	Energy Flow Optimization Model
ELSA	Energy Local Storage Advanced system
Fe	Fer
GES	Gaz à effet de serre
G\$	Milliard de dollars (\$ CAD 2011)
GJ	Gigajoule d'énergie
GJ/t	Gigajoule d'énergie par tonne
GWh	Gigawatt-heure
h	Heure
h/an	Heure par année
k	Millier
kg	Kilogramme
Kg/kWh	Kilogramme par kilowatt-heure
km	Kilomètre
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt-heure
kWh/tCO ₂	Kilowatt-heure par tonne de dioxyde de carbone
kt	Kilotonne métrique
kt/an	Kilotonne métrique par an
ktCO ₂	Kilotonne de dioxyde de carbone
ktCO ₂ /an	Kilotonne de dioxyde de carbone par année
ktCO ₂ /t	Kilotonne de dioxyde de carbone par tonne
ktCO ₂ -éq	Kilotonne de dioxyde de carbone équivalent
LCE	Équivalent de carbonate de lithium
Li	Lithium
Litre/t	Litre par tonne métrique
m ²	Mètre carré
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec
MPKkm	Million de passagers-kilomètres

M\$	Million de dollars (\$ CAD 2011)
M\$/t	Million de dollars (\$ CAD 2011) par tonne
MJ	Mégajoule
MJ/t	Mégajoule par tonne
mmBTU	Million de BTU (British Thermal Units)
Mt	Million de tonnes métriques
MtCO ₂	Million de tonnes de dioxyde de carbone
MW	Mégawatt
MWh	Mégawatt-heure
MWh/an	Mégawatt-heure par année
MWh/t	Mégawatt-heure par tonne
n	Nombre (unité)
NATEM	North American TIMES Energy Model
N ₂ O	Oxyde nitreux
Ni	Nickel
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
oz	onze
Pd	Palladium
PIB	Produit intérieur brut
PJ	Pétajoule d'énergie
PJ/an	Pétajoule d'énergie par année
PJ/t	Pétajoule d'énergie par tonne
PRP	Potentiel de réchauffement planétaire
Pt	Platine
\$	Dollars (\$ CAD 2011)
\$/GJ	Dollars (\$ CAD 2011) par gigajoule d'énergie
\$/h	Dollars (\$ CAD 2011) par heure
\$/kW	Dollars (\$ CAD 2011) par kilowatt
\$/kWh	Dollars (\$ CAD 2011) par kilowatt-heure
\$/MWh	Dollars (\$ CAD 2011) par mégawatt-heure
\$/oz	Dollars (\$ CAD 2011) par onze
\$/t	Dollars (\$ CAD 2011) par tonne métrique
\$/tCO ₂	Dollars (\$ CAD 2011) par tonne de dioxyde de carbone
\$/tCO ₂ -eq	Dollars (\$ CAD 2011) par tonne de dioxyde de carbone équivalent
Se	Sélénium
t	Tonne métrique
t/an	Tonne métrique par an
t/h	Tonne métrique par heure
tCO ₂	Tonne de dioxyde de carbone
tCO ₂ -éq	Tonne de dioxyde de carbone équivalent
TIMES	The Integrated MARKAL-EFOM System
Te	Tellure
Ti	Titane
TJ	Térajoule d'énergie
TWh	Térawattheure
VE	Véhicule tout-électrique
VHR	Véhicule hybride rechargeable

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) du Québec a mandaté l'Institut EDDEC pour réaliser un projet de recherche en économie circulaire visant à évaluer le potentiel de circularité de trois métaux stratégiques pour le Québec, soit le fer, le cuivre et le lithium, de même qu'à documenter les impacts de l'industrie minière québécoise sur l'environnement. La sélection des métaux a été faite parmi une liste de douze métaux et matériaux exploités ou potentiellement exploitables au Québec à l'aide d'une grille de sélection de neuf critères (EDDEC, 2016). Le choix final a été fait de manière à obtenir un représentant dans chacune des trois catégories de métaux suivantes, selon les enjeux qui se rapportent au concept d'économie circulaire: ceux présentant un enjeu de production important au Québec (cuivre), ceux ayant une filière complète au Québec (fer) et ceux présentant un potentiel de développement de la filière au Québec (lithium).

Concernant les stratégies de circularité des métaux, une première phase de diagnostic a permis de réaliser une synthèse générale des meilleures pratiques existantes au Québec et ailleurs dans le monde (Gervais et al., 2016; Mousseau et al., 2016). Au total, 41 stratégies ont été identifiées pour chacune des étapes du cycle de vie des métaux, depuis l'extraction du minerai jusqu'à la fin de vie des produits de consommation. Lors d'une seconde phase, un nombre plus restreint de 13 stratégies ont été retenues pour faire l'objet d'une analyse sur les freins et les leviers, et ce, dans un contexte plus spécifiquement québécois (voir Gervais et al., 2017 pour plus de détails concernant la sélection des stratégies). La sélection a été réalisée sur la base des critères suivants : potentiel de mise en œuvre au Québec, faisabilité technique et opérationnelle, pertinence générale, quantité de métal ciblée, préservation de la valeur de la ressource, retombées environnementales, économiques et sociales potentielles. Ces 13 stratégies doivent faire l'objet d'une analyse technico-économique d'une part et d'une analyse du cycle de vie conséquente d'autre part.

1.2 Objectif et approche

L'objectif de ce présent rapport d'étape consiste à documenter et évaluer ces 13 stratégies de circularité d'un point de vue technico-économique, et ce, dans une perspective de long terme. Le travail a essentiellement été réalisé en deux phases.

Phase 1 - Documentation de la chaîne de valeur des trois métaux et modélisation du scénario de référence. L'identification des stratégies de circularité les plus prometteuses nécessite au préalable la documentation de la chaîne de valeur de chacun des trois métaux visés et leur intégration dans le modèle technico-économique NATEM (North American TIMES Energy Model) pour établir le scénario de référence. NATEM appartient à la famille des modèles TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) soutenus par un programme de l'Agence internationale de l'énergie (Loulou et al., 2016) et utilisés dans 70 pays. Il s'agit donc d'une méthodologie reconnue. Ce sont plus précisément des modèles d'optimisation permettant de mesurer les flux de plusieurs types de produits comme les différentes formes d'énergies, mais également les matériaux, les métaux, les polluants, etc. pour satisfaire des demandes utiles à long terme.

La chaîne de valeur des trois métaux doit donc être documentée avec le même niveau de détails et dans le même format que pour les autres secteurs déjà inclus dans le modèle. Une fois complété, le modèle permet de mesurer et optimiser les flux de métaux et autres matériaux, ainsi

que la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à ces industries. La modélisation des activités minières, de première transformation et de transformation métallique existantes au Québec actuellement, et leurs projections dans le temps, représente ainsi un effort de travail important, préalablement à l'analyse des stratégies proprement dite.

Phase 2 - Documentation et modélisation des stratégies de circularité. L'analyse des stratégies de circularité a essentiellement été conduite suivant : a) une revue de littérature visant à documenter et à quantifier les paramètres technico-économiques de chacune des stratégies dans le contexte du Québec, sous forme de fiche technique, et b) une modélisation des huit stratégies les mieux documentées et leurs variantes, pour un total de 16 sous-stratégies, à l'aide du modèle technico-économique NATEM. Le principal avantage lié à l'utilisation d'un tel modèle concerne la notion d'intégration notamment : du système modélisé, où de nombreuses technologies sont en concurrence à toutes les étapes de la chaîne, depuis l'extraction des ressources primaires jusqu'à leur utilisation dans les divers secteurs de consommation finale, et géographiquement, puisque le Québec est en relation avec le reste du Canada et du monde.

Cependant, toutes les stratégies n'ont pas été évaluées à l'aide du modèle d'optimisation étant donné le manque de données et la quantité importante d'hypothèses qu'il est nécessaire de poser pour arriver à évaluer le potentiel de circularité des métaux dans le contexte spécifique du Québec.

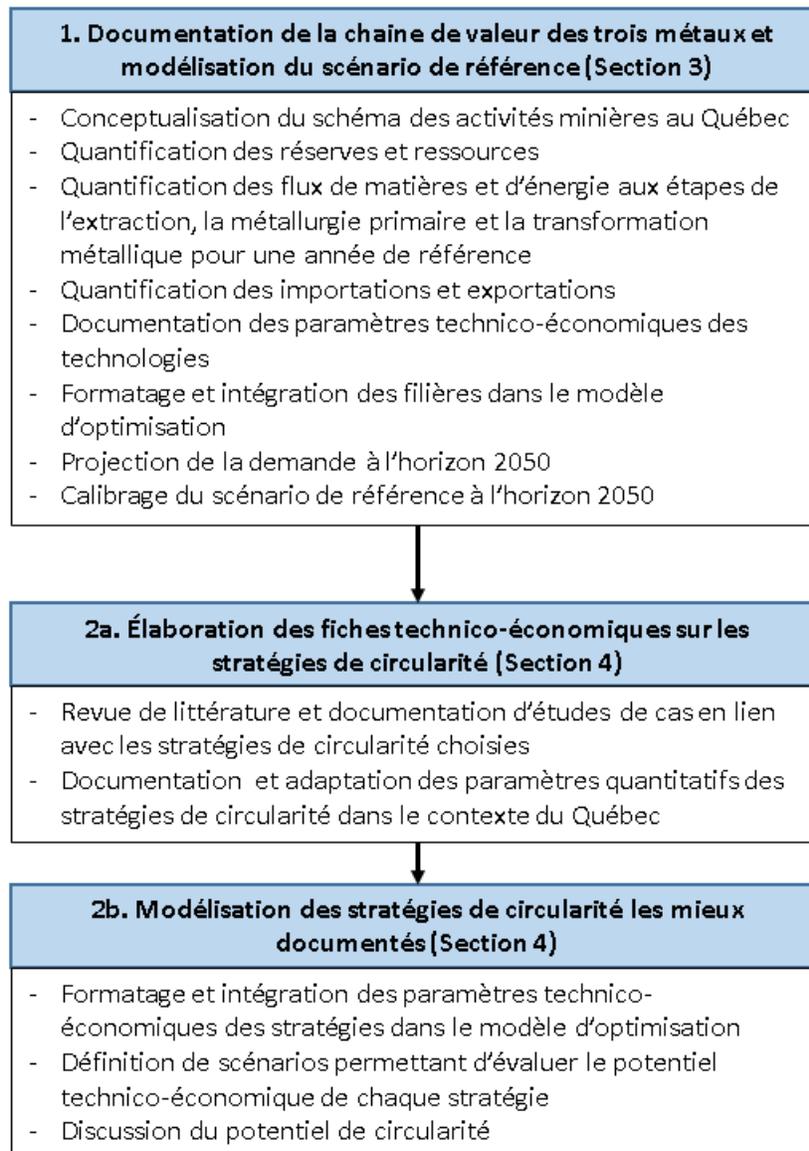
1.3 Organisation du rapport

La Section 2 contient une brève description de l'approche méthodologique générale utilisée, alors que les détails concernant la structure et le contenu du modèle NATEM sont présentés à l'Annexe A. Une présentation plus détaillée des hypothèses utilisées pour la modélisation de la filière des trois métaux est effectuée à la Section 3 et les détails technico-économiques sont fournis à l'Annexe B. La Section 4 effectue un rappel des stratégies et sous-stratégies de circularité dont les paramètres technico-économiques ont été documentés à partir de la littérature et, lorsqu'applicable, qui ont fait l'objet d'une modélisation technico-économique dans le modèle NATEM. Cette section contient ensuite l'ensemble des détails relatifs à chaque stratégie, soit les principaux freins et leviers identifiés préalablement, les données issues de la revue de la littérature pour la modélisation technico-économique, la définition des scénarios modélisés dans NATEM et les résultats correspondants (s'il y a lieu), et une brève discussion sur le potentiel de circularité et la faisabilité technico-économique. La Section 5 contient la synthèse de l'évaluation du potentiel de circularité et de la faisabilité technique et économique, ainsi qu'une évaluation globale de leur pertinence quant à la circularité des trois métaux. La Section 6 permet de mettre en évidence les principales limites de l'analyse et de suggérer les pistes de recherche visant à pallier ces limites, avant de conclure à la section 7.

2 APPROCHE METHODOLOGIQUE

L'approche générale utilisée pour documenter et évaluer les 13 stratégies de circularité d'un point de vue technico-économique dans une perspective de long terme est illustrée à la Figure 2-1.

Figure 2-1. Approche générale



La base de données du modèle NATEM comporte un très grand nombre de filières énergétiques et de technologies. La Section 3 sert à documenter plus spécifiquement les hypothèses de modélisation concernant les trois métaux visés par le projet aux étapes d'extraction, de première transformation et de transformation métallique. Alors que la Section 4 présente en détail les informations recueillies pour chaque stratégie, et les résultats de l'analyse et de la modélisation technico-économique (lors qu'il y a lieu), la Section 5 contient la synthèse des perspectives quant aux stratégies les plus prometteuses.

2.1 Documentation de la chaîne de valeur des trois métaux et scénario de référence

L'analyse technico-économique des 13 stratégies de circularité, dans une perspective de long terme, nécessite d'abord la documentation de la chaîne de valeur de chacun des trois métaux visés et leur intégration dans le modèle d'optimisation NATEM (détails à l'Annexe A). Une importante partie du projet a donc été consacrée à la recherche d'information pour conceptualiser le schéma des activités minières en lien avec le reste du système énergétique, documenter les paramètres techniques et économiques des procédés (détails à l'Annexe B) et quantifier les flux existants d'énergies et de matières pour chaque métal. Toutes ces données ont ensuite été formatées et intégrées dans le modèle d'optimisation; le modèle a finalement été calibré avec ces nouvelles filières. Une fois complété, le modèle permet de faire des simulations pour mesurer et optimiser les flux de métaux et autres matériaux, ainsi que la consommation énergétique et les émissions de GES liées à ces industries (détails à l'Annexe C).

2.2 Fiche technico-économique des stratégies de circularité

Une revue de littérature a permis de documenter chacune des stratégies et leurs paramètres technico-économiques dans le contexte du Québec plus spécifiquement. Un grand nombre de sources ont été utilisées à cet effet: publications scientifiques, rapports annuels de compagnies, rapports techniques, articles de journaux, sites Web, etc. Une approche spécifique a été définie pour chacune des stratégies en vue d'établir le lien entre leur mise en œuvre et l'évaluation de leurs impacts potentiels sur la circularité des métaux.

En effet, la nature très distincte de chaque des stratégies a nécessité la mise en place d'une approche différente et propre à chacune. Dans certains cas, l'analyse d'une stratégie consistait plus simplement à documenter les paramètres technico-économiques d'une nouvelle technologie, comme le système de camions autonomes (Stratégie 1). D'autres stratégies ont nécessité un raisonnement plus complexe faisant intervenir des variables évoluant dans le temps et de nombreuses hypothèses. Cela est notamment le cas de la stratégie portant sur le recyclage des batteries au lithium pour le stockage d'énergie (Stratégie 13), dont la modélisation impliquait de faire des hypothèses sur l'évolution du nombre de véhicules électriques au Québec, la durée de vie et le type de batteries, le taux de recyclage, etc. Lorsque les données étaient disponibles, ou qu'il était possible de faire des hypothèses réalistes, des scénarios ont ainsi pu être construits spécifiquement pour le Québec. Dans d'autres cas, plus difficiles à documenter pour le Québec, l'analyse a été réalisée à partir de cas d'applications réels provenant d'autres juridictions, comme le cas de la fabrication additive dans le secteur aéronautique (Stratégie 5).

Enfin, c'est l'ensemble des éléments d'information recueillis qui a déterminé le nombre de stratégies et de sous-stratégies correspondantes à analyser et à modéliser.

2.3 Modélisation technico-économique des stratégies de circularité

Finalement, les stratégies les mieux documentées pour leur application dans le contexte du Québec ont été intégrées dans le modèle NATEM. NATEM est une application des modèles d'optimisation TIMES pour le Canada. NATEM-Canada permet de représenter de manière très détaillée le système énergétique intégré des 13 provinces et territoires du Canada, leurs émissions de GES, ainsi que les flux d'énergie interprovinciaux et internationaux. Dans le cadre de ce projet, les analyses portent essentiellement sur le Québec, mais de manière dynamique dans un contexte canadien (et non de manière isolée). Suite à la réalisation des étapes précédentes, la base de données du modèle inclut également la chaîne de valeurs des trois métaux avec le même niveau

de détails que pour le système énergétique, ainsi que les paramètres technico-économiques relatifs aux stratégies de circularité sélectionnées pour la modélisation. Les détails relatifs aux modèles TIMES en général, et au modèle NATEM en particulier, sont présentés à l'Annexe A.

Les stratégies modélisées ont chacune été comparées au même scénario de référence (Annexe C), soit un scénario représentant le cours normal des affaires, afin de bien discerner les impacts d'implanter telle ou telle stratégie sur l'industrie minière, ainsi que l'ensemble du système énergétique. Dans certains cas, des scénarios supplémentaires ont aussi été définis afin de mieux évaluer l'influence de facteurs spécifiques sur l'optimalité technico-économique d'une stratégie, telle qu'une politique climatique. En effet, certaines stratégies sont davantage pertinentes dans un contexte de réduction des émissions de GES. Dans ce contexte, la modélisation de ces scénarios supplémentaires a apporté des éléments de réponses pertinents.

3 CHAÎNE DE VALEUR DES TROIS MÉTAUX

La chaîne de valeur des trois métaux s'intègre plus particulièrement dans le secteur industriel du modèle NATEM. Chacune des trois filières représente donc un sous-secteur industriel distinct, couvrant les étapes allant de l'extraction du minerai jusqu'à la transformation métallique, et dirigée par une demande de produits semi-finis. NATEM distingue en effet les secteurs industriels à plus forte intensité énergétique. Quant à la fabrication et l'assemblage des produits finis et leur utilisation, la consommation énergétique associée à ces étapes est incluse dans d'autres secteurs : par exemple, le secteur « autre manufacturier » pour la fabrication et l'assemblage de véhicules et le secteur des transports pour l'utilisation des véhicules.

Puisqu'une importante partie du projet a été consacrée à la documentation et à la modélisation de la chaîne de valeur de chacun des trois métaux, les aboutissements de cette étape méthodologique sont présentés brièvement ci-dessous (et le détail des paramètres technico-économiques à l'Annexe B).

La chaîne de valeur des trois métaux a été déterminée de la manière la plus exacte possible à l'aide des informations disponibles. À noter cependant que toutes les hypothèses et les données utilisées n'ont pas nécessairement fait l'objet d'une validation en bonne et due forme par les paires ou par l'industrie.

3.1 Réserves et ressources

Le Tableau 3-1 présente les réserves et ressources du Québec pour chaque métal en 2011. La distinction entre réserves prouvées et probables et entre ressources mesurées, indiquées et présumées, est définie selon la norme canadienne 43-101 (CIM, 2014). Les réserves représentent la partie économiquement exploitable du minerai actuellement, et évoluent dans le temps, alors que les ressources représentent une portion plus incertaine. Une partie des ressources est susceptible d'être convertie en réserves économiquement exploitables éventuellement (Drake, 2017). Tous les types de réserves et ressources sont inclus dans la base de données du modèle, sans égard au potentiel économique, lequel sera plutôt déterminé par le modèle lui-même en fonction de la demande.

Tableau 3-1. Réserves et ressources disponibles au Québec pour chaque métal en 2011

Métal	Fer (Minerai avec 30-35 % Fe)	Ilménite (Minerai avec 83-85 % TiO ₂)	Ilménite (Minerai avec 7-8 % TiO ₂)	Cuivre (Minerai avec 0.25-2.00 % Cu)	Lithium (Minerai avec 0.90-1.54 % Li)
Unité	Mt	Mt	Mt	Mt	Mt
Réserves prouvées	7 937,5		356,5	80,8	21,6
Réserves probables	4 692,9	135,0	48,7	26,3	22,8
Total réserves	12 630,3	135,0	405,2	107,1	44,4
Ressources mesurées	18 291,0	11,1	380,7	10,6	22,3
Ressources indiquées	9 944,3		84,9	25,6	72,9
Ressources présumées	13 494,5		84,5	28,4	29,4
Total ressources	41 729,7	11,1	550,1	64,6	124,7

Source: MERN (2012 ; 2016a).

Les estimations ont été obtenues par agrégation de données pour les mines actives, en développement et à l'étape de mise en valeur, où certaines données sont manquantes ou confidentielles (MERN, 2012 ; 2016a). Les estimations utilisées dans le modèle sont donc conservatrices. Chaque catégorie de réserves et ressources est exclusive et n'inclut pas les catégories supérieures (les données de ressources n'incluent pas les données de réserves). Les estimations sont en millions de tonnes (Mt).

Les réserves et ressources de fer sont abondantes au Québec. Les estimations incluent notamment les mines suivantes: Mont Wright, Fire Lake, ainsi que les projets miniers suivants: Lac Bloom, Blackrock, Fire Lake North, Full Moon-Sunny Lake, Hopes Advance, Lac Otelnuk, Lamêlée, Taconite-Kémag, DSO. Les réserves du Canada représentent 1,2 % des réserves mondiales (Cunningham et al., 2005); elles sont concentrées au Québec et au Labrador (MAC, 2015). Les réserves et ressources d'ilménite incluent celles des mines suivantes: Lac Tio (plus forte concentration) et BlackRock (plus faible concentration).

Le Québec a déjà compté plusieurs mines de cuivre qui sont aujourd'hui épuisées. Ce métal est maintenant un sous-produit de mines d'or, d'argent, de nickel, de cobalt et/ou de zinc: Raglan, LaRonde, Bracemac-McLeod, Langlois, Akasaba Ouest. Ce type de mines est présent dans plusieurs provinces au Canada. Les estimations obtenues sont compatibles avec celle de Drake (2017) et ICSG (2015). Les réserves du Québec représentent 2,5 % des réserves du Canada et les réserves du Canada représentent 1,6 % des réserves mondiales (Cunningham et al., 2005).

Quant aux mines de lithium, les projets sont: Québec Lithium, Rose Tantal-Lithium, Whabouchi.

3.2 De l'extraction à la transformation métallique

La modélisation de la chaîne de valeur des trois métaux nécessite une compréhension approfondie des phases d'extraction et de concentration du minerai, ainsi que de la métallurgie primaire et de la transformation métallique. Cette section présente les trois filières telles qu'elles ont été modélisées dans NATEM. D'une part, il est nécessaire de connaître la situation québécoise actuelle, cela comprend entre autres : le recensement des procédés utilisés au Québec, la connaissance des quantités de matière qui entrent et sortent à chaque étape, pour les fins de consommation domestique, ainsi que les flux d'importations et d'exportations. D'autre part, il est également nécessaire de documenter les différentes caractéristiques techniques et économiques des procédés existants, ainsi que des procédés susceptibles d'être utilisés dans le futur afin de répondre à une demande croissante pour les métaux et/ou de remplacer les procédés existants arrivant à la fin de leur vie utile.

Dans tout exercice de modélisation, un choix s'impose quant au niveau de détails adéquats pour atteindre l'objectif visé par l'étude. Le niveau de détails des filières modélisées dépend également de la disponibilité des données. Ainsi, les regroupements de procédés et les flux de matières autres que l'énergie sont considérés lorsque les produits en question comportent une valeur économique importante pouvant avoir un impact sur la solution optimale ou lorsqu'elles sont impliquées dans l'une ou l'autre des stratégies de circularité à évaluer. Cette section explique sommairement comment chacune des trois filières est modélisée, avec le niveau de détail et les valeurs correspondantes.

3.2.1 Fer et acier

Le fer est utilisé en grande majorité pour produire de l'acier, le reste étant destiné à des fins non métallurgiques, dont l'électronique. Pour cette raison, la modélisation couvre aussi bien la production d'acier que de fer.

3.2.1.1 Portrait au Québec

L'exploitation du fer au Québec reste confinée entre quelques gros joueurs, notamment Arcelor Mittal et Rio Tinto Fer et Titane. Cependant, les deux compagnies n'extraient pas et ne commercialisent pas le même type de produit. Arcelor Mittal possède deux mines au Québec : Mont Wright et Fire Lake sur la Côte-Nord près du Labrador. La production de concentré de fer était d'environ 26,0 Mt en 2015 (MERN, 2016b), soit près de 60 % de la production canadienne. D'une teneur initiale variant autour de 30 %, le minerai y est concentré à 65 %. La majorité du concentré est ensuite envoyé par transport ferroviaire à leur usine de Port Cartier afin de produire des boulettes. Une autre usine du groupe, Arcelor Contrecoeur, possède une filière de production d'acier à partir d'un procédé de réduction directe et de fours à arc électrique (ArcelorMittal, 2017). Le procédé permet aussi de traiter la ferraille. Des aciéries procèdent ensuite à la transformation métallique (production de barres, fils, etc.).

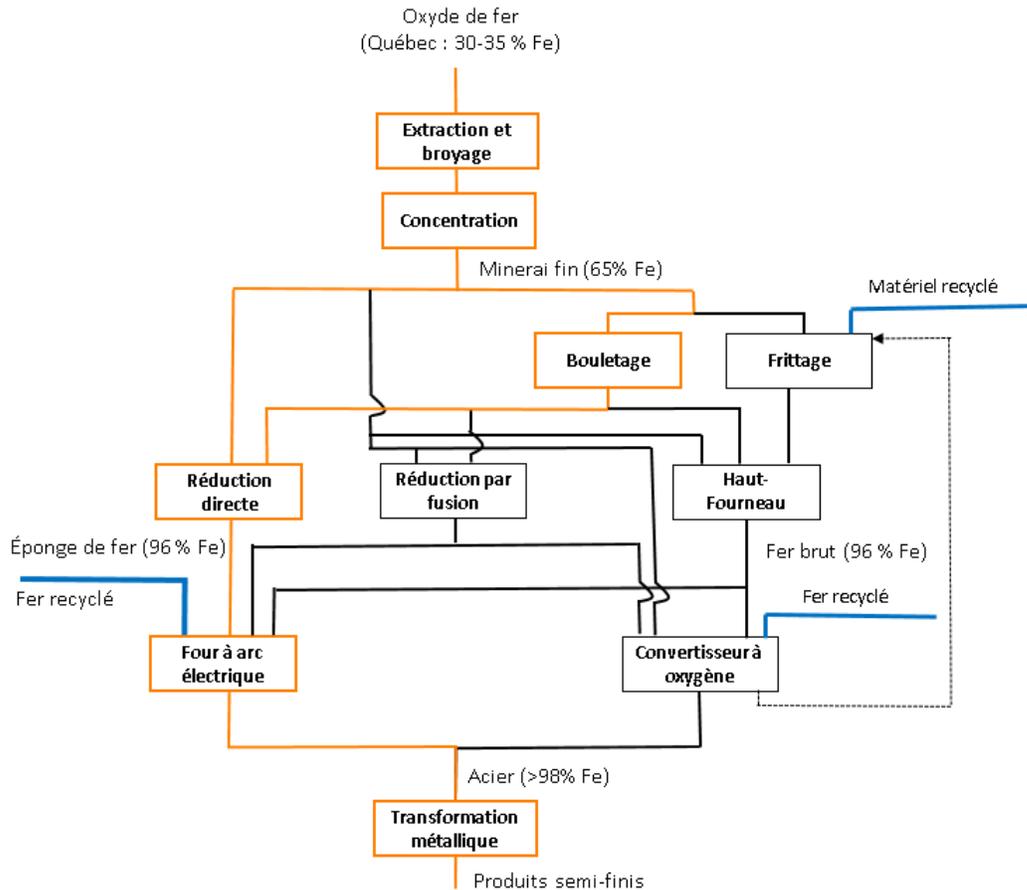
Les activités industrielles effectuées par Rio Tinto Fer et Titane, regroupent l'exploitation minière de la mine de Lac Tio, un gisement d'ilménite situé au nord du Havre-Saint-Pierre, ainsi que sa transformation dans six usines indépendantes situées sur le complexe industriel métallurgique de Sorel-Tracy. L'ilménite est principalement constituée de FeOTiO_2 ; il s'agit donc d'une espèce minérale formée d'oxyde minéral de fer et de titane (Bertrand, 2010). Le minerai d'ilménite au Québec est composé à 30 % de TiO_2 (% massique). Les principaux produits commercialisés sont du dioxyde de titane, de la fonte sous forme d'alliage, des billettes d'acier, ainsi que des poudres métalliques (RioTinto, 2017). Le procédé de Rio-Tinto est complexe et unique. Les informations concernant ce procédé restent confidentielles. La production de fer selon le procédé Rio Tinto est modélisée de manière très simple, alors que la production de fer et acier par la voie classique est traitée plus en détail.

Le Québec possède des réserves et ressources abondantes en fer et les projets d'exploration sont nombreux (MERN, 2016b).

3.2.1.2 Procédés

La Figure 3-1 présente une synthèse des principales options classiques qu'il est possible de prendre à partir du minerai de fer permettant de produire de l'acier. Chaque boîte correspond à un procédé et chaque trait à un flux de matière, d'un ou de plusieurs produits. Il existe notamment trois principaux parcours, soit la réduction directe, la réduction par fusion et les hauts fourneaux. Les traits en orange présentent le parcours actuellement utilisé au Québec (bouletage, réduction directe et four à arc électrique). Les traits bleus présentent les technologies pouvant utiliser de la ferraille ou bien des matériaux recyclés (frittage, convertisseur à oxygène (BOF) et four à arc électrique). Quant à la production de fer et d'acier selon le procédé Rio Tinto, elle est modélisée de manière très simple à l'aide d'un seul procédé générique, étant donné le manque d'information à cet effet.

Figure 3-1. La représentation schématique des parcours de production de fer et d'acier



La description des procédés est la suivante:

- **Extraction et broyage:** À partir d'une mine à ciel ouvert, la roche est extraite puis broyée. Un minerai est considéré riche si la teneur en fer est supérieure à 50 % et pauvre si la teneur est inférieure à 30 %. Au Québec, celle-ci est en moyenne de 30 % (Bertrand, 2010).
- **Concentration:** Dans le minerai, les grains de fer sont soudés à d'autres minéraux comme la silice, par exemple. Il faut passer par des étapes de libération et de séparation, soit la séparation par gravimétrie (utilisation d'une spirale) ou par magnétisme (le fer colle à l'aimant). Au Québec, le minerai est concentré à une teneur d'environ 65 %.
- **Bouletage:** Il est nécessaire de préparer des boulettes (ou du frittage), afin de lier les morceaux de minerai ensemble et en faciliter la manutention lorsqu'ils sont insérés dans les procédés de production du fer. Les boulettes sont cuites en dessous de la température de fusion et possèdent un diamètre approximatif compris entre 9 mm et 16 mm. Du coke est souvent utilisé dans la confection de boulettes, cela permet en effet à la boule de métal d'être poreuse et facilite ainsi la réaction. Le coke est produit à partir de charbon dans une cokerie ou importé (comme au Québec).
- **Frittage:** Ce procédé consiste à chauffer les grains de minerais sans aller jusqu'à la fusion. Sous l'effet de la chaleur, les grains se soudent entre eux. Il est également possible de

rajouter des matériaux recyclés au procédé. Le frittage est souvent produit à côté du haut fourneau (non utilisé au Québec actuellement).

- **Réduction directe:** Le procédé de réduction directe est utilisé depuis les années 70. Celui-ci utilise tout type de minerai (boulettes, frittage ou lambeaux). La mixture est chauffée en dessous du point de fusion du fer. Le but de la cuisson consiste à éliminer l'oxygène du minerai. La réduction directe demande moins de charbon que les hauts fourneaux; la même quantité de fer est obtenue (90-94 % fer). On recense quatre technologies principales de réduction directe : fournaies à cuve, fours rotatifs, fournaie à foyer rotatif et réacteurs à lit fluidisé.
- **Réduction par fusion:** Le procédé de réduction par fusion est un des procédés les plus récents permettant d'obtenir de la fonte équivalente à celle en sortie des hauts fourneaux. Sa valeur tient dans le fait que le procédé n'a pas besoin de coke dans son fonctionnement, mais de charbon directement. Son intensité énergétique est plus faible que celle des hauts fourneaux. Ce procédé comprend deux unités : une étape de préréduction et une étape de fusion. Il existe une dizaine de procédés différents de réduction par fusion. Il n'y a pas d'utilisation de tels procédés actuellement au Québec.
- **Haut fourneau:** La technologie par hauts fourneaux est la plus utilisée dans le monde pour produire de l'acier. La combustion permet d'éliminer l'oxygène contenu dans le minerai. Le fer fond à 1 600°C. On retrouve des températures de l'ordre de 2 200°C à l'intérieur du haut fourneau. Afin de récolter la fonte, on vient percer un côté du fourneau. La coulée obtenue est versée dans des wagons qui les mènent directement au convertisseur à oxygène. Le laitier est un coproduit de la fabrication de la fonte (180 à 350 kg par tonne de fonte), moins dense que la fonte, il flotte à sa surface. Il n'y a pas d'utilisation de hauts fourneaux actuellement au Québec.
- **Four à arc électrique:** Ce type de four est largement utilisé sur la planète. Ils ont la particularité de pouvoir inclure jusqu'à 100 % de fer recyclé. Il existe plusieurs types de fours à arc électriques : certains vont produire de l'acier à partir de 100 % de ferrailles, tandis que d'autres peuvent produire de l'acier à partir de 100 % de produit de la réduction directe.
- **Convertisseur à oxygène:** Le convertisseur à oxygène possède plusieurs rôles, il permet d'abaisser la teneur en carbone, de supprimer les impuretés et d'ajuster le contenu des éléments présents. On y ajoute aussi de la ferraille, environ 10 % de la masse de fonte, ceci dit, celle-ci ne sert qu'à contrôler la température de la mixture. Le procédé consiste à réaliser une combustion pendant 15 min à 1 600°C. Le convertisseur est rotatif (30 tours/secondes) afin de faciliter l'échange.
- **Transformation métallique :** Cette étape comprend la fabrication de produits en acier à partir d'acier acheté, tels que les tubes, tuyaux, formes laminées, fils, etc. Dans le modèle, un seul procédé est utilisé pour mesurer la consommation d'énergie associée à cette étape, la dernière de ce sous-secteur industriel (Statistique Canada, 2012b).

Les principaux paramètres technico-économiques sont présentés à l'Annexe B.

3.2.2 Cuivre

Le cuivre est le troisième métal le plus utilisé au monde après le fer et l'aluminium. Lorsque l'on parle de cuivre raffiné, on parle de cathode de cuivre pur à 99.99 %. Contrairement au fer, il est généralement utilisé sous sa forme pure, bien qu'on le trouve également sous forme d'alliages comme le bronze et le laiton.

3.2.2.1 *Portrait au Québec*

On trouve deux types de minerai permettant l'extraction de cuivre : les minerais d'oxyde de cuivre et les minerais de sulfite de cuivre. Au Québec, seul du minerai de sulfite existe et la filière repose sur le procédé pyrométallurgique pour le raffinage et l'affinage électrométallurgique permettant d'enrichir le minerai en cuivre, afin de produire au final des cathodes de cuivre d'une pureté supérieure à 99.99 %.

On compte au Québec cinq mines qui extraient du cuivre, ce cuivre est par ailleurs un sous-produit de l'extraction de différents métaux, tels que l'or ou le nickel (MERN, 2016b):

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

Malgré la diminution des réserves et des ressources, une importante filière de traitement du cuivre existe au Québec. Le Québec compte d'ailleurs la seule fonderie de cuivre au Canada, la Fonderie Horne de Rouyn-Noranda qui appartient à Glencore. Elle produit des anodes de cuivre à partir de concentré provenant du Québec, du reste du Canada et de l'étranger. Les anodes sont acheminées à l'Affinerie CCR de Montréal-Est et appartenant aussi à Glencore (2017), où sont produites des cathodes de cuivre. Une partie de ces cathodes demeurent au Québec et l'autre partie est exportée (Tableau 3-3). D'autres entreprises procèdent ensuite à la transformation métallique (production de fils, câbles électriques, etc.).

Quelques projets d'exploration existent en lien avec la valorisation d'autres minerais comme le nickel, le zinc et l'or (voir MERN, 2016b pour les projets en lien avec ces autres métaux).

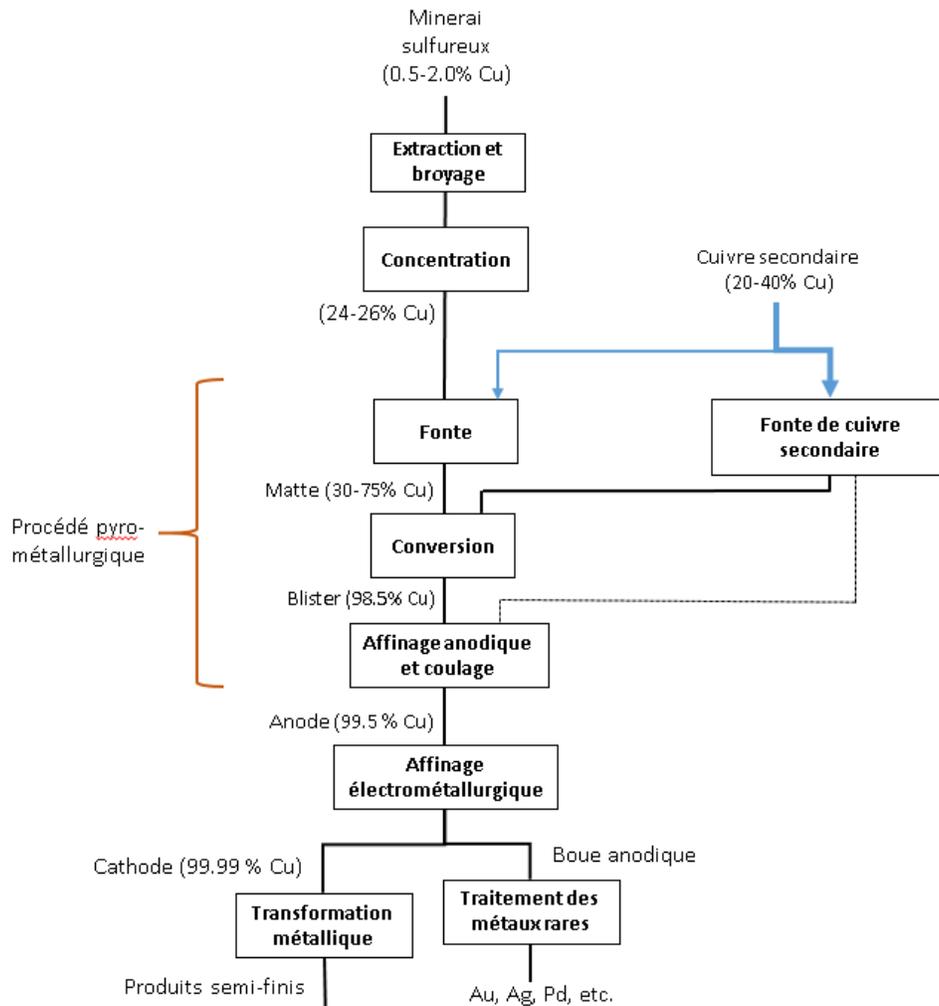
3.2.2.2 *Procédés*

La Figure 3-2 présente une synthèse des différentes étapes permettant de produire des cathodes de cuivre avec une pureté supérieure à 99.99 %. Chaque boîte correspond à un procédé et chaque trait à un flux de matière, un produit. La zone identifiée en orange rassemble les procédés de fonderie avant l'étape d'affinage. Les traits bleus présentent les technologies pouvant utiliser des matériaux recyclés.

Le cuivre recyclé peut être inséré directement dans le procédé initial à l'étape de fonte, ou bien il peut emprunter une technologie alternative spécialisée pour les matériaux recyclés (ou la fonte de cuivre secondaire). Cette technologie alternative peut prendre la forme de différents processus existants, tels que celui d'un four à arc électrique ou d'un haut fourneau.

Lors du dernier processus, l'affinage électrométallurgique, transformant l'anode de cuivre en cathode, se retrouve au fond de la cuve une boue anodique. Celle-ci comprend des métaux précieux (or, platine, argent, etc.) qu'il est intéressant de récupérer étant donné leur valeur.

Figure 3-2. La représentation schématique des parcours de production du cuivre



La description des procédés est la suivante:

- **Extraction et broyage:** Il n'existe pas de mines québécoises uniquement dédiées à l'extraction de cuivre. Ce métal est plutôt un sous-produit de mines d'or, d'argent, de nickel, de cobalt et/ou de zinc. Par exemple, la mine de zinc Bracemac-McLeod dans le camp minier Matagami, produit du cuivre lorsque le minerai de zinc est traité, de même que la mine de zinc Langlois (MERN, 2016b). Une fois que le minerai a été extrait, il est écrasé et broyé suivi d'une concentration par flottation. De manière générale, la teneur en cuivre dans le minerai initial est comprise entre 0,5 % et 2,0 %.
- **Concentration par flottation:** Le procédé consiste à attaquer chimiquement le minerai dans un cylindre en rotation; le cuivre se retrouve en haut du liquide et les impuretés au fond. Les concentrés de cuivre obtenus contiennent généralement environ 30 % de cuivre, mais les teneurs peuvent varier de 20 % à 40 % (ICSG, 2015); l'estimation de 26 % est utilisée pour le Québec.
- **Fonte:** Une étape de grillage précède parfois l'étape de fonte, mais avec les procédés modernes, ces deux opérations sont réalisées simultanément (JRC, 2014). Lors du

procédé de fonte, le cuivre est transformé en matte contenant 30-75 % de cuivre (ICSG, 2015).

- **Conversion:** La matte est traitée dans un convertisseur, donnant un blister contenant de 98% à 98,5 % de cuivre. Il existe trois types de conversion possible : le processus de conversion continu de matte, le procédé de conversion d'alliage et le processus de conversion de lot de matte. Le premier procédé consiste à souffler de l'oxygène dans la mixture insérée (Classen et al., 2009).
- **Affinage anodique:** Le blister est transféré dans des fours pour subir un procédé de pyro-affinage, afin d'éliminer les impuretés restantes par oxydation et scorification (Glencore, 2017). Ce procédé consiste à former une plaque de cuivre pure à 99 % - 99.5%, qui est la plaque anodique.
- **Affinage électrométallurgique:** Le procédé consiste à faire circuler un courant électrique entre deux plaques (anodes) plongées dans une solution électrolytique, un bain composé d'éléments conducteurs (Glencore, 2017). Par électrodéposition, le cuivre se dépose sur une cathode composant une nouvelle plaque à un niveau de pureté de 99.99 %. Les impuretés tombent dans le fond du bassin et créent une boue anodique contenant notamment des métaux précieux.
- **Traitement des métaux rares:** Traitement des boues anodiques à l'aide d'un convertisseur rotatif afin d'extraire des métaux précieux (Glencore, 2017).
- **Fonte du cuivre secondaire:** Le cuivre secondaire fait référence aux pertes industrielles et aux déchets des consommateurs. Le cuivre secondaire (ferraille) contribue à la production mondiale de cuivre à hauteur de 35 % en 2010. La composition de certains matériaux issus du cuivre secondaire ne permet pas de les traiter comme le cuivre primaire. Les procédés doivent pouvoir s'adapter au type de cuivre inséré, et par conséquent, être flexibles (JRC, 2014). Les fours à arc électrique peuvent notamment être utilisés pour une large gamme de cuivre recyclé.
- **Transformation métallique :** Cette étape comprend la fabrication de produits en cuivre, tels que les plaques, feuilles, rubans, barres, fils, tubes, etc. Dans le modèle, un seul procédé est utilisé pour mesurer la consommation d'énergie associée à cette étape, la dernière de ce sous-secteur industriel (Statistique Canada, 2012b), puisque la fabrication et l'assemblage des produits finis font partie d'autres secteurs manufacturiers que celui du fer et de l'acier.

Les principaux paramètres technico-économiques sont présentés à l'Annexe B.

3.2.3 Lithium

Le lithium peut être obtenu à partir de différents types de dépôts (RCGT, 2015; Wietelmann & Steinbild, 2013):

- Les saumures continentales, représentent 58 % des sources mondiales de lithium, où le lithium est concentré par évaporation.
- Les gisements de pegmatite, représentent 26 % des sources mondiales de lithium, où le lithium se trouve sous forme de spodumène $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$.
- Les autres types de dépôts, représentent 16 % des sources mondiales de lithium, comprenant les argiles riches en lithium, les saumures d'hydrocarbures, les saumures géothermales et les zéolithes enrichies.

3.2.3.1 *Portrait au Québec*

Au Québec, on ne trouve pas de saumure, seul est possible l'extraction de spodumène. Bien que des entreprises transforment déjà du carbonate de lithium en composante pour la production de batteries, il n'y a pas de mines actuellement en exploitation au Québec. On recense cependant un projet d'exploitation et trois autres projets de mise en valeur, principalement dans les régions de l'Abitibi et de la Baie James (RCGT, 2015):

- Whabouchi (Nemaska Lithium Inc.) à la Baie-James: production de 4 000 tonnes par jour. Par ailleurs, Nemaska Lithium envisage la construction d'une usine de production d'hydroxyde et de carbonate de lithium pour laquelle une étude de faisabilité a été publiée (Païement et al., 2016).
- Lithium Amérique du Nord (Lithium Amérique du Nord) à La Corne en Abitibi: production de 2 950 tonnes par jour.
- Authier (Ressources Glen Eagle) en Abitibi: production de 2 200 tonnes par jour.
- Rose Tantal-Lithium (Corporation Éléments Critiques) à la Baie-James: production de 4 600 tonnes par jour.

Le développement de la filière du lithium s'annonce prometteur en lien avec la demande croissante pour les produits électroniques, les véhicules électriques et les accumulateurs, au Québec et partout dans le monde.

3.2.3.2 *Procédés*

Le procédé de production du lithium à partir du spodumène nécessite l'extraction du minerai et sa concentration.

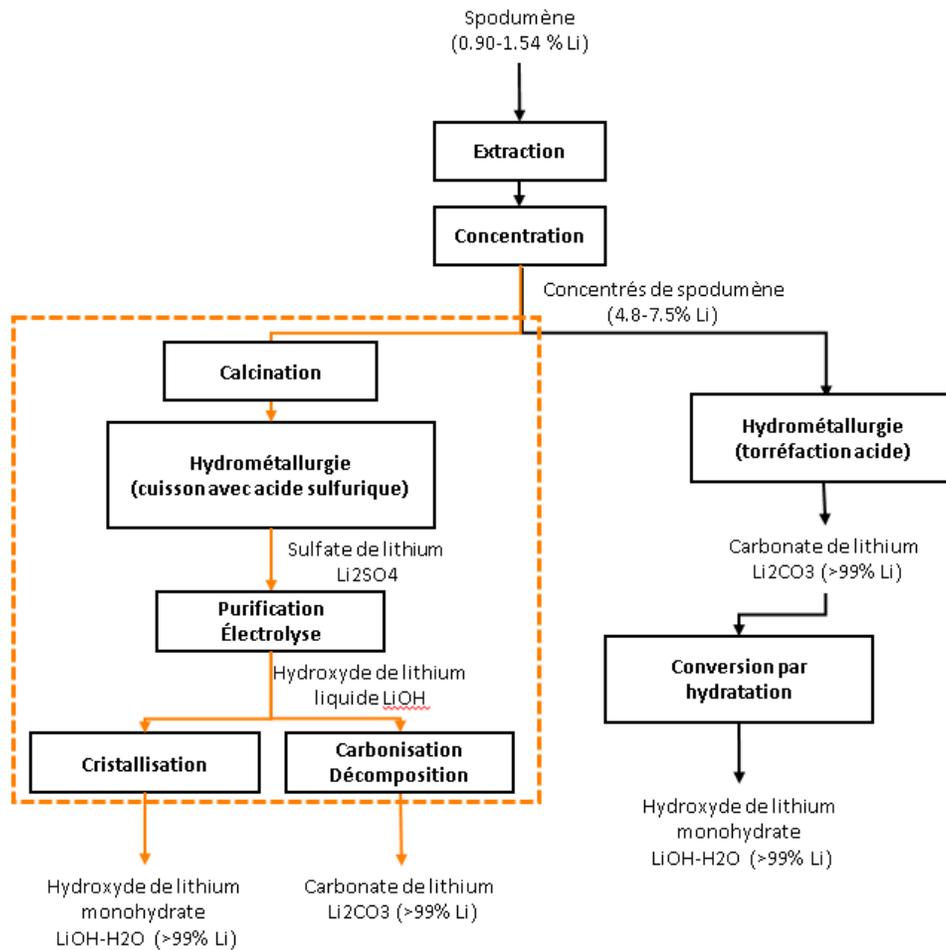
- **Extraction:** L'extraction du lithium est d'abord réalisée dans les mines à ciel ouvert, pour des raisons économiques, mais peut également être poursuivie dans des mines souterraines.
- **Concentration:** La concentration est réalisée par différents processus de séparation, par gravité et par magnétisme notamment, avant d'être séchée. On obtient alors un composé de spodumène concentré.

Voici les principaux chemins pouvant ensuite être empruntés par ce produit (Wietelmann & Steinbild, 2013) et illustrés à la Figure 3-3 :

- Par un procédé d'hydrométallurgie, on peut obtenir du carbonate de lithium (lequel peut ensuite être transformé en hydroxyde de lithium à l'aide d'hydroxyde de calcium).
- Par la succession d'un procédé de calcination puis d'hydrométallurgie, il est possible de produire de l'hydroxyde de lithium. Enfin, il est possible de transformer ce produit en carbonate de lithium par carbonisation.
- Le procédé de Nemaska Lithium Inc. (parcours identifié en orange) transforme le concentré de spodumène en lithium de sulfate (Li_2SO_4), puis produit de l'hydroxyde de lithium par électrolyse.

Les principaux paramètres technico-économiques sont présentés à l'Annexe B.

Figure 3-3. La représentation schématique des parcours de production du lithium



3.3 Demande domestique et internationale

Les modèles TIMES fonctionnent à partir de contraintes de demandes pour des services énergétiques à satisfaire, lesquelles sont spécifiées de manière exogène sur un horizon futur. Dans le secteur industriel, les demandes sont spécifiées en termes de produits semi-finis sur l’horizon 2050 (Tableau 3-2). Cette demande couvre les besoins domestiques et internationaux. À noter que le bond important de la demande de lithium en 2020 correspond au début de la production prévue du projet de Namaska Lithium. Il est difficile à ce stade-ci de savoir quel sera l’impact de la demande mondiale sur la production québécoise du lithium lui-même et des produits semi-finis. Les projections de demandes sont la combinaison de plusieurs facteurs, dont les importations et exportations à chaque étape de la chaîne de valeur et non seulement l’augmentation de la consommation.

Tableau 3-2. Demandes utiles annuelles pour les produits semi-finis à l’horizon 2050

Mt/an	2011	2013	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Fer et acier	6,270	5,417	6,076	7,721	9,367	11,012	13,121	15,230	19,449
Cuivre	0,080	0,085	0,097	0,110	0,128	0,152	0,176	0,204	0,236
Lithium	0,0010	0,0006	0,0004	0,0313	0,0318	0,0323	0,0328	0,0333	0,0344

Pour l'année de référence du modèle (2011), le Tableau 3-3 fournit des détails quant à la production au Québec et aux exportations nettes à chaque étape de la chaîne de valeur, menant au calcul de la demande utile. Ces données ont été établies à partir de plusieurs documents (MAC 2015; USGS 2014; 2016; Paiement et al., 2016), des résultats de l'analyse des flux de matière (Tirado et al., 2017), et elles ont été adaptées aux besoins de la modélisation. À noter toutefois que les données peuvent être légèrement différentes (mais du même ordre de grandeur) de celles obtenues par le biais de l'analyse des flux de matières, et que les valeurs provenant des deux approches ne peuvent pas toujours être comparées directement, étant donné les différences quant à la manière de modéliser les étapes et de présenter les résultats (niveau d'agrégation).

À partir de l'année de référence 2011, et des données observées pour les années suivantes à mesure qu'elles deviennent disponibles, les demandes pour les services énergétiques sont déterminées à l'horizon 2050, à l'aide des projections provenant du modèle de simulation CanESS (whatIf? Technologies, 2014), et de manière compatible avec divers indicateurs macroéconomiques (produit intérieur brut, population, etc.). Le modèle NATEM optimise ensuite la chaîne de valeur pour satisfaire cette demande de produits finis à l'horizon 2050. Alors que la production domestique est flexible pour pouvoir combler l'excédent de la demande après l'année de base (selon les paramètres documentés à l'Annexe B), l'évolution des mouvements d'importations et d'exportations des produits de la chaîne de valeur des métaux est toutefois circonscrite arbitrairement à l'intérieur de bornes minimales et maximales, équivalentes à environ +/- 25 % de la valeur de 2011 pour 2050. Cette hypothèse est contraignante, mais nécessaire à des fins de calibration, étant donné les incertitudes sur l'évolution des échanges mondiaux.

Compte tenu du manque de données, il n'y a pas de distinctions à l'égard de l'origine et la destination des mouvements commerciaux (même pour ceux à l'intérieur du Canada); seulement les importations ou les exportations totales sont comptabilisées. Quant aux pertes de matière à chaque étape, elles constituent des approximations déduites des quantités produites et des exportations nettes, et/ou de l'analyse de flux de matières (Tirado et al., 2017). Les plus importantes surviennent à l'étape de la métallurgie primaire.

Tableau 3-3. Production et exportations nettes des produits de la chaîne de valeur en 2011

Mt	Production	Exportations nettes	Pertes	Demande utile
Fer et acier				
Minerais	95,366			
Concentré	28,610	18,540	0,009	
Boulette	9,891	8,049	0,001	
Fer	1,775	0,965	0,375	
Acier	1,329	0,049	-	
Produits semi-finis	1,267	-5,003	0,004	6,270
Cuivre				
Minerais	0,416			
Concentré	0,080	-0,508	0,0003	
Anodes	0,187	-0,078	0,0003	
Cathodes	0,263	0,126	0,0001	
Produits semi-finis	0,137	0,057		0,080
Lithium				
Produits semi-finis	-	-0,001		0,001

4 STRATEGIES DE CIRCULARITE

Le Tableau 4-1 présente la liste des 13 stratégies de circularité retenues parmi les 41 stratégies analysées initialement pour l'analyse des freins et leviers, en fonction des étapes de cycle de vie (Gervais et al., 2017). Certaines stratégies sont réparties en sous-stratégies étant donné leur définition très large. Toutes les stratégies ne s'appliquent donc pas à tous les métaux.

Tableau 4-1. Stratégies de circularité sélectionnées pour l'analyse technico-économique

Étape du cycle de vie	No	Stratégie	Fe	Cu	Li
Extraction	1	Développement technologique pour une extraction plus efficace - Camions autonomes	X		
	2	Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure		X	
	3	Mines urbaines			
Métallurgie primaire	4a	Recyclage et symbiose industrielle - Récupération des métaux précieux dans les boues anodiques		X	
	4b	- Récupération d'énergie thermique à partir des laitiers	X		
	4c	- Séquestration de CO ₂ avec les sous-produits de l'industrie métallurgique	X		
Transformation métallique et fabrication	5	Fabrication additive - Application dans le secteur de l'aéronautique	X		
Fin de vie	6a	Recyclage du fer (et d'autres métaux) - Démantèlement et recyclage des avions	X		
	6b	- Démantèlement et recyclage des trains	X		
	6c	- Recyclage des voitures	X		
	6d	- Recyclage de la ferraille	X		
	7a	Recyclage du cuivre (et d'autres métaux) - Recyclage des ordinateurs		X	
	7b	- Recyclage des téléphones mobiles		X	
	7c	- Recyclage des câbles et fils		X	
	7d	- Recyclage des circuits imprimés		X	
	8a	Recyclage du lithium - Recyclage des batteries Lithium-ion			X
	8b	- Recyclage du verre			X
Équipements mécaniques et industriels	9	Modularité des équipements mécaniques et industriels	X	X	
Bâtiments et infrastructures	10	Écoconception des poutres en acier	X		
	11	Déconstruction sélective *	X	X	
Véhicules	12a	Écoconception des véhicules - Autopartage	X	X	X
	12b	- Utilisation de matériaux plus légers	X	X	X
Batteries Li-ion	13	Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées - Application pour l'énergie solaire décentralisée			X

* Bien que la déconstruction sélective vise autant le fer (acier) que le cuivre, l'exemple recensé dans cette étude concerne surtout l'acier et ne précise pas les quantités de cuivre récupérées.

Certaines stratégies pourraient s’appliquer à d’autres métaux, à condition d’avoir accès aux données nécessaires, telles que la déconstruction sélective pour le cuivre.

L’évaluation du potentiel technico-économique des stratégies de circularité a été réalisée en deux phases. L’objectif de la première phase était de documenter chacune des stratégies et de quantifier leurs paramètres technico-économiques dans le contexte spécifique du Québec, à partir de la littérature et de calculs simples. Dans une seconde phase, les stratégies les mieux documentées ont été intégrées dans le modèle NATEM afin de déterminer dans quelle mesure chacune des stratégies est optimale ou non d’un point de vue technico-économique. Chaque stratégie fait l’objet d’une section incluant :

- Un **rappel des freins et leviers** identifiés préalablement (Gervais et al., 2017);
- Une **fiche technico-économique** contenant la description du ou des scénarios étudiés, la définition des technologies impliquées ou visées par la stratégie, la présentation des paramètres techniques et économiques (certains sont constants, alors que d’autres évoluent dans le temps et nécessitent des projections), ainsi que l’explication des principales hypothèses;
- Les résultats de la **modélisation technico-économique** (lorsqu’il y a lieu), où chacune des stratégies modélisées fait l’objet d’une comparaison avec un scénario de référence (voir les détails à l’Annexe C);
- Une brève **analyse et discussion** au sujet de leur potentiel de circularité (généralement évalué par la quantité de minerai non extrait du sol) et de la faisabilité technico-économique (à savoir si la stratégie est optimale économiquement pour un sous-ensemble de la société, ou rentable pour les entreprises).

Alors que les études de cas recensés dans la littérature permettent d’estimer la rentabilité potentielle d’une stratégie pour une entreprise précise, la modélisation technico-économique permet de déterminer si une stratégie est économiquement optimale pour un sous-ensemble de l’économie québécoise. L’optimalité économique est définie comme le coût minimal pour satisfaire des demandes en produits et services, dans un sous-ensemble de l’économie québécoise, selon la rationalité économique des modèles d’optimisation TIMES décrit à l’Annexe A. Le modèle utilisé permet de minimiser les coûts du système énergétique, incluant d’autres produits (matériaux, métaux), dans une perspective technico-économique, mais ne mesure pas les impacts de nature macroéconomique comme le produit intérieur brut et l’emploi.

Rappelons que les coûts et les prix sont toujours indiqués en dollars canadiens réels de 2011 (\$ CAD 2011) et que le taux d’actualisation global a été fixé à une valeur standard de 5 % pour ce type d’études (valeur qui reflète à la fois l’inflation attendue et la préférence inter-temporelle des agents économiques). Bien que le choix du taux puisse avoir un impact sur les résultats et faire l’objet de nombreuses discussions, ce type d’analyse de sensibilité dépasse le cadre de ce projet.

4.1 Stratégie 1 - Développement technologique pour une extraction plus efficace

Le développement technologique réfère essentiellement à la conception d’outils ou systèmes permettant l’automatisation et l’optimisation des opérations minières.

4.1.1 Rappel des freins et leviers

L’analyse des freins et leviers, telle que réalisée par Gervais et al (2017), est résumée ci-dessous et dans le Tableau 4-2.

Pertinence. La pertinence est réelle puisque l’adoption de ces technologies permet de réduire les coûts d’opération, et par conséquent, d’améliorer la rentabilité des compagnies minières. Le développement de ces technologies permettra aussi de prolonger la durée de vie de mines existantes, et même, de retourner extraire dans d’anciennes mines.

Faisabilité. Il est probable que ces technologies soient d’abord implantées dans les mines à ciel ouvert, puis dans les mines souterraines, où la faisabilité est plus complexe. Plusieurs technologies existent déjà (Gervais et al., 2017):

- Camions automatisés : Camions sans conducteur contrôlés à distance par un employé devant un écran et dotés de senseurs sur chacune des roues permettant de mesurer les vibrations et déterminer les besoins de maintenance préventive.
- Camions semi-automatisés : Camions conventionnels sur lesquels sont installés des équipements de contrôle à distance; le conducteur demeure nécessaire.
- Foreuses : Foreuses dotées d’un système permettant l’analyse de la composition du minerai en temps réel dans les mines à ciel ouvert, et ainsi de catégoriser le minerai immédiatement pour concassage ou entreposage. Il existe aussi des foreuses automatisées contrôlées à distance qui offrent une précision accrue.
- Capteurs : Capteurs installés sur les équipements pour détecter les bris, la température, le niveau d’huile ou les signaux électriques, facilitant la maintenance préventive et entraînant ainsi des gains de productivité et une réduction de la consommation d’énergie.
- Simulateurs : Simulateurs utilisés pour la formation des travailleurs au sujet des activités de forage ou pour la conduite d’équipement lourd augmentant les habiletés des employés et améliorant la mise en application des opérations sur le terrain.
- Systèmes de ventilation: Systèmes de ventilation instrumentés et connectés par le biais d’un réseau de traitement de données pour adapter la ventilation en fonction des activités souterraines, sur demande, générant ainsi des économies d’énergie (diesel).

État actuel. Le développement technologique progresse rapidement, bien que l’implantation des technologies sur le terrain progresse plus lentement. Au Québec, l’industrie minière se situerait à environ 30 % à 40 % de l’atteinte complète de cette vision de l’automatisation (Gervais et al., 2017). La mine d’or Éléonore, de la compagnie Goldcorp, serait la plus avancée de ce point de vue, avec : des forages automatisés contrôlés à distance, une ventilation automatisée, des systèmes de géolocalisation sur chacun des équipements et des employés, afin de suivre leur position en temps réel et ainsi minimiser les pertes de temps, etc. (St-Arnaud, 2016). En général, les technologies sont utilisées pour des cas précis, mais l’automatisation intégrée et complète demeure plus rare au Québec. De plus, le taux et la vitesse d’automatisation sont plus faibles que dans l’ensemble du Canada, avec un retard d’environ 15 ans (Gagnon et Poirier, 2016). En Australie, il y a des mines déjà totalement automatisées (Gervais et al., 2017). De plus, Rio Tinto s’est dotée d’environ 70 camions automatisés sur les 3 000 qu’elle possède dans une mine en Australie. Il y a également eu des avancées en Russie et en Afrique du Sud.

Tableau 4-2. Freins et leviers – Développement technologique pour une extraction plus efficace

Freins	Leviers
<ul style="list-style-type: none"> • Délocalisation et perte d’emplois, disponibilité limitée d’une main-d’œuvre qualifiée • Changement de culture organisationnelle et résistances aux changements 	<ul style="list-style-type: none"> • Économie d’énergie et de temps, réduction des GES, réduction des risques d’accident et meilleure rentabilité

Freins	Leviers
<ul style="list-style-type: none"> • Sécurité des travailleurs en jeu, en présence d'équipements automatisés • Manque d'interopérabilité des systèmes de traitement de données • Disponibilité des données à accroître • Enjeu de cybersécurité • Automatisation plus difficile et dispendieuse dans les mines existantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Prolongation de la durée de vie des mines souterraines • Réouverture d'anciennes mines • Normes et réglementations environnementales • Formation de la relève et du personnel en fonction • Maintien et renforcement des rabais sur les tarifs d'électricité et des programmes gouvernementaux d'efficacité énergétique et de conversion • Recherche et développement • Adoption d'un code de gestion de risques (ex. : Australie) • Perspective globale d'amélioration des procédés et de génie industriel en faisant appel à des firmes de consultants

Source : Gervais et al., 2017.

4.1.2 Fiche technico-économique

Définition du scénario étudié. L'analyse technico-économique de la stratégie compare un système de transport autonome à un système de transport conventionnel fonctionnant dans une mine à ciel ouvert situé en Colombie-Britannique (Parreira, 2013). Plus spécifiquement, l'analyse est basée sur un système de transport conventionnel opérant 9 camions manuels versus un système de transport autonome opérant 7 camions automatisés pour la même production annuelle de 13,8 Mt de minerai de fer pendant la même période, soit 7 ans (Parreira, 2013). Les flottes de camions automatisés sont appropriées dans les mines à plus gros volumes; la stratégie est donc appliquée au minerai de fer seulement. D'autres avancées technologiques sont pertinentes pour les plus petits volumes, comme les camions semi-automatisés, mais elles n'ont pas été analysées par manque de temps et de données.

Technologies impliquées. La stratégie est appliquée à l'utilisation des camions automatisés. Les principaux fabricants de camions automatisés utilisés dans les exploitations minières sont Komatsu et Caterpillar (Fisher & Schnittger, 2012). Par exemple, les camions 930E de Komatsu ont des ordinateurs à bord qui donnent l'information sur le positionnement des autres véhicules et les communiquent au centre d'opérations. Ces camions sont équipés de radars à détection d'obstacles, de lasers, d'antennes de communication et de systèmes de géolocalisation de haute précision, afin que ceux-ci soient contrôlés efficacement à distance via des systèmes de communication, de surveillance, d'orientation et d'évitement (Fisher & Schnittger, 2012). Ces systèmes permettent aux camions d'utiliser des parcours prédéfinis et d'automatiser la navigation des routes et des intersections, les déplacements entre les zones de chargement, de vidange et de ravitaillement, les interactions avec d'autres équipements. Initialement introduit au Chili en 2005, un total de 5 mines dans le monde sont connues pour avoir utilisé, utilisent présentement ou planifient d'utiliser cette technologie (Parreira, 2013) : les mines Radomiro Tomic et Gabriela Mistral au Chili (CODELCO), la mine West Angelas en Australie (Rio Tinto), la mine Salomon en Australie (Fortescue Metals) et la mine Navajo au Nouveau-Mexique aux États-Unis (BHP).

Paramètres techniques. Dans le scénario étudié, un système à 7 camions automatisés permet donc d'exploiter la même quantité de minerai pendant 7 ans, qu'un système à 9 camions

conventionnels (Parreira, 2013). Le système autonome permet aux camions de fonctionner de manière plus stable, ce qui fait diminuer la consommation de carburant : ces derniers nécessitent 0,76 litre/t plutôt que 0,83 litre/t pour les camions conventionnels (Tableau 4-3). Cependant, dans ce cas-ci, l'augmentation du pourcentage d'utilisation des camions automatisés (78 % du temps comparativement à 65 %) annule les gains en économies de carburants à l'échelle d'une année pour extraire la même quantité de minerai.

Paramètres économiques. Dans cette étude de cas, les coûts d'investissements pour le système autonome (0,42 \$/t) sont plus élevés que pour le système conventionnel (0,36 \$/t) : le coût à l'achat d'un camion automatisé (4,83 M\$) est légèrement plus élevé que celui d'un camion conventionnel (3,86 M\$) (Parreira, 2013).

Par contre, l'ajout de camions automatisés à la mine conduit principalement à un gain important en termes de main d'œuvre. Les coûts d'opération fixes passent ainsi de 2,65 \$/t dans le système conventionnel à 2,25 \$/t dans le système autonome. Les pneus, les freins et autres composantes sensibles aux bris et à l'usure sont mieux utilisés et ont une plus longue durée de vie même en étant en opération constante (Parreira, 2013). Les coûts d'opération variables sont donc également inférieurs.

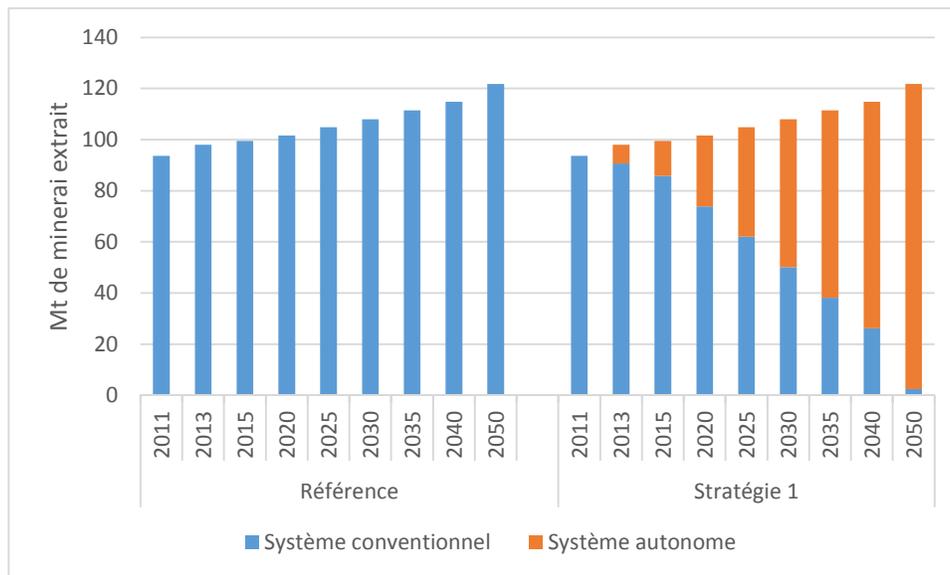
Tableau 4-3. Paramètres – Développement technologique pour une extraction plus efficace

Paramètre technique	Unité	Constante	Référence
Camions conventionnels (9)			
Capacité annuelle moyenne d'une mine de fer	t/an	13 821 605	Parreira (2013)
Capacité annuelle unitaire	t/an	1 535 734	
Durée de vie	an	7	
Consommation de carburant	litre/t	0,83	
Pourcentage d'utilisation	%	65 %	
Camions automatisés (7)			
Capacité annuelle moyenne d'une mine de fer	t/an	13 821 605	Parreira (2013)
Capacité annuelle unitaire	t/an	1 974 515	
Durée de vie	an	7	
Consommation de carburant	litre/t	0,76	
Pourcentage d'utilisation	%	78 %	
Paramètre économique			
Camions conventionnels (9)			
Prix unitaire camion conventionnel	M\$	\$3,86	Parreira (2013)
Coût d'investissement pour 9 camions conventionnels	\$/t	\$0,36	
Coût d'investissement pour le système automatisé	\$/t	\$ -	
Coût d'investissement total	\$/t	\$0,36	
Coût d'opération fixe	\$/t	\$2,65	
Coût d'opération variable (exc. énergie)	\$/t	\$0,16	
Coût d'énergie	\$/t	\$0,70	
Camions automatisés (7)			
Prix unitaire camion automatisé	M\$	\$4,83	Parreira (2013)
Coût d'investissement pour 7 camions automatisés	\$/t	\$0,35	
Coût d'investissement pour le système automatisé	\$/t	\$0,07	
Coût d'investissement total	\$/t	\$0,42	
Coût d'opération fixe	\$/t	\$2,25	
Coût d'opération variable (exc. énergie)	\$/t	\$0,15	
Coût d'énergie	\$/t	\$0,71	

4.1.3 Modélisation technico-économique

Cette stratégie a également été testée dans le modèle NATEM, où un scénario incluant la possibilité d’investir dans un système autonome plutôt que dans un système conventionnel, à l’étape de l’extraction du minerai de fer au Québec a été comparé au scénario de référence (dont les détails sont présentés à l’Annexe C). Ainsi, malgré des coûts d’investissement plus élevés, le système autonome fait partie de la solution optimale où les camions automatisés remplacent progressivement les camions manuels à mesure qu’ils arrivent à la fin de leur vie utile (Figure 4-1). Le modèle confirme donc que cette stratégie est optimale d’un point de vue purement économique (sans tenir compte d’éventuelles contraintes de mise en œuvre sur le terrain). Les impacts sur le système énergétique et les émissions de GES sont négligeables.

Figure 4-1. Technologies utilisées pour l’extraction de fer



4.1.4 Analyse et discussion

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

Faisabilité technico-économique. L’objectif visé par l’adoption de ces technologies est essentiellement de réduire les coûts d’opération. En effet, les résultats de la modélisation montrent que malgré des coûts d’investissement plus élevés, cette stratégie est optimale économiquement. Cependant, cet investissement supplémentaire initial peut s’avérer dissuasif pour les plus petites entreprises qui démarrent ou pour celles dont les camions conventionnels sont encore bons (il peut aussi y avoir un impact environnemental associé au remplacement prématuré des équipements).

De manière générale, chaque mesure d’automatisation des opérations peut réduire les coûts d’opération en moyenne de 15 %, selon les technologies et les activités minières (Gervais et al., 2017). Ce gain est effectivement observé dans le scénario étudié ici où les coûts d’opération sont réduits de 15 % avec l’adoption du système autonome. Cette estimation concorde également avec celle de Rio Tinto (2015) qui mentionne dans son rapport annuel que sa flotte de 71 camions automatisés, dont 52 Komatsu 930E et 19 Komatsu 830E, a permis de diminuer ses coûts

d'opérations de 13 % et d'augmenter l'utilisation effective des camions de 14 %. Il n'est pas mentionné si le nombre total de camions est également moindre par contre. D'un point de vue économique, la stratégie est donc prometteuse.

De plus, les camions autonomes ne représentent qu'une partie de l'automatisation des activités minières. Par exemple, dans son projet *Mine du futur*, Rio Tinto a investi plus de 500 M\$ dans son système de transport ferroviaire entièrement automatisé qui couvre près de 700 km entre la mine West Angelas en Australie et le port (Dansereau, 2014). « Cette automatisation rendra superflue la présence d'un opérateur sur la centaine de trains qui circulent tous les jours. De plus, le pilotage automatique des trains permettra de revoir en temps réel l'ordonnancement des opérations de chargement dans les bateaux pour l'adapter au rythme de la mine » (Dansereau, 2014, p.2).

Une ventilation améliorée permet également de diminuer les dépenses en énergie, alors que les systèmes de géolocalisation permettent de diminuer les pertes de temps, car la position des employés et des équipements est connue en temps réel. Avec une automatisation complète, il est possible d'aller chercher un autre gain supplémentaire, mesuré par la diminution des coûts d'opération, de 15 %.

Autres facteurs. Un autre facteur non pris en compte dans l'analyse concerne l'amélioration de la sécurité à la mine et donc la diminution des coûts associés aux accidents. Avec un système de transport automatisé, la communication sans fil, les détecteurs d'objets, les ordinateurs de bord, les systèmes de géolocalisation et les logiciels d'intelligence artificielle permettent que les camions soient contrôlés à distance par un opérateur à l'abri des dangers auxquels un camionneur s'expose habituellement.

La stratégie est donc assurément rentable, mais la capacité des entreprises de mobiliser le personnel et de passer à l'automatisation est limitée par le changement de culture nécessaire. De plus, il y a des enjeux liés aux pertes d'emplois et de retombées économiques pour les régions.

4.2 Stratégie 2- Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure

Les résidus miniers peuvent contenir des métaux pour lesquels l'extraction pourrait s'avérer viable dans le futur si l'entreposage a été réalisé de manière adéquate dès le départ. Cette stratégie doit être appuyée par une vision à long terme.

4.2.1 Rappel des freins et leviers

L'analyse des freins et leviers, telle que réalisée par Gervais et al (2017), est résumée ci-dessous et dans le Tableau 4-4.

Pertinence. La pertinence d'entreposer les résidus miniers en vue d'une extraction ultérieure dépendra de la teneur en minerais des résidus, ainsi que des efforts technologiques et économiques nécessaires pour les récupérer par rapport à la valeur du minerai en question sur les marchés.

Faisabilité. L'extraction de minerai dans des aires d'accumulation de résidus miniers existe déjà. Par contre, des problèmes de rentabilité financière ont limité le nombre de projets dans les dernières années. De plus, l'exploitation de résidus miniers dans les aires d'accumulation déjà restaurées représente un défi supplémentaire, étant donné les obligations de remettre le site dans un état satisfaisant à la fin de l'exploitation ainsi que les garanties financières exigées.

Puisque les technologies de traitement n'évoluent pas suffisamment rapidement, une option à préconiser pour les mines en opération serait d'extraire des résidus miniers un minerai autre que celui à l'origine des activités de l'entreprise minière (par ex. du zinc dans les résidus des mines de cuivre). Dans les anciennes mines, il serait possible de traiter les résidus miniers à condition de les transporter vers une usine existante ou de se doter d'une usine mobile de traitement. Finalement, une méthode à envisager pour faciliter une extraction future de minerais dans les résidus miniers serait de caractériser le matériel entreposé pour obtenir une chaîne de traçabilité et cartographier la zone d'entreposage. Il existe déjà des puces électroniques permettant d'assurer la traçabilité en fonction de la zone exploitée et du moment où les résidus ont été déposés.

État actuel. Au Québec, les activités minières des dernières années ont généré une importante quantité de résidus miniers à gérer et la restauration est à envisager pour plusieurs sites miniers abandonnés. Par contre, la présence de résidus miniers acidogènes limite le potentiel et nécessite des travaux de restauration à court terme afin de limiter les impacts environnementaux. De plus, une fois l'aire d'accumulation de résidus miniers restaurée, il devient difficile économiquement d'extraire des minerais de valeur.

En Amérique du Sud, des entreprises auraient exploité des résidus miniers d'anciennes mines. À sa mine Kittila, en Finlande, Agnico Eagle a entreposé à part ses résidus miniers contenant de l'or. Rio Tinto Fer et Titane considère ses stériles comme son second gisement exploitable à la mine Tio, située à Havre-Saint-Pierre. À la mine Éléonore de Goldcorp, on a séparé le matériel riche en sulfures du matériel pauvre en sulfures dans deux cellules séparées.

Tableau 4-4. Freins et leviers – Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure

Freins	Leviers
<ul style="list-style-type: none"> • Obstacle financier : investissements importants en restauration, coûts de traitement des résidus versus valeur du minerai • Stabilité géotechnique et chimique des aires d'accumulation de résidus en contradiction avec l'entreposage pour un traitement ultérieur • Défis techniques pour récupérer le minerai ainsi que pour classer et déplacer les résidus • Perception des résidus miniers comme des déchets • Environnemental : comme on ne sait pas si la mine reprendra, il y a une volonté d'assurer la remise en état du site. 	<ul style="list-style-type: none"> • Crédits à la valorisation pour les résidus miniers traités • Coordination interministérielle pour l'arrimage des réglementations sur la gestion des résidus miniers • Ententes de partenariat pour le traitement des résidus miniers dans les sites miniers abandonnés • Ajout d'une section portant sur la valorisation des résidus miniers dans le guide de restauration (MERN, 2016c) • Information, sensibilisation et éducation des sociétés minières • Incitatifs économiques (ex. : fiscaux, crédits, subventions, tarifs réduits de transport) • Normes plus strictes sur les effluents miniers • Développement technologique pour la traçabilité, le déplacement et le traitement des résidus miniers; programmes d'aide en innovation • Pression sociale et image corporative

Source : Gervais et al., 2017.

4.2.2 Fiche technico-économique

Les résidus miniers sont classés selon quatre groupes en fonction des étapes d'exploitation d'un gisement métallique (Charbonneau, 2014; Bihoux & de Guillebon, 2015):

- Les dépôts meubles (le mort-terrain) concernent la couche de matériaux qui recouvrait le minerai. Ils sont accumulés en tas dans un lieu spécifique. La plupart du temps, ils sont inertes et ne représentent pas de danger pour l'environnement, mais ils peuvent occasionner des problèmes d'espace. Ils n'ont aucune valeur économique.
- Les stériles miniers, dont la production est une conséquence directe de l'extraction du minerai et dont la teneur en minerai est trop faible pour que leur valorisation soit économiquement viable. Ils sont donc entreposés dans des aires d'accumulation, lesquelles peuvent devenir très imposantes, surtout pour les mines à ciel ouvert.
- Les résidus de concentrateur qui sont rejetés à l'étape de la concentration. Ils sont problématiques du point de vue environnemental, car ils sont composés de fines particules de minerai non-récupéré souvent réactives à l'oxygène et à l'eau. Ils doivent parfois être traités avant d'être entreposés. Ces résidus sont déposés dans des parcs à résidus miniers.
- Les boues de traitement générées par le traitement des résidus sont entreposées dans des cellules spécialement aménagées à cet effet sur le site.
- Quant aux scories de fusion, elles forment un cas particulier de résidus miniers oxydés issus des fonderies et qui s'accumulent parfois sur le site de la mine lorsque l'opération de grillage s'effectue sur place, ou encore, près de la fonderie. Ces résidus peuvent être très toxiques.

Technologies impliquées. Il existe plusieurs approches d'entreposage existantes et futures (Franks et al., 2011):

- Les parcs à résidus miniers conventionnels sont la forme la plus courante de gestion des résidus. Munis de digues, ils isolent les résidus miniers de l'écosystème environnant par confinement. La défaillance des digues présente un risque environnemental important à considérer. La stabilité géochimique des résidus peut également être un défi.
- Les techniques d'épaississement des résidus sont de plus en plus répandues grâce à une gamme élargie de technologies à faible coût. Les résidus épaissis ont des concentrations élevées en solides et des propriétés élastiques améliorées. À long terme, la technique d'épaississement diminue les coûts de gestion, de construction de digues et de réhabilitation à cause d'une plus faible utilisation d'eau. Cette technique permet également de réduire l'empreinte au sol et de diminuer la quantité d'eau à gérer.
- La lixiviation en tas est une méthode d'extraction de métaux (comme pour le cuivre) à partir du minerai qui comprend le placement du minerai broyé sur une membrane imperméable et l'irrigation avec un réactif favorisant la décomposition des minéraux et la capture du métal désiré. Les piles résiduelles peuvent être restaurées, mais parfois elles ne le sont pas. Ces piles de déchets font face à des défis de stabilité physique et chimique.
- La lixiviation in situ est une technique plus rare qui consiste à pomper des réactifs in situ dans le minerai d'intérêt, afin de dissoudre les minéraux désirés en solution pour une extraction et un traitement ultérieur. Cette technique est adaptée à des dépôts de cuivre par exemple. Le confinement des contaminants potentiels mobilisés dans les eaux souterraines peut représenter un risque à long terme.
- Le remblayage à sec des ouvertures minières par des dépôts meubles et des résidus ou stériles miniers est une technique de restauration applicable pour les mines à ciel ouvert.

Ce type d'installation doit être restauré et recouvert rapidement afin de minimiser les infiltrations d'eau et les impacts sur l'environnement. Il est à noter que le remblayage à sec des ouvertures augmente la stabilité physique de ces ouvrages ainsi que la stabilité chimique du matériel entreposé. Cependant, le foisonnement du volume des roches minées augmente le volume occupé et peut ainsi augmenter les coûts de manutention, de transport et d'entreposage.

L'épuisement des minerais et l'augmentation de la demande de métaux incitent à développer de nouvelles technologies hydrométallurgiques afin de récupérer certains métaux à partir des minerais à faibles teneurs, des dépôts-meubles et des résidus miniers (Watling, 2004). L'extraction économique du cuivre à partir d'un minerai à faible teneur nécessite des méthodes de traitement peu coûteuses, telles que la lixiviation in situ et en tas. Par contre, les études démontrent une récupération de 40 % du cuivre contenu dans la bornite (Cu_5FeS_4) et la chalcocite (Cu_2S) en 18 jours. Le taux de récupération peut atteindre 80 % en 150-210 jours. Quant à la récupération du cuivre dans la chalcopirite (CuFeS_2) par ces méthodes, cela peut prendre des années pour un minerai de cuivre à faible teneur (0,1-0,5 % Cu) (Watling, 2004).

Définition du scénario étudié. Le scénario porte donc sur la récupération du cuivre dans les résidus miniers d'une mine de fer par biolixiviation. En 2015, une étude effectuée sur une mine de fer en Iran a établi la possibilité de récupérer des métaux précieux (cuivre, nickel, cobalt, fer) par biolixiviation (Ahmadi et al., 2015).

Dans cette mine, les éléments nuisibles dans le minerai sont les sulfures métalliques (pyrite et chalcopirite). Ces sulfures sont séparés des oxydes de fer par un procédé de flottation inverse qui produit un résidu à faible teneur en cuivre, nickel et cobalt. Des enquêtes préliminaires ont montré que la récupération de ces métaux dans les résidus ne peut être effectuée par des méthodes traditionnelles. La biolixiviation présente un grand potentiel de récupération de ces métaux à partir de minerais sulfurés complexes à faible teneur et polymétalliques (Ahmadi et al., 2015). La méthode est techniquement faisable, relativement simple, écologiquement respectueuse et entraîne de faibles coûts d'opération (Ahmadi et al., 2015).

Paramètres techniques. Les expériences montrent l'extraction/récupération de 72 % de cuivre, 61 % de nickel, 36 % de cobalt 49 % de fer à partir des déchets d'une mine de fer (en 30 jours, avec une pulpe contenant 5 % de solides, en présence de microorganismes et à un pH contrôlé) (Tableau 4-5). La composition minéralogique des résidus indique une teneur initiale en cuivre de 0,16 % sous forme de chalcopirite (Ahmadi et al., 2015).

Paramètres économiques. En ne tenant compte que de la récupération du cuivre par le procédé de biolixiviation, en excluant les gains associés à la récupération du fer, du nickel et du cobalt, chaque tonne de résidus traitée rapporte 7\$ selon le prix du cuivre sur le marché (mai 2017). La récupération d'une tonne de cuivre par cette méthode apporte un gain de 6 090\$. En considérant:

- Que ce procédé doit être ajouté avant l'entreposage des déchets;
- Que les estimations du prix actuel de la biolixiviation varie entre 400-1 400 \$/t de cuivre récupéré;
- Qu'une avancée technologique permet de mettre en place cette méthode pour des minerais à une teneur inférieure à 0.4 % de cuivre;
- Que la récupération du cuivre dans le résidu est de 0,115 %; et
- Qu'on estime les coûts d'opération à 1 395\$/t de cuivre (SERI, 2015; OECD, 2001).

Le gain net de cette technologie serait de 4 695\$ par tonne de cuivre récupéré. À cela, il faut ajouter la réduction des frais de restauration du site minier (moins de résidus à entreposer et moins dangereux) et les gains liés à la récupération des autres métaux (nickel, cobalt et fer). De plus, les chercheurs mentionnent que les solides obtenus après la biolixiviation avaient été cuits afin d'obtenir un composé d'une teneur en fer de plus de 56 %, et avec moins de 2 % de soufre, qui pourrait être vendu comme source de fer (ce qui peut renforcer l'aspect économique du procédé).

Tableau 4-5. Paramètres - Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure

Composition métallique du résidu de la mine de fer	Teneur métallique dans le résidu	Récupération du métal par biolixiviation	Récupération du métal dans résidus par lixiviation	Prix du métal par tonne	Total par tonne de résidus traités	Total pour une tonne de cuivre récupérée	Coût d'opération estimé de la biolixiviation	Gain net par tonne de cuivre récupérée
	(%)	(%)	(%)	(\$/t)	(\$/t)	(\$/t Cu)	(\$/t Cu)	(\$/t Cu)
Cuivre	0,160	72	0,115	5 825	7	6 090	1 395	4 695
Nickel	0,078	61	0,048	-	-			
Cobalt	0,044	36	0,016	-	-			
Fer	56,820	49	27,842	87	24			

Source : (Ahmadi et al., 2015; SERI, 2015; OECD, 2001)

4.2.3 Modélisation technico-économique

Cette stratégie n'a pas fait l'objet d'une modélisation, notamment en raison du niveau de détails insuffisant dans le modèle d'une part, et des conclusions déjà pertinentes obtenues lors de la revue de la littérature (calcul de rentabilité).

4.2.4 Analyse et discussion

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

Faisabilité technico-économique. Selon le cas recensé dans la littérature (Ahmadi et al., 2015), les faibles coûts d'opération de la méthode de récupération des métaux dans les résidus miniers après investissement initial pourraient faire en sorte que ces approches soient économiquement optimales, surtout pour les métaux qui ont une valeur importante sur les marchés. Il est par contre difficile de se prononcer de manière générale.

4.3 Stratégie 3- Mines urbaines

Le concept de mines urbaines désigne le métal qui peut être extrait des villes (Gervais et al., 2016). En effet, une large part de métaux se retrouve en milieu urbain, que ce soit dans les produits ou les structures (par exemple, les chemins de fer, bâtiments, ponts). Les minerais urbains peuvent constituer une alternative à l'extraction conventionnelle des minerais sous terre.

4.3.1 Rappel des freins et leviers

L'analyse des freins et leviers, telle que réalisée par Gervais et al (2017), est résumée ci-dessous et dans le Tableau 4-6.

Pertinence. Pour être pertinente, cette stratégie doit être concurrentielle avec l'extraction minière conventionnelle. Si les métaux à récupérer sont très dispersés sur le territoire, le coût de collecte et de recyclage peut vite grimper (Gervais et al., 2017).

Les gisements urbains qui apparaissent comme étant les plus intéressants en France sont : les équipements industriels volumineux comprenant des alliages, les systèmes d'éclairage, les équipements électriques et électroniques, les véhicules automobiles, ainsi que les équipements producteurs d'énergie électrique, éolienne ou solaire (Geldron, 2016). Au niveau des infrastructures et des bâtiments, la durée de vie est plus longue, mais les quantités de matériaux sont plus élevées.

Faisabilité. La mine urbaine possède trois caractéristiques principales qui la distinguent d'une mine géologique conventionnelle (Geldron, 2016): i) elle est disséminée sur l'ensemble du territoire, ii) sa composition physico-chimique peut être plus complexe, notamment pour les produits contenant des composantes électroniques), iii) les gisements évoluent en quantité et en qualité au gré du cycle commercial des produits pour lesquels l'obsolescence peut parfois être très rapide. L'extraction urbaine doit donc s'adapter à ces changements. Les informations nécessaires pour la prise de décision concernant les mines urbaines doivent considérer tous les flux et stocks d'une substance particulière, dans toute la chaîne de valeur.

État actuel. Le concept de mines urbaines comme source d’approvisionnement en métaux stratégiques est relativement récent (Geldron, 2016). Des travaux de recherche sont en cours par *The Urban Mining Innovation Centre*, mis en place récemment à l’Université de Colombie-Britannique, à Vancouver. En France, l’accent est davantage mis sur les flux de métaux (recyclage) que sur les stocks de métaux (mines urbaines), puisque l’information sur les flux est davantage accessible. Des études sont à envisager pour mieux documenter les gisements urbains actuels et potentiels, la dynamique de leur disponibilité dans le temps, ainsi que la pertinence économique relativement aux types et à la valeur des métaux.

Tableau 4-6. Freins et leviers – Mines urbaines

Freins	Leviers
<ul style="list-style-type: none"> • Caractérisation difficile des gisements : quantités mises en marché, composition et durée de vie • Acier, cuivre et lithium principalement en usage • Propriété et considérations légales • Coûts <p>Évolution des produits vs retour sur l’investissement des recycleurs</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Soutien à la recherche pour documenter les gisements et les modèles économiques • Internet des objets pour une meilleure traçabilité des produits et leurs métaux • Proximité des entreprises de recyclage avec leurs sources de matières secondaires • Modification aux lois et règlements pour permettre la récupération de produits ou d’infrastructures abandonnés • Subventions aux entreprises de recyclage • Étude prospective sur les besoins en métaux

Source : Gervais et al., 2017.

4.3.2 Fiche technico-économique

L’analyse de cette stratégie consiste à identifier et quantifier les métaux disponibles dans les infrastructures urbaines au Québec. Cependant, contrairement au flux de métaux, les gisements urbains (stock) de métaux et leurs compositions sont peu ou pas documentés. Des recherches sont nécessaires pour établir le potentiel existant et son évolution probable dans le temps.

Information générale. Pour le cuivre plus particulièrement, des modèles existent cependant pour en évaluer les flux et les stocks de métal sur un territoire donné, mais ils sont peu utilisés étant donné la quantité de données non disponibles (Glöser et al., 2013; Spatari et al., 2005). Quelques indications sont tout de même fournies de manière générale dans la littérature. Depuis 1900, il semblerait que les deux tiers des 550 Mt de cuivre produites soient toujours en utilisation : à 70 % pour des applications électriques et 30 % pour d’autres applications (Glöser et al., 2013; ICA, 2014). Le stock de cuivre équivaldrait à environ de 20 à 25 années de production minière (ICA, 2014).

Il existe également des scénarios évaluant l’évolution du stock de cuivre en utilisation dans le monde pour le prochain siècle (Gerst, 2009). L’étude montre que d’ici 2100 les pays en développement disposeront d’un stock de cuivre en cours d’utilisation environ trois fois plus grand que les pays industrialisés, mais ces derniers maintiendront un stock par habitant deux fois plus élevé. Sans substitution matérielle ou changement technologique, le stock mondial de cuivre en utilisation sera en 2100 à peu près aussi grand que les ressources en cuivre actuellement connues (Gerst, 2009).

Le potentiel des mines urbaines pour la récupération des métaux précieux est particulièrement important; il serait de 40 à 50 fois plus élevé que celui des mines naturelles dont les plus

accessibles ont déjà été exploitées (Schaub, 2014). De plus, la production de métal recyclé est moins énergivore que la production de métal par extraction des ressources primaires. Le potentiel de circularité est d'autant plus important que le taux de recyclage de ces métaux, à partir d'équipements électriques et électroniques, demeure encore très faible. Les enjeux sont de nature technique, puisqu'un ordinateur par exemple, peut contenir jusqu'à 60 matériaux en faible quantité et ayant leur propre chimie (Schaub, 2014). Ainsi, la complexité technique impacte aussi la rentabilité économique. La rentabilité des opérations de recyclages nécessite plutôt des stocks importants et concentrés au même endroit.

Information spécifique au Québec. Étant donné la difficulté de quantifier les stocks de métaux, au Québec spécifiquement, et de manière indépendante des flux de métaux, cette stratégie a été analysée conjointement avec les stratégies portant sur le recyclage du fer (section 5.6), du cuivre (section 5.7) et du lithium (section 5.8), ainsi que la stratégie de déconstruction sélective (section 5.11). Ces stratégies ont d'ailleurs été déclinées en plusieurs sous-stratégies permettant de couvrir la possibilité de récupérer les stocks de métaux dans les équipements de transport (avion, train), les équipements électriques et électroniques, etc.

Par contre, il est difficile d'évaluer le nombre de bâtiments, d'usines, d'éoliennes, de ponts et de lignes de chemin de fer qui sont ou seront laissés à l'abandon sans récupération de métaux. Les promoteurs d'un grand projet sont tenus de gérer de façon responsable la fin de vie de leurs structures. Ces options n'ont pas été quantifiées. De même qu'il est difficile d'évaluer la quantité de câbles souterrains et de tuyauterie au Québec qui ne sera plus utilisée et qui sera abandonnée en raison du coût de leur extraction (Glöser et al., 2013).

Enfin, un des moyens additionnels qui permettrait d'améliorer l'exploitation des mines urbaines serait de limiter l'exportation de métaux sous forme de déchets, débris et alliages. Le Tableau 4-7 présente les exportations mondiales du Québec en déchets, débris de cuivre, et alliage de cuivre. Les principaux destinataires sont les États-Unis, la Chine, l'Europe et l'Inde (Statistique Canada, 2017a).

Tableau 4-7. Exportations de déchets, débris et alliages de cuivre du Québec

kt	2013	2014	2015	2016
Exportations mondiales	44,7	44,2	46,3	37,1

4.3.3 Modélisation technico-économique

Voir les sections 5.6, 5.7, 5.8 et 5.11.

4.3.4 Analyse et discussion

Potentiel de circularité. Certes le potentiel des mines urbaines comme gisements de métaux est très intéressant, et d'autant plus à long terme, mais il est difficile à évaluer. Par ailleurs, les modèles d'estimation des flux et des stocks de cuivre ne sont pas encore abondamment utilisés en raison du manque de données requises (Glöser et al., 2013).

Faisabilité technico-économique. La pertinence économique de cette stratégie, par rapport à l'extraction conventionnelle, reste à démontrer (Geldron, 2012). Plus les techniques de recyclage sont complexes, plus elles sont coûteuses et l'exploitation des gisements urbains de métaux pose de nombreux défis en ce sens: dissémination géographique, composition physico-chimique, évolution des quantités et qualités, etc. (Geldron, 2016). Par contre, le développement

technologique et l'augmentation du coût des métaux pourraient changer la situation, comme c'est devenu le cas pour le pétrole non conventionnel depuis quelques décennies par exemple.

4.4 Stratégie 4- Recyclage et symbiose industrielle

La métallurgie primaire du fer et de l'acier produit des laitiers, aussi appelés des scories, qu'il est possible de valoriser pour d'autres usages, alors que la métallurgie primaire du cuivre produit des boues anodiques contenant des métaux précieux. Le recyclage et les symbioses industrielles avec ces deux sous-produits sont déjà en place au Québec.

4.4.1 Rappel des freins et leviers

L'analyse des freins et leviers, telle que réalisée par Gervais et al (2017), est résumée ci-dessous et dans le Tableau 4-8.

Pertinence. Pour les laitiers, l'enjeu au niveau des symbioses industrielles est principalement économique. En effet, pour en assurer la pertinence, il faut que la transformation des laitiers soit concurrentielle avec le coût de l'enfouissement et ainsi donner une valeur ajoutée au produit. Au niveau des boues anodiques, le secteur de l'affinage fait face à la compétition mondiale. De plus, les boues anodiques sont considérées comme des matières dangereuses, alors leur transport peut être dispendieux et requiert des permis variant selon les législations de chaque pays, ce qui est un enjeu important.

Faisabilité. Cette stratégie est déjà bien implantée. Il s'agit de voir de quelle façon ces pratiques peuvent être renforcées.

État actuel. En général, les aciéries adhèrent aux projets de symbioses industrielles et soutiennent financièrement la recherche et le développement dans ce secteur. Pour les laitiers, plusieurs projets ont été mis en place dans la région de Contrecoeur et de Sorel-Tracy, notamment à l'aide du *Centre de transfert technologique en écologie industrielle* (CTTÉI). En plus d'un projet de séquestration de CO₂, le CTTÉI développe un déglaçant. L'important est de trouver des usages à haute valeur ajoutée. Les symbioses industrielles sont bien implantées dans le secteur des aciéries au Québec et ces pratiques peuvent être encouragées davantage.

Il y a environ 40 affineries de cuivre dans le monde, dont environ 10 font le traitement de leurs boues anodiques, incluant l'affinerie CCR de Montréal-Est qui récupère les métaux précieux selon divers procédés de séparation. L'affinerie reçoit davantage de boues provenant de l'étranger, avec des compositions diverses, ce qui nécessite l'adaptation de ses procédés afin de livrer des produits de qualité.

Tableau 4-8. Freins et leviers – Recyclage et symbiose industrielle

Freins	Leviers
<p>Laitiers</p> <ul style="list-style-type: none"> • Perception négative par rapport à la matière recyclée • Définition de « matière résiduelle » qui limite la valorisation et l'innovation • Défis techniques pour trouver des débouchés • Rentabilité de la symbiose et concurrence avec la matière vierge 	<p>Laitiers</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aciéries : compétition, rentabilité, acceptabilité sociale, GES, débouchés pour les rejets • Démarchage pour attirer des entreprises près des aciéries • Liens de confiance et collaboration entre les entreprises • Investissement dans la R&D

Freins	Leviers
<p>Boues anodiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Normes de transport contraignantes (car considérées comme des matières dangereuses) • Procédés d'électro-affinage et de traitement des boues soumis à des défis à cause de la variabilité des anodes et des boues importées 	<ul style="list-style-type: none"> • Directives pour l'achat de produits à contenu recyclé par les donneurs d'ordre • Sensibilisation des entreprises pour leur faire valoir les sous-produits • Médiateur externe pour convaincre les entreprises de participer à une symbiose • Formation des jeunes • Programme de recrutement de stagiaires dans les aciéries pour travailler sur les résidus <p>Boues anodiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rentabilité souhaitable, liée à la conversion des procédés au gaz naturel par l'hydroélectricité (crédits de carbone) • Avenues réglementaires pour faciliter le transport des boues anodiques et l'obtention de permis d'importation • Investissement dans la R&D

Source : Gervais et al., 2017.

4.4.2 Fiche technico-économique

La revue de la littérature a permis de documenter trois sous-stratégies : la récupération de métaux précieux des boues anodiques de cuivre, la récupération d'énergie thermique à partir des laitiers des aciéries, la capture et la séquestration du CO₂ à partir de laitiers.

4.4.2.1 Récupération des métaux précieux des boues anodiques

Définition du scénario étudié. L'analyse technico-économique de la stratégie porte sur les pratiques existantes de récupération des métaux précieux dans les boues anodiques générées (et importées) à l'affinerie CCR. Cette stratégie ne s'applique, évidemment, qu'au cuivre seulement. À l'affinerie CCR, les boues anodiques sont traitées afin d'en récupérer les métaux précieux tels que l'or, l'argent, le platine et le palladium, ainsi que des sous-produits comme le dioxyde de tellure et le sélénium (Glencore, 2017). L'affinerie CCR traite les boues anodiques produites à l'interne, mais également celles expédiées par d'autres entreprises qui ne disposent pas d'installations, d'équipements et de l'expertise nécessaires. L'affinerie CCR est la seule du genre en Amérique du Nord.

Technologies impliquées. La récupération des métaux précieux dans les boues anodiques et l'élimination des polluants nécessite une étude préalable de caractérisation chimique et minéralogique (Elamari, 1993). À l'affinerie CCR, le procédé de traitement fonctionne de la manière suivante (Glencore, 2017). Tout d'abord, la boue est traitée dans un autoclave. Le tellure obtenu est converti en dioxyde de tellure et vendu sous forme de poudre. Ensuite, la boue est expédiée dans un convertisseur rotatif à soufflage par le haut, afin d'obtenir un alliage de métaux précieux (or, argent, palladium et platine) sous forme de barres d'anodes dorées ainsi qu'une poudre de sélénium vendue sur le marché. L'or et l'argent sont séparés des anodes dorées par électro-affinage et hydrométallurgie, coulés chacun respectivement en lingots de grande pureté, puis vendus. Quant au platine et au palladium restant, ils sont concentrés et le composé est vendu.

Paramètres techniques. La capacité annuelle de production à l'affinerie CCR est de 370 000 t de cuivre, 1 million d'onces d'or et 35 millions d'onces d'argent (Glencore, 2017). Entre 2008 et 2014, l'affinerie a donc produit des cathodes de cuivre à des taux variant entre 71 % et 93 % de sa capacité maximale. La production d'argent s'est maintenue entre 80 % et 88 % de la capacité en 2011 et 2014, alors que la production d'or s'est maintenue autour de 50 % à 57 % pour la même période (Tableau 4-9). Les données de production des différents métaux et de leurs concentrations moyennes proviennent des rapports annuels de la société (Xstrata Copper Canada, 2008; 2011; 2012; Glencore Xstrata, 2013; Glencore, 2015).

Paramètres économiques. La recherche a permis de documenter les dépenses annuelles de l'affinerie CCR (Xstrata Copper Canada, 2008; 2011; 2012) et le prix moyen des métaux récupérés sur le marché (Labbé & Christmann, 2011), et donc de calculer simplement les revenus potentiels. Les investissements initiaux qui ont été nécessaires pour mettre en place toute cette infrastructure de traitement des boues anodiques et de récupération des métaux ne sont pas connus.

Tableau 4-9. Paramètres – Récupération des métaux précieux des boues anodiques

Paramètres techniques	Unité	Constante	2011	2012	2013	2014	Références
Capacité de production à l'affinerie CCR							
Cathode de cuivre (99.99 %)	t	370 000					(Glencore, 2017)
Argent	oz	35 000 000					
Or	oz	1 000 000					
Production à l'affinerie CCR							
Cathode de cuivre (99.99 %)	t		263 967	265 538	298,200	315 000	(Xstrata Copper Canada, 2008; 2011; 2012) (Glencore Xstrata, 2013) (Glencore, 2015)
Dioxyde de tellure	t		45	53 870		20	
Sélénium	t		365	458 775		225	
Argent	oz		28 188 502	30 951 749		28 000 000	
Or	oz		510 396	573 266		500 000	
Platine/palladium	oz		106 559	36 780		155 000	
Sulfate de nickel	t		-	-		3 000	
Rhodium	oz		2 821	2 314		-	
Concentration des métaux produits par l'affinerie CCR							
Cathode de cuivre	% Cu	99,99 %					(Glencore, 2017)
Dioxyde de Tellure	% Te	77,00 %					
Sélénium	% Se	99,50 %					
Argent	% Ag	99,99 %					
Or	% Au	99,99 %					
Platine	% Pt	60 %-64 %					
Palladium	% Pd	25 %-28 %					
Sulfate de nickel	% Ni	21,00 %					
Production à l'affinerie CCR selon la concentration des métaux							
Dioxyde de tellure	t		35	41 480		15	
Sélénium	t		365	458 775		225	
Argent	oz		28 188 502	30 951 749		28 000 000	
Or	oz		510 396	573 266		500 000	
Platine concentré	oz		66 067	22 804		96 100	
Palladium concentré	oz		28 238	9 747		41 075	
Nickel	t		-	-		630	

Paramètres économiques	Unité	Constante	2011	2012	2013	2014	Références
Contribution économique directe de l'affinerie CCR							
Coût des matériaux, biens et services	M\$		\$31,0	\$28,7	-	\$29,8	(Xstrata Copper Canada, 2008, 2011, 2012)
Achat de biens et services régionaux	M\$		\$29,5	\$19,2	-	\$22,6	
Coût des services (énergie, eau, etc.)	M\$		\$15,1	\$13,7	-	\$14,4	
Salaires et avantages sociaux	M\$		\$58,1	\$56,9	-	\$56,3	
Taxes locales	M\$		\$1,8	\$1,6	-	\$1,7	
Investissement en capital	M\$		\$10,7	\$8,6	-	\$8,8	
Autres (dons, formations, etc)	M\$		\$0,2	\$0,2	-	\$0,8	
Total	M\$		\$146,4	\$128,8	\$-	\$134,4	
Prix des métaux							
Cathode de cuivre (99,99 %, grade A)	\$/t	\$8 383					(Labbé & Christmann, 2011)
Or	\$/oz	\$1 357					
Argent	\$/oz	\$25					
Platine	\$/oz	\$1 692					
Palladium	\$/oz	\$636					
Sélénium	\$/kg	\$100					
Tellure	\$/kg	\$241					
Nickel	\$/t	\$23 348					
Rhodium	\$/oz	\$2 293					
Revenu annuel provenant des métaux récupérés							
Tellure	M\$		\$8,4	\$9 996,7		\$3,7	
Sélénium	M\$		\$36,5	\$45 877,5		\$22,5	
Argent	M\$		\$704,7	\$773,8		\$700,0	
Or	M\$		\$692,6	\$777,9		\$678,5	
Platine concentré	M\$		\$42,0	\$14,5		\$61,1	
Palladium concentré	M\$		\$18,0	\$6,2		\$26,1	
Nickel	M\$		\$-	\$-		\$14,7	
Total	M\$		\$1 502,1	\$57 446,6		\$1 506,7	
Sommaire économique							
Gain net annuel provenant de la récupération de métaux	M\$		\$1 355,7	\$57 317,7		\$1 372,2	
Gain net annuel par tonne de cuivre produit	\$/t		\$5 135,9	\$215 855,1		\$4 356,3	

4.4.2.2 Récupération d'énergie thermique des laitiers

Définition du scénario étudié. L'analyse technico-économique évalue la faisabilité de récupérer l'énergie thermique des laitiers d'aciéries afin de produire de l'électricité, l'utilisation des laitiers à d'autres fins étant déjà pratique courante. La stratégie concerne donc uniquement le fer. Il y a plusieurs types de laitiers d'aciéries : ceux provenant des fours à arc électrique et ceux provenant des convertisseurs à oxygène. Il y a aussi les laitiers provenant de hauts fourneaux lors de la production de fer. Les températures respectives sont (Alvarez et al., 2012; Chartrand, 2016) : 1 600 °C (fours à arc électrique), 1 530 à 1 630 °C (convertisseurs à oxygène), 1 500 à 1 600 °C (haut fourneau). L'analyse d'un cas spécifique, soit la production d'électricité à partir de l'énergie thermique récupérée des laitiers de haut fourneau produits aux usines d'Arcelor-Mittal en Espagne (Alvarez et al., 2012), a été appliquée aux laitiers issus des fours à arc électrique au Québec. Puisque les températures sont similaires, l'hypothèse est que le cas de l'Espagne pourrait s'appliquer au Québec.

Technologies impliquées. La production d'électricité à partir d'énergie thermique récupérée est réalisée par une centrale à vapeur de cycle Rankine, une technologie déjà utilisée pour la production d'électricité à partir de biomasse (Alvarez et al., 2012).

Paramètres techniques. La production de laitiers provenant des fours à arc électrique au Québec peut être calculée à l'aide d'un simple coefficient provenant de la littérature (Tableau 4-10). Alors que Alvarez et al. (2012) utilisent la valeur de 0,118 t de laitier par t d'acier, une autre source fournit une estimation plus élevée de 0,240 t de laitier par t d'acier (Remus et al., 2013). Cette valeur donne des quantités plus compatibles avec les données fournies par Arcelor Mittal (2015).

Ensuite, la technologie de production d'électricité est caractérisée par le biais des paramètres suivants (Alvarez et al., 2012) : une capacité calorifique des laitiers de 0,98 MJ/t * Δ C°, une durée de vie de 15 ans, un facteur de capacité de 88 % (7 700 h/an), un taux d'autoconsommation de 10 %.

Paramètres économiques. Le coût d'investissement de 2 890 \$/kW et les coûts d'opération de 16,7 \$/MWh ont été estimés à partir des informations provenant de la littérature également (Alvarez et al., 2012). De plus, l'adaptation de l'ensemble des coûts au cas du Québec, ainsi que des calculs supplémentaires hors modèle, avec possibilité de vendre l'électricité à Hydro-Québec au tarif de 10,7 ¢/kWh, soit le prix moyen de l'électricité achetée à des producteurs privés en 2015 (Couture, 2015) démontre que l'utilisation des laitiers à des fins énergétiques engendre des profits nets de 1,88 \$/t d'acier produit si la technologie est utilisée à pleine capacité.

Tableau 4-10. Paramètres – Récupération d'énergie thermique des laitiers

Variables évolutives	Unité	Constante	2011	2035	2050	Références
Production d'acier et de laitier au Québec						
Acier	Mt		1,33	3,64	6,63	NATEM
Laitier provenant de fournaise à arc électrique	Mt		0,32	0,87	1,59	
Paramètres techniques	Unité	Constante	2011	2035	2050	Références
Production de laitier						
Quantité de laitier produite par tonne de fer	t laitier/t fer	0,300				(Alvarez et al., 2012)
Quantité de laitier produite par tonne d'acier	t laitier/t acier	0,40				
Production mondiale annuelle de laitiers (2010)	Mt	476				(Remus et al., 2013)
Différence thermique du procédé de récupération	°C	800				
Capacité calorifique des laitiers	MJ/t acier °C	0,98				
Usine de récupération thermique des laitiers						
Durée de vie	an	15				(Alvarez et al., 2012)
Heures des opérations	h/an	7 700				
Puissance électrique produite	MW	7,7				
Production d'énergie annuelle	MWh/an	59 290				(Alvarez et al., 2012)
Taux d'autoconsommation électrique de l'usine	%	10 %				
Énergie totale disponible par année	MWh/an	53 361				
Paramètres économiques	Unité	Constante	2011	2035	2050	Références
Coût d'investissement	\$/kW	\$2 890,00				(Alvarez et al., 2012)
Coûts d'opération fixes & variables	\$/MWh	\$16,67				

4.4.2.3 Séquestration du CO₂ à partir de laitiers

Définition du scénario étudié. L'analyse technico-économique évalue la faisabilité de séquestrer le CO₂ issu de la combustion industrielle à l'aide des laitiers générés par les aciéries. D'une part, le scénario proposé est inspiré d'un cas d'application visant la séquestration de CO₂ à partir de résidus d'anciennes mines d'amiante à Thetford-Mines et Asbestos au Québec, soit 2000 Mt de résidus générés pendant la période 1970-1980 (Pasquier, 2014). Cette région du Québec renferme d'importantes quantités de résidus miniers à une distance raisonnable de grands émetteurs, d'où la pertinence de cette stratégie. Les résidus de serpentinite sont concassés, broyés, séparés à l'ancienne mine. Ensuite, les résidus sont transportés sur 200 km par train vers l'usine émettrice de CO₂, une cimenterie. La vente du carbonate obtenu représente un revenu financier important.

D'autre part, les paramètres technico-économiques ont été ajustés à l'aide de publications plus ciblées sur l'utilisation des laitiers, mais non spécifiques au Québec (Huijgen et al., 2005; 2007). La stratégie est donc ici appliquée seulement à la filière du fer. Les quantités disponibles sont beaucoup moins importantes que dans le cas des résidus de mines d'amiante.

Technologies impliquées. La technologie en question concerne la carbonatation minérale où l'on fait réagir du CO₂ avec un métal alcalino-terreux pour former un solide qui renfermera du CO₂ (Olajire, 2013). On évite ainsi de rejeter du CO₂ dans l'atmosphère. Pour créer un matériau solide dans le cadre de la carbonatation minérale, le CO₂ doit en général réagir avec une substance qui est riche en calcium. Il est donc possible d'utiliser tout type de laitiers, car ils possèdent cette caractéristique (Huijgen et al., 2005).

Les laitiers issus des fours à arc électriques utilisés au Québec sont particulièrement bien documentés : ils peuvent être entièrement utilisés à cet effet (Bonenfant et al., 2008). Parmi les intrants de la technologie, il y a donc le CO₂ issu de la combustion d'énergie dans les opérations industrielles, ainsi que des résidus miniers tels que les laitiers. La technologie génère ensuite du carbonate de magnésium et/ou du sable de silice, soit deux matériaux solides au sein desquels est emprisonné le CO₂. Une fois sous forme de carbonate, le CO₂ peut être stocké en le retournant à la mine d'où est extrait le matériel réactif (Pasquier, 2014). Les matériaux solides peuvent aussi être utilisés dans la construction : ciment, briques, plaque de plâtre, etc. (Schiffman, 2016). Cette dernière option a été considérée dans l'analyse.

Paramètres techniques. La production de laitiers provenant des fours à arc électrique au Québec peut être calculée à l'aide d'un simple coefficient provenant de la littérature : 0,118 t de laitier par t d'acier (Alvarez et al., 2012). Une autre source fournit une estimation plus élevée de 0,240 t de laitier par t d'acier (Remus et al., 2013). Cette valeur donne des quantités plus compatibles avec les données fournies par Arcelor Mittal (2015). Ensuite, la technologie de carbonatation minérale est caractérisée par le biais des paramètres suivants (Tableau 4-11): une capacité maximale de séquestration de 0,25 tCO₂/t de laitiers (Bonenfant et al., 2008), une durée de vie de 15 ans, un facteur de capacité de 91,3 % (8 000 h/an) et une consommation d'énergie électrique de 337 kWh/tCO₂ séquestré. La capacité maximale de séquestration est similaire au cas des résidus des mines d'amiante où le taux est de 0,24 tCO₂/t de roches (Pasquier et al., 2016).

Paramètres économiques. Le coût d'investissement d'environ 19,5 M\$ et les coûts d'opération de 32,40 \$/tCO₂ séquestré (dont environ 50 % pour la minéralisation) ont été estimés à partir des informations provenant de la littérature pour une usine type pouvant traiter 15 t/h de laitiers et séquestrer 120 ktCO₂/an (Huijgen et al., 2007). Le prix du carbonate de magnésium obtenu pour la vente est fixé à 258,50 \$/t (Pasquier et al., 2016). Cela représente la situation idéale (Pasquier, 2014). Les coûts de transport ne sont pas pris en compte selon l'hypothèse que les laitiers servent

à séquestrer les émissions générées à proximité. Quant au prix de la tonne de CO₂, les prix planchers associés à l'existence du marché du carbone sont déjà considérés par le biais d'une taxe dans tous les scénarios (section 3.4). Ces prix pourraient être plus élevés dans un contexte avec cibles ambitieuses pour la réduction des GES.

Tableau 4-11. Paramètres – Séquestration du CO₂ à partir des laitiers

Variables évolutives pour le Québec	Unité	Constante	2011	2035	2050	Références
Production d'acier et de laitier au Québec						
Acier	Mt		1,33	3,64	6,63	NATEM
Laitier provenant de fournaise à arc électrique	Mt		0,32	0,87	1,59	
Paramètres techniques						
Unité	Constante	2011	2035	2050	Références	
Production de laitier						
Quantité de laitiers produits par tonne d'acier	t laitier/t acier	0,240				(Remus et al., 2013)
Usine de récupération thermique des laitiers						
Durée de vie	an	10				(Pasquier et al., 2016)
Heures des opérations	h/a	8 000				
Efficacité de séquestration	tCO ₂ /t de laitier	0,250				(Bonenfant et al., 2008)
Consommation d'énergie	kWh/tCO ₂	337				
Paramètres économiques						
Unité	Constante	2011	2035	2050	Références	
Cas des résidus de mines d'amiante						
Coût d'investissement	\$/tCO ₂	\$33,84				(Pasquier et al., 2016)
Coûts d'opération fixes	\$/tCO ₂	\$9,40				
Coûts d'opération variables (inc énergie) - Min	\$/tCO ₂	\$92,12				
Coûts d'opération variables (inc énergie) - Max	\$/tCO ₂	\$146,64				
Total - maximum		\$189,88				
Revenu de la vente du carbonate de magnésium	\$/tCO ₂	\$583,74				(Pasquier et al., 2016)
Revenu de la vente de la portion magnétique	\$/tCO ₂	\$11,28				
Prix actuel du CO ₂	\$/tCO ₂ -eq	\$10,00				
Profit par tonne d'acier produit	\$/tCO ₂	\$605,02				
Cas des laitiers						
Coût d'investissement	M\$	\$19,50				(Huijgen et al., 2007)
Coûts d'opération fixes & variables (exc. énergie)	\$/tCO ₂	\$36,40				
Prix du carbonate de magnésium	\$/tCO ₂	\$258,50				

4.4.3 Modélisation technico-économique

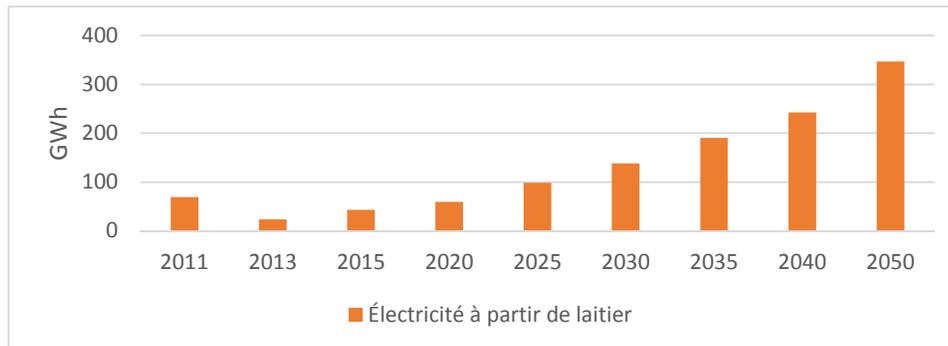
4.4.3.1 Récupération de métaux précieux des boues anodiques

Cette stratégie n'a pas été modélisée pour des raisons de manques de données. L'analyse de la possibilité d'investir dans des capacités additionnelles de traitement des boues anodiques pour augmenter la production des métaux précieux nécessite de mieux connaître : les sources d'approvisionnement des boues anodiques, les quantités et leurs compositions, les coûts de transport et les coûts d'investissement additionnels pour l'augmentation de la capacité de traitement.

4.4.3.2 Récupération d'énergie thermique des laitiers

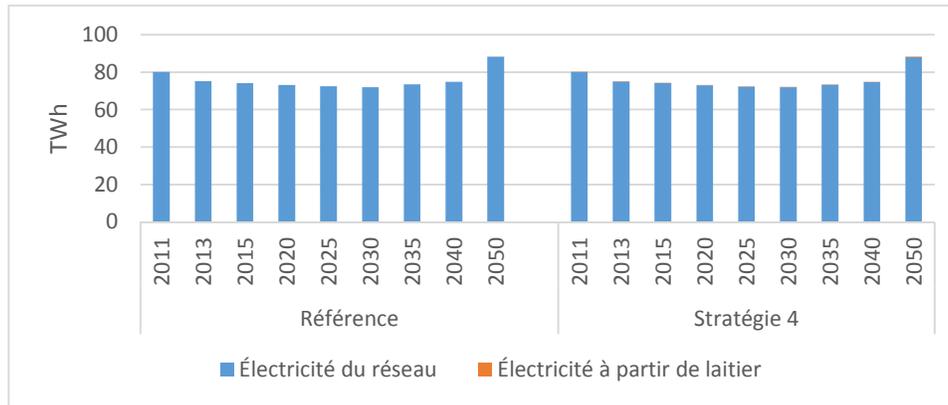
Cette stratégie a été testée dans le modèle NATEM, où un scénario incluant la possibilité d'investir dans la technologie de production d'électricité à partir des laitiers d'aciéries pour l'autoconsommation dans le secteur industriel, a été comparé au scénario de référence (voir l'Annexe C pour plus de détails). La technologie fait partie de la solution optimale où les investissements nécessaires sont réalisés pour la production d'électricité à partir de laitier au maximum du potentiel disponible sur tout l'horizon temporel (Figure 4-2). La courbe reflète l'évolution de la demande pour le fer et l'acier et donc de la quantité de laitiers disponible.

Figure 4-2. Électricité produite à partir de laitier et consommée dans le secteur industriel



Cependant, les quantités sont négligeables en regard du total d'électricité consommée dans le secteur industriel (Figure 4-3). La quantité totale d'électricité consommée diminue dans le temps avec l'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés jusqu'à ce que l'augmentation de la demande devienne plus importante que ces gains à partir de 2040. Les impacts sur le système énergétique et les émissions de GES sont donc négligeables. La modélisation ne tient pas compte de pertes de revenus associées à la vente ou l'utilisation des laitiers pour d'autres usages.

Figure 4-3. Source de l'électricité consommée dans le secteur industriel



4.4.3.3 Séquestration du CO₂ à partir de laitiers

Cette stratégie n'a pas été modélisée. Le modèle nécessiterait un certain nombre de changements avant de pouvoir intégrer cette option. Cependant, il est possible de calculer les quantités maximales de CO₂ pouvant être séquestrées à partir des laitiers : approximativement de 80 kt CO₂ actuellement jusqu'à 400 kt CO₂ en 2050.

4.4.4 Analyse et discussion

4.4.4.1 Récupération métaux précieux des boues anodiques

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

Faisabilité technico-économique. Il est reconnu que l'électroaffinage du cuivre, permettant d'obtenir des cathodes pures à 99.99 %, conduit à la formation de boues anodiques bénéficiant d'un intérêt économique pour leur contenu en métaux précieux (Elamari, 1993). À partir des dépenses annuelles de l'affinerie CCR (Xstrata Copper Canada, 2008; 2011; 2012) et du prix moyen des métaux récupérés sur le marché (Labbé & Christmann, 2011), il est possible de voir par un calcul très simple que cette activité est rentable. En effet, le prix de l'or et de l'argent fait en sorte qu'un revenu important peut être obtenu avec la vente des quantités récupérées. Ce calcul ignore cependant les investissements initiaux qui ont été nécessaires pour mettre en place toute cette infrastructure de traitement des boues anodiques et de récupération des métaux. Ces informations sont manquantes. L'affinerie CCR se démarque d'autant plus par sa capacité à traiter des boues complexes qui leur assure une certaine rentabilité par rapport aux concurrents.

Autres facteurs. Les boues anodiques sont considérées comme des matières dangereuses, ce qui complique la gestion de toutes nouvelles sources d'approvisionnement.

4.4.4.2 Récupération d'énergie thermique des laitiers

Potentiel de circularité. De même, cette stratégie ne contribue pas directement à la circularité du fer lui-même, mais elle favorise un meilleur rendement de l'industrie. Le potentiel est limité par la quantité de laitiers produits ainsi que le faible taux de récupération de l'énergie, estimé en moyenne à 0,26 GJ/t d'acier produit. Le potentiel énergétique mondial des laitiers des aciéries est estimé à 370 PJ/an. Par comparaison, cela représente environ la moitié de la production annuelle du Québec en électricité (autour de 760 PJ ou 210 TWh). De plus, la pertinence de réduire les GES est moindre au Québec, où l'électricité produite est déjà renouvelable.

Enfin, plusieurs usages sont en compétition pour les laitiers (bien que la modélisation n'ait pas permis de mesurer les effets de cette compétition sur les autres usages). ArcelorMittal (2015) recycle déjà presque la quasi-totalité des nombreux coproduits issus de leurs opérations dont les laitiers qui peuvent être réutilisés pour construire des routes, produire des engrais et du verre. Les complexes sidérurgiques de Contrecoeur et d'Hamilton ont produit environ 0,74 Mt de laitiers en 2015 dont 99 % sont recyclés (ArcelorMittal, 2015). À l'échelle mondiale, ArcelorMittal (2014) a réutilisé 18 Mt de laitiers dans leurs opérations et vendu 10 Mt de laitiers à l'industrie du ciment annuellement depuis 2012.

Faisabilité technico-économique. La récupération d'énergie des laitiers d'aciérie ne constitue pas une pratique courante en raison des difficultés de mise en œuvre et des perspectives économiques peu intéressantes, mais l'augmentation de la demande d'électricité et les incitatifs pour une production à partir des énergies renouvelables pourraient globalement contribuer à l'essor de cette filière dans les prochaines années. La société Éco-Tech Ceram a par ailleurs développé un système de stockage d'énergie thermique fonctionnant à partir d'une pile rechargeable de chaleur où des céramiques issues de la valorisation de déchets sont utilisées pour stocker et restituer la chaleur (Gervais et al., 2016).

L'étude de faisabilité pour les usines d'Arcelor-Mittal en Espagne a démontré qu'avec une capacité de traitement de 7,7 MW, le projet était viable économiquement pour les producteurs. De plus, l'adaptation de l'ensemble des coûts au cas du Québec, avec possibilité de vendre l'électricité à Hydro-Québec, démontre que l'utilisation des laitiers à des fins énergétiques peut engendrer des profits nets. Par contre, au Québec, où les tarifs d'électricité sont peu élevés et l'électricité déjà renouvelable, il y a cependant moins de valeur ajoutée.

Autres facteurs. Les laitiers ne peuvent pas être transportés sur de longues distances, car leur température diminuerait et ils ne seraient plus exploitables. Cette technologie doit donc se situer sur les lieux de la métallurgie primaire, et par conséquent, sa taille sera limitée par les capacités des aciéries individuelles.

4.4.4.3 Séquestration du CO₂ à partir de laitiers

Potentiel de circularité. De même, cette stratégie ne contribue pas directement à la circularité du fer lui-même, mais elle favorise un meilleur rendement de l'industrie.

Par contre, cette stratégie est intéressante dans la mesure où elle peut contribuer à la diminution des émissions de GES du Québec. Dans les cas des anciennes mines d'amiante, les 2 000 Mt de résidus générés pendant la période 1970-1980 permettraient de séquestrer 625 MtCO₂ (Pasquier, 2014). Par comparaison, les émissions industrielles provenant de la combustion d'énergie sont d'environ 11 Mt, dont moins de 2 Mt pour les trois filières étudiées : fer, cuivre, lithium. Le potentiel est donc moins important pour ce type de résidus. Cependant, le potentiel est limité par la quantité de laitiers produits.

Faisabilité technico-économique. Dans le cas des résidus de mine d’amiante, l’étude de faisabilité a démontré qu’un tel projet était rentable, puisque la quantité de résidus est importante et que la vente du carbonate de magnésium représente un revenu financier important (Pasquier, 2014). Certes, les coûts d’opération varient passablement selon le mode de transport et le type d’énergie : les coûts sont moins élevés si la roche est transportée par train plutôt que par camion. Dans tous les cas cependant, les opérations sont rentables.

Dans le cas des laitiers, l’avantage est dû au fait que les laitiers sont disponibles à proximité de la source émettrice de CO₂, ce qui minimise les coûts d’exploitation. De plus, le Québec dispose de source d’électricité à faibles coûts et d’un prix sur le carbone.

Un autre cas documenté sur l’intégration de la carbonatation aux opérations d’une mine de Nickel en Colombie-Britannique montre que la stratégie rentabilise les coûts d’extraction. Les matières premières du procédé de séquestration sont les résidus miniers réactifs, des résidus silicatés riches en magnésium. Un apport constant en CO₂, provenant des émissions des procédés miniers, d’une source extérieure via un pipeline, ou d’une combinaison des deux est nécessaire.

4.5 Stratégie 5- Fabrication additive

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

4.5.1 Rappel des freins et leviers

L’analyse des freins et leviers, telle que réalisée par Gervais et al (2017), est résumée ci-dessous et dans le Tableau 4-12.

Pertinence. La fabrication additive devrait entraîner de profonds bouleversements dans le secteur manufacturier. Elle permet d’éliminer les joints et soudures, réduisant ainsi le nombre et le poids des pièces. Cela contribue ainsi à réduire la consommation de carburant, et conséquemment, les émissions de GES. La fabrication additive devrait contribuer à réduire le transport lui-même puisque la production pourrait alors être délocalisée et située près des marchés.

Faisabilité. Les matériaux disponibles pour l’impression 3D à l’heure actuelle comprennent, par exemple, l’acier outil, l’acier inoxydable, l’inconel (alliage fer-nickel) et le cuivre. Cependant, l’éventail de matériaux disponibles évolue rapidement et cette liste n’est pas forcément exhaustive. Le procédé ne serait pas encore adapté au lithium. Le titane, par ailleurs, est beaucoup utilisé dans l’impression 3D.

La fabrication additive est prometteuse, mais c’est tout le modèle d’affaires des entreprises qui serait appelé à changer. Il s’agit donc d’une stratégie dont le développement du plein potentiel pourrait s’étirer sur de nombreuses années. À long terme, il est possible de penser que les entreprises ne vendront possiblement plus la pièce, mais le fichier numérique du design de la pièce. Elles pourraient ainsi inviter leurs clients, ayant acheté le fichier numérique d’origine, à se diriger vers des centres de services d’impression certifiés afin de garantir la qualité de la pièce.

État actuel. Le marché de l’impression 3D évolue de façon exponentielle. Il n’y a pas encore de grand écosystème d’impression 3D au Québec; le secteur est encore en émergence. En 2014, 0.7 % des entreprises en générale utilisaient la fabrication additive et l’impression 3D pour les métaux (ISQ, 2016a). La technologie est toutefois prometteuse et présente des avantages

compétitifs dans certains secteurs au Québec. En 2014, le Réseau Québec-3D a été créé à cet effet (Réseau Québec-3D, 2015). Il est coordonné par le *Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ)* qui combine l'expertise des divers intervenants. Les secteurs les plus avancés en termes d'impression 3D métallique de pièces finies sont l'aéronautique, l'outillage et le médical.

Tableau 4-12. Freins et leviers – Fabrication additive

Freins	Leviers
<ul style="list-style-type: none"> • Normalisation et certification • Coût élevé des équipements d'impression • Difficulté pour les entreprises d'obtenir du financement • Pas adaptée à toutes les applications et à la production de masse • Pas adapté aux pièces de grande taille • Limites de répétabilité • Manque de main-d'œuvre spécialisée • Ignorance des entreprises sur l'impression 3D de métaux • Inertie dans le secteur manufacturier • Perte d'emplois (ou du moins, modification des compétences recherchées) 	<ul style="list-style-type: none"> • Formation académique (ex. : bacc. en mécatronique) et continue, incitatifs aux entreprises pour la formation • Programmes de financement ou incitatifs fiscaux pour l'achat d'imprimantes 3D • Incitatifs pour les entreprises : pièces complexes et personnalisées, réduction du cycle de développement d'un produit, réduction de matières et de rejets, pas d'assemblage, allègement des pièces, etc. • Choix de matériaux imprimables à accroître • Diminution du coût des équipements • Adaptation des normes • Mobilisation par secteur d'activités s'appuyant sur des cas appliqués

Source : Gervais et al., 2017.

4.5.2 Fiche technico-économique

Définition du scénario étudié. L'analyse technico-économique de la stratégie porte plus spécifiquement sur le rôle de la fabrication additive dans le secteur de l'aéronautique. En effet, les activités de recherche et développement au sein de l'industrie aéronautique (et de la défense) sont axées sur l'amélioration continue de l'efficacité des avions (y compris par la réduction de poids), ainsi que la réduction de la pollution atmosphérique et acoustique. Ces objectifs nécessitent des pièces qui sont géométriquement complexes et fabriquées en petites quantités avec des coûts unitaires élevés (US DOE, 2015). Pour ces raisons, l'industrie aéronautique est particulièrement bien positionnée pour l'adoption anticipée de technologies de fabrication additives qui ont déjà commencé à pénétrer ce marché.

Technologies impliquées. L'impression 3D, appelée également fabrication additive, consiste à former un objet en y déposant de la matière par couches successives. Cela s'oppose aux technologies conventionnelles qui sont basées sur la soustraction de matière (CAR, 2016). Le développement technologique a progressé rapidement dans les dernières années et couvre maintenant une gamme plus large d'applications industrielles (US DOE, 2015). Il existe une très grande variété de technologies différentes pour différents matériaux (métaux, plastiques, etc.); pour les métaux, notons la fusion sur lit de poudre, le dépôt de matériaux et fusion par énergie directe et la stratification (Réseau Québec-3D, 2015). La fabrication additive est appropriée pour les produits de faibles volumes, et en particulier ceux à géométrie complexe. Elles sont utilisées dans des secteurs aussi variés que : aéronautique, défense, automobile, médical, et électronique. (US DOE, 2015). Les avantages sont nombreux (US DOE, 2015):

- Réduction du besoin de matière (jusqu'à 90 %) grâce à la fabrication « couche par couche ». De plus, il n'y a plus besoin de moules et outillages. Enfin, la fabrication étant totalement automatique, l'erreur humaine n'y cause plus de pertes de matière.
- Allègement de certains objets : une nouvelle forme plus complexe et légère permet parfois de remplir les mêmes fonctions qu'initialement.
- Souplesse de production permettant de localiser la production dans des endroits stratégiques – proches des ressources ou des clients - et de répondre rapidement à la demande. Les besoins de stockage et les pertes qui en découlent sont alors réduits.
- Réduction de la consommation d'énergie en réduisant les étapes de fabrication – une seule étape est nécessaire – et en utilisant moins de matière.
- Innovations rendues possibles grâce à davantage de liberté de fabrication vis-à-vis des contraintes auxquelles est soumise la fabrication conventionnelle. Les produits peuvent avoir une performance accrue, diminuant ainsi le besoin d'autres produits.
- Réduction des coûts de production, simplification de la chaîne de production et du contrôle, et gains de temps concernant la mise sur le marché.

Paramètres techniques. Une étude de cas rapporte les gains en énergie et émissions de GES associés au passage à la fabrication additive pour les composantes métalliques légères des appareils dans l'industrie aéronautique américaine à l'horizon 2050 (Huang et al., 2016). Il n'a pas été possible de trouver un exemple bien documenté de fabrication 3D utilisant le fer, le cuivre ou le lithium. Les paramètres de l'étude sont présentés au Tableau 4-13 :

- De 9 % à 17 % de la masse d'un avion peut être fabriquée par impression 3D et de 0,4 % à 1 % concerne des composants en acier. Il aurait été intéressant de documenter un exemple où la proportion de métal est plus importante, mais cela n'a pas été possible.
- La réduction totale de masse réalisable sur un avion de 40 622 kg en utilisant la fabrication additive varie entre 1 650 et 2 850 kg, soit une réduction de 4,1 % à 7,0 %.
- La fabrication additive permet de générer des économies d'énergies de 2 592 à 11 170 GJ par avion.
- La diminution de masse de 100 kg d'un avion permet des économies annuelles en consommation de carburant de 0,45 à 0,67 TJ par année.
- Appliquée à la flotte américaine, l'étude montre des économies d'énergie annuelles en 2050, de 16 PJ (adoption lente) à 173 PJ (adoption rapide) (Huang et al., 2016).

Un autre cas d'application simple concerne l'optimisation du poids des boucles de ceintures d'avion par la fabrication additive (US DOE, 2015) :

- Une boucle d'acier classique pèse 0,15 kg (ou 0,12 kg en aluminium), alors qu'une boucle en titane conçue avec la fabrication additive pèse 0,07 kg, une réduction de 55 %.
- Pour un Airbus 380 avec 853 sièges, cela entraînerait une réduction de 72,6 kg.
- Sur la durée de vie de l'avion (30 ans), 3,3 millions de litres de carburant pourraient être économisés. Cette économie a été calculée en supposant une économie de 5 390 gallons par livre-mille éliminée (une livre correspond à environ 0,45 kg; un mille à 1,6 kilomètre et 1 gallon à 3,79 litres).

Une autre étude de cas montre comment les composants aérospatiaux conçus par fabrication additive ont un impact énergétique, et ce, pendant de nombreuses années. Plus spécifiquement, il s'agit des supports utilisés dans les avions pour attacher les structures dans les cuisines, les toilettes, etc. La production optimisée d'un support se traduit par une réduction de poids de 65 %, et, donc, des économies d'énergie significatives.

Tableau 4-13. Paramètres – Fabrication additive dans l’industrie aéronautique américaine

Paramètres techniques	Unité	Aluminium		Titane		Nickel		Acier		Total		Référence
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Poids moyen d'un avion	kg									40 622		
Matière remplaçable dans un avion	kg	1 590	2 260	1 070	2 290	980	1 960	140	280	3 780	6 790	
Réduction de masse	kg	880	1 240	380	820	340	690	50	100	1 650	2 850	(Huang et al., 2016)
Réductions d'énergie du berceau à la gate	GJ/avion	240	1 660	1 590	5 120	760	4 280	2	110	2 592	11 170	
Réduction annuelle de la consommation de carburants	TJ/100kg									0,45	0,67	
Paramètres économiques	Unité	Aluminium		Titane		Nickel		Acier		Total		Référence
Coût de production d'un avion	M\$									\$265		(Combiér, 2017)
Économies avec la fabrication additive	M\$									\$3		

Paramètres économiques. L'étude citée en exemple n'aborde pas les coûts de la fabrication additive (Huang et al., 2016). Cependant, des informations de nature économique variées ont été recensées dans la littérature. Les coûts peuvent donc être difficilement attribuables à une entreprise ou à un projet en particulier, puisque les pièces sont souvent fabriquées par des sous-traitants. Il est donc difficile d'avoir une vue d'ensemble des coûts. En raison de la complexité de la mesure des coûts de fabrication des additifs, les études actuelles sont limitées dans leur portée. Beaucoup d'études actuelles examinent la production de pièces isolées (Thomas & Gilbert, 2014).

Un document regroupe des analyses économiques comparatives réalisées sur différentes pièces et il en résulte que l'investissement pour une machine est d'environ 500 000\$ et qu'elle peut fonctionner 4 500 h/an, soit 51,4 % du temps (Thomas & Gilbert, 2014). De plus, la matière première utilisée, comme les poudres métalliques, peut coûter 10 fois le prix du métal conventionnel (Thomas & Gilbert, 2014).

Par ailleurs, la littérature rapporte une économie de 2 à 3 M\$US pouvant être réalisée sur la production de chaque 787 Dreamliner de Boeing d'ici 2018 (Combiar, 2017). Alors que chaque avion coûte environ 265 M\$ à produire, ce sont des économies de 0,8 % à 1,1 %.

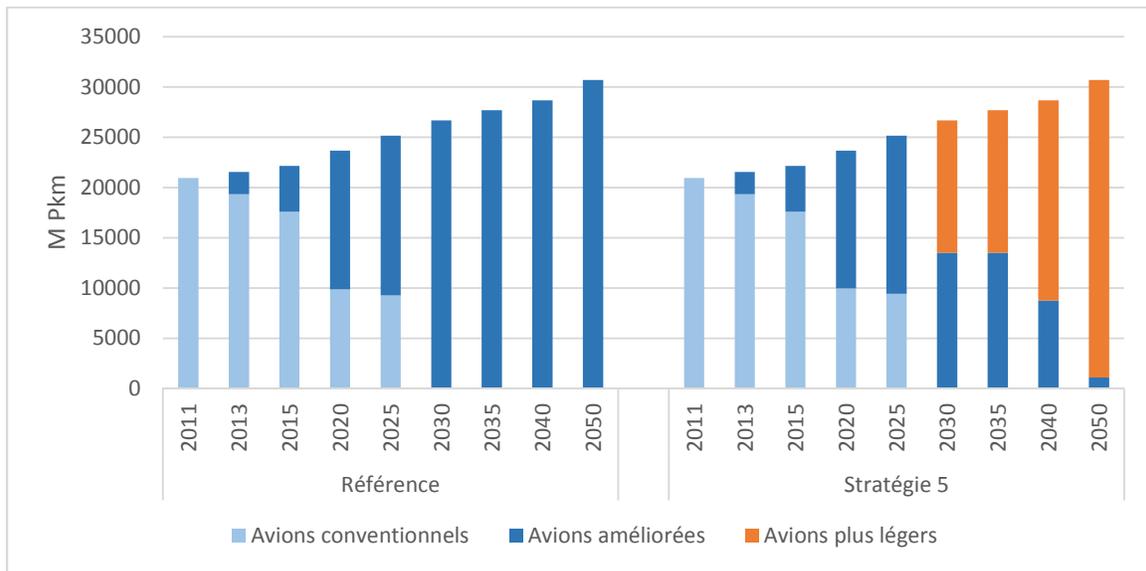
Un autre cas étudié permet de démontrer la faisabilité économique de cette stratégie: l'évaluation du potentiel de la fabrication additive pour les monte-charges utilisés dans l'industrie automobile (CAR, 2016). Le scénario compare la fabrication de 88 systèmes de levier (*lifters*) nécessaires pour fabriquer une berline à quatre portes. Alors qu'il en coûte 168 960\$ pour fabriquer les composantes des 88 systèmes de leviers, l'impression 3D permet de ramener le coût à 35 200\$, des économies substantielles provenant surtout des coûts de main-d'œuvre (CAR, 2016). De plus les économies s'additionnent avec le nombre de modèle d'automobiles fabriquées. Ce scénario suppose que l'impression 3D est un service acheté à un tiers et non un investissement à l'interne.

4.5.3 Modélisation technico-économique

Une version plus simple de cette stratégie a également été testée dans le modèle NATEM, où un scénario incluant la possibilité d'investir dans des avions plus légers et économes en carburant a été comparé au scénario de référence. La base de données du modèle contient déjà des modèles futurs d'avions plus économes en carburant, jusqu'à 25 % comparativement aux modèles actuels, dû à plusieurs facteurs, dont l'amélioration de l'aérodynamisme. L'hypothèse est qu'une amélioration additionnelle (arbitraire) de 20 % peut être obtenue avec la réduction du poids de l'avion en lien avec l'utilisation de pièces issues de la fabrication additive, à un coût de fabrication égal à celui des avions les plus performants. Plus de recherches seraient nécessaires afin de déterminer l'amélioration maximale de l'efficacité énergétique qu'il serait possible d'envisager à l'horizon 2030 en combinant diverses options, soit de déterminer jusqu'à quel point les impacts de ces mesures sont cumulatifs.

Dans la solution optimale, les avions plus légers remplacent progressivement les avions conventionnels, ainsi que les avions dont l'aérodynamisme a été amélioré à partir de 2030 (date à laquelle elles deviennent disponibles sur le marché) pour satisfaire la demande de transport domestique et internationale de passagers (Figure 4-4). Cela implique pour le Québec une réduction de la consommation annuelle de carburant de 2,6 PJ en 2030 et de 4,7 PJ en 2050, ainsi qu'une réduction des émissions de GES de 180 ktCO₂-eq en 2030 et 336 ktCO₂-eq en 2050. De plus, le modèle ne tient pas compte des économies d'énergies générées lors de la fabrication additive des pièces.

Figure 4-4. Technologies utilisées pour satisfaire la demande de transport aérien des passagers



Ces résultats correspondraient à des économies potentielles annuelles, sur la période 2030-2050 de 238 t à 435 t d'aluminium de 157 t à 188 t de titane, de 133 t à 168 t de nickel et de 19 t à 25 t d'acier.

Le potentiel de cette stratégie semble donc important, mais il est difficile de mesurer l'impact directement sur les activités d'extraction du fer au Québec étant donné la grande variété de secteurs, de pièces et de compositions qu'il est possible de considérer. Il faudrait de plus établir le lien avec les quantités de métaux contenu dans ces pièces et déterminer leur provenance afin de pouvoir faire un lien avec les activités d'extraction du Québec. De plus, il est difficile de réconcilier les différentes périodes où le minerai est extrait, où les avions sont fabriqués et où les économies d'énergie sont réalisées (sur toute la durée de vie de l'avion).

4.5.4 Analyse et discussion

Potentiel de circularité. Alors que le potentiel de circularité réel de cette stratégie reste à démontrer, il demeure que la fabrication additive constitue un secteur en plein développement. La croissance attendue dans ce secteur à l'échelle mondiale est très importante, alors il y a des raisons de penser que cette tendance touchera également le Québec, avec un impact potentiel pour le secteur des métaux. En effet, seulement 0,7 % des entreprises en général utilisaient la fabrication additive et l'impression 3D pour les métaux en 2014 (ISQ, 2016a). Par comparaison, ce taux d'utilisation pour les plastiques est de 1,4 %. Pour les métaux, comme pour les plastiques, ces approches sont jusqu'à maintenant surtout adoptées dans les grandes entreprises de 250 employés et plus. Plus spécifiquement, les taux d'utilisation de la fabrication additive et l'impression 3D pour les métaux sont de 3,2 % dans les entreprises de première transformation des métaux et de 4,5 % dans les entreprises de fabrications métalliques (ISQ, 2016a).

De plus, il est généralement reconnu que les avancées technologiques, telles que les imprimantes 3D, vont révolutionner le domaine de la fabrication, ainsi que les modèles d'affaires. Les manufacturiers cherchent de plus en plus à se démarquer de leurs concurrents par la conception de leurs produits, les matériaux utilisés, et les services offerts, ainsi qu'à augmenter leur productivité et à générer de la valeur ajoutée (CME, 2016). Les clients eux-mêmes exigent des

cycles de produits plus courts, de nouvelles innovations, une qualité supérieure et des coûts plus bas. La technologie aide les fabricants répondre à ces exigences. Selon Marcotte (2016), la croissance du marché mondial (produits et services) pour la fabrication additive est exponentielle : elle était de 5,1 G\$ en 2015 et devrait atteindre 21 G\$ pour 2021. À maturité, une occupation de 5 % du marché mondial de la fabrication représenterait un potentiel de 640 G\$. Les systèmes d'impression de pièces métalliques en particulier ont connu ce même phénomène de croissance exponentielle depuis 2012 (Marcotte, 2016).

En plus des économies de métaux vierges, les technologies de fabrication additive ont un rôle à jouer pour aider la société à atteindre ses objectifs de sécurité énergétique et de réduction des émissions de GES. Plusieurs études de cas démontrent les économies d'énergie associées à la réduction du poids des pièces, dans l'aéronautique par exemple. L'exercice de modélisation appliquée au cas du Québec indique les mêmes conclusions. Il y a également tous les bénéfices potentiels associés à l'utilisation de la fabrication additive pour la réparation de pièces plutôt que la fabrication de pièces neuves.

Le potentiel de circularité de cette stratégie a donc été évalué comme étant forte, mais dans une perspective à long terme.

Faisabilité technico-économique. De manière générale, les entreprises manufacturières du Canada sont lentes à adopter ces technologies, les taux d'adoption de nouvelles technologies étant parmi les plus faibles des pays industrialisés (CME, 2016). Les coûts d'investissement importants, les incertitudes quant au retour sur l'investissement et le manque d'incitatifs financiers, en lien avec la taille moyenne des entreprises (généralement plus petite qu'aux États-Unis) sont les principaux facteurs. Cependant, avec la diffusion des technologies sur le marché, les coûts sont amenés à réduire (Thomas & Gilbert, 2014). Les coûts peuvent aller jusqu'à 1 M\$ pour une imprimante 3D, un investissement élevé supporté par des années en recherche et développement. Ces investissements sont dissuasifs pour les plus petites entreprises. Cette technologie n'est pas adaptée à la production de masse, mais plutôt à des petits volumes.

Mais malgré les investissements élevés, des études de cas confirment que la fabrication additive peut être plus économique que la fabrication conventionnelle, même à petite échelle (Salmi & Atzeni, 2012). Il y a des gains de coût de production de 50 % à 80 % dans certains cas, car la pièce est imprimée à l'endroit et au moment où elle est nécessaire. De plus, les marges de profit sont supérieures pour ceux qui investissent dans ces technologies, puisqu'ils peuvent vendre le design et les fichiers numériques, plutôt que la pièce elle-même. Les gains sont d'autant plus importants que la complexité de la pièce est grande (Marcotte, 2016). Une application à grande échelle de cette stratégie et l'observation de ses effets se situent cependant dans une perspective à long terme étant donné les investissements initiaux importants et les nombreux développements qui doivent encore être réalisés (pour son application à des productions de masse par exemple).

De manière globale pour la société, les économies d'énergie et les réductions importantes de GES qu'il est possible d'envisager font en sorte que la stratégie de fabrication additive soit optimale économiquement, selon l'exemple étudié dans ce cas-ci.

Autres facteurs. Les normes restent à définir, ce qui peut prendre un certain temps. De plus, des risques sont à considérer (US DOE, 2015), tels que la protection de la propriété intellectuelle : la fabrication d'un objet peut commencer une fois que les données sont fournies à une imprimante 3D. Enfin, l'analyse n'évalue pas l'augmentation potentielle de l'extraction de certains métaux pour obtenir la matière première utilisée dans la fabrication additive.

4.6 Stratégie 6- Recyclage du fer

Au Québec, les produits de fer sont déjà récupérés, triés et conditionnés par des entreprises, puis envoyés dans les aciéries pour être fondus. Les véhicules automobiles représentent une part non négligeable de l'acier récupéré; cette filière a donc été traitée séparément.

4.6.1 Rappel des freins et leviers

L'analyse des freins et leviers, telle que réalisée par Gervais et al (2017), est résumée ci-dessous et dans le Tableau 4-14.

Pertinence. La pertinence de recycler le fer au Québec est déjà bien établie. La filière du recyclage du fer au Québec doit par contre composer avec les fluctuations du prix des métaux sur le marché international. La réduction du prix du fer peut réduire le taux de récupération par les petits ferrailleurs qui alimentent les entreprises de tri et de conditionnement. Quant au secteur du réemploi des pièces de véhicules usagés, il y a de la concurrence avec la vente de pièces neuves. De plus, la dimension des véhicules augmente et leurs composantes varient, complexifiant ainsi les opérations de démantèlement et affectant la rentabilité des opérations.

Faisabilité. Le recyclage du fer et de l'acier est bien établi au Québec, depuis un bon nombre d'années, alors la faisabilité n'est pas remise en doute. Quant à l'idée d'organiser des filières de récupération et des applications dans lesquelles les alliages de fer conserveraient leur fonction une fois recyclés, cette activité n'est pas suffisamment lucrative pour les ferrailleurs. Il n'y a généralement pas de valeur ajoutée de faire le tri des alliages ferreux. Il n'en demeure pas moins que les aciéries connaissent la composition des alliages selon leur catégorie et peuvent donc ajuster leurs recettes en conséquence. Par contre, l'augmentation de la présence d'éléments d'alliage représente de plus en plus un défi pour les aciéries, lesquelles doivent diluer le métal recyclé avec du fer pur pour ne pas excéder les limites de concentration acceptables pour certains éléments d'alliages.

État actuel. Le recyclage du fer est une activité bien implantée au Québec, de même que celle du démantèlement des véhicules en vue du réemploi des pièces.

- Démantèlement des véhicules automobiles et réemploi des pièces : Au Québec, il existe 490 entreprises qui font le démantèlement de pièces d'automobiles et de camions. Une pièce usagée se vend généralement 50 % à 75 % moins cher qu'une pièce neuve. Les carcasses sont pour leur part entreposées ou directement expédiées chez les ferrailleurs.
- Tri et conditionnement du fer (acier) : Plusieurs entreprises sont actives dans le tri et le conditionnement des métaux au Québec. Lorsque le métal est reçu chez le ferrailleur, il est trié, nettoyé et traité (décheté, densifié, mis en ballots, etc.). Les alliages peuvent être triés à la source si leur valeur le permet. Les alliages ferreux ne sont cependant pas caractérisés avant d'être envoyés aux fonderies.
- Recyclage du fer (acier) : Les aciéries achètent de la ferraille et en font le tri. Certaines font également du déchetage de véhicules et d'électroménagers. La ferraille achetée provient principalement du Québec, mais aussi de l'Ontario, du Nord-Est américain et des provinces maritimes. Le prix varie selon la qualité de la ferraille et le prix du marché. Les aciéries suivent des recettes pour obtenir le grade d'acier souhaité. Les impuretés et la densité influencent le grade et des additifs peuvent être nécessaires.

Au niveau industriel, la récupération du fer fait maintenant partie des pratiques des entreprises et de leurs revenus. Au niveau résidentiel, la collecte sélective est en place et des particuliers

amassent aussi les métaux en bordure de rue. Quant au secteur de la construction, rénovation et démolition, les centres de tri trient et vendent le métal, dont les métaux ferreux.

Tableau 4-14. Freins et leviers – Recyclage du fer

Freins	Leviers
<p>Démantèlement des véhicules et réemploi des pièces</p> <ul style="list-style-type: none"> • Manipulation risquée des véhicules accidentés (sang) ou électriques (électrocution) • Normes strictes qui nuisent à la rentabilité • Démantèlement difficile d’alliage d’acier de haute densité et d’aluminium • Dépôts sauvages <p>Tri et conditionnement</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mélanges de métaux qui se trient difficilement • Coût de transport en région éloignée • Augmentation des aciers fortement alliés <p>Recyclage</p> <ul style="list-style-type: none"> • Manque de ferraille (une question de prix) • Coût de transport de la ferraille • Exportation de résidus (ex. : oxyde de fer) 	<p>Démantèlement des véhicules et réemploi des pièces</p> <ul style="list-style-type: none"> • Décret en France obligeant les commerçants d’entretien ou de réparation à offrir des pièces de véhicules usagées • Inspection obligatoire des véhicules de 8 ans et plus et des véhicules usagés revendus • Obligation ou incitatif financier aux propriétaires pour la gestion écologique des véhicules en fin de vie et leur mise en rancart (meilleure traçabilité) • Réflexe à développer chez le citoyen pour le recours à des pièces usagées, changement des perceptions <p>Tri et conditionnement</p> <ul style="list-style-type: none"> • N/A <p>Recyclage</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exportation de ferraille à éviter • Approvisionnement en ferraille de plusieurs sources, de meilleure qualité et dans un rayon acceptable • Redevances à l’élimination aux aciéries pour reconnaître leur contribution au recyclage

Source : Gervais et al., 2017.

4.6.2 Fiche technico-économique

Le fer est souvent retrouvé sous forme d’acier dans les moyens de transport. Le recyclage des avions, des trains et des voitures est étudié, ainsi que le recyclage de la ferraille de manière générale.

4.6.2.1 Recyclage des avions

Définition du scénario étudié. Il y aurait 6500 avions qui devraient arriver en fin de vie en 2020 dans le monde (Marcaillou, 2005). La quantité qui se retrouvera au Québec dépendra d’accords conclus avec des compagnies aériennes ou avec des fabricants d’avions. Une étude de cas française est prise comme exemple et appliquée directement pour le Québec : la capacité est de 20 avions par an (Angel, 2005) à partir de 2025. Il y avait un projet de recyclage complet des avions au Québec, mais il ne semble donner aucune suite (Rettino-Parazelli, 2016).

Paramètres techniques. À partir du poids moyen d’un avion (200 t) et de la fraction métallique (59,5 % d’aluminium, 7,0 % de fer, 2,1 % de titane et 1,4 % de cuivre), il est possible d’estimer la quantité annuelle des métaux qu’il est pertinent de récupérer (Tableau 4-15) (Orfali, 2008). De

25 % à 35 % de l'avion est composé de pièces non métalliques. D'une durée de 30 ans, le début du projet est estimé à 2025. Les dépenses énergétiques sont supposées négligeables, car les opérations sont majoritairement manuelles.

Paramètres économiques. Considérant une usine traitant 20 avions par an, le coût d'investissement est considéré comme étant égal à celui du cas de base, soit 30 M\$. Ce coût est ramené par quantité de métal récupéré. Les coûts d'opération fixes incluent la charge salariale (70 employés*40h*48 semaines*20\$/h), la maintenance (5 % du coût d'investissement), et les frais généraux (50 % de la charge salariale). Les coûts variables sont composés uniquement des coûts de matériaux divers (10 % de la maintenance).

Il est également possible de calculer les revenus potentiels des activités de recyclage des avions. La composition de l'avion est connue, ainsi que la valeur massique de chacun de ses constituants : 1 205 \$/t pour l'aluminium, 250 \$/t pour l'acier, 3 770 \$/t pour le titane et 4 600 \$/t pour le cuivre (Prix-métaux.com, 2017; InvestmentMines, 2017). Après retrait de toutes les pièces réutilisables et la décontamination des réservoirs, l'essentiel de la ferraille de l'avion se vend pour environ 250\$/t.

Selon ces calculs, le projet n'est plus vraiment rentable, en partie à cause de la baisse du prix de l'aluminium (Rettino-Parazelli, 2016). Cependant, les revenus issus de la revente d'équipements électroniques n'ont pas été considérés ici : les bénéfices sont donc sous-estimés.

Tableau 4-15. Paramètres – Recyclage des avions

Quantité d'avions arrivant en fin de vie	Unité	Constante	Référence
Quantité d'avions en fin de vie	t/an	4 000	(Orfali, 2008)
Quantité déjà recyclée	t/an	-	(Angel, 2005)
Quantité disponible pour le recyclage	t/an	4 000	
Paramètres techniques	Unité	Constante	Référence
Proportion des composantes			
Aluminium (Al)	%	59,5 %	(Orfali, 2008)
Acier (Fe)	%	7,0 %	
Titane (Ti)	%	2,1 %	
Cuivre (Cu)	%	1,4 %	
Quantité de chaque composante			
Aluminium (Al)	t/an	2 380	
Acier (Fe)	t/an	280	
Titane (Ti)	t/an	84	
Cuivre (Cu)	t/an	56	
Total	t/an	2 800	
Début du projet	année	2025	Hypothèse
Durée du projet	an	30	Hypothèse
Consommation d'énergie	PJ/t	Négligeable	Hypothèse
Paramètres économiques	Unité	Constante	Référence
Coût d'investissement	\$/t (Al+Fe+Ti+Cu)	357	(Angel, 2005)
Coûts d'opération fixes	\$/t (Al+Fe+Ti+Cu)	1 976	(Prix-métaux.com, 2017)
Coûts d'opération variables	\$/t (Al+Fe+Ti+Cu)	54	(InvestmentMine, 2017) Hypothèse

4.6.2.2 Recyclage des trains

Définition du scénario étudié. La quantité de trains à recycler au Québec n'est pas connue. En France, il y a au moins 16 000 caisses (voitures et wagons) à démanteler (Marais, 2015). Le

nombre total de trains à démanteler en Europe serait de 5 000. Une étude de cas française est utilisée et appliquée, directement, au cas du Québec : soit une usine récupérant et recyclant 360 véhicules de chemin de fer par an (Buyse & Quiret, 2013).

Paramètres techniques. À partir du poids moyen d'une locomotive, soit 60 t (Delogu et al., 2017) et de la fraction métallique, soit 80 % de fer et 0,4 % de cuivre (Buyse & Quiret, 2013), il est possible d'estimer la quantité annuelle des métaux qu'il est pertinent de récupérer (Tableau 4-16). D'une durée de 30 ans, le début du projet est estimé à 2025. Les dépenses énergétiques sont supposées négligeables, car les opérations sont majoritairement manuelles.

Paramètres économiques. Dans le cas de base (Buyse & Quiret, 2013), une usine est établie dans un bâtiment déjà existant. Le coût d'investissement a été adapté pour tenir compte du coût de construction du bâtiment (Marais, 2015); la part dédiée à la construction d'un nouveau bâtiment est de 18 %. Ce coût est ramené par quantité de métal récupéré. Les coûts d'opération fixes incluent la charge salariale (50 employés*40h*48 semaines*20\$/h), la maintenance (5 % du coût d'investissement), et les frais généraux (50 % de la charge salariale). Les coûts variables incluent le coût de désamiantage et de matériaux divers (10 % de la maintenance). Un désamiantage est nécessaire si le train contient de l'amiante. Cette étape est généralement sous-traitée et son coût est important (ActuEnvironnement, 2013).

Il est également possible de calculer les revenus potentiels des activités de recyclage des trains à partir de la valeur massique de chacun de ses constituants : 110 \$/t pour le fer et 4 600 \$/t pour le cuivre (Rockaway Recycling, 2017 ; Prix-métaux.com, 2017). Des revenus sont également tirés de la vente de matériel électronique : ce revenu est estimé à 30 000\$ par train, un peu inférieur au cas de base français (ActuEnvironnement, 2014). La fraction de cuivre présente dans le train est supposée égale à la proportion de composés électroniques dans le train. Selon ces calculs, le procédé est rentable. Néanmoins, cela est très sensible au prix de revente des composés électroniques, et cette valeur est très incertaine.

Tableau 4-16. Paramètres – Recyclage des trains

Quantité de trains arrivant en fin de vie	Unité	Constante	Référence
Quantité de trains en fin de vie	t/an	21 600	(Buyse & Quiret 2013)
Quantité déjà recyclée	t/an	-	
Quantité disponible pour le recyclage	t/an	21 600	
Paramètres techniques	Unité	Constante	Référence
Proportion des composantes			
Acier (Fe)	%	80,0 %	(Delogu et al., 2017)
Cuivre (Cu)	%	0,4 %	
Quantité de chaque composante			
Acier (Fe)	t/an	17 280	
Cuivre (Cu)	t/an	86	
Total	t/an	17 366	
Début du projet	année	2025	Hypothèse
Durée du projet	an	30	(Buyse & Quiret, 2013)
Consommation d'énergie	PJ/t	Négligeable	Hypothèse
Paramètres économiques	Unité	Constante	Référence
Coût d'investissement	\$/t (Fe+Cu)	23	(ActuEnvironnement, 2013)
Coûts d'opération fixes	\$/t (Fe+Cu)	201	(Marais, 2015)
			(Rockaway Recycling, 2017)
Coûts d'opération variables	\$/t (Fe+Cu)	370	Hypothèses

4.6.2.3 Ferraille

Définition du scénario étudié. La quantité totale de ferraille est estimée en soustrayant le potentiel de récupération de métaux ferreux par la quantité récupérée cette même année.

Paramètres techniques. La quantité de fer contenu dans la ferraille est estimée à 90 % (Tableau 4-17). D'une durée de 30 ans, le début du projet est estimé à 2020. L'énergie nécessaire est calculée à partir de la littérature (Birat & Zaoui, 2002). L'analyse tient compte du fait que la consommation énergétique (électricité essentiellement) dans les fours à arc électriques diminue avec l'augmentation de la proportion de ferraille utilisée : une augmentation de 30 % à 50 % de ferraille peut diminuer la consommation d'électricité de 29 %.

Paramètres économiques. Le scénario considère la mise en place d'une capacité supplémentaire de traitement et de recyclage de la ferraille à partir des informations de la littérature (De Song Technology Trading Co., 2017 ; Steelonthenet.com, 2017; Sheng, 2017; Ministère de L'Économie, 2014) et de nombreuses hypothèses. Les revenus sont calculés en multipliant la masse d'acier sortant par son prix actuel (JDN, 2017). Les coûts d'affinage et de transport n'ont pas été considérés dans cette étude.

Tableau 4-17. Paramètres – Recyclage de la ferraille

Quantité de ferraille	Unité	Constante	Référence
Quantité de ferraille potentiellement recyclable	t/an	76 000	(Langlois-Blouin, 2010)
Quantité déjà recyclée	t/an	21 000	
Quantité disponible pour le recyclage	t/an	55 000	
Paramètres techniques	Unité	Constante	Référence
Proportion des composantes			
Fer (Fe)	%	90 %	
Quantité de chaque composante	t/an	49 416	
Début du projet	année	2020	Hypothèse
Durée du projet	an	30	Hypothèse
Consommation d'énergie	PJ/t	0,000001	(Birat & Zaoui, 2002)
Paramètres économiques	Unité	Constante	Référence
Coût d'investissement	\$/t (Fe)	7	(Steelonthenet.com, 2017)
Coûts d'opération fixes	\$/t (Fe)	14	(Sheng, 2017)
Coûts de la ferraille	\$/t (Fe)	246	(JDN, 2017)
Coûts d'opération variables	\$/t (Fe)	80	(Ministère de L'Économie, 2014)
			Hypothèses

4.6.2.4 Voitures

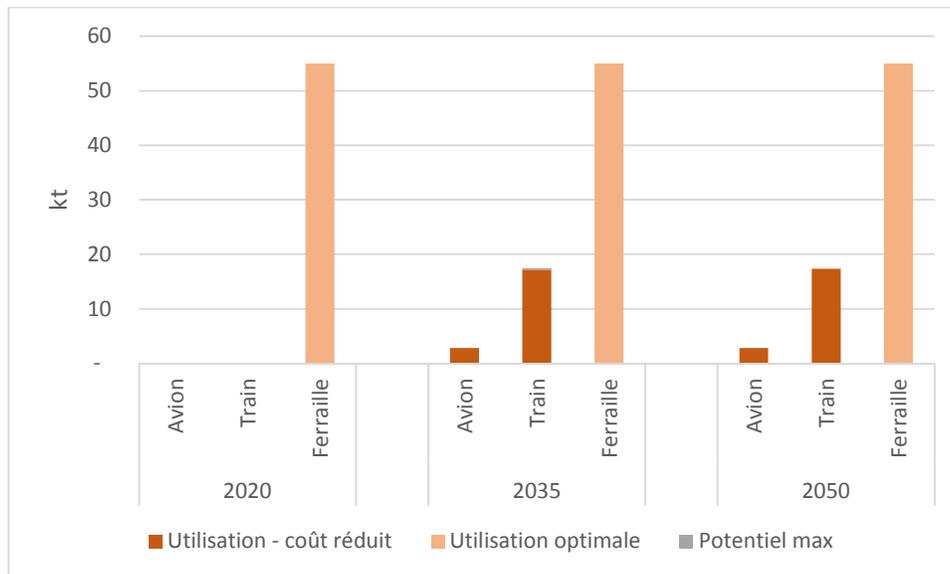
Connaissant le nombre de véhicules (voitures particulières et camions) vendu annuellement au Québec entre 1997 et 2016, il semble y avoir une stabilisation à environ 460,000 véhicules (Statistique Canada, 2017b). Cependant, la quantité de véhicules déjà récupérée est de près de 100 % (Recyc-Quebec, 2008), et cette quantité est déjà recyclée en majorité. Remarques : La méthode actuelle de recyclage enfouit les rebuts plastiques. Des méthodes de valorisation telles que la pyrolyse sont explorées à cet effet (Mulliken, 2009).

4.6.3 Modélisation technico-économique

L'ensemble des sous-stratégies spécifiques à chaque métal ont été testées simultanément dans le modèle NATEM.

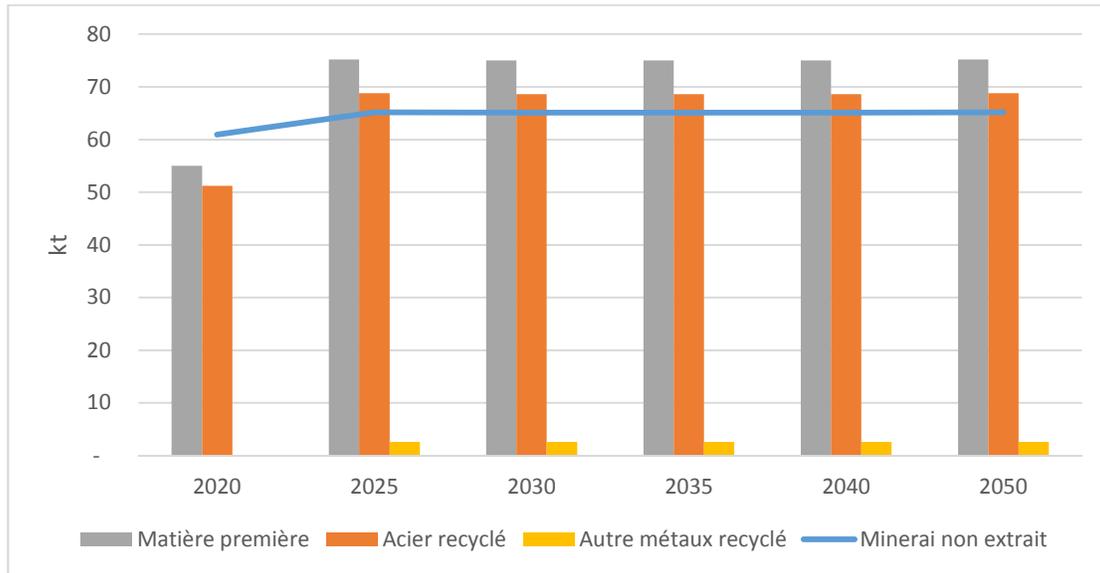
Un scénario incluant la possibilité de recycler l'acier contenu dans les avions, les trains, ainsi que la ferraille résiduelle, a été comparé au scénario de référence (Figure 4-5). La solution du modèle montre que le recyclage de la quantité résiduelle totale de ferraille (55 kt) est une stratégie optimale économiquement, malgré les investissements supplémentaires requis, et ce, dès le départ. Cette source de matières premières est également celle qui a le plus grand potentiel technique (c'est-à-dire en quantité disponible) de fournir de l'acier recyclé. Par contre, le recyclage des avions et des trains n'apparaît pas comme une option optimale économiquement. Un scénario supplémentaire a permis de tester l'impact d'une réduction des coûts : seules une réduction importante des coûts d'investissement et d'opération de 50 % pour le recyclage des avions et une réduction de 50 % des coûts d'opération pour le recyclage des trains font apparaître ces deux sous-stratégies presque au maximum (17,4 kt pour les trains et 2,8 kt pour les avions) dans la solution optimale à partir de 2025. Le potentiel technique d'obtenir de l'acier recyclé, et d'autres métaux, à partir des avions est faible.

Figure 4-5. Utilisation de matières premières pour la production d'acier recyclé



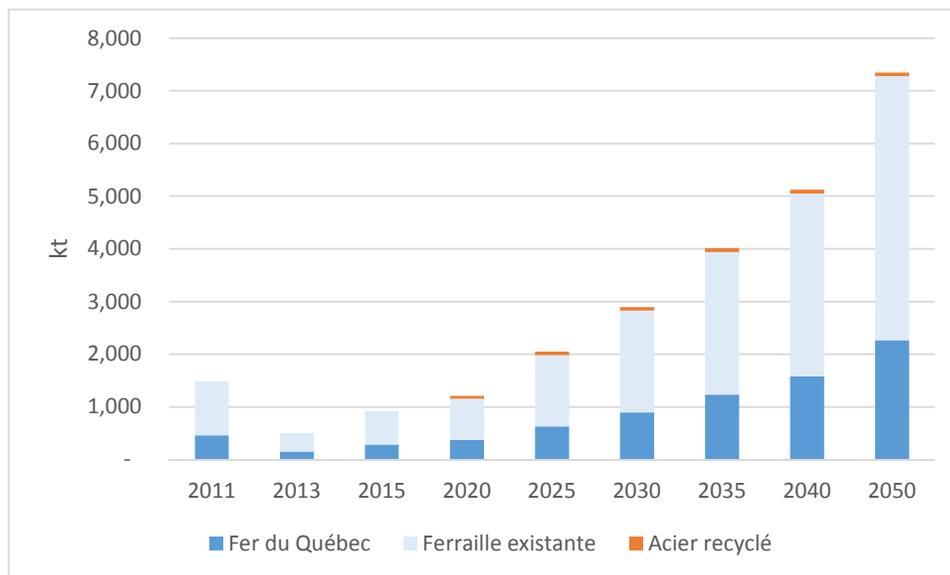
La Figure 4-6 compare les quantités totales de matières premières utilisées (avions, trains, ferraille) avec les quantités d'acier et autres métaux recyclés dans le scénario avec les coûts réduits. La différence entre la somme des intrants et la somme des extrants provient de l'efficacité du procédé de traitement de la ferraille qui contient seulement 89,8 % d'acier recyclable. Pour les deux autres procédés, les pertes sont calculées a priori. Les métaux produits sont de l'acier recyclé (96,3 %) et d'autres métaux (3,7 %), principalement l'aluminium provenant des avions. Ces stratégies permettent d'éviter l'extraction de 65 kt de minerai de fer (contenant 30 % de fer concentré) annuellement entre 2025 et 2050.

Figure 4-6. Utilisation de matières premières, production d'acier et autres métaux recyclés et minerais non extraits



La Figure 4-7 montre les types de matières premières utilisées pour la production d'acier dans le scénario avec les coûts réduits. Même en considérant les potentiels maximums, la quantité d'acier recyclé qu'il est possible d'obtenir à partir des différentes sources de matières premières est minime par rapport à la demande totale d'acier et de l'acier déjà produit dans les procédés existants à partir de fer produit au Québec et de la ferraille déjà recyclée.

Figure 4-7. Source de matières premières pour la production d'acier



4.6.4 Analyse et discussion

Potentiel de circularité. Le potentiel de circularité, soit la quantité d'acier pouvant être recyclée à partir des avions et des trains, demeure faible. La quantité d'acier provenant de la ferraille résiduelle, non recyclé actuellement, est un peu plus importante. Cependant, le total d'acier

recyclé obtenu à partir de ces nouvelles sources demeure marginal par rapport à la demande totale d'acier.

Faisabilité technico-économique. Autant l'analyse que la modélisation technico-économique montre que le recyclage de la ferraille est une activité rentable et d'ailleurs déjà bien implantée au Québec. Le problème n'est donc pas la rentabilité, mais les quantités supplémentaires qu'il est possible d'aller chercher. Quant au recyclage de l'acier dans les avions et les trains, les études de cas documentées montrent que ces activités sont moins rentables. Dans le cas des avions, cela est principalement dû à la baisse du prix de l'aluminium (Rettino-Parazelli, 2016). Dans les deux cas, il serait nécessaire de considérer la vente d'autres sous-produits, comme les équipements électroniques.

4.7 Stratégie 7- Recyclage du cuivre

4.7.1 Rappel des freins et leviers

Pertinence et faisabilité. L'analyse des freins et leviers n'a pas été réalisée pour cette stratégie, étant donné le refus de participation des principaux intervenants. Le recyclage du cuivre est une stratégie très pertinente vu sa grande valeur économique sur le marché.

État actuel. La filière de récupération, tri et conditionnement est d'ailleurs déjà bien implantée au Québec, dont notamment le cuivre provenant des résidus de déchetage des véhicules (Gervais et al., 2017). Par ailleurs, le fabricant automobile Renault, en France, a conçu une architecture de véhicule favorisant le retrait des moteurs de véhicules électriques avant leur broyage. La bobine de cuivre se trouve ainsi sur une pièce en plastique facile à écraser, permettant ainsi une meilleure séparation des matériaux.

4.7.2 Fiche technico-économique

Le cuivre se retrouve en partie dans les déchets d'équipement électrique et électronique (D3E) (Maung et al., 2016). L'Association pour le recyclage des produits électroniques (ARPE, 2015a) garantit un recyclage des déchets écologiquement et socialement responsable. Les déchets qu'elle gère ne sont pas exportés vers des pays non membres de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), dans lesquels, en l'absence d'équipements et d'expertises adéquats, leur traitement serait nocif pour la santé et l'environnement. L'ARPE (2016) récupère gratuitement les D3E qui lui sont apportés à leurs points de dépôts. Toutefois, elle est concurrencée par un réseau parallèle qui est capable de récupérer les équipements électroniques directement chez l'utilisateur final. Par ailleurs, concernant les D3E déposés en bordure de rue, ceux-ci sont dépouillés de leurs composants précieux avant même leur récupération par un recycleur. Ce mode de collecte désavantage donc le recycleur qui ne récupère que des déchets à faible valeur résiduelle.

La période 2008-2009 marque une transition avec la mise en place de la réglementation de responsabilité élargie des producteurs. Les fabricants et distributeurs sont responsables de la gestion en fin de vie des D3E. Les éco-frais actuellement en vigueur sont : 0,10\$ le cellulaire, 1,15\$ l'ordinateur portable et 7,50\$ l'ordinateur de bureau. En 2008, l'objectif de récupération était de 40 % pour l'ensemble des D3E et de 25 % pour les téléphones mobiles et traditionnels d'ici 2015. Puis cet objectif est rehaussé de 5 % par année jusqu'à l'atteinte de taux de récupération de 65 %. (Ferland, 2012).

Outre une communication claire sur les comportements citoyens facilitant le recyclage responsable des D3E, outre leur interdiction des sites d'enfouissement, des solutions consistant à offrir leur transport, ainsi qu'une incitation financière - quelques dollars par unités récupérés - pourraient augmenter leur taux de récupération et récupérer des téléphones plus récents (ARPE, 2015b).

Des procédés spécifiques au cellulaire, à l'ordinateur de bureau et au câble ont été analysés. De plus, le procédé Black Copper Route (Ghodrat et al., 2016) prenant en entrée des résidus de cuivre et des circuits électroniques a été étudié.

4.7.2.1 Recyclage des ordinateurs

Définition du scénario étudié. Les quantités d'ordinateurs en fin de vie et déjà recyclées au Québec sont dérivées de statistiques américaines (Statistic Brain, 2016; Potelle, 2009). Le taux de recyclage des ordinateurs semble avoir évolué dans les dernières années puisqu'il était de 51 % en 2015 pour les ordinateurs de bureau selon Recyc-Québec (2015).

Paramètres techniques. À partir du poids moyen d'un ordinateur, soit 14,5 kg t et de la fraction métallique, soit 0,003 % d'or, 8,4 % de cuivre et 63,6 % d'acier (Bhuie et al., 2004; GoldPrice.org, 2017; Ching-Hwa et al., 2004; Cdiscount, 2017), il est possible d'estimer la quantité annuelle des métaux qu'il est pertinent de récupérer (Tableau 4-18). D'une durée de 20 ans, le début du projet est estimé à 2017. Les dépenses énergétiques sont supposées négligeables, car les opérations sont majoritairement manuelles.

Tableau 4-18. Paramètres – Recyclage des ordinateurs

Quantité d'ordinateurs arrivant en fin de vie	Unité	Constante	Référence
Quantité d'ordinateurs en fin de vie	t/an	18 012	(Statistic Brain, 2016)
Quantité déjà recyclée	t/an	5 200	(Potelle, 2009)
Quantité disponible pour le recyclage	t/an	12 812	
Paramètres techniques	Unité	Constante	Référence
Durée de vie d'un ordinateur	an	5,0	(Statistic Brain, 2016)
Masse d'un ordinateur	kg	14,5	
Proportion des composantes (en masse)			
Or (Au)	%	0,003 %	(Bhuie et al., 2004) (GoldPrice.org, 2017).
Cuivre (Cu)	%	8,4 %	
Acier (Fe)	%	63,6 %	
Quantité de chaque composante			(Ching-Hwa et al., 2004)
Or (Au)	t/an	0,4	(Cdiscount, 2017)
Cuivre (Cu)	t/an	1,073	
Acier (Fe)	t/an	8,151	
Total	t/an	9,225	
Début du projet	année	2017	Hypothèse
Durée du projet	an	20	Hypothèse
Consommation d'énergie	PJ/t	négligeable	Hypothèse
Paramètres économiques	Unité	Constante	Référence
Coût de collecte	\$/t (Au+Cu+Fe)	2 256	(Bhuie et al., 2004)
Coût d'investissement	\$/t (Au+Cu+Fe)	182	
Coûts d'opération fixes & variables	\$/t (Au+Cu+Fe)	1 956	

Paramètres économiques. Les coûts sont ramenés par quantité de métal récupéré : 2 256 \$/t pour les coûts de collecte, 182 \$/t pour le coût d'investissement et 1 956 \$/t pour les coûts

d'opération (Bhuie et al., 2004). Il est également possible de calculer les revenus potentiels des activités de recyclage des ordinateurs à partir de la valeur massique de chacun de ces constituants : 250 \$/t pour l'acier, 4 600 \$/t pour le cuivre et 30,5 M\$/t pour l'or (GoldPrice.org, 2017).

4.7.2.2 *Recyclage des cellulaires*

Définition du scénario étudié. Des données existent quant à la quantité de téléphones cellulaires vendus au Québec et déjà recyclés au Québec, ainsi que leurs projections à l'horizon 2047 (Potelle, 2009). Contrairement aux ordinateurs, les ventes sont à la hausse.

Paramètres techniques. À partir du poids moyen d'un cellulaire, soit 0,08 kg t et de la fraction métallique, soit 14,81 % de cuivre, 0,38 % d'argent, 0,04 % d'or, et 0,02 % de palladium (Geyer & Blass, 2009; GoldPrice.org, 2017; Live Palladium Price, 2017), il est possible d'estimer la quantité annuelle des métaux qu'il est pertinent de récupérer (Tableau 4-19). D'une durée de 20 ans, le début du projet est estimé à 2017. Les dépenses énergétiques sont faibles (McLaren et al., 1999).

Paramètres économiques. Les coûts sont ramenés par quantité de métal récupéré : 491 884 \$/t pour les coûts de collecte, 5 981 \$/t pour le coût d'investissement et 60 666 \$/t pour les coûts d'opération (Geyer & Blass, 2009; Bhuie et al., 2004). Il est également possible de calculer les revenus potentiels des activités de recyclage des cellulaires à partir de la valeur massique de chacun de ses constituants : 4 600 \$/t pour le cuivre, 517 000 \$/t pour l'argent, 30,5 M\$/t pour l'or et 25 M\$/t pour le palladium (GoldPrice.org, 2017; Silverprice.org, 2017; Live Palladium Price, 2017).

Tableau 4-19. Paramètres – Recyclage des cellulaires

Quantité de cellulaires arrivant en fin de vie	Unité	Constante	2015	2035	2050	Référence
Quantité de cellulaires en fin de vie	t/an		156	282	377	(Potelle, 2009)
Quantité déjà recyclée	t/an		17	36	50	
Quantité disponible pour le recyclage	t/an		140	247	327	
Paramètres techniques	Unité	Constante	2015	2035	2050	Référence
Durée de vie d'un cellulaire	an	3				Hypothèse
Masse d'un téléphone	kg	0,08				(Potelle, 2009)
Proportion des composantes (en masse)						
Cuivre (Cu)	%	14,81 %				(Geyer & Blass, 2009)
Argent (Ag)	%	0,38 %				(GoldPrice.org, 2017).
Or (Au)	%	0,04 %				(Live Palladium Price, 2017)
Paladium (Pd)	%	0,02 %				(Silverprice.org, 2017)
Quantité de chaque composante						
Cuivre (Cu)	t/an		20,7	36,5	48,4	
Argent (Ag)	t/an		0,5	0,9	1,2	
Or (Au)	t/an		0,1	0,1	0,1	
Palladium (Pd)	t/an		0,0	0,0	0,1	
Total	t/an		21,3	37,6	49,9	
Début du projet	année	2017				Hypothèse
Durée du projet	an	20				(Potelle, 2009)
Consommation d'énergie	PJ/t	0.0012				(McLaren, 1999)
Paramètres économiques	Unité	Constante	2015	2035	2050	Référence
Coût de collecte	\$/t (Cu+Ag+Au+Pd)	491 884				(Geyer & Blass, 2009)
Coût d'investissement	\$/t (Cu+Ag+Au+Pd)	5 981				(Bhuie et al., 2004)
Coûts d'opération fixes & variables	\$/t (Cu+Ag+Au+Pd)	60 666				

4.7.2.3 Recyclage des câbles

Définition du scénario étudié. Les quantités de câbles disponibles pour le recyclage en fin de vie ne sont pas connues. La quantité de câbles considérée dans l'étude pour le recyclage correspond à la capacité moyenne du procédé Black Copper Route (Ghodrat et al., 2016).

Technologies impliquées. Black Copper Route

Paramètres techniques. La fraction de cuivre est de 30 % (Medles et al., 2009). D'une durée de 5 ans, le début du projet est estimé à 2017 (Tableau 4-20). Les dépenses énergétiques sont très faibles (Changzhou Optima Technology Co., Ltd., 2017).

Paramètres économiques. Les coûts sont ramenés par quantité de métal récupéré : 5 102 \$/t pour les coûts d'achat de la matière première, 2 \$/t pour le coût d'investissement, 4 \$/t pour les coûts d'opération fixes et 117 \$/t pour les coûts d'opération variables (Changzhou Optima Technology Co., Ltd., 2017; Greengate Metals, 2017). Il est également possible de calculer les revenus potentiels des activités de recyclage des câbles à partir de la valeur massique du cuivre : 4 600 \$/t.

Tableau 4-20. Paramètres – Recyclage des câbles

Quantité de câbles arrivant en fin de vie	Unité	Constante	Référence
Quantité de câbles en fin de vie		Inconnue	
Quantité de câbles considérée dans l'étude	t/an	16 000	(Ghodrat et al., 2016)
Cuivre récupéré	t/an	4 800	(Medles et al., 2009)
Paramètres techniques	Unité	Constante	Référence
Début du projet	année	2017	Hypothèse
Durée du projet	an	5	
Consommation d'énergie	PJ/t	0,0000001	(Changzhou Optima Technology Co., Ltd., 2017)
Paramètres économiques	Unité	Constante	Référence
Coût d'investissement	\$/t Cu	2	
Coûts d'achat des matières premières	\$/t Cu	5 102	(Changzhou Optima Technology Co., Ltd., 2017)
Coûts d'opération fixes	\$/t Cu	4	
Coûts d'opération variables	\$/t Cu	117	(Greengate Metals, 2017)

4.7.2.4 Recyclage des circuits imprimés

Actuellement, les seules usines au monde permettant de recycler convenablement les circuits imprimés sont : Xstrata (Rouyn-Noranda), Aurubis (Allemagne), Boliden (Suède), Umicore (Belgique) et Johnson Matthey (États-Unis) (Québec PC, 2017). Umicore peut également se charger des cellulaires.

Définition du scénario étudié. Des données existent quant aux quantités de circuits-imprimés en fin de vie et déjà recyclées au Québec (ARPE, 2015a; VanderPol, 2014).

Technologies impliquées. Black Copper Route

Paramètres techniques. La fraction des différents métaux est : 84,68 % de cuivre, 0,11 % d'argent et 0,05 % d'or (Tableau 4-21) (LME Copper, 2017; Silverprice.org, 2017). D'une durée de 30 ans,

le début du projet est estimé à 2017. Les dépenses énergétiques sont très faibles (Ghodrat et al, 2016).

Paramètres économiques. Les coûts sont ramenés par quantité de métal récupéré : 6 224 \$/t pour les coûts d'achat de la matière première, 407 \$/t pour le coût d'investissement et 26 \$/t pour les coûts d'opération (Ghodrat et al, 2016). Il est également possible de calculer les revenus potentiels des activités de recyclage des circuits imprimés à partir de la valeur massique de chacun de ces constituants : 4 600 \$/t pour le cuivre, 517 000 \$/t pour l'argent et 30,5 M\$/t pour l'or (GoldPrice.org, 2017; Silverprice.org, 2017).

Tableau 4-21. Paramètres – Recyclage des circuits imprimés

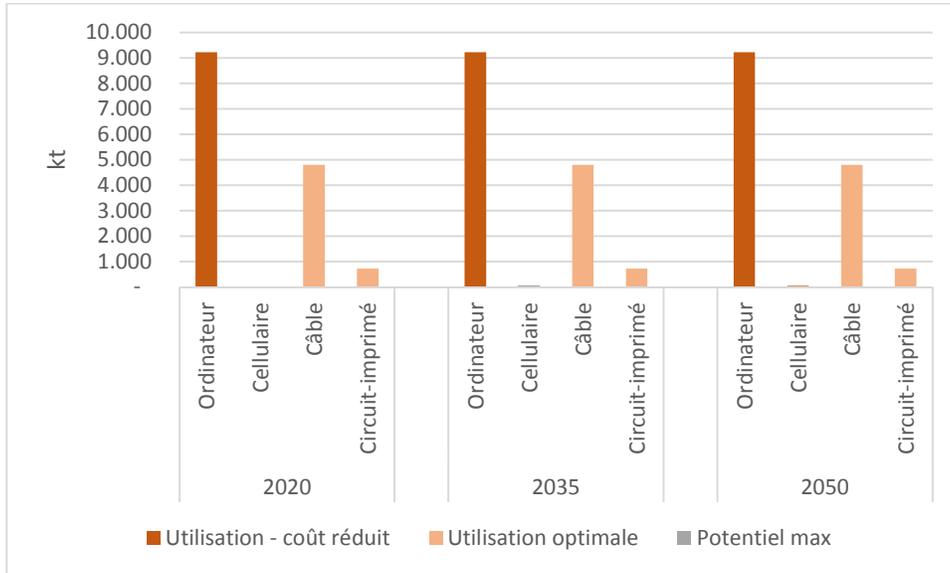
Quantité de circuits imprimés arrivant en fin de vie	Unité	Constante	Référence
Quantité de circuits imprimés en fin de vie	t/an	1 058	(ARPE, 2015a)
Quantité déjà recyclée	t/an	204	(VanderPol, 2014)
Quantité disponible pour le recyclage	t/an	853	
Paramètres techniques	Unité	Constante	Référence
Proportion des composantes (en masse)			
Or (Au)	%	0,05 %	(Silverprice.org, 2017) (LME Copper, 2017)
Argent (Ag)	%	0,11 %	
Cuivre (Cu)	%	84,68 %	
Quantité de chaque composante			
Or (Au)	t/an	0,4	
Argent (Ag)	t/an	1	
Cuivre (Cu)	t/an	723	
Total	t/an	724	
Début du projet	année	2 017	
Durée du projet	an	30	
Consommation d'énergie	PJ/t	0.00002	(Ghodrat et al., 2016)
Paramètres économiques	Unité	Constante	Référence
Coût d'investissement	\$/t Au+Ag+Cu	407	(Ghodrat et al., 2016)
Coûts d'achat des matières premières	\$/t Au+Ag+Cu	6 224	
Coûts d'opération fixes & variables	\$/t Au+Ag+Cu	26	

4.7.3 Modélisation technico-économique

Un scénario incluant la possibilité de recycler le cuivre contenu dans les ordinateurs, les cellulaires, les câbles et les circuits imprimés a été comparé au scénario de référence (Figure 4-8). La solution du modèle montre que le recyclage des câbles et des circuits imprimés (4,8 kt et 0,7 kt respectivement) sont des stratégies optimales économiquement, sans tenir compte toutefois des coûts d'achat de la matière première, et ce, dès le départ. Alors que les câbles peuvent constituer une source importante de matières premières pour fournir du cuivre recyclé, l'apport des circuits imprimés est beaucoup moins significatif. Quant au recyclage des ordinateurs et des cellulaires, ces activités ne constituent pas des options optimales, malgré la récupération et la vente de métaux précieux comme l'or, l'argent et le palladium. Un scénario supplémentaire a permis de tester l'impact d'une réduction des coûts de ces activités de recyclage: seule une réduction substantielle des coûts d'investissement et d'opération d'un facteur 100, ainsi que le retrait des coûts de collecte, fait apparaître ces deux sous-stratégies dans la solution optimale : au maximum pour les ordinateurs (9,2 kt) et presque au maximum pour les cellulaires (0,02 kt en 2020; 0,03 kt

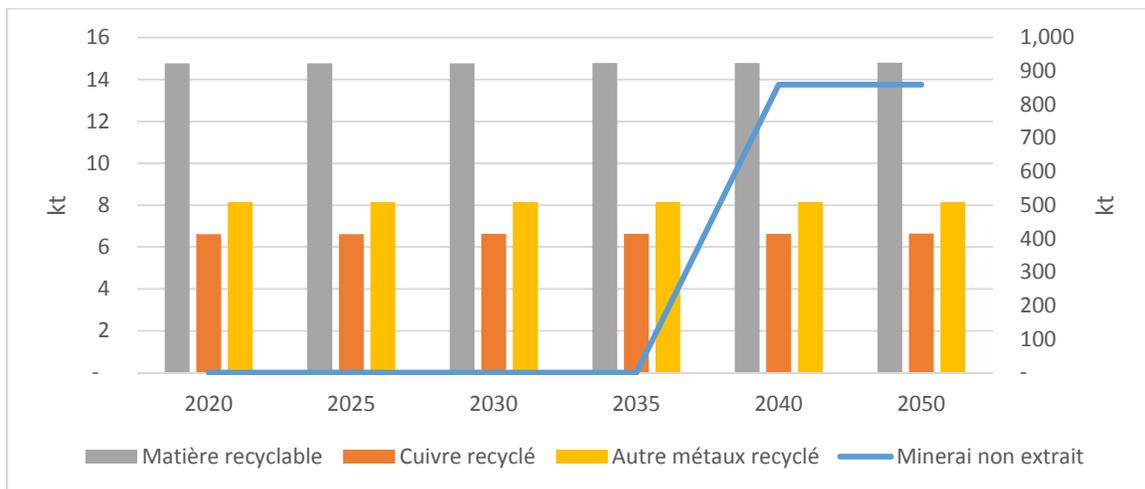
en 2035; 0,05 kt en 2050). Si les ordinateurs peuvent constituer une source importante de matières premières pour fournir du cuivre recyclé, l'apport des cellulaires demeure très faible.

Figure 4-8. Utilisation de matières premières pour la production de cuivre recyclé



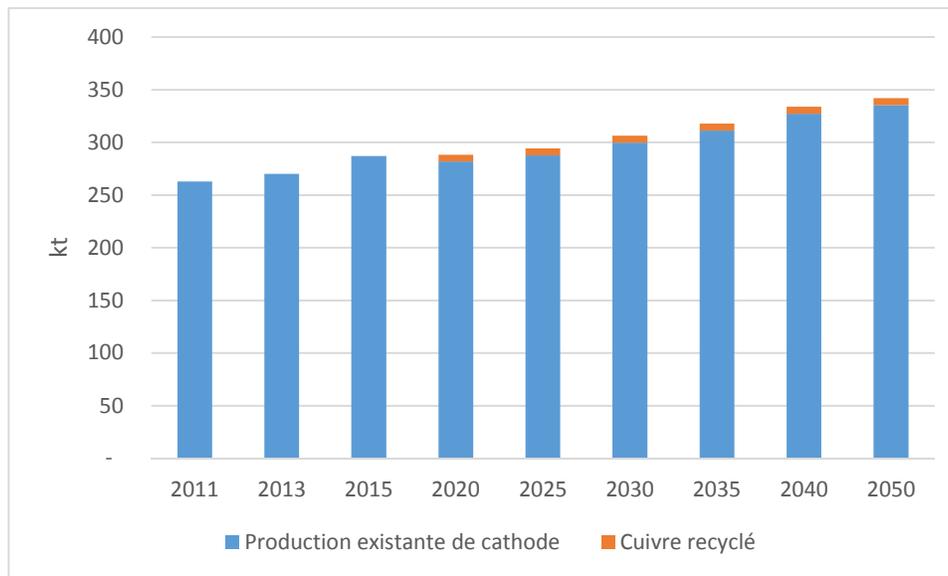
La Figure 4-9 compare les quantités totales de matières premières utilisées (ordinateurs, cellulaires, câbles, circuit-imprimés) avec les quantités de cuivre et autres métaux recyclés dans le scénario avec les coûts réduits. Les métaux produits sont du cuivre recyclé (44,9 %), de l'acier provenant des ordinateurs (55,1 %) et des métaux précieux (0,02 %). Ces stratégies permettent d'éviter l'extraction de 859 kt de minerais (contenant entre 0,5 % et 2,0 % de cuivre) annuellement entre 2040 et 2050. En effet, le cuivre recyclé permet de remplacer l'extraction du cuivre provenant des réserves probables, où les coûts sont plus élevés, mais non des réserves prouvées. À court terme, les gains associés à cette stratégie concernent plutôt la diminution des importations de concentrés de cuivre (à 26 %), de 21 kt entre 2020 et 2040.

Figure 4-9. Utilisation de matières premières, production de cuivre et autres métaux recyclés et minerais non extraits



La Figure 4-10 montre les types de matières premières utilisées pour la production de cathode de cuivre dans le scénario avec les coûts réduits. Même en considérant les potentiels maximums, la quantité de cuivre recyclé qu'il est possible d'obtenir à partir des différentes sources de matières premières est minime par rapport à la demande totale pour les cathodes de cuivre et des cathodes déjà produites dans les procédés existants à partir d'anodes produites au Québec et d'anodes importées.

Figure 4-10. Source de matières premières pour la production des cathodes de cuivre



4.7.4 Analyse et discussion

Potentiel de circularité. Le potentiel de circularité, soit la quantité de cuivre pouvant être recyclée à partir des ordinateurs, cellulaires, câbles et circuit imprimés, demeure faible. La quantité totale de cuivre obtenu à partir de ces nouvelles sources demeure marginale par rapport à la demande totale. De plus, alors que les quantités les plus importantes se trouvent dans les ordinateurs, les tendances futures sont délicates à prévoir quant au potentiel de recyclage de cette source. Les ordinateurs vont être de plus en plus légers et de moins en moins constitués de composants de grande valeur. On peut supposer la masse d'ordinateurs rejetée constante ou en diminution pour les prochaines années. D'ici 2050, il est possible que des ordinateurs technologiquement différents arrivent sur le marché (ordinateurs photoniques par exemple).

Quant aux téléphones, ils devraient être de plus en plus nombreux à être jetés (la croissance des ventes est d'environ 2,5 % au QC). En général, l'enfouissement des D3E risque d'être de moins en moins accepté, ce qui suppose une augmentation des flux à recycler. De plus, à l'avenir, des pays émergents comme la Chine pourraient cesser d'importer des D3E : le Québec devra dans ce cas se concentrer davantage sur leur recyclage, pouvant même en importer si une expertise y est développée (présence de fonderies et d'affineries avantageuse au QC). Par contre, la quantité de cuivre contenu dans chaque cellulaire est minime.

Faisabilité technico-économique. Autant l'analyse que la modélisation technico-économique montre que le recyclage des câbles et des circuits imprimés sont des activités rentables. Quant au recyclage du cuivre des ordinateurs et des cellulaires, les études de cas documentées montrent que ces activités sont moins rentables (les coûts du démantèlement ne compensent pas la

quantité et la valeur des métaux récupérés). Cependant, plusieurs facteurs pourraient influencer ces conclusions, dont la prise en compte de la provenance de chaque type de matière première, ainsi que de son coût d'achat et de transport. Enfin, dans tous les cas, ces stratégies n'ont du sens que si l'ensemble des sous-produits sont valorisés.

Les téléphones comportent des métaux rares et précieux, principale incitation au recyclage. Cependant, la réduction de la valeur des composants des cellulaires au cours des dernières décennies explique la faible rentabilité économique actuelle de leur recyclage, qui est plus difficile à mettre en place. Par ailleurs, a priori, la réutilisation permet d'allonger la durée de vie des produits. La revente est de plus une activité rentable économiquement, permettant aux recycleurs de générer des revenus s'ils revendent une proportion suffisante des téléphones qu'ils reçoivent. Cependant, les téléphones ayant quelques années d'existence ont une courte seconde vie, et leur revente s'effectue en grande partie dans des pays émergents où les normes environnementales concernant le recyclage sont peu appliquées. Une solution serait d'étendre le recyclage responsable des téléphones aux produits en fin de seconde vie dans les pays en voie de développement (Laseter et al., 2010 ; Geyer & Blass, 2009).

4.8 Stratégie 8- Recyclage du lithium

Le recyclage du lithium fait surtout référence à celui présent dans les batteries lithium-ion, mais il est aussi présent dans les verres et céramiques.

4.8.1 Rappel des freins et leviers

L'analyse des freins et leviers, telle que réalisée par Gervais et al (2017), est résumée ci-dessous et dans le Tableau 4-22.

Pertinence. Avec les projets d'extraction du lithium au Québec de la fabrication de cathodes ou batteries (Johnson Matthey Matériaux pour Batteries, Solutions Bleues Canada), le Québec détient un bon potentiel pour se positionner dans la filière du lithium, particulièrement dans le contexte d'électrification des transports.

Le recyclage du lithium est pertinent. Toutefois, le lithium ne peut justifier à lui seul le recyclage des batteries lithium-ion, car sa valeur ne peut rentabiliser la filière. D'autres métaux de plus grande valeur, comme le cobalt, intéressent davantage les recycleurs de batteries.

Faisabilité. Le recyclage est faisable, car quelques rares compagnies, comme Retriev Technologies en Colombie-Britannique, parviennent à recycler le lithium contenu dans les batteries, incluant celles provenant de véhicules hybrides et électriques. Un procédé de broyage, de séparation par flottaison et de dissolution permet la séparation des différentes composantes (par ex. : aluminium, cuivre, polymère, lithium, cobalt). Les batteries de véhicules hybrides et électriques passent d'abord par un processus de désassemblage manuel fait avec la plus grande précaution (Retriev Technologies, 2017). Le lithium est régénéré sous forme de carbonate de lithium de grade industriel qui pourrait servir dans les batteries s'il était davantage raffiné. Le coût de transport pour acheminer les batteries chez Retriev Technologies est assez élevé, sans compter les risques pour la sécurité et l'environnement.

État actuel. Le marché du recyclage des batteries lithium-ion de véhicules hybrides et électriques est encore petit, car il y a encore peu de quantité en circulation. Toutefois, avec l'électrification des transports, ce marché est appelé à croître. De plus, le recyclage du lithium implique d'abord la récupération des batteries lithium-ion. Au Québec, un programme de responsabilité élargie des producteurs s'applique aux piles et batteries diverses, ainsi qu'aux produits électroniques (dont

certaines contiennent des piles lithium-ion), mais non aux batteries des véhicules hybrides ou électriques. Cette filière reste à développer.

Tableau 4-22. Freins et leviers – Recyclage du lithium

Freins	Leviers
<ul style="list-style-type: none"> • Cinq différents matériaux de cathodes aux chimies distinctes • Lithium seul ne justifie pas le recyclage des batteries pour l’instant • Absence de filière de récupération des batteries lithium-ion des véhicules hybrides et électriques • Coût du recyclage et nécessité d’importantes quantités pour rentabiliser l’opération, concurrence avec Retriev Technologies • Quantité actuellement faible de batteries de véhicules Polymère fluoré parfois problématique pour le recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> • Présence de mines de lithium, d’expertise dans la batterie et faible coût de l’énergie hydroélectrique : Québec en bonne position • Transport de batteries (matières dangereuses) pouvant favoriser le recyclage local • Législation et incitatifs pour la récupération, le conditionnement et le recyclage des batteries lithium-ion de véhicules • Législation pour l’approvisionnement local de batteries de véhicules • Concertation avec les parties prenantes (symposium) • Appel de projets avec les universités et l’industrie pour le développement de procédés de recyclage • Phase pilote d’un procédé, soutenue par un programme de financement • Recyclage pour tous les types de batteries, pour une meilleure rentabilité • Batteries de véhicules rarement endommagées, facilitant le démantèlement en fin de vie

Source : Gervais et al., 2017.

4.8.2 Fiche technico-économique

Le lithium est principalement présent dans les batteries ainsi que dans les verres et céramiques (Brosseau, 2016). Le recyclage des batteries lithium-ion et des contenants en verre est ici étudié pour minimiser l’utilisation de lithium nouvellement extrait.

4.8.2.1 Recyclage des batteries lithium-ion

Définition du scénario étudié. Le scénario évalue les quantités de lithium pouvant être récupérées des batteries lithium-ion en fin de vie provenant des véhicules voitures électriques et hybrides rechargeables, ainsi que des appareils électroniques, et des réseaux électriques. Les entreprises sont responsables de leurs produits en fin de vie, mais il ne semble pas y avoir d’obligation de recycler les batteries lithium-ion (Robinson, 2015).

Technologies impliquées. Il existe cinq technologies de batteries lithium-ion qui sont actuellement commercialisées et qui sont considérées dans le scénario : Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide (LiNiCoAlO₂), Lithium Nickel Cobalt Manganese Oxide (LiNiCoMnO₂), Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄), Lithium Manganese Oxide (LiMn₂O₄), Lithium Nickel Manganese Spinel (LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄) et Lithium Cobalt Oxide (LiCoO₂).

Paramètres techniques. Les principales variables de l’analyse sont présentées dans le Tableau 4-23.

- La littérature indique la distribution et la composition de chacune de ces batteries. La masse totale d'une batterie est estimée à 350 kg (Devie, 2012). Pour une technologie donnée, la masse de chacun de ses constituants métalliques (Wang et al., 2014 ; Gaine et al., 2011; Elibama, s.d.) est multipliée par le prix d'une tonne de ce métal (Renard, 2014) et par l'efficacité de recyclage du métal. Cette efficacité correspond à un taux de récupération du métal. Le résultat obtenu indique la valeur maximale qui peut être retirée du recyclage d'une tonne de batteries d'une technologie donnée.
- L'hypothèse est faite que la durée de vie moyenne d'une batterie lithium-ion est de 8 ans (Neubauer & Pesaran, 2011), à l'instar des batteries lithium-ion de véhicules électriques, ce qui veut dire qu'elles n'auront pas de seconde vie (AVÉQ, 2015), et que l'intégralité des batteries vendues en 2012 seront en fin de vie en 2020. En connaissant la distribution de batteries en fin de vie en 2020, ainsi que la valeur qui peut être retirée d'une tonne de batteries de chaque technologie, la valeur d'une tonne du mélange de batteries arrivées en fin de vie en 2020 est calculée. De même, un travail similaire est réalisé avec les batteries mises sur le marché en 2025 et arrivant en fin de vie huit ans plus tard. Pour simplifier, l'analyse ne tient pas compte d'un allongement possible de la vie utile des batteries et d'une amélioration des performances avec le temps.
- Il s'agit à présent de connaître le flux de batteries entrant dans l'usine de recyclage. D'abord, le nombre de véhicules électriques et hybrides immatriculés au Québec a été repris d'un scénario optimiste du modèle NATEM entre 2012 et 2050, soit un scénario visant l'atteinte de la cible du Québec de 37,5 % en 2030 et d'un objectif ambitieux de 75 % en 2050 par rapport au niveau de 1990. Connaissant la durée de vie de la batterie d'un véhicule électrique (Neubauer & Pesaran, 2011) et la masse d'une telle batterie (Devie, 2012), la masse de batteries lithium-ion d'automobiles arrivant en fin de vie est calculée entre 2020 et 2050.
- À cette masse s'ajoutent les batteries provenant d'appareils mobiles et ainsi que celles utilisées dans le réseau électrique. Leur quantité mondiale est connue en tonne équivalente de carbonate de lithium (LCE) (Brosseau, 2016). Cette quantité est ramenée à l'échelle du Québec : la quantité mondiale de telles batteries est multipliée par la part de PIB du Québec dans le PIB mondial. Enfin, les tonnes LCE sont converties en tonnes de batteries en appliquant la formule suivante :

$$t \text{ batterie} = t \text{ LCE} * \frac{t \text{ Li par } t \text{ Li}_2\text{CO}_3}{t \text{ Li par } t \text{ Batterie}}$$

- Les masses obtenues correspondent aux batteries d'appareils électroniques et aux batteries pour le réseau électrique mises sur le marché en 2011 et 2025. Par interpolation linéaire, ses masses sont extrapolées pour les autres années. L'hypothèse est faite que les appareils mobiles ont une durée de vie de 4 ans et que les batteries pour réseau ont une durée de vie de 10 ans : les masses arrivant en fin de vie sont ainsi déterminées de la même façon que pour les batteries automobiles. La somme de ces trois types de batteries donne la quantité totale de batteries arrivant en fin de vie une année donnée.
- La quantité d'énergie nécessaire a été reprise de données d'un procédé mentionné dans la littérature (Dunn et al, 2012). Une conversion d'unité de : mmBtu/t Li₂CO₃ en MWh/t batteries a été effectué en utilisant la formule suivante :

$$\left[\frac{MWh}{t \text{ batteries}} \right] = \left[\frac{mmBtu}{t \text{ Li}_2\text{CO}_3} \right] * \frac{MWh}{mmBtu} * \frac{t \text{ Li}_2\text{CO}_3}{t \text{ Li}} * \frac{t \text{ Li}}{t \text{ batteries}}$$

Paramètres économiques. Une étude de cas au sujet d'une entreprise de recyclage aux États-Unis (Wang et al., 2014) est reprise. Les coûts sont ramenés par quantité de métal récupéré : 156,52 \$/t pour le coût d'investissement, 5,22 \$/t pour les coûts d'opération fixes et 12 345,16 \$/t pour les coûts d'opération variables en 2020. Les coûts de transport ont été évalués à 383,62 \$/t.

À court terme, l'usine est difficilement rentable, même si toutes les batteries arrivant en fin de vie au Québec sont recyclées. À plus long terme, la quantité de batteries augmente, mais la distribution des différentes technologies de batteries arrivant en fin de vie aura évolué : il est possible que la valeur qui peut être tirée d'une tonne de batteries ne compense plus les coûts de recyclage, qui eux sont supposés constants au cours des années. Donc, à moins d'une diminution des coûts de recyclage, il n'est pas possible d'affirmer que cette stratégie serait rentable à court et moyen terme.

Tableau 4-23. Paramètres – Recyclage des batteries lithium-ion

Quantités de lithium disponibles	Unité	Constante	2020	2035	2050	Référence
Quantité de batteries en fin de vie	t		1 569	3 512	26 802	NATEM; (AVEQ, 2017)
Paramètres techniques	Unité	Constante	2020	2035	2050	Référence
Dans les batteries fabriquées, fraction massique récupérable de :						
Cobalt (Co)	%		6,6 %	3,9 %	1.3 %	(Devie 2012)
Nickel (Ni)	%		2,2 %	2,5 %	2.8 %	(Wang et al 2014)
Lithium (Li)	%		1,6 %	1,4 %	1.3 %	(Gaine et al. 2011)
Aluminium (Al)	%		5,3 %	5,9 %	6.6 %	(Elibama. s.d.)
Cuivre (Cu)	%		7,0 %	7,7 %	8.5 %	Renard (2014) (Neubauer & Pesaran 2011)
Dans les batteries en fin de vie récupérées, masse récupérable de :						
Cobalt (Co)	t		125	188	727	
Nickel (Ni)	t		32	83	718	
Lithium (Li)	t		26	52	360	
Aluminium (Al)	t		78	197	1,675	
Cuivre (Cu)	t		103	257	2,161	
Total	t		364	777	5,641	
Consommation d'énergie	PJ/t		1.6E-06	1,7E-06	1,8E-06	(Dunn et al, 2012)
Paramètres économiques	Unité	Constante	2020	2035	2050	Référence
Coûts d'investissement	\$/t (Co+Ni+Li+Al+Cu)	156.52				(Wang et al, 2014)
Coûts d'opération fixes	\$/t (Co+Ni+Li+Al+Cu)	5.22				
Coûts d'opération variables	\$/t (Co+Ni+Li+Al+Cu)		12 345	12 967	13 654	
Coût du transport (sans le carburant)	\$/t (Co+Ni+Li+Al+Cu)		384	403	424	

4.8.2.2 Recyclage des contenants en verre

Définition du scénario étudié. Le recyclage du verre n’avait pas été abordé lors de l’analyse des freins et leviers; la stratégie du recyclage du lithium portait surtout sur le recyclage des batteries lithium-ion. Cependant, la revue de la littérature a permis de documenter un cas d’application réel de récupération du lithium contenu dans des contenants en verre. Un cas d’usine de recyclage de contenants en verre en Ohio a été repris (DSM Environmental, 2011). En entrée de l’usine sont acheminées les 92 700 tonnes de contenants en verre issus du secteur municipal et récupérés au Québec en 2008 (Gagné, 2010; Recyc-Québec, 2015), qui ne sont désormais plus recyclés (Despins, 2013). Ces quantités incluent les contenants en verre acheminés au centre de tri, mais non le verre issu de la fenestration ou la vitrocéramique qui peuvent aussi contenir du lithium. Les principales variables de l’analyse sont présentées dans le Tableau 4-24.

Paramètres techniques. La fraction massique du lithium dans le verre pourrait représenter environ 0,1 % (Grahl, 2014), ce qui est très peu. En effet, l’ajout de lithium permet de réduire les temps de fusion et la température du four lors de la fabrication du verre, une méthode permettant de réduire les besoins énergétiques allant jusqu’à 5-10%. Cette teneur en lithium, appliquée à la quantité de contenants en verre récupérés, donne 93 tonnes de lithium par an.

Paramètres économiques. Les coûts de l’usine (DSM Environmental, 2011) sont ramenés par quantité de métal récupéré : 3 597 \$/t pour le coût d’investissement et 178 000 \$/t pour les coûts d’opération. Les coûts de collecte ont été évalués à 90 000 \$/t.

Les tarifs de vente de calcin sont calculés comme la moyenne des extremums de prix donnés par Recyc-Québec (Gagné, 2010; Recyc-Québec, 2017). Ces prix permettent d’effectuer une analyse coûts-bénéfices. Une sortie de 80 % de sable de grade de verre est obtenue (Blengini et al., 2012). Cependant, ces opérations ne sont pas rentables en comparaison du coût de l’enfouissement. De plus, une solution de collecte sélective très performante récemment proposée par un regroupement d’entreprises pourrait être mise en place pour la vente de verre recyclé (y compris du verre importé des États-Unis); le problème du verre pourrait ainsi être résolu autrement (Porter, 2017).

Tableau 4-24. Paramètres – Recyclage des contenants de verre

Quantité de verre collecté et non traité au Québec	Unité	Constante	Référence
Quantité de verre collecté	t/an	92 663	(Gagné, 2010) (Despins, 2013)
Paramètres techniques	Unité	Constante	Référence
Fraction massique de lithium	%	0,1 %	(Grahl, 2004)
Quantité de lithium récupérée	t/an	93	
Durée du projet	an	30	(DSM Environmental, 2011)
Paramètres économiques	Unité	Constante	Référence
Coût de collecte (consigne)	\$/t Li	174 000	(Despins, 2013)
Coûts d'investissement	\$/t Li	3 597	(Blengini et al, 2012)
Coûts d'opération fixes & variables	\$/t Li	178 000	(DSM Environmental, 2011)

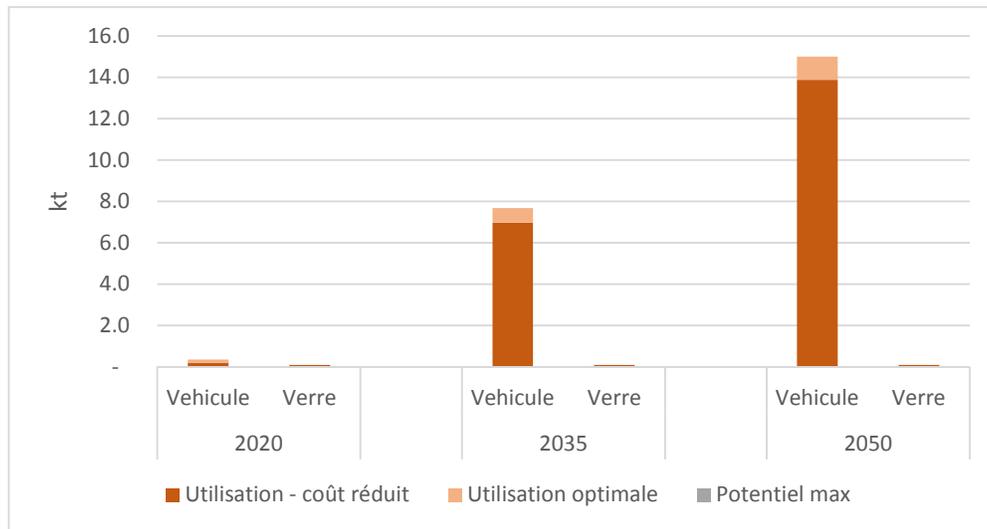
4.8.3 Modélisation technico-économique

Un scénario incluant la possibilité de recycler le lithium contenu dans les batteries lithium-ion de véhicules et des appareils électroniques, ainsi que dans les contenants en verre, a été comparé au scénario de référence (Figure 4-11). La solution du modèle montre que le recyclage des batteries lithium-ion de véhicules et des appareils électroniques est une stratégie optimale

économiquement, mais sans atteindre le maximum du potentiel, et sans tenir compte des coûts de transport. Cependant, avec une réduction des coûts d'opération de seulement 10 % permet d'atteindre le maximum du potentiel (jusqu'à 0,15 kt en 2050).

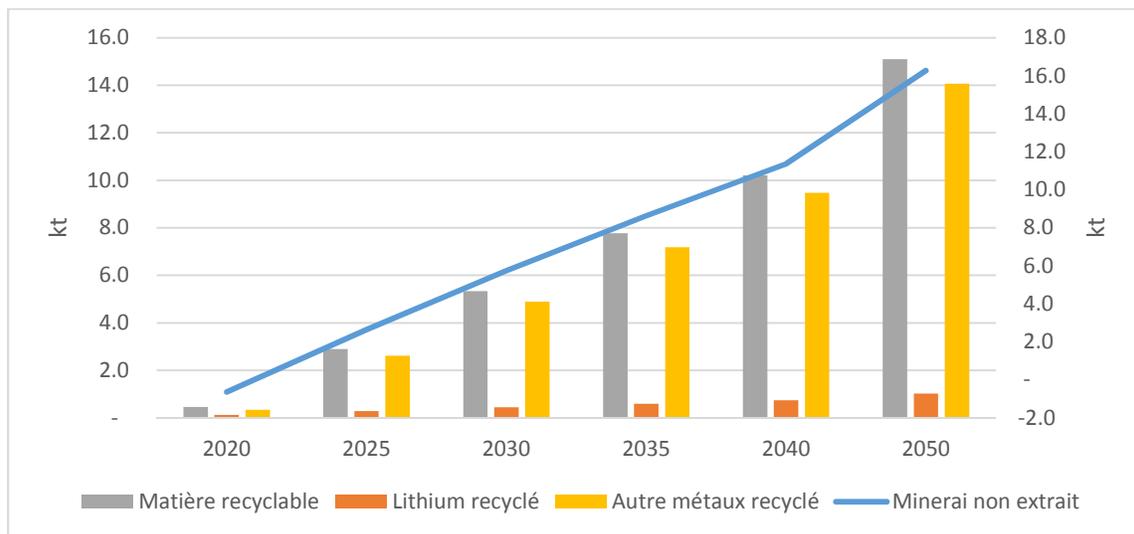
Par contre, le recyclage des contenants de verre n'apparaît pas comme une option optimale. Une énorme réduction des coûts est nécessaire pour voir la stratégie faire partie de la solution optimale et la quantité de lithium pouvant être recyclé est minime.

Figure 4-11. Utilisation de matières premières pour la production de lithium recyclé



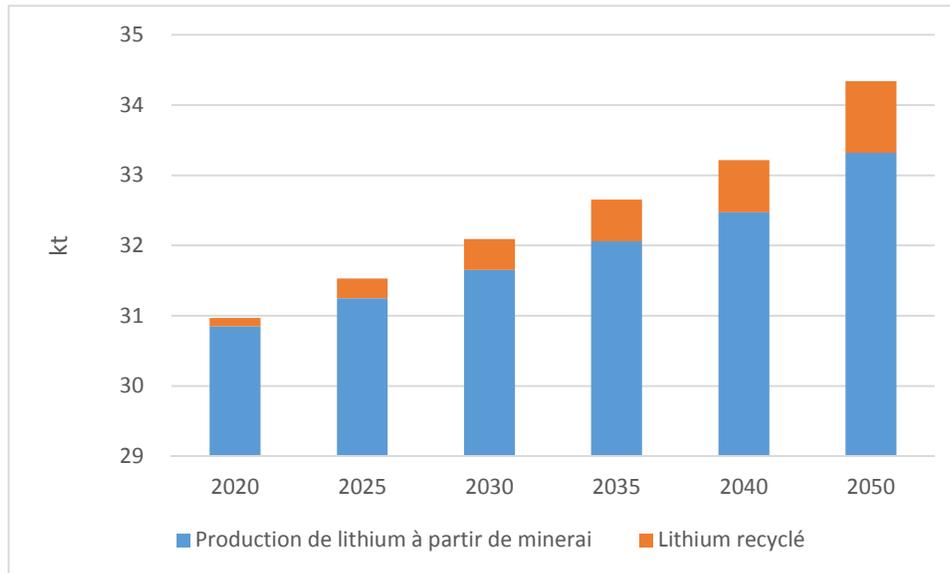
La Figure 4-12 compare les quantités totales de matières premières utilisées (batteries lithium-ion et verre) avec les quantités de lithium et autres métaux recyclés dans le scénario avec les coûts réduits. Les métaux produits sont du lithium recyclé (6,8 %) et d'autres métaux (93,2 %) comme l'aluminium, le cobalt, le nickel et le cuivre. Ces stratégies permettent d'éviter l'extraction de 16,3 kt de minerais (contenant environ 1,5 % de lithium) en 2050.

Figure 4-12. Utilisation de matières premières, production de lithium et autres métaux recyclés et minerais non extraits



La Figure 4-13 montre les types de matières premières utilisées pour la production du lithium dans le scénario avec les coûts réduits. La quantité de lithium recyclé qu'il est possible d'obtenir à partir des différentes sources de matières premières est toute de même significative par rapport à la demande totale.

Figure 4-13. Source de matières premières pour la production du lithium



4.8.4 Analyse et discussion

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

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

Quant au recyclage des contenants de verre issus de la collecte sélective, ces opérations ne sont pas rentables en comparaison du coût de l'enfouissement. L'analyse n'a pas été effectuée pour le verre utilisé dans la fenestration ou de la vitrocéramique. De plus, une solution récemment adoptée de collecte sélective très performante va être mise en place pour la vente de verre recyclé; le problème du verre est donc résolu autrement (Porter, 2017).

4.9 Stratégie 9- Modularités des équipements mécaniques et industriels

Les équipements mécaniques et industriels, contenant pour la plupart du fer et du cuivre, représentent une quantité non négligeable de produits finis importés au Québec. Il s'agit par

exemple de machines et appareils pour la production du froid, pour l’emballage ainsi que pour le levage, le chargement/déchargement et la manutention ou encore, des chasse-neiges non autopropulsés. La modularité de ces machines et appareils, visant à remplir plus d’une fonction ou à allonger leur durée de vie, optimise l’utilisation des métaux qu’ils contiennent.

4.9.1 *Rappel des freins et leviers*

L’analyse des freins et leviers, telle que réalisée par Gervais et al (2017), est résumée ci-dessous et dans le Tableau 4-25.

Pertinence. Généralement, la modularité des machines et appareils est pertinente puisqu’elle présente un intérêt autant économique qu’environnemental. Par contre, l’approche peut avoir des limites si on conçoit un équipement modulable afin de pouvoir doubler sa capacité dans plusieurs années; il n’est pas garanti qu’il y ait un gain économique ou environnemental à utiliser un équipement disproportionné pour ses besoins pendant les premières années.

Faisabilité. Par ailleurs, la modularité est faisable et il existe plusieurs exemples à l’appui. Alors que le processus de design des produits fonctionne souvent par sections pour faciliter l’assemblage et réduire les coûts, et implique des équipes de travail différentes, la modularité nécessite plutôt un travail collaboratif des équipes sur les interfaces communes pour faciliter la transformation des produits dans le temps. Il y a de l’amélioration à apporter sur ce plan.

- Équipements de réfrigération et de climatisation : Ces équipements ne sont généralement pas conçus pour permettre le remplacement des compresseurs ou des moteurs. Il faudrait donc les concevoir dans une optique de remise à niveau. Dans d’autres cas, il est parfois plus judicieux de remplacer l’équipement pour avoir une meilleure efficacité énergétique.
- Équipements de manutention: La flexibilité représente un critère de base, car les entreprises veulent s’assurer de pouvoir les adapter (par ex. un bras robotisé) plusieurs années en fonction des prochaines générations de produits à développer.
- Équipements industriels : Plusieurs entreprises ont leur propre atelier mécanique et transforment les équipements existants pour allonger leur durée de vie, améliorer leur performance, mettre à jour les technologies de l’information qui leur sont associées, ou encore, les automatiser à l’aide de capteurs de contrôle et automates programmables. Il n’est souvent pas nécessaire de remplacer les équipements. Les industries préfèrent se doter d’équipements petits et modulables que d’équipements volumineux, afin d’avoir une plus grande polyvalence dans la production.
- Chasse-neiges : Plutôt que d’utiliser des chenillettes pour le déneigement des trottoirs, lesquelles sont entreposées le reste de l’année, certaines municipalités commencent à faire l’acquisition de petits tracteurs dotés d’un bras articulé pour installer une pelle pour déneiger les trottoirs en hiver ou un balai pour le lavage des trottoirs les autres saisons, optimisant ainsi l’utilisation des métaux contenus dans le tracteur.
- Tracteurs agricoles : De même, tous les équipements peuvent être branchés au même axe de moteur situé à l’arrière du tracteur. Le tracteur est donc très polyvalent.
- Appareils électroménagers : Il s’agit par exemple d’un moteur sur socle sur lequel peuvent se brancher divers accessoires aux fonctions différentes (mélangeur, hachoir, coupe-légumes, machine à pâtes, robot culinaire, etc.).

État actuel. Bien qu’il y ait encore de grands pas à franchir dans l’écoconception des machines et appareils, leur adaptation dans les ateliers mécaniques et informatiques des industries, pour les

adapter aux besoins du marché, est une tendance réelle. Les industries sont pour la plupart déjà dans cette logique. Plusieurs entreprises ont déjà intégré des pratiques favorisant l’adaptation et la modularité de leurs équipements pour allonger leur durée de vie et rentabiliser leurs investissements. Pour les fournisseurs d’équipements, la modularité devient un argument de vente. Il reste toutefois encore beaucoup de chemin à parcourir pour intégrer l’écoconception dans les formations de même que dans le processus de design des produits.

Tableau 4-25. Freins et leviers – Modularité des équipements mécaniques et industriels

Freins	Leviers
<ul style="list-style-type: none"> • Effondrement d’un secteur industriel • Miniaturisation qui rend désuets des équipements • Équipements spécialisés et dédiés • Normes et spécifications • Carence de formation en écoconception • Financement insuffisant pour l’achat de produits de qualité par les usagers 	<p>Fabricants et fournisseurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rétention de la clientèle, argument de vente • Meilleure qualité du produit modulable • Appropriation des parts de marché des concurrents • Meilleure rentabilité par l’écoconception • Réduction du temps nécessaire à l’obtention des approbations en fonction des normes, pour un équipement modulable <p>Industries :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Coût de l’équipement qui incite à l’allongement de la durée de vie, diminution du cycle commercial des produits, ateliers en usine <p>Autres :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Courtiers d’équipements usagés • Formation en écoconception • Services d’écoconception offerts aux entreprises (surtout les PME) par le Gouvernement (équipe experte dédiée), services d’écoconception de proximité • Incitatifs fiscaux encourageant l’adaptation, la réparation ou la remise à neuf

Source : Gervais et al., 2017.

4.9.2 Fiche technico-économique

Technologies impliquées. Cette stratégie concerne les équipements mécaniques et industriels modulaires. Selon la littérature, la définition de module est la suivante (Gershenson et al., 2003):

- Le module est défini comme un composant ou un groupe de composants pouvant être retirés du produit sans détruire ni le composant ni le produit.
- Ce module fournit une fonction de base unique au produit.
- Enfin le module peut être réutilisé ou de nouveau fabriqué facilement. Une telle architecture modulaire permet de réaliser un changement de conception à un sous-ensemble du produit, sans affecter les autres.

Plusieurs entreprises présentes au Québec proposent des solutions de modularité à travers leurs produits, dont:

- Pedlex (2017): cette entreprise propose une multitude de solutions modulaires pour les bureaux, les ateliers et rangements industriels.
- Flexpipe (2017): cette entreprise propose des structures d'acier entièrement modulaires pouvant être montées facilement dans le cas d'entrepôts et de chaînes de production.
- Gilbert (2017): cette entreprise utilise une conception modulaire pour leurs différents tracteurs, déposés sur un châssis chenille.
- Leviton (2017): cette entreprise propose des centres de données modulaires selon la taille de l'entreprise et les besoins de celle-ci.

Paramètres technico-économiques. La modularité peut donc s'appliquer à de très nombreux produits. Concernant les équipements mécaniques et industriels, la littérature n'a pas fourni d'informations pertinentes qu'il serait possible d'exploiter afin d'évaluer l'impact de stratégies de modularité sur la circularité des métaux concernés. De plus, il est compliqué, sans études précises, de comparer ces produits modulaires avec des produits ordinaires. Il faudrait déterminer la quantité de matière qui est sauvée par ces conceptions, connaître la durée de vie des produits et enfin leurs coûts respectifs de production et de maintenance. Par un manque d'information quantitative évident sur le sujet, il n'est pas possible de réaliser une analyse technico-économique de cette stratégie.

4.9.3 Modélisation technico-économique

Cette stratégie n'a pas fait l'objet d'une modélisation.

4.9.4 Analyse et discussion

Potentiel de circularité. La pertinence environnementale de la modularité est évidente, cependant, il n'existe aujourd'hui qu'une très faible littérature quantitative sur l'utilisation d'un tel procédé. Les avantages de la conception modulaire sont reconnus (Gershenson et al., 2003), mais il n'y a peu ou pas d'études connues visant à illustrer les avantages de la modularité des produits durant leur conception et leur durée de vie utile.

Faisabilité technico-économique. Il n'y a pas suffisamment d'information pour se prononcer à cet effet.

4.10 Stratégie 10- Écoconception des poutres en acier

Au Canada, 45 % du fer (acier) est utilisé dans la construction des bâtiments ou des infrastructures (Müller et al., 2010). Puisque la durée de vie des bâtiments et des infrastructures est longue, une des stratégies avancées est l'écoconception des poutres en acier dans une optique de réemploi. Cela implique notamment l'utilisation de raccords vissés plutôt que soudés pour permettre le démontage, l'utilisation de connexions standards, de ne pas avoir de revêtements et d'avoir si possible des poutres de longue portée pour permettre la coupe ultérieure.

4.10.1 Rappel des freins et leviers

L'analyse des freins et leviers, telle que réalisée par Gervais et al (2017), est résumée ci-dessous et dans le Tableau 4-26.

Pertinence. Le marché des structures métalliques est très compétitif. Les fabricants québécois doivent composer d'une part, avec le *Buy American Act*, qui limite la participation à certains projets et d'autre part, à des concurrents internationaux comme la Chine et l'Inde qui

soumissionnent sur des projets. Il n’y a pas pour le moment d’incitatifs favorisant le contenu local. De plus, les appels d’offres qui privilégient les plus bas soumissionnaires limitent les possibilités d’offrir des projets de meilleure qualité ou intégrant des considérations environnementales.

L’idée de l’écoconception des poutres pour leur réemploi apparaît intéressante pour les fabricants, mais tout est une question de prix. Avec la compétitivité du secteur, il est difficile pour le moment d’ajouter une nouvelle variable environnementale dans les projets. La stratégie est difficilement réalisable dans le contexte économique actuel et l’effet ne se ferait sentir que sur le long terme.

Faisabilité. Il semble que les clients et les prêteurs ne soient pas prêts à payer la prime requise pour de telles conceptions. Le déplacement de bâtiments sur de nouvelles fondations est une alternative toujours moins économique que la construction d’une nouvelle structure métallique. La raison principale étant qu’il faut prévoir un chantier supplémentaire pour le démontage et que cette étape coûte généralement plus cher que le prix de l’acier.

Quant à l’idée de privilégier des poutres de longue portée afin de mieux pouvoir les couper pour le réemploi, il semble que cela ne soit pas pertinent, car la poutre supporterait trop pour ce qui est réellement nécessaire. Il serait donc préférable de faire fondre l’acier et de fabriquer des poutres aux dimensions requises pour la performance désirée.

Pour permettre le démontage des poutres, il faudrait des systèmes d’attache (ex. : boulons) extrêmement durables afin qu’ils restent intacts (ex. : pas de rouille) et qu’il soit alors possible de les détacher. Une des idées proposées serait d’avoir des poutres modules, de formats standards, un peu comme des Lego pouvant être réutilisés d’un bâtiment à l’autre. D’ailleurs, au niveau des standards, il faudrait développer des standards très précis, de concert avec tous les acteurs, pour permettre le démontage des poutres.

Il faudrait également réaliser divers tests pour certifier la résistance des poutres. Il y a des chances que l’acier soit réemployé dans des applications pour lesquelles la performance mécanique n’est pas un enjeu, par exemple, pour la décoration des bâtiments.

État actuel. Il existe des fabricants de poutres d’acier au Québec. Aucun n’a entrepris ce type de démarche et aucun avancement sur cette question n’a eu lieu. Ce serait possible d’un point de vue logistique, mais les obstacles sont importants d’un point de vue économique.

Tableau 4-26. Freins et leviers – Écoconception des poutres en acier

Freins	Leviers
<ul style="list-style-type: none"> • Règle du plus bas soumissionnaire limitant l’innovation et la qualité • Augmentation possible du coût de l’acier par rapport à d’autres matériaux sans exigence de réemploi • Temps et main-d’œuvre pour le démontage nuisant à la rentabilité • Normes du Code du bâtiment : intégrité de la poutre et coefficient de sécurité • Faible disponibilité des poutres d’acier usagées Fin de vie des poutres n’étant pas une préoccupation pour les fabricants 	<ul style="list-style-type: none"> • Projet de loi en cours d’adoption pour les paiements plus rapides des travaux de construction : entrepreneurs en meilleure position pour investir dans l’écoconception • Développement de standards de concert avec tous les acteurs • Crédits à la déconstruction • Qualité à mettre davantage au-devant dans les critères d’évaluation des soumissions • Rareté de l’acier pouvant entraîner les fabricants à garder la mainmise de leurs poutres • Conditions ambiantes propices à l’intégrité des poutres

Freins	Leviers
	<ul style="list-style-type: none"> • Poutres conçues pour durer et pour être démontées (ex. : systèmes d'attaches)

Source : Gervais et al., 2017.

4.10.2 Fiche technico-économique

Il est difficile de réaliser une analyse technico-économique de cette stratégie étant donné le manque d'information quantitative sur le sujet.

4.10.3 Modélisation technico-économique

Cette stratégie n'a pas fait l'objet d'une modélisation.

4.10.4 Analyse et discussion

Potentiel de circularité. Le potentiel de circularité de cette stratégie est incertain, mais il apparaît intéressant, puisqu'elle permet d'augmenter le remploi de l'acier. Elle est également pertinente d'un point de vue environnemental.

Faisabilité technico-économique. Suivant l'analyse des freins et leviers, il est possible d'affirmer que cette stratégie n'est pas économiquement optimale, du moins, actuellement. La réutilisation de poutres possède en effet des freins économiques très importants. Tout d'abord, notons que le marché des structures métalliques est un marché international très compétitif. Le Québec est en concurrence avec de gros joueurs. Avec cette compétitivité, il est difficile d'ajouter une nouvelle variable environnementale dans les projets de structures métalliques.

4.11 Stratégie 11- Déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures

La déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures consiste à retirer successivement les composantes d'un bâtiment ou d'une infrastructure afin d'en récupérer un maximum d'éléments réutilisables et recyclables pour d'autres chantiers (Recyc-Québec, 2016). Dans le secteur de la construction, rénovation et démolition, les métaux sont généralement assez bien récupérés. Les matières les plus problématiques sont le gypse et les bardeaux d'asphalte pour lesquels les débouchés sont limités.

4.11.1 Rappel des freins et leviers

L'analyse des freins et leviers, telle que réalisée par Gervais et al (2017), est résumée ci-dessous et dans le Tableau 4-27.

Pertinence. La déconstruction est pertinente pour des bâtiments ou infrastructures avec une certaine ampleur, afin de légitimer le travail associé à une planification de déconstruction, alors que la déconstruction d'une maison serait de moindre intérêt par exemple. La déconstruction est également de mise lorsqu'on veut préserver la structure d'un bâtiment ou d'une infrastructure. Cette pratique est encore peu répandue, pour des raisons économiques principalement.

Faisabilité technique. La déconstruction est faisable techniquement. Dans un bâtiment industriel, commercial ou institutionnel, l'intérieur peut être déconstruit, mais le noyau (béton) et l'enveloppe (acier) sont généralement démolis et recyclés. Dans le cas de la déconstruction de la gare maritime Champlain dans le port de Québec, les ouvriers ont d'abord regroupé l'ameublement pour en effectuer la vente, puis tous les matériaux récupérables ou recyclables

ont été retirés et triés en vue de leur disposition (ex. : extincteurs, dispositifs de chauffage, éclairage). Ensuite, ils ont procédé au dégarnissage de toutes les surfaces et ouvertures (ex. : plafonds suspendus, portes, fenêtres) et ont fait des travaux de décontamination (ex. : désamiantage). En dernier lieu, les poutres, colonnes et dalles ont été découpées et cisailées à l'aide d'une machinerie spécialisée. Les barres d'armature (acier) ont été triées pour être recyclées alors que le béton a été broyé et granulé pour être utilisé comme matériel de remblayage sur le site (Demers, 2016). Dans une maison, la déconstruction se traduit généralement par le démantèlement des composantes qui ont de la valeur. Typiquement seront récupérés les portes, les fenêtres, les armoires, la quincaillerie, les planchers de bois franc, les articles de plomberie, les systèmes de chauffage et de ventilation, etc.

Dans tous les cas, les métaux vont être récupérés pour le réemploi, mais surtout pour le recyclage, étant donné leur grande valeur. Une partie du secteur résidentiel non soumis au décret de la construction, la législation du milieu syndiqué de la construction fixe des seuils salariaux élevés qui limite l'accès aux chantiers à certains corps de métiers et qui nuit donc à la rentabilité de la déconstruction (RénoCyclage, 2013). Il est rare qu'une structure de métal soit déconstruite compte tenu des coûts de main-d'œuvre. L'acier est plutôt acheminé dans les divers centres de tri du Québec où il est trié mécaniquement (séparateurs magnétiques) ou manuellement en un seul grade pour être vendu aux recycleurs de ferraille. Quant au cuivre, du fait de sa grande valeur, que ce soit une déconstruction ou une démolition, il sera récupéré pour être recyclé, mais rarement réemployé. Pour ce qui est des infrastructures comme l'échangeur Turcot, on cisaille et on fait tomber les dalles de béton alors que les armatures d'acier sont récupérées et envoyées au recyclage.

État actuel. Contrairement à d'autres pays, on peut qualifier le degré d'avancement de très faible en déconstruction au Québec. Quelques projets de démonstration ont été réalisés pour faire l'évaluation économique de la déconstruction comparativement à la démolition. Le Québec peut sans aucun doute bâtir une filière de déconstruction en s'inspirant des meilleures pratiques, mais dans tous les cas, les métaux sont déjà largement récupérés lors de la démolition.

Tableau 4-27. Freins et leviers – Déconstruction sélective des bâtiments

Freins	Leviers
<ul style="list-style-type: none"> • Réglementation et décret de la construction : seuils salariaux élevés • Marché des matériaux usagés : dimensions non standards • Marché de réemploi des matériaux peu structuré, mise en marché déficiente, jonction offre/demande aléatoire et peu conviviale • Statut de « matières résiduelles » aux matériaux récupérés sur chantiers, même à des fins de réemploi • Bas tarifs à l'élimination • Réticences des entrepreneurs à modifier leurs habitudes 	<ul style="list-style-type: none"> • Allègement de la réglementation pour la déconstruction (ex. : nouvelles catégories de corps de métiers) • Création d'emplois et réinsertion sociale • Volonté des entrepreneurs de faire les choses autrement, logistique de ségrégation des matériaux avec des conteneurs • Bannissement des métaux des lieux d'élimination • Programme de financement pour le démarrage d'entreprises de déconstruction • Mission entrepreneuriale en déconstruction • États généraux sur la déconstruction • Modèle caritatif pour les entreprises de déconstruction (reçu de charité déductible d'impôts pour les propriétaires donnant leurs matériaux)

Freins	Leviers
	<ul style="list-style-type: none"> • Incitatifs municipaux : crédits d'impôts, rabais, gratuité à l'enfouissement des résidus; délivrance rapide de permis de déconstruction • Réseau structuré de réemploi des matériaux : inventaire, entreposage (intérieur), commercialisation, plateformes

Source : Gervais et al., 2017.

4.11.2 Fiche technico-économique

Lors d'une démolition, les résidus du bâtiment sont expédiés dans un centre de tri qui s'occupe de séparer les différents métaux : grâce à de simples procédés, on récolte la totalité du fer et du cuivre présent (Morneau, 2009). Les métaux sont en général recyclables un très grand nombre de fois, si ce n'est une infinité, sans perte de leurs propriétés. Cela est le cas pour le fer et le cuivre (Consoglobe, 2010). Notons cependant que le fer, en présence de certains métaux, peut voir sa récupération délicate, voire impossible. Le tri de ces deux métaux est simple, notamment pour le fer : on utilise en effet le caractère magnétique de ce métal pour le trier à l'aide d'un grand électro-aimant. Le lithium dans les bâtiments n'est contenu que dans le verre. Le verre est une ressource recyclable à l'infini, le lithium reste donc prisonnier du cycle d'utilisation du verre.

Information générale. La démolition ou la déconstruction sélective ne change généralement pas la quantité de métaux récupérés. Cependant, on change le rapport entre recyclage et emploi. Dans le cas de la démolition, les métaux seront recyclés dans leur totalité. Dans le cas de la déconstruction sélective, les métaux pourront être réemployés. Il apparaît que le réemploi du cuivre ne se pratique que très rarement, celui-ci sera davantage recyclé à 100 %. Le réemploi des structures d'acier d'un bâtiment, quant à lui, a déjà été réalisé plusieurs fois à travers le monde (Sergio & Gorgolewshi, 2003).

Paramètres technico-économiques. Quelques exemples ont été recensés dans la littérature. Par exemple, l'objectif de la déconstruction du bâtiment *Meubles en Gros* à Montréal était de prioriser le réemploi et détourner les matériaux des sites d'enfouissement, plus précisément de détourner 95 % des matériaux de l'enfouissement et d'en réutiliser 10 % (Ville de Montréal, s.d.; Fortier, 2011). Actuellement, la filière du réemploi demeure marginale et possède un potentiel pour l'acier et les planches de bois, mais moins pour les autres composantes. Il y a jusqu'à 85 % des matériaux qui sont récupérés par les entrepreneurs de toute manière, vu leur valeur sur le marché du recyclage. De plus, 5 % des composantes du bâtiment sont dès le départ condamnées à l'enfouissement parce qu'elles ne peuvent être recyclées ou valorisées.

Lors de la déconstruction d'un bâtiment de 2 465 m² à Saint-Jean-sur-Richelieu au Québec en 2003, le temps de déconstruction a été environ trois fois plus long que celui qui est nécessaire dans la démolition traditionnelle (Millette, 2010). Cependant, puisque la structure d'acier possède une grande valeur, soit environ 55 000\$ dans ce cas, cette technique s'est démontrée rentable. La réutilisation de la structure d'acier était plus rentable que son recyclage, puisque le prix de l'acier manufacturé est grandement supérieur à celui de l'acier brut. Dans ce projet, les coûts de transport étaient également faibles, car les composantes ont été prises en charge à proximité du site. Le taux d'acier du bâtiment réutilisé/réemployé fut de 95,3 % (Tableau 4-28). Les données correspondantes pour le cuivre ne sont pas disponibles.

Tableau 4-28. Taux de réutilisation des matériaux d'un projet de déconstruction sélective

Composante	Quantité (t)	% de composition du bâtiment	Usage
Structure d'acier	47,27	4,84	Réutilisation/réemploi à 100 %
Tôle d'acier	20,14	2,06	Réutilisation/réemploi à 100 %
Profilé d'acier	3,36	0,34	Recyclage à 100 %

Source : (Millette, 2010)

D'autres exemples illustrent les difficultés de rentabiliser les activités de déconstruction. Une étude comparative des coûts de démolition et de déconstruction concernant un bâtiment résidentiel de 137 m² au Massachusetts (États-Unis) rapporte des coûts de déconstruction de 17 % à 25 % supérieurs à ceux de la démolition (Dantata et al., 2004). Un autre cas concernant un bâtiment résidentiel de 100 m² au Portugal mène à la même conclusion (Coelho & Brito, 2010). Le Tableau 4-29 montre la répartition des coûts moyens sur le coût total entre la démolition et la déconstruction, ainsi que les coûts réels que cela représente pour une entreprise.

Tableau 4-29. Analyse économique d'un projet de déconstruction sélective

	Démolition conventionnelle	Déconstruction sélective	% de différence
Répartition des coûts			
Installation sur chantier	3,1 %	2,8 %	
Travail humain	4,9 %	22,1 %	
Équipements utilisés	9,5 %	20,0 %	
Transport	6,1 %	27,1 %	
Élimination des matériaux	75,8 %	28,0 %	
Coûts			
Travail humain	\$283	\$1 697	83 %
Équipements utilisés	\$546	\$1 540	65 %
Transport	\$218	\$1 756	88 %
Élimination des matériaux	\$2 688	\$1 914	-40 %
Total	\$3 735	\$6 906	46 %

Source : (Coelho & Brito, 2010).

Enfin, d'un point de vue énergétique, la démolition d'un camp militaire de 34 hectares avec 25 bâtiments et permettant de récupérer : 118 t d'acier, 0,3 t de cuivre et 21,9 t de verre, indique des performances similaires en termes de dépenses énergétiques et émissions de GES, à condition de valoriser le bois des bâtiments après combustion (Roussat et al., 2009).

4.11.3 Modélisation technico-économique

La quantité de matériaux demeurant inchangée selon la déconstruction ou la démolition, seul change les taux de recyclage et de réemploi. Il n'est donc pas aisé de modéliser deux scénarios distincts dans l'analyse technico-économique: en effet, utiliser la déconstruction plutôt que la démolition n'a que peu d'impacts sur la chaîne en amont de l'utilisation des métaux (extraction, transformation). De plus, la stratégie n'apparaît pas intéressante d'un point de vue économique : elle ne sera donc pas choisie par le modèle technico-économique sans incitations financières importantes. Pour ces deux points, cette stratégie ne sera pas modélisée dans le modèle technico-économique.

4.11.4 Analyse et discussion

Potentiel de circularité. Le potentiel de circularité est significatif, puisque la déconstruction sélective permet d'augmenter le rapport entre réemploi et recyclage comparativement à la démolition. Plusieurs exemples démontrent cette affirmation. Bien que cette stratégie ne contribue pas vraiment à augmenter la quantité de métaux récupérés au final (par rapport à la stratégie de recyclage elle-même), elle est pertinente d'un point de vue de l'économie circulaire puisqu'elle privilégie le réemploi avant le recyclage.

Faisabilité technico-économique. Bien qu'un des exemples de déconstruction sélective (Milette, 2010), parmi ceux recensés, fut considéré comme étant rentable avec la réutilisation de la structure d'acier, il est difficile d'affirmer que cette stratégie est économiquement optimale de manière générale. En effet, un salarié employé dans la démolition d'un bâtiment équivaut à entre trois et six salariés employés pour la déconstruction sélective du même bâtiment. De plus, d'après une étude de cas québécoise, le temps de déconstruction d'un bâtiment est trois fois plus grand que celui nécessaire à une démolition traditionnelle (Milette, 2010; Coelho & de Brito, 2011). Par ailleurs, les matériaux extraits sur place doivent être triés et envoyés sur les sites adéquats par types de contenus : cela ajoute du temps et des frais de transport. Finalement, lorsque l'on s'intéresse aux études scientifiques, le coût de démolition est souvent inférieur aux coûts de déconstruction (Coelho & de Brito, 2011; Dantata et al., 2005).

4.12 Stratégie 12- Écoconception des véhicules

Les véhicules routiers, ainsi que les trains, les bateaux et les avions, contiennent pour la plupart du fer (carrosserie en acier), du cuivre (moteur, filage) et dans le cas des véhicules électriques, du lithium (batterie). L'écoconception réfère aux éléments suivants : légèreté et résistance, démontabilité, modularité, recyclabilité et faible consommation énergétique. Dans le domaine plus général de la mobilité durable, le discours actuel porte principalement sur l'électrification des transports, ainsi que sur les formes de partage des véhicules, dont le covoiturage et l'autopartage. Ce sont ces derniers aspects qui ont surtout été abordés par l'analyse technico-économique.

4.12.1 Rappel des freins et leviers

L'analyse des freins et leviers, telle que réalisée par Gervais et al (2017), est résumée ci-dessous et dans le Tableau 4-30.

Pertinence. L'écoconception en soi n'est pas un terme fortement utilisé dans le langage des constructeurs de véhicules, mais le concept demeure pertinent en regard de l'économie circulaire et plusieurs exemples en témoignent.

Faisabilité. Dans le secteur automobile, les recherches portent surtout sur l'utilisation de matériaux plus légers (ex. : aluminium, plastique) afin d'accroître l'autonomie des véhicules électriques, tout en respectant les normes de sécurité. Le développement de nouveaux matériaux devrait surtout être porté par l'implantation des véhicules de partage. Plusieurs constructeurs automobiles visent d'ailleurs pour 2020-2021 l'introduction de flotte de véhicules électriques partagés en milieu urbain. Puisque les véhicules sont utilisés plus fréquemment, cela requiert des matériaux résistants, faciles à nettoyer et à remplacer. On devrait donc voir apparaître des clubs de partage.

Pour les camions et les autobus, les constructeurs veillent plutôt à ce qu'ils soient bien réparables et démontables. Étant donné que plusieurs camions sont utilisés en régions éloignées, dans le

secteur minier ou forestier par exemple, il faut en effet être en mesure de les réparer facilement et dans toutes conditions. La robustesse est également de mise et les pièces doivent être faciles à remplacer. Quant à la modularité des véhicules, elle fait son apparition très timidement, mais la tendance devrait augmenter avec le temps. Elle requiert un châssis ultra durable, pour permettre de garder la structure du véhicule, et de pouvoir y changer des composantes au gré de l'évolution technologique, de l'usure ou des bris.

État actuel. En général, les constructeurs québécois de véhicules font peu référence à l'écoconception, mais ils travaillent tout de même sur les aspects de démontabilité des véhicules lourds. Quant aux constructeurs automobiles (aucun au Québec), à l'exception de Tesla, peu sont enclins à écoconcevoir leurs véhicules à moins d'y être obligés. Par contre, plusieurs constructeurs automobiles travaillent à intégrer des flottes de véhicules électriques partagés. La construction de véhicules est une industrie centenaire, qui présente des résistances à changer ses façons de faire. Les initiatives d'écoconception portent principalement sur l'électrification des transports, sans pour autant viser la préservation des métaux à l'étude.

Tableau 4-30. Freins et leviers – Écoconception des véhicules

Freins	Leviers
<ul style="list-style-type: none"> • Constructeurs se limitant à leurs obligations • Pas d'effet de levier pour le Québec qui est un petit marché • Constructeurs peu motivés à construire des véhicules électriques : pas assez de revenus, modification des procédés, dépendance pour la batterie • Concessionnaires qui encouragent les véhicules à essence pour le service après-vente (revenus) • Contraintes sur l'écoconception pas assez agressives dans les appels d'offres (ex. : autobus et camions) • Résistances, pressions et menaces des constructeurs en cas d'ingérence de l'État • Lobby pétrolier • Résistance aux changements par les consommateurs 	<ul style="list-style-type: none"> • Incitatifs gouvernementaux (municipal, provincial, fédéral) pour encourager les véhicules électriques (financement, voies réservées, stationnements gratuits) • Loi VZE du Gouvernement du Québec qui obligera les constructeurs automobiles à respecter une cible annuelle de vente de VZE • Directive européenne rendant les constructeurs responsables de la fin de vie de leurs véhicules et qui fixe des règles d'écoconception • Compétitivité chez les constructeurs • Programmes d'aide du MTMDET favorisant la durabilité des autobus publics et l'électrification des autobus scolaires • Augmentation du coût de l'essence • Écart important entre le prix de l'essence et le prix de l'électricité (faible en émissions GES) au Québec • Information, sensibilisation et éducation des consommateurs

Source : Gervais et al., 2017.

4.12.2 Fiche technico-économique

Cette stratégie comporte plusieurs sous-stratégies : l'électrification des transports, l'utilisation de matériaux différents, l'autopartage, les transports en commun et les véhicules modulaires. L'autopartage (véhicules électriques, hybrides rechargeables et conventionnels) et l'utilisation de matériaux plus légers ont fait l'objet d'une analyse plus approfondie.

4.12.2.1 Autopartage

Définition du scénario étudié. Le service d'autopartage de véhicules consiste à instaurer au sein d'un territoire une flotte de véhicules qu'il est possible d'emprunter pour de courtes périodes. Ce

service est particulièrement écologique, car il donne la possibilité aux membres d'utiliser une voiture ponctuellement, sans le besoin d'en posséder une. Cela permet ainsi de réduire le nombre de véhicules produits et achetés. L'analyse de cette stratégie permettra de comparer un scénario d'évolution du nombre de véhicules au Québec incluant une stratégie d'autopartage de véhicules avec un scénario de référence sans mesures particulières. L'analyse de cette stratégie implique la construction d'un scénario pour le Québec et l'estimation de plusieurs facteurs évolutifs.

Technologies impliquées. La stratégie est d'abord appliquée à tous les véhicules (petites et grandes voitures) et ensuite exclusivement aux véhicules électriques et hybrides rechargeables.

Paramètres techniques. Les principales variables de l'analyse sont présentées dans le Tableau 4-31. Il s'agit d'estimer l'évolution de la quantité de véhicules partagés au Québec à l'horizon 2050 pour satisfaire une demande de transport des passagers:

- La demande de transport de passagers par véhicules (petites et grandes voitures seulement, et non les camions légers), exprimée en millions de passagers-kilomètres, provient du modèle NATEM et ne change pas. En d'autres mots, les besoins en déplacements des passagers sont considérés comme étant les mêmes, peu importe la présence de véhicules partagés ou non. Elle passe de 42 990 MPkm en 2011 à 62 434 MPkm en 2050 pour les petites voitures et de 37 193 MPkm en 2011 à 54 015 MPkm en 2050 pour les grandes voitures. Il est possible que les services d'autopartage contribuent à diminuer le nombre total de kilomètres parcourus annuellement, mais cela n'a pas été traité ici.
- De même, l'évolution du nombre de véhicules (petites et grandes voitures) provient des projections du modèle NATEM dans un scénario de référence. Le nombre de petites et grandes voitures atteint respectivement 2 830 milliers et 2 588 milliers en 2050.
- L'estimation et l'évolution du nombre de véhicules partagés pouvant contribuer à satisfaire la demande de transport des passagers nécessitent de poser un certain nombre d'hypothèses :
 - Car2go et Communauto sont les deux seuls services d'autopartage de véhicule au Québec, ils opèrent dans les villes suivantes : Montréal, Québec, Gatineau et Sherbrooke. Le nombre de véhicules partagés étant connu pour Montréal (Rocha & Rioux, 2016), un ratio de proportionnalité quant à la population respective des villes (ISQ, 2016b) a été appliqué afin d'estimer la flotte présente dans chacune des autres villes. En 2014, le nombre de véhicules partagés au Québec est ainsi estimé à 1 584 (Tableau 4-32).
 - Pour 2030, l'hypothèse est que toutes les villes de plus de 60 000 habitants comprendront des véhicules partagés, ce qui correspond à 16 villes, et que la croissance annuelle du nombre de véhicules partagés serait de 9,3 %, pour un compte de 10 585 véhicules partagés au Québec. Cela constitue une augmentation de 5,7 fois entre 2014 et 2030 ; cette augmentation est une nouvelle fois également attribuée à la période 2030-2050 pour atteindre 60 519 véhicules partagés.
- Ensuite, plusieurs études estiment le nombre de véhicules non utilisés ou non achetés par la mise en circulation de véhicules partagés (Tableau 4-33). Une estimation optimiste donnée dans la littérature a été utilisée: celle-ci indique que 13,5 % des membres d'un service d'autopartage n'achèteront pas de véhicules (Firnorn & Müller, 2011). Ainsi, en 2030, cela représenterait un total cumulé depuis 2014 de près de 59 422 véhicules non achetés sur le sol québécois. La quantité totale (et moindre) de véhicules

dans un contexte où les clubs de partage seraient disponibles à plus grande échelle, a pu ainsi être calculée. Par extrapolation, cela donne 339 748 véhicules non achetés en 2050.

- Alors que la demande pour le transport de passager est fixe, le nombre moyen de passagers par véhicule ne change pas, même avec l'utilisation de véhicules partagés. Le kilométrage moyen effectué par un véhicule partagé va quant à lui évoluer dans le temps, plus il y aura de véhicules partagés, plus le nombre de kilomètres parcouru par un véhicule annuellement augmentera en moyenne. En effet, un véhicule standard est stationné plus de 95 % du temps en moyenne (Morency et al., 2015). Pour satisfaire une même demande de transport, moins de véhicules sont nécessaires dans une stratégie d'autopartage. La différence entre les kilomètres annuels moyens parcourus par les voitures non partagées et ceux parcourus par les voitures partagées demeure liée aux hypothèses effectuées quant au nombre de voitures non achetées en raison de la mise en place de clubs de partage. Des hypothèses plus optimistes pourraient être testées.

Finalement, bien que les véhicules ne soient pas fabriqués au Québec et qu'il ne soit pas possible d'évaluer l'impact de cette stratégie sur les activités minières du Québec, il est possible néanmoins d'évaluer la quantité de métaux économisés par ces véhicules non achetés (conventionnels, hybrides rechargeables et électriques) en fonction de la solution du modèle NATEM. Les paramètres utilisés à cet effet sont :

- Le cuivre évolue selon le taux d'électrification du véhicule. Il double en moyenne lorsque l'on passe d'un véhicule doté d'un moteur à combustion interne à un véhicule hybride rechargeable. Il double encore lorsque l'on passe à un véhicule entièrement électrique. La quantité de cuivre par véhicule est considérée comme étant fixe en moyenne dans le temps. En effet, aucune littérature n'a pu être identifiée quant à son remplacement par d'autres matériaux.
- Par contre la quantité d'acier est amenée à évoluer, principalement parce que c'est un métal lourd. L'hypothèse posée est que le poids des véhicules a atteint une moyenne maximale en 2015, qui ne peut que diminuer. La littérature permet d'estimer le remplacement de certaines parties en acier par de l'aluminium d'ici à 2025 (Ducker Worldwide, 2016; Le Forum des Magisterants et Doctorants Algériens, 2012) : les estimations les plus faibles ont été utilisées pour analyser cette stratégie. L'aluminium étant plus léger que l'acier, mais moins résistant, on considère un gain de masse effectif de 45 %. Entre 2015 et 2050, l'hypothèse posée est que la quantité d'acier demeure constante.
- Le lithium est contenu dans les batteries des véhicules électriques, dont les quantités ont été estimées à la Stratégie 13.

Paramètres économiques. Le coût d'investissement et les coûts d'opération fixes pour un véhicule partagé sont considérés comme étant les mêmes que pour un véhicule individuel. Ces coûts sont spécifiés par unité de stocks véhicules, ils seront donc moindres dans un contexte d'autopartage. De même, les coûts d'opération variables sont les mêmes. Cependant, ces coûts sont spécifiés par unité d'activités des véhicules (par véhicules-kilomètres parcourus), ils seront donc supérieurs dans un contexte d'autopartage.

Tableau 4-31. Paramètres – Écoconception des véhicules – Autopartage

Évolution du nombre de voitures	Unité	Constante	2013	2015	2020	2035	2050	Références
Demande de transport								
Petites voitures	MPKm		44 227	45 464	48 556	56 664	62 434	NATEM
Grandes voitures	MPKm		38 263	39 333	42 008	49 023	54 015	NATEM
Nombre de voitures sans autopartage								
Petites voitures	k unités		2009	2053	2195	2543	2830	NATEM
Grande voitures	k unités		1825	1840	2008	2349	2588	NATEM
Nombre de voitures partagées								
Petites voitures	k unités			1	3	12	32	
Grande voitures	k unités			1	2	11	29	
Nombre de voitures non achetées								
Petites voitures	k unités			6	15	68	177	Rocha & Rioux (2016) ISQ (2016b)
Grande voitures	k unités			6	13	62	162	Ville de Montréal (2014)
Nombre de véhicules avec autopartage								
Petites voitures	k unités			2 052	2 187	2 517	2 688	Geoffroy (2016) Dussault (2013)
Grande voitures	k unités			1 832	2 000	2 301	2 458	Massé (2014)
Kilométrage moyen par année								
Petites voitures - Individuelles	km		15 407	15 499	15 482	15 442	15 442	Rocha & Rioux (2016)
Grandes voitures - Individuelles	km		15 828	15 818	15 796	15 757	15 757	Firnkorn & Müller (2011)
Petites voitures - Partagées	km			15 509	15 540	15 759	16 258	Morency et al. (2015).
Grandes voitures - Partagées	km			15 829	15 855	16 081	16 590	
Nombre moyen de passagers par voiture								
Petites voitures	n	1,43						NATEM
Grandes voitures	n	1,32						NATEM
Quantité moyenne de métaux par véhicule	Unité	Constante	2013	2015	2020	2035	2050	Références
Quantité moyenne de cuivre par véhicule								
Quantité de cuivre véhicule conventionnel	kg	22,5						Depuis, 2014; King (2012)
Quantité de cuivre VHR	kg	45,0						M. JQ (2017)
Quantité de cuivre VE	kg	80,0						
Quantité moyenne d'acier par véhicule								
Quantité d'acier véhicule conventionnel	kg		965	958	942	907	907	Ducker Worldwide (2016)
Quantité d'acier VHR	kg		965	958	942	907	907	

Quantité d'acier VE	kg		960	954	938	902	902	Le Forum des Magisterants et Doctorants Algériens (2012)
Capacité des batteries en circulation au Québec								
Capacité moyenne d'une batterie d'un VHR	kWh	17						Voir Stratégie 40
Capacité moyenne d'une batterie d'un VE	kWh	43						
Teneur en lithium dans chaque batterie	kg/kWh	0,333						Voir Stratégie 40

Tableau 4-32. Nombre de voitures partagées

Ville	Population en 2014	Nombre de voitures partagées en 2014 - Car2Go et Communauto	Nombre de voitures partagées en 2030	Nombre de voitures partagées en 2050	Référence
Montréal	1 735 096	1 010	4 190		Rocha & Rioux (2016) ISQ (2016b) Ville de Montréal (2014)
Québec	533 857	311	1 289		
Laval	421 959		1 019		
Gatineau	276 290	161	667		
Longueuil	241 267		583		
Sherbrooke	161 649	94	390		
Saguenay	146 005		353		
Lévis	142 564		344		
Trois-Rivières	134 690		325		
Terrebonne	111 206		269		
Saint-Jean-sur-Richelieu	94 640		229		
Brossard	84 964		205		
Repentigny	84 457		204		
Drummondville	74 587		180		
Saint-Jérôme	73 014		176		
Granby	66 656		161		
Total	4 382 901	1 576	10 585	60 519	

Tableau 4-33. Nombre de voitures non achetées

Variables	2014	2030	2050	Référence
Nombre de voitures non utilisées au Québec (méthode A)	23 635	158 772	907 792	Geoffroy (2016)
Nombre de voitures non utilisées au Québec (méthode B)	14 181	95 263	544 675	Dussault (2013)
Nombre de membres à Montréal	42 000			Massé (2014)
Nombre de membres dans tout le Québec	65 523	440 159	2 516 650	Morency et al. (2015)
Abstention d'achat de véhicules à Montréal (moyenne basse)	2 940			Rocha & Rioux (2016)
Abstention d'achat de véhicules à Montréal (moyenne haute)	5 670			Firnkorn & Müller (2011)
Nombre de voitures non achetées pour tout le Québec (moyenne basse)	4 587	30 811	176 166	
Nombre de voitures non achetées pour tout le Québec (moyenne haute)	8 846	59 422	339 748	

4.12.2.2 Utilisation de matériaux plus légers

Définition du scénario étudié. Cette stratégie permet d'analyser l'évolution de l'utilisation de matériaux plus légers (notamment l'aluminium) dans les véhicules personnels.

Technologies impliquées. La stratégie est appliquée à tous les véhicules (petites et grandes voitures) conventionnels, électriques et hybrides rechargeables.

Paramètres techniques. Les principales variables de l'analyse sont présentées dans le Tableau 4-34. Il s'agit d'estimer l'évolution de la quantité moyenne de métal par véhicule à l'horizon 2050 :

- Les mêmes hypothèses sont utilisées quant à la quantité de cuivre par véhicule que pour la stratégie d'autopartage.
- Par contre la quantité d'acier est amenée à évoluer, principalement parce que c'est un métal lourd. Bien que le poids soit une garantie de sécurité, et que l'on observe en moyenne une augmentation constante du poids d'un véhicule, notamment avec l'installation d'éléments de confort (vitres électriques, air conditionné, etc.) et de sécurité (frein ABS, électrostabilisateur programmé, etc.), les constructeurs sont amenés dans le futur à diminuer le poids de leur véhicule dans l'objectif de réduire la consommation de carburant (Kaiser et al., 2008). L'acier correspond entre 55 % et 66 % du poids d'un véhicule, il est donc intéressant de trouver des matériaux permettant de le remplacer.
- La littérature permet d'estimer le remplacement de certaines parties en acier par de l'aluminium d'ici à 2025 (Ducker Worldwide, 2016; Le Forum des Magisterants et Doctorants Algériens, 2012). Il est à noter que l'utilisation d'alliages d'acier à haute résistance, permettant de réduire le volume des pièces tout en conservant leurs propriétés mécaniques, est aussi envisagée, mais non documentée ici. L'aluminium étant plus léger que l'acier, mais moins résistant, on considère un gain de masse effectif de 45 %. Les hypothèses utilisées pour établir le scénario sont les suivantes :
 - Le poids des véhicules a atteint une moyenne maximale en 2015, qui ne peut que diminuer.
 - Les véhicules tout électriques utilisent en moyenne 5 % d'acier en moins que les autres véhicules, car les éléments suivants ont été retirés: la transmission et le tuyau d'échappement des gaz.
 - L'acier, qui possède de nombreux concurrents (aluminium, magnésium, titane), va progressivement être remplacé par différents matériaux, notamment moins lourds, qui permettront aux véhicules de gagner en légèreté. Le cas de l'aluminium a été davantage exploré.
- Le lithium est contenu dans les batteries des véhicules électriques, dont les quantités ont été estimées dans la Stratégie 13.

Ensuite, il est possible de déduire le poids moyen de chaque catégorie de véhicules en fonction de la diminution d'acier au profit de l'aluminium et d'estimer les économies de carburants en fonction de la différence de poids et de coefficients de la littérature (Tolouei & Titheridge, 2009; Shiau et al., 2009; Reynolds & Kandlikar, 2007).

Paramètres économiques. Le coût d'investissement et les coûts d'opération fixes et variables sont considérés comme étant les mêmes pour un véhicule conventionnel et un véhicule contenant une plus grande proportion d'aluminium au détriment de l'acier. Les quantités d'aluminium utilisées proviennent des projections déjà existantes des constructeurs automobiles et ne devraient pas faire augmenter le coût des véhicules au-delà de ce qui est causé par le taux d'inflation.

Tableau 4-34. Paramètres – Écoconception des véhicules – Utilisation de matériaux plus légers

Évolution du poids des véhicules et économies de carburants	Unité	2013	2015	2020	2035	2050	Références
Quantité moyenne d'acier par véhicule - avec aluminium							
Quantité d'acier véhicule conventionnel	kg	963	953	928	790	662	Ducker Worldwide (2016)
Quantité d'acier VHR	kg	963	953	928	790	662	Le Forum des Magisterants et Doctorants Algériens (2012)
Quantité d'acier VE	kg	958	948	923	786	658	
Poids moyen des véhicules - sans évolution des matériaux							
Poids moyen véhicule conventionnel	kg	1 597	1 591	1 577	1 544	1 544	RnCan (2017)
Poids moyen VHR	kg	1 605	1 599	1 585	1 552	1 552	Guideautoweb.com (2017)
Poids moyen VE	kg	1 917	1 912	1 892	1 853	1 853	Kemper (2014)
Quantité de matériaux remplaçant l'acier	kg	1	6	12	28	28	
Quantité d'acier + matériaux remplaçant l'acier	kg	966	964	954	934	934	
Poids moyen des véhicules - avec évolution des matériaux							
Poids moyen véhicule conventionnel	kg	1 595	1 586	1 563	1 438	1 322	RnCan (2017)
Poids moyen VHR	kg	1 603	1 594	1 571	1 445	1 328	Guideautoweb.com (2017)
Poids moyen VE	kg	1 914	1 903	1 876	1 726	1 586	Kemper (2014)
Quantité de matériaux remplaçant l'acier	kg	2	7	18	80	138	
Quantité d'acier + matériaux remplaçant l'acier	kg	965	960	946	870	800	
Économies de carburant avec évolution des matériaux							
Économies pour véhicule conventionnel	%	0,1 %	0,4 %	1,2 %	9,4 %	19,8 %	Tolouei & Titheridge (2009)
Économies pour VHR	%	0,1 %	0,3 %	0,8 %	6,2 %	12,9 %	Shiau et al., (2009)
Économies pour VE	%	0,1 %	0,3 %	0,8 %	6,2 %	12,9 %	Reynolds & Kandlikar (2007)

4.12.3 Modélisation technico-économique

4.12.3.1 Autopartage

Les véhicules partagés sont ajoutés dans le modèle NATEM. Pour cette stratégie, plusieurs scénarios ont été comparés au scénario de référence (REF):

- S12a Elc : Un scénario incluant la possibilité d'investir dans des véhicules partagés électriques et hybrides rechargeables.
- S12a Tout : Un scénario incluant la possibilité d'investir dans des véhicules partagés de tout type, conventionnels, électriques et hybrides rechargeables.
- S12a Elc GES: Un scénario incluant la possibilité d'investir dans des véhicules partagés électriques et hybrides rechargeables, et une contrainte additionnelle visant la réduction des GES de 37,5 % en 2030 et d'un objectif ambitieux de 75 % en 2050 par rapport au niveau de 1990.
- S12a Tout GES: Un scénario incluant la possibilité d'investir dans des véhicules partagés de tout type, conventionnels, électriques et hybrides rechargeables, et une contrainte additionnelle visant la réduction des GES de 37,5 % en 2030 et d'un objectif ambitieux de 75 % en 2050 par rapport au niveau de 1990.

La Figure 4-14 montre le nombre de véhicules (petites et grandes voitures) pour l'ensemble des scénarios. Les véhicules électriques et hybrides rechargeables partagés font partie de la solution optimale dès leur disponibilité. Cependant, la disponibilité de tout type de véhicules partagés a plus d'impacts sur le nombre total de véhicules en circulation, et par conséquent, de véhicules achetés. En 2050, la quantité totale de véhicules sur les routes diminue, par rapport à la référence, de 0,9 % lorsque les véhicules partagés sont seulement électriques et hybrides rechargeables, mais de 5,0 % lorsque les véhicules conventionnels peuvent être partagés également. L'impact sur la consommation de carburant est alors négligeable, puisque l'augmentation de véhicules électriques et hybrides rechargeables partagés se fait au détriment des véhicules électriques et hybrides rechargeables individuels et non au détriment de véhicules conventionnels à l'essence. Sans incitatif particulier pour l'achat de véhicules électriques, dont le coût initial est toujours légèrement supérieur à celui des véhicules conventionnels, leur présence sur les routes n'est pas nécessairement favorisée par l'existence des clubs d'autopartage.

En effet, l'imposition de limites sur les émissions de GES contribue au remplacement de véhicules conventionnels par des véhicules électriques et hybrides rechargeables (partagés et individuels). La pénétration de véhicules électriques et hybrides rechargeables est davantage favorisée par la limite sur les GES que par l'existence des clubs d'autopartage. De plus, la contrainte GES favorise une transition depuis les véhicules hybrides rechargeables vers les véhicules tout électriques.

Bien que les véhicules ne soient pas fabriqués au Québec et qu'il ne soit pas possible d'évaluer l'impact de cette stratégie sur les activités minières du Québec, il est possible néanmoins d'évaluer la quantité de métaux économisés par ces véhicules non achetés (conventionnels, hybrides rechargeables et électriques) en fonction de la solution du modèle NATEM (Tableau 4-35). Les résultats sont présentés pour les scénarios sans limites sur les GES. L'autopartage permet de réduire le nombre de véhicules achetés, fabriqués et donc l'utilisation d'une certaine quantité de métaux. Les scénarios étudiés dans le contexte du Québec permettent d'éviter 42 t d'acier si les clubs d'autopartage incluent seulement des véhicules électriques et hybrides rechargeables et 246 t si tout type de véhicule peut être partagé (ainsi que 8 t de cuivre et 0,5 t de lithium).

Figure 4-14. Nombre de véhicules dans la stratégie d'autopartage

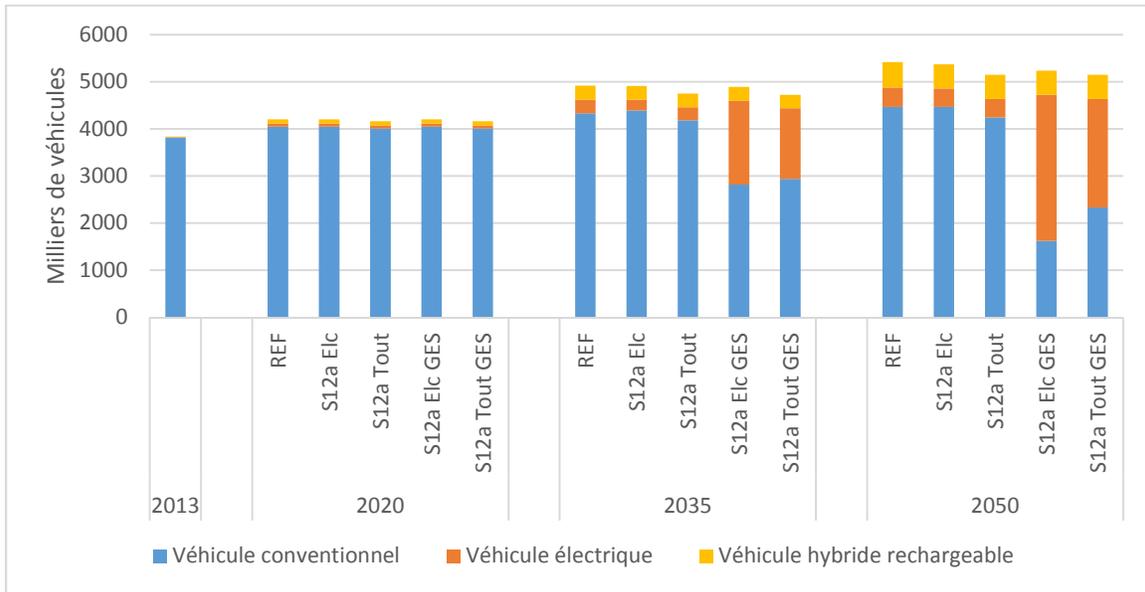


Tableau 4-35. Évolution de la quantité de métaux dans les véhicules – Autoportage

Évolution de la quantité totale de métaux dans les véhicules	Unité	2020	2035	2050
Quantité de métal en circulation sans autopartage (REF)				
Quantité de cuivre	t	101	134	162
Quantité d'acier	t	3 961	4 457	4 910
Quantité de lithium	t	2	6	10
Quantité de métal en circulation avec autopartage - VE et VHR (S12a E/c)				
Quantité de cuivre	t	101	133	159
Quantité d'acier	t	3 961	4 453	4 868
Quantité de lithium	t	2	5	10
Quantité de métal en circulation avec autopartage – Tout (S12a Tout)				
Quantité de cuivre	t	100	130	154
Quantité d'acier	t	3 923	4 302	4 664
Quantité de lithium	t	2	6	10
Quantité d'acier évité - Autoportage - VE et VHR	t	-	4	42
Quantité d'acier évité - Autoportage - Tout	t	38	155	246

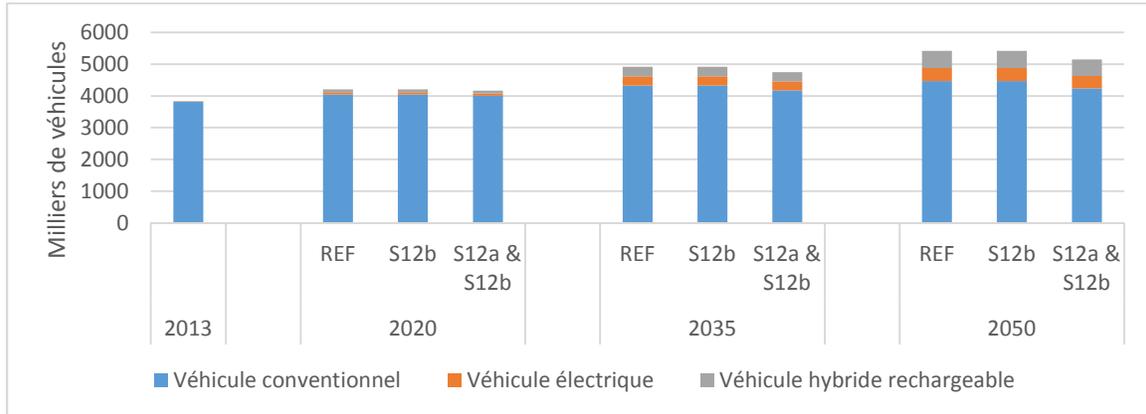
4.12.3.2 Utilisation de matériaux plus légers

Les véhicules plus légers (contenant un plus grand pourcentage d'aluminium), à plus faible consommation, sont ajoutés dans le modèle NATEM. Pour cette stratégie, plusieurs scénarios ont été comparés au scénario de référence (REF):

- S12b : Un scénario incluant la possibilité d'investir dans des véhicules contenant un plus grand pourcentage d'aluminium et à plus faible consommation.
- S12a & S12b: Un scénario incluant la possibilité d'investir dans des véhicules contenant un plus grand pourcentage d'aluminium et à plus faible consommation, ainsi que dans des véhicules partagés (tout type).

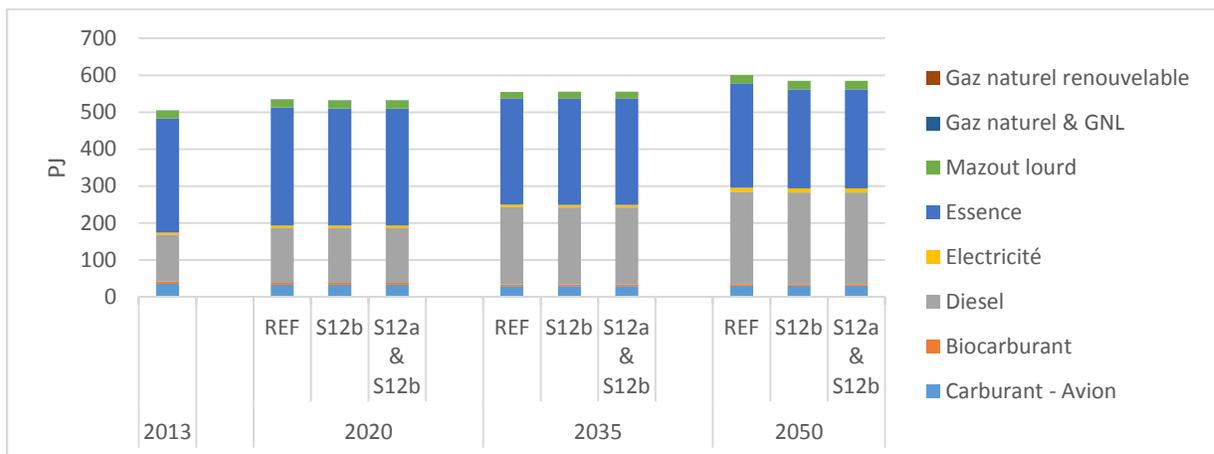
La Figure 4-15 montre le nombre de véhicules (petites et grandes voitures) pour l'ensemble des scénarios. Les véhicules partagés font toujours partie de la solution optimale au maximum, lorsqu'ils sont disponibles (S12a) et contribuent à une diminution du nombre total de véhicules sur les routes de 5.0 % par rapport à la référence en 2050.

Figure 4-15. Nombre de véhicules dans la stratégie d'utilisation de matériaux plus légers et d'autopartage



L'impact sur la consommation de carburant est plus significatif avec la pénétration de véhicules plus légers et à plus faible consommation (Figure 4-16). La consommation totale diminue de 2,7 % par rapport à la référence en 2050. Les deux sous-stratégies jouent simultanément un rôle dans la solution optimale. À noter cependant que la solution optimale du modèle pour le scénario de référence implique déjà des investissements dans des véhicules plus efficaces, notamment en lien avec les normes CAFE, d'où la faible augmentation de la consommation d'énergie (19,2 %) entre 2013 et 2050 dans le scénario de référence malgré une augmentation de la demande de transport par véhicule (petites et grandes voitures) de 41,2 % sur la même période (selon les projections des demandes pour les services énergétiques établies pour le scénario de référence).

Figure 4-16. Consommation d'énergie dans la stratégie d'utilisation de matériaux plus légers et d'autopartage



De nouveau, il est possible d'évaluer la quantité de métaux économisés par ces véhicules plus légers et non achetés en fonction de la solution du modèle NATEM (Tableau 4-36). L'utilisation de

matériaux plus légers permet d'éviter 1 327 t d'acier sans autopartage et 1 507 t avec l'autopartage (ainsi que 8 t de cuivre et 0,5 t de lithium).

Tableau 4-36. Évolution de la quantité de métaux dans les véhicules – d'utilisation de matériaux plus légers et autopartage

Évolution de la quantité totale de métaux dans les véhicules	Unité	2020	2035	2050
Quantité de métal en circulation sans autopartage (REF)				
Quantité de cuivre	t	101	134	162
Quantité d'acier	t	3 961	4 457	4 910
Quantité de lithium	t	2	6	10
Quantité de métal en circulation avec évolution des métaux (S12b)				
Quantité de cuivre	t	101	134	162
Quantité d'acier	t	3 898	3 883	3 583
Quantité de lithium	t	2	6	10
Quantité de métal en circulation avec évolution des métaux et autopartage (S12a & S12b)				
Quantité de cuivre	t	100	130	154
Quantité d'acier	t	3 861	3 748	3 403
Quantité de lithium	t	2	6	10
Quantité d'acier évité – Évolution des métaux	t	63	574	1 327
Quantité d'acier évité - Évolution des métaux Autopartage	t	100	709	1 507

4.12.4 Analyse et discussion

Potentiel de circularité. L'effet de l'évolution des métaux avec le remplacement d'une portion d'acier par de l'aluminium contribue davantage à la circularité de l'acier que l'autopartage.

Faisabilité technico-économique. La modélisation des scénarios montre que les deux sous-stratégies sont optimales d'un point de vue économique. Cependant, la pénétration des véhicules électriques sera davantage favorisée par une politique gouvernementale, telle que l'adoption de cible de réduction des GES ou de taux d'électrification des transports.

Autres facteurs. Toute stratégie visant à favoriser l'électrification des transports augmente les besoins en lithium. Les stratégies de circularité du lithium doivent être envisagées parallèlement.

4.13 Stratégie 13- Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées

Cette stratégie concerne la réutilisation des batteries lithium-ion à la fin de leur vie utile dans les véhicules hybrides et électriques (application mobile) pour le stockage d'énergie (application stationnaire).

4.13.1 Rappel des freins et leviers

L'analyse des freins et leviers, telle que réalisée par Gervais et al (2017), est résumée ci-dessous et dans le Tableau 4-37.

Pertinence. Selon l'analyse des freins et leviers, cette stratégie démontre un potentiel de développement intéressant et prometteur (Gervais et al., 2017). Cette conclusion est d'autant plus pertinente dans le contexte du Québec, notamment avec le *Plan d'action en électrification des transports* (MTQ, 2015) ainsi que la présence de communautés isolées et entreprises minières en régions éloignées.

Faisabilité. Les batteries lithium-ion possèdent encore environ les trois quarts de leur capacité de stockage initial lorsqu’elles ont atteint leur fin de vie utile dans les véhicules. Ensuite, elles deviennent une option de stockage possible pour la production d’énergie solaire/éolienne décentralisée ou pour accroître la fiabilité et la flexibilité du réseau électrique dans un contexte d’augmentation de l’intégration des énergies renouvelables intermittentes.

État actuel. Le projet européen ELSA (Energy Local Storage Advanced system), impliquant plusieurs pays et fabricants automobiles dont Renault et Nissan, représente un cas concret de mise en œuvre de cette stratégie (ELSA, 2017). La phase de commercialisation est prévue pour le début 2018 avec des prix concurrentiels par rapport à d’autres systèmes de stockage à partir de batteries neuves. Les batteries proviennent des concessionnaires automobiles et sont utilisées sans modifications majeures. Les travaux de recherche ont porté sur la durée de vie des batteries usagées, les cycles de charge et de décharge, les convertisseurs de courants continu et alternatif, le système informatique, les enjeux de sécurité, ainsi que les règlements en vigueur dans les divers pays. Concernant les applications possibles, notons les bâtiments (plus petite échelle) et les réseaux de distribution ou de transport d’électricité (plus grande échelle). D’autres projets ont été reportés aux États-Unis, où une application a permis de stocker de l’énergie solaire dans 208 batteries de Toyota Camry usagées, ainsi qu’au Japon, où des applications de stockage stationnaire domiciliaire ont été créées à partir de batteries usagées de Nissan Leaf. Au Québec, aucun projet de ce type n’a été réalisé à ce jour.

Tableau 4-37. Freins et leviers – Stockage d’énergie avec des batteries lithium-ion usagées

Freins	Leviers
<ul style="list-style-type: none"> • Transport des batteries usagées : coût et normes • Réglementation pouvant limiter l’emploi de batteries usagées • Système informatique (logiciel) complexe à développer avec des batteries variables • Normes de sécurité différentes pour le bâtiment et le réseau de distribution • Sécurité (incendie) • Froid 	<p>Projet ELSA (Europe) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Subventions gouvernementales • Réponse au manque de débouchés pour les batteries usagées (difficulté de recycler) • Marché suffisant de batteries usagées • Évolution de la réglementation pour permettre ce type d’application • Exigences de stockage dans les appels d’offres de certains pays européens • Financement pour le stockage (ex. : Allemagne) • Prix compétitif par rapport à un système de stockage avec des batteries neuves • Subventions des gouvernements et des villes pour la R&D sur le stockage • Électrification des transports • Économies d’électricité, énergies renouvelables favorisées, coupures d’électricité évitées, création d’emplois <p>Québec :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Communautés isolées et entreprises minières en régions éloignées, étant propices à des applications de stockage • Énergie solaire et éolienne en développement

Freins	Leviers
	<ul style="list-style-type: none"> • Études de faisabilité économique, de vieillissement des batteries, de modélisation, de simulation, analyse technico-économique • Économie de fonctionnalité chez les fabricants de batteries pour un meilleur suivi des batteries • Intégration des surplus d'énergie au réseau d'Hydro-Québec et intégration de systèmes de stockage de grande capacité dans son réseau

Source : Gervais et al., 2017.

4.13.2 Fiche technico-économique

Définition du scénario étudié. La modélisation de cette stratégie implique la construction d'un scénario pour le Québec et l'estimation de plusieurs facteurs évolutifs. Un cas d'application concret a été choisi et adapté pour le Québec, soit la réutilisation des batteries lithium-ion provenant des véhicules hybrides rechargeables et tout électriques pour le stockage d'énergie solaire décentralisée en milieu résidentiel et commercial. Davantage d'information est disponible pour cette application décentralisée à petite échelle, contrairement aux applications à plus grande échelle pour la distribution sur les réseaux.

Technologies impliquées. Les batteries représentent la technologie de choix pour accompagner les systèmes solaires décentralisés et parmi l'ensemble des types de batteries disponibles, les batteries lithium-ion constituent une des technologies les plus prometteuses, car elles offrent des performances supérieures, ainsi qu'un poids inférieur et une meilleure durabilité (Simbolotti & Kempener, 2012).

Paramètres techniques. Les principales variables de l'analyse sont présentées dans le Tableau 4-38. Le scénario correspondant à la stratégie a été développé en deux étapes. La première étape consiste à estimer l'évolution de la quantité de véhicules hybrides rechargeables et tout électriques en circulation au Québec, et par conséquent la quantité de lithium correspondante, à l'horizon 2050 :

- L'évolution du nombre respectif de véhicules hybrides rechargeables et tout électriques (automobiles et camions légers) a été déterminée à partir de la solution du modèle NATEM pour deux scénarios : un scénario de référence, considéré comme étant plus modéré quant à la pénétration de ce type de véhicules (954 milliers de véhicules en 2050), et un scénario optimiste avec une limite sur les émissions de GES pour atteindre la cible de 37.5 % en 2030 et un objectif ambitieux de 75 % en 2050 par rapport au niveau de 1990 (2 620 milliers de véhicules en 2050). En comparaison, les projections de l'*Agence internationale de l'énergie* (IEA, 2011) visent environ 1,500 milliers de véhicules en 2050. En réalité, cette évolution peut être drastiquement modifiée en fonction de plusieurs facteurs tels que les politiques climatiques et l'émergence d'autres technologies comme les véhicules à hydrogène par exemple. Les deux scénarios étudiés couvrent donc un large éventail d'incertitudes à cet effet. Enfin, le projet de loi qui contraindrait les constructeurs automobiles à vendre une quantité croissante de véhicules à zéro émission amènerait ce nombre à 357 milliers de véhicules en 2025 (Breton, 2017), ce qui est inférieur aux deux scénarios utilisés ici.
- Afin de connaître la quantité de lithium en circulation correspondant à cette quantité de véhicules, il est nécessaire d'évaluer une moyenne de la quantité de lithium contenu

respectivement par un véhicule hybride et un véhicule tout électrique. À cet effet, les statistiques de l'AVEQ (2017) permettent de connaître la répartition précise des modèles électriques en circulation au Québec. À partir de la capacité des batteries des modèles les plus vendus, il est possible d'estimer la capacité moyenne des batteries contenues respectivement dans un véhicule hybride rechargeable et un véhicule tout électrique (Tableau 4-39). Les capacités moyennes sont considérées comme étant constantes dans le temps. La capacité actuelle des batteries permet déjà de réaliser la presque totalité des trajets effectués en véhicules légers et les bornes et les moyens de recharge vont se démocratiser et se multiplier.

- Enfin, la quantité de lithium pur nécessaire à la capacité affichée de chaque type de batterie est calculée pour obtenir la quantité de lithium en circulation au Québec. Une estimation moyenne est utilisée. Il est considéré que toutes les batteries sont au lithium et plus spécifiquement de technologie lithium-fer-phosphate pour différentes raisons : les densités énergétiques entre l'accumulateur lithium-ion et LiFePO₄ sont proches, l'accumulateur lithium air n'en est qu'à un stade de recherche actuellement, iii) les alternatives possibles aux batteries lithium-ion sont encore à un stade de recherche (Hall, 2017), telles que les batteries qui pourraient utiliser du sodium ou du potassium, des substances beaucoup plus abondantes sur terre (Mayer, 2015).

La seconde étape consiste à estimer la quantité de lithium qu'il est possible de récupérer pour la seconde vie des batteries et leur utilisation comme système de stockage, à l'horizon 2050 :

- Afin d'évaluer la quantité de lithium qu'il est possible de récupérer pour des besoins de stockage en seconde vie, il est nécessaire de considérer un taux de retour des batteries : soit une estimation arbitraire de 50 % des batteries des véhicules tout électriques et de 30 % des batteries de véhicules hybrides rechargeables, puisque ces dernières utiliseraient davantage de cycles de la batterie (une batterie possède une autonomie de vie constituée d'un certain nombre de cycles de recharge-décharge avant le début de la dégradation de ses performances) et que la capacité est moins importante. Ces taux devraient par contre augmenter considérablement dans le temps, en lien avec le développement des technologies de stockage et l'utilité des batteries usagées.
- Au cours du temps et des cycles d'utilisation en charge et décharge, une batterie perd en capacité. On estime bien souvent qu'elle arrive en fin de première vie à 75 % de ses capacités initiales (Neubauer & Pesaran, 2011; Debnath et al., 2014; Cessieux, 2015; Lih et al., 2012), soit après 8 ans d'utilisation en moyenne (Neubauer & Pesaran, 2011).
- Les véhicules hybrides rechargeables peuvent se permettre d'utiliser plus en profondeur leurs batteries (à cause du moteur thermique), alors leurs batteries ont ainsi tendance à avoir des capacités de charge inférieures au bout de 8 ans (Neubauer & Pesaran, 2011; Wood et al., 2011). Puisqu'il n'est pas très utile d'utiliser une batterie qui possède une capacité inférieure à 75 %, on considère que toutes les batteries récupérées ont une capacité de 75 %, seulement, le taux de retour des batteries des véhicules hybrides rechargeables sera moindre.
- Puisque la durée de vie totale des batteries est de 15 à 20 ans (Neubauer & Pesaran, 2011 ; Cloutier, 2015), l'hypothèse est que les batteries possèdent une durée de vie allongée de 10 ans pour leur seconde vie. La durée de vie est aussi estimée entre 5 et 10 ans selon ELSA (2017). Cette hypothèse est optimiste, mais il est probable que les batteries ne seront utilisées qu'une très faible partie du temps pour la seconde vie. Mais leur utilisation implique de nouveau une diminution de leur capacité, jusqu'à 45 %

(Cessieux, 2015), après 18 ans de service. Ensuite, elles ne sont plus assez performantes pour être utilisées.

- La quantité cumulative de lithium récupéré est ainsi calculée en tenant compte des pertes de capacité des batteries récupérées annuellement.

Dans le modèle, l'efficacité des batteries neuves et usagées est estimée à 95 % (Zakeri & Syri, 2015). Il est possible d'obtenir des performances comparables entre les batteries de seconde vie et les batteries neuves (Tong et al., 2012).

Tableau 4-38. Paramètres – Stockage d’énergie avec des batteries lithium-ion usagées

Évolution des véhicules électriques et du lithium en circulation au Québec	Unité	Constante	2013	2020-2021	2035	2050	Références
Nombre de véhicules électriques en circulation au Québec - Scénario modéré							
Nombre de VE en circulation	n		8 062	67 857	291 291	412 409	NATEM
Nombre de VHR en circulation	n		10 474	89 044	297 825	541 812	NATEM
Quantité de lithium en circulation au Québec - Scénario modéré							
Quantité de lithium pour les VE au Québec	kg		114 471	963 523	4 136 155	5 855 960	
Quantité de lithium pour les VHR au Québec	kg		60 586	515 071	1 722 759	3 134 094	
Nombre de véhicules électriques en circulation au Québec - Scénario optimiste							
Nombre de VE en circulation	n		8 062	67 857	1 085 207	2 078 646	NATEM
Nombre de VHR en circulation	n		10 474	89 044	300 631	541 812	NATEM
Quantité de lithium en circulation au Québec - Scénario optimiste							
Quantité de lithium pour les VE au Québec	kg		114 471	963 523	15 409 303	29 515 549	
Quantité de lithium pour les VHR au Québec	kg		60 586	515 071	1 738 991	3 134 094	
Retour des batteries et quantité de lithium récupéré pour la seconde vie							
	Unité	Constante	2013	2020	2035	2050	Références
Taux de retour des batteries							
Taux de retour pour les VE	%			50 %	73 %	95 %	Hypothèse
Taux de retour pour les VHR	%			30 %	56 %	80 %	Hypothèse
Quantité annuelle de lithium récupéré	t			75	-6	249	
Quantité cumulative de lithium récupéré (avec perte)	t			57	1 821	614	
Capacité maximale de stockage d'électricité	GWh			170	5 464	1 841	
Quantité annuelle de lithium récupéré	t			75	-6	650	
Quantité cumulative de lithium récupéré (avec perte)	t			57	6 553	5 939	
Capacité maximale de stockage d'électricité	GWh			170	19 659	17 817	

Paramètres techniques	Unité	Constante	2013	2020	2035	2050	Références
Capacité des batteries en circulation au Québec							
Capacité moyenne d'une batterie d'un VE au Québec	kWh	43					
Capacité moyenne d'une batterie d'un VHR au Québec	kWh	17					
Teneur en lithium dans chaque batterie	kg/kWh	0,333					Le blog de doc zaius (2012)
Durée de vie des batteries							
Temps de vie moyen d'une batterie	an	15-20					Neubauer & Pesaran (2011)
Temps moyen d'utilisation garanti des batteries	an	8					Elsa (2017)
Temps moyen d'utilisation pour la seconde vie	an	10					
Perte de capacité des batteries							
Perte de capacité des batteries des VE en fin de vie (après 8 ans)	%	75 %					Neubauer & Pesaran (2011); Debnath et al, 2014; Cessieux (2015); Lih et al (2012)
Perte de capacité des batteries des VHR en fin de vie (après 8 ans)	%	75 %					Wood et al (2011); Tong et al (2011); Cessieux (2015); Lih et al (2012)
Perte de capacité des batteries en fin de seconde vie (après 18 ans)	%	45 %					
Efficacité moyenne des batteries		95 %					Zakeri & Syri (2015)
Paramètres économiques	Unité	Constante	2013	2020	2035	2050	Références
Coûts achats des systèmes de stockage							
Systèmes de stockage - batteries neuves	\$/kWh			\$537	\$275	\$218	Christopher et al. (2016)
Systèmes de stockage - batteries usagées	\$/kWh			\$556	\$361	\$167	Christopher et al. (2016)
Coûts d'opération des systèmes de stockage							
Systèmes de stockage - batteries neuves	\$/kWh			\$5,6	\$5,6	\$5,6	Zakeri & Syri (2015)
Systèmes de stockage - batteries usagées	\$/kWh			\$5,8	\$5,8	\$5,8	Hypothèse

Tableau 4-39. Paramètres – Capacité moyenne des batteries lithium-ion au Québec

	Capacités de batteries représentatives au Québec en 2016		Répartitions de ces capacités au Québec		Teneur en lithium dans chaque batterie	
	kWh	Référence	%	Référence	kg/kWh	Référence
Véhicules tout électriques						
Capacité 1 (Nissan Leaf)	24	Nissan.ca (2017)	58,9 %	AVEQ (2017)	0,333*	Le blog de doc zaius (2012)
Capacité 2 (Kia soul)	27	Breton (2015)	13,5 %	AVEQ (2017)	0,333*	
Capacité 3 (Tesla S)	90	Tesla.com (2017a)	27,6 %	AVEQ (2017)	0,333*	
Capacité moyenne	43				0,333*	
Véhicules hybrides rechargeables						
Capacité 1 (Chevrolet Volt)	8	Mercier (2016)	9,7 %	AVEQ (2017)	0,333*	Le blog de doc zaius (2012)
Capacité 2 (Ford C)	18	Ford.ca (2017)	90,3 %	AVEQ (2017)	0,333*	
Capacité moyenne	17				0,333*	

* La teneur en lithium dans chaque batterie varie dans la littérature entre 0.140 kg/kWh (Langlois, 2009) et 0.400 kg/kWh (Shin et al., 2009).

Paramètres économiques. Le coût des systèmes de stockage n'est pas égal au prix de la batterie, puisqu'il est nécessaire d'y ajouter des systèmes de gestion de la puissance, d'acquisition des données, de gestion thermique, etc. (Caumon, 2011). De plus, il y a des coûts d'installation. Cependant, pour évaluer correctement les perspectives quant à la compétitivité des différents systèmes de stockage, il est nécessaire d'avoir des informations précises sur le coût actuel et prévu des batteries.

Alors que les batteries elles-mêmes, celles au lithium-ion en particulier, étaient encore très coûteuses jusqu'à récemment, leurs coûts ont déjà rapidement diminué dans les dernières années. Une métaétude réalisée sur l'évolution du coût des batteries pour voitures électriques présente une revue de plus de 80 estimations différentes rapportées entre 2007 et 2014 (Danielo, 2015 ; Nykvist & Nilsson, 2015). Les coûts ont diminué d'environ 14 % par an entre 2007 et 2014, passant de 1250 \$/kWh à moins de 400 \$/kWh en moyenne et à moins de 300 \$/kWh au plus bas. De plus, les coûts continuent de diminuer, ce qui permet d'envisager des perspectives optimistes pour les véhicules électriques.

Quant aux coûts des systèmes de stockage, ils varient beaucoup selon les sources et les applications. Les développements technologiques sont actuellement nombreux et rapides. Toutes les études concluent également que le coût des systèmes de stockage stationnaires avec batteries diminuera de manière importante (Christopher et al., 2016). Le Tableau 4-40 résume les coûts estimés pour différentes applications jusqu'en 2025. Les projections de coûts au-delà de 2025 sont très limitées ou indisponibles.

Tableau 4-40. Paramètres – Coûts des systèmes de stockage avec batteries

\$/kWh	2015		2020		2025		Références
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Cellules lithium-ion	\$237	\$474	\$187	\$262	\$137	\$225	Christopher et al. (2016)
Batteries lithium-ion pour véhicules	\$374	\$624	\$262	\$412	\$175	\$275	Christopher et al. (2016)
Système de stockage à grande échelle	\$562	\$749	\$349	\$524	\$187	\$312	Christopher et al. (2016)
Système de stockage pour énergie décentralisée	\$936	\$1 560	\$537	\$849	\$312	\$624	Christopher et al. (2016)

* Converted from Euros into Canadian dollars of 2011

D'autres sources rapportent des coûts d'achat (spécifiés en fonction du nombre maximal de cycles utilisables) pour les systèmes de stockage pour énergie solaire décentralisée avec batterie lithium-ion à 1 700 \$/kWh en 2014 sur le marché allemand (IRENA, 2015). Par contre, Tesla (Tesla.com, 2017b) annonce le prix de vente de son système de stockage résidentiel à environ 450 \$/kWh, incluant donc la marge de profit. De même, le géant suédois Ikea a annoncé début août 2017 son intention de vendre des batteries de stockage d'énergie solaire à partir de batteries lithium-ion à 1 186 \$/kWh (Garoscio, 2017). Étant donné les prix agressifs de Tesla sur le marché, les estimations les plus optimistes ont été utilisées pour les systèmes de stockage avec batteries neuves.

Les coûts d'opération sont peu documentés, mais Zakeri & Syri (2015) rapportent des coûts fixes d'opération équivalents à moins de 1 % du coût d'investissement pour les systèmes avec batteries lithium-ion. Les coûts d'opération des systèmes avec batteries usagées sont légèrement supérieurs selon nos estimations.

De manière générale, le stockage d'énergie est économiquement compétitif si le prix marginal de l'électricité est supérieur au coût de stockage et récupération de l'électricité (Simbolotti & Kempener, 2012). Quant à la compétitivité des systèmes avec batteries usagées avec ceux fabriqués à partir de batteries neuves, cela dépend de l'évolution de leurs coûts respectifs (données non disponibles). Cependant, l'objectif du projet ELSA (2017) est de mettre au point un système dont les coûts sont compétitifs avec ceux des systèmes avec batteries neuves et même légèrement inférieurs. Le système informatique est plus cher, mais la batterie elle-même est moins chère. L'objectif de 556 \$/kWh, incluant le système électronique qui représente presque la moitié du coût, est le prix de vente auquel les instigateurs du projet veulent pouvoir parvenir d'ici 2020.

Étant donné que la durée de vie des batteries usagées est moindre que celle des batteries neuves, l'équivalence des coûts d'investissement n'est pas suffisante pour assurer la compétitivité des systèmes avec batteries usagées. La diminution de coûts doit être significative. De plus, étant donné les baisses significatives anticipées pour les batteries neuves à long terme, il est difficile de prévoir que les systèmes avec batteries usagées seront compétitifs.

4.13.3 Modélisation technico-économique

Cette stratégie a été testée dans le modèle NATEM, où un scénario incluant la possibilité d'investir dans des systèmes de stockage à partir de batteries lithium-ion usagées pour le stockage d'énergie solaire décentralisée en milieu résidentiel et commercial, a été comparé au scénario de référence.

Pour cette stratégie, plusieurs scénarios ont été comparés au scénario de référence (REF):

- S13a : Un scénario incluant la disponibilité de systèmes de stockage à partir de batteries lithium-ion usagées à des coûts compétitifs avec ceux des systèmes de stockage à partir de batteries neuves. Des analyses préliminaires (non présentées ici) ont pu en effet démontrer que des réductions de coûts significatives sont nécessaires à l’horizon 2050 pour que ces systèmes puissent pénétrer le marché, étant donné leur durée de vie moindre. Le stockage d’énergie est un secteur encore en développement et l’évolution des coûts à l’horizon est très incertaine. Ainsi, les analyses ont plutôt visé à identifier le seuil de coût (environ 167 \$/kWh en 2050) permettant de rendre les systèmes avec batteries usagées compétitifs. De plus, les analyses préliminaires ont démontré que des baisses additionnelles de coûts, ou encore une limite sur les émissions de GES n’entraient pas une plus grande utilisation de ces systèmes.
- S13b: Un scénario incluant une diminution du coût de la production d’électricité solaire décentralisée en milieu commercial et résidentiel. Cette filière est déjà caractérisée par une diminution importante attendue des coûts à long terme (ces coûts de production sont fournis au modèle par unité de kW installé) : de 1 540 \$/kW en 2025 à 1 053 \$/kW en 2050 pour le secteur résidentiel et de 1 283 \$/kW en 2025 à 877 \$/kW pour le secteur commercial. Avec les diminutions (arbitraires) subséquentes, les coûts atteignent 702 \$/kW en 2050 dans les deux secteurs.

Avec des coûts compétitifs, les systèmes avec batteries usagées remplacent évidemment la totalité (100%) des parts de marché des systèmes avec batteries neuves (Figure 4-17). L’utilisation des systèmes de stockage en général augmente ensuite en lien la diminution du coût de production de l’électricité solaire décentralisée. Les quantités stockées correspondent au total d’électricité stockée (avant perte) sur une année. La Figure 4-18 montre les variations saisonnières et journalières pour l’année 2050 dans le scénario S13a.

Figure 4-17. Stockage d’électricité solaire décentralisée par année selon le type de système

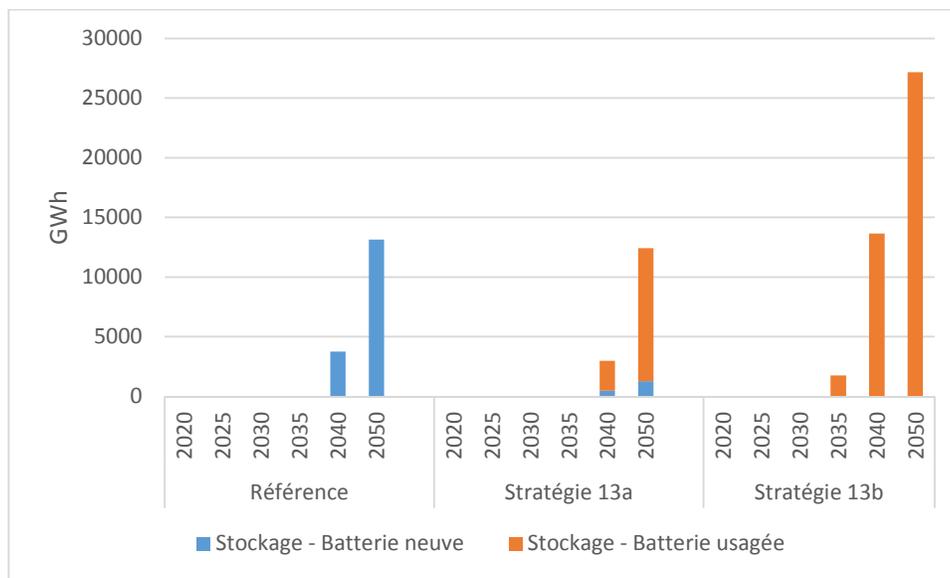
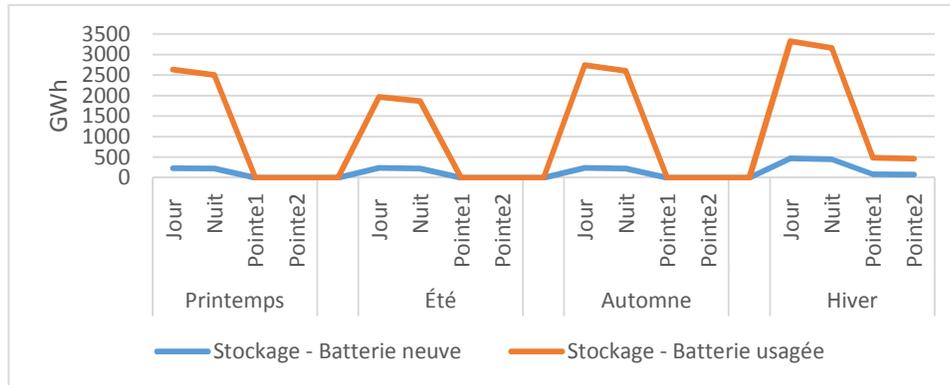
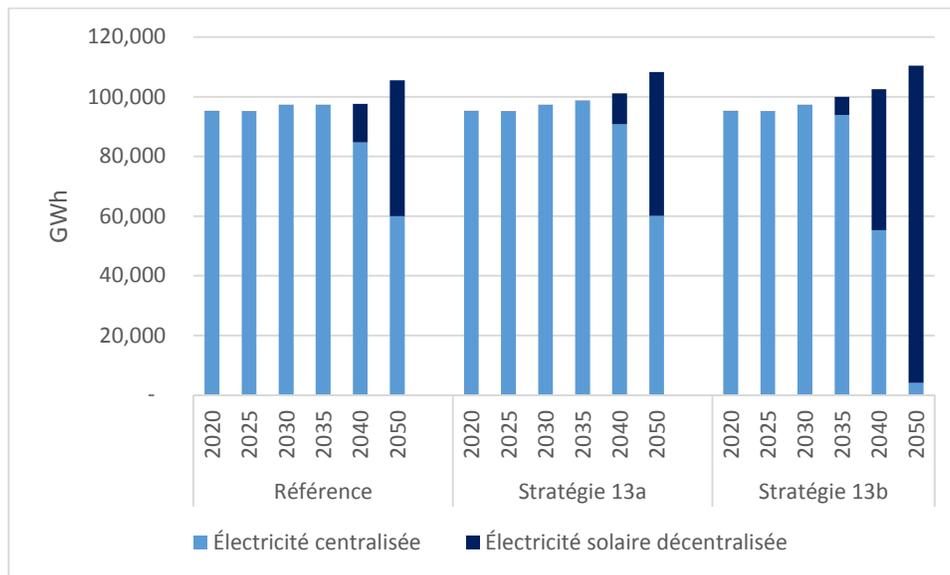


Figure 4-18. Stockage d'électricité solaire décentralisée par période en 2050 selon le type de système



Bien que la pénétration d'énergie solaire décentralisée soit déjà favorisée par la diminution attendue des coûts à long terme dans le scénario de référence, les diminutions subséquentes contribuent à renforcer cette tendance (Figure 4-19). Cependant, ces diminutions de coût n'ont pas d'effet avant 2035.

Figure 4-19. Pénétration d'électricité solaire décentralisée dans les secteurs résidentiel et commercial



Il est possible d'évaluer la quantité de lithium économisé par ces systèmes de stockage à partir de batteries usagées (Tableau 4-41). La quantité maximale d'électricité stockée dans les systèmes avec batteries usagées pendant l'année 2050 atteint 3 326 GWh en hiver, ce qui correspond à 1 102 t de lithium (selon le coefficient provenant de : Le blog de doc zaius, 2012). Dans le scénario S13b, ces quantités atteignent 8 408 GWh correspondant à 2 803 t de lithium. Dans les deux cas, la quantité maximale de lithium disponible, telle que calculée dans les scénarios modéré et optimiste quant à l'électrification des transports et la récupération des batteries, est loin d'être atteinte.

Tableau 4-41. Quantité de lithium recyclé utilisé pour le stockage d'énergie en 2050

Scénario	Type de stockage	Unité	2050
REF	Batteries neuves	GWh	3 210
S13	Batteries neuves	GWh	361
S13	Batteries usagées	GWh	3 306
S13b	Batteries neuves	GWh	0
S13b	Batteries usagées	GWh	8 408
S13	Lithium recyclé	t	1 102
S13b	Lithium recyclé	t	2 803

4.13.4 Analyse et discussion

Potentiel de circularité. Le potentiel de circularité pourrait être important dans un contexte d'électrification des transports. Cependant, les besoins de stockage en milieu décentralisés sont limités. La prise en compte des besoins de stockage à grande échelle pour les réseaux électriques permettrait de combler cette lacune. Puisque l'électrification des transports entraînera une augmentation des besoins d'extraction du lithium, cette stratégie est d'autant plus pertinente.

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

5 DISCUSSION

Le Tableau 5-1 présente la synthèse du potentiel de circularité relatif à chacune des stratégies de circularité en termes de quantité : **quelle est la quantité de métaux remise en circulation et combien de tonnes de minerai est-il possible d'éviter d'extraire avec la mise en œuvre de la stratégie?** La discussion entourant le potentiel de circularité réfère donc ici autant à la quantité de métaux réutilisée ou recyclée, ainsi que la quantité de métaux potentiellement non extraite, suite à la mise en œuvre d'une stratégie. Suivant cette synthèse, un indice de potentiel (fort, moyen, faible) a été attribué à chacune des stratégies.

Le Tableau 5-2 permet de discuter de la faisabilité technico-économique de circularité relative à chacune des stratégies: **est-ce que la stratégie est économiquement optimale ?** La discussion entourant le potentiel technico-économique de circularité réfère ici à la rentabilité (pour une entreprise) ou à l'optimalité économique (pour un sous-ensemble de l'économie québécoise) de mettre en place une stratégie en fonction des connaissances existantes au sujet des technologies ou des options disponibles. L'optimalité économique étant définie comme le coût minimal pour satisfaire des demandes en produits et services, dans un sous-ensemble de l'économie québécoise, selon la rationalité économique des modèles d'optimisation TIMES décrite à l'Annexe A. Le modèle utilisé permet de minimiser les coûts du système énergétique, incluant d'autres produits (matériaux, métaux), dans une perspective technico-économique, mais ne mesure pas les impacts de nature macroéconomique comme le produit intérieur brut et l'emploi. Suivant cette synthèse, un indice de potentiel (fort, moyen, faible) a été attribué à chacune des stratégies.

Le sommaire des évaluations est présenté dans le Tableau 5-3. Les principaux constats généraux issus de l'analyse technico-économique et pris en compte pour l'attribution des niveaux de potentiel (fort, moyen, faible):

- Les impacts des stratégies ne peuvent être analysés en vase clos; la pertinence de la plupart des stratégies provient du fait qu'elles s'appliquent à plusieurs métaux.
- De même, la pertinence de certaines stratégies est influencée par leur contribution aux économies d'énergie et à la réduction des émissions de GES.
- Pour certaines stratégies, le potentiel de circularité ne peut être appliqué au Québec directement, mais permet de déduire des quantités de métaux extraits quelque part sur la planète.
- Il est essentiel d'utiliser une approche intégrée, car certaines stratégies de circularité contribuant à la circularité d'un métal contribuent en retour à augmenter l'extraction d'autres métaux. Par exemple, toute mesure visant à favoriser l'électrification des transports augmente les besoins en lithium. Les stratégies de circularité du lithium doivent être envisagées parallèlement.
- De manière générale, il n'est pas possible de déterminer le potentiel global de circularité pour le Québec, découlant de la mise en œuvre complète de toutes les stratégies pour les trois métaux à l'étude. Chaque stratégie a été analysée individuellement et par le biais de sous-stratégies en fonction des données disponibles.

Tableau 5-1. Évaluation du potentiel de circularité des stratégies relativement aux métaux remis en circulation, ainsi que la quantité de métaux potentiellement non extraits

Stratégie	Quantité de métal récupéré	Minerai non extrait (au Québec ou ailleurs)	Commentaire	Potentiel
Stratégie 1- Développement technologique pour une extraction plus efficace	Ne vise pas la circularité des métaux, mais l'optimisation des opérations d'extraction. Applicable au fer, cuivre et lithium.	Peut même conduire à extraire davantage dans certaines mines.	Beaucoup de place à l'amélioration car l'industrie minière se situerait entre 30 % à 40 % d'une automatisation complète.	Faible
Stratégie 2 - Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure	Potentiel existant, mais difficile à quantifier. Possibilité d'extraire des résidus miniers, un minerai autre que celui à l'origine des activités de l'entreprise (ex. le cuivre dans les mines de fer).	Impact faible sur l'extraction de minerais.	Les activités minières des dernières années ont généré une importante quantité de résidus miniers, mais il n'est pas clair si ceux-ci peuvent être récupérés.	Moyen
Stratégie 3 – Mines urbaines	Potentiel important selon la littérature surtout pour le cuivre, et encore plus à long terme. Grande quantité de cuivre en circulation. Difficile à quantifier pour le Québec.	Le stock mondial de cuivre équivaldrait à de 20-25 années de production minière. En 2100, le stock mondial de cuivre en utilisation sera aussi grand que les ressources en cuivre actuellement connues.	Concept récent et nécessité de quantifier les gisements urbains (stock) de métaux. Stratégie analysée conjointement avec celles portant sur le recyclage du fer, cuivre et lithium.	Fort
Stratégie 4a - Récupération métaux précieux des boues anodiques	Stratégie déjà mise en place au seul endroit possible au Québec. Augmentation possible par l'importation de boues anodiques au-delà des volumes existants. Potentiel important pour les métaux précieux comme l'or et l'argent.	Ne contribue pas directement à la circularité du cuivre lui-même, mais elle favorise un meilleur rendement de l'industrie.	Stratégie est déjà bien implantée.	Faible

Stratégie	Quantité de métal récupéré	Minerai non extrait (au Québec ou ailleurs)	Commentaire	Potentiel
Stratégie 4b - Récupération d'énergie thermique des laitiers	<p>Potentiel limité par la quantité de laitiers provenant des fours à arc électrique et le faible taux de récupération de l'énergie.</p> <p>La technologie doit se situer sur les lieux de la métallurgie primaire, donc sa taille sera limitée par les capacités des aciéries individuelles.</p> <p>Plusieurs usages sont en compétition pour l'utilisation des quantités limitées de laitiers générées.</p>	Ne contribue pas directement à la circularité du fer lui-même, mais elle favorise un meilleur rendement de l'industrie.	Pertinence de réduire les GES moindre au Québec, où l'électricité produite est déjà renouvelable.	Faible
Stratégie 4c - Séquestration du CO ₂ à partir de laitiers	<p>Potentiel limité par la quantité de laitiers provenant des fours à arc électrique.</p> <p>Plusieurs usages sont en compétition pour les laitiers.</p>	Ne contribue pas directement à la circularité du fer lui-même, mais elle favorise un meilleur rendement de l'industrie.	<p>Contribue à la diminution des émissions de GES du Québec. Séquestration jusqu'à 400 kt CO₂ en 2050.</p> <p>Les émissions provenant de la combustion d'énergie sont de 11 Mt, dont moins de 2 Mt pour les trois filières: fer, cuivre, lithium.</p>	Moyen
Stratégie 5 - Fabrication additive	<p>Potentiel probablement très important, mais difficile de quantifier les impacts globaux au Québec étant donné la grande variété de secteur, de pièces et de compositions qu'il est possible de considérer.</p> <p>Potentiel d'autant plus élevé que le taux d'utilisation est encore faible.</p>	<p>Pour un seul exemple (avions plus légers): économies annuelles totales de 238 à 435 t/an d'aluminium, de 157 à 188 t/an de titane, de 133 à 168 t/an de nickel et de 19 à 25 t/an d'acier pendant 20 ans (période 2030-2050).</p> <p>Pas nécessairement au Québec.</p>	<p>Avancées technologiques qui devraient révolutionner le domaine de la fabrication et les modèles d'affaires.</p> <p>Croissance exponentielle du marché mondial.</p> <p>Permet de générer des économies d'énergie importantes et contribue à la diminution des émissions de GES.</p>	Fort

Stratégie	Quantité de métal récupéré	Minerai non extrait (au Québec ou ailleurs)	Commentaire	Potentiel
Stratégie 6a - Recyclage du fer des avions	Potentiel faible : 280 t/an. Autres métaux recyclés : 56 t/an de cuivre, 2 380 t/an d'aluminium, 84 t/an de titane.	Les exemples étudiés permettent d'éviter au maximum l'extraction de 65 kt/an de minerais de fer (contenant 30 % de fer concentré) annuellement entre 2025 et 2050.	Quantités recyclées qui demeurent cependant marginales par rapport à la demande totale d'acier.	Faible
Stratégie 6b - Recyclage du fer des trains	Potentiel important : 17 280 t/an. Autres métaux recyclés : 86 t/an de cuivre.			Fort
Stratégie 6c - Recyclage du fer des voitures	Potentiel faible et non quantifié.			Faible
Stratégie 6d - Recyclage de la ferraille	Potentiel important : 49 416 t/an. Potentiel restant, i.e. la ferraille non déjà récupérée, excluant celle issue des voitures.			Fort
Stratégie 7a - Recyclage du cuivre des ordinateurs	Potentiel faible : 1 073 t/an. Quantités potentiellement en décroissance. Autres métaux recyclés : 8 151 t/an d'acier, 0,4 t/an d'or.	Les exemples étudiés permettent d'éviter au maximum l'extraction de 859 kt/an de minerais (contenant entre 0,5 % et 2,0 % de cuivre) entre 2040 et 2050.	Quantités recyclées qui demeurent marginales par rapport à la demande totale de cuivre.	Fort
Stratégie 7b - Recyclage du cuivre des cellulaires	Potentiel faible : de 20,7 à 48,4 t/an en 2050. Quantités en croissance. Autres métaux recyclés : 0,39 à 1,25 t/an d'argent, 0,04 à 0,13 t/an d'or, 0,02 à 0,06 t/an de palladium.			Faible
Stratégie 7c - Recyclage du cuivre des câbles	Potentiel modéré : 4 800 t/an.			Fort

Stratégie	Quantité de métal récupéré	Minerai non extrait (au Québec ou ailleurs)	Commentaire	Potentiel
Stratégie 7d - Recyclage du cuivre des circuits-imprimés	Potentiel faible : 723 t/an. Autres métaux recyclés : 1,0 t/an d'argent, 0,4 t/an d'or.			Moyen
Stratégie 8a - Recyclage du lithium des batteries	Potentiel important : 360 t/an Quantités en croissance avec l'électrification des transports. Autres métaux recyclés : 2 161 t/an de cuivre, 727 t/an de cobalt, 718 t/an de nickel, 1 675 t/an d'aluminium.	Les exemples étudiés permettent d'éviter au maximum l'extraction de 16,3 kt/an de minerais (contenant environ 1,5 % de lithium) en 2050.	Quantités recyclées sont significatives par rapport à la demande totale de lithium.	Fort
Stratégie 8b - Recyclage du lithium du verre	Potentiel minime avec une fraction massique du lithium dans le verre de 0,1 % : 93 t/an		Quantités recyclées demeurent marginales par rapport à la demande totale de lithium.	Faible
Stratégie 9 - Modularités des équipements mécaniques et industriels	Avantages reconnus, mais peu ou pas d'études connues visant à quantifier les impacts de la modularité des produits durant leur conception et leur durée de vie utile.	Impact incertain sur les activités d'extraction.	Pertinence environnementale de la modularité en général.	Faible
Stratégie 10 - Écoconception des poutres en acier	Potentiel incertain, mais potentiellement intéressant. Permet d'augmenter le réemploi de l'acier.	Impact incertain sur les activités d'extraction.	Pertinence environnementale en général.	Moyen
Stratégie 11 - Déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures	Potentiel significatif, puisque la déconstruction sélective permet d'augmenter le rapport entre le réemploi et le recyclage comparativement à la démolition. Plusieurs exemples démontrent cette affirmation.	Impact incertain sur les activités d'extraction.	Bien que cette stratégie ne contribue pas à changer la quantité de métaux récupérés au final, par rapport à la démolition et au recyclage des matériaux récupérés, elle est pertinente d'un point de vue économie circulaire puisqu'elle favorise le réemploi.	Fort

Stratégie	Quantité de métal récupéré	Minerai non extrait (au Québec ou ailleurs)	Commentaire	Potentiel
Stratégie 12a - Écoconception des véhicules – Autopartage	Potentiel plus important en considérant que tous les types de véhicules peuvent être partagés ou encore dans un contexte de politique climatique et/ou d'électrification.	Les scénarios étudiés dans le contexte du Québec permettent d'éviter au total un maximum de 42 t/an d'acier si les clubs d'autopartage incluent seulement des véhicules électriques et hybrides rechargeables et 246 t/an si tout type de véhicule peut être partagé (ainsi que 8 t/an de cuivre et 0,5 t/an de lithium). Pas nécessairement au Québec.	Contribue à diminuer le nombre de véhicules sur les routes. La pénétration des marchés par des véhicules électriques sera davantage favorisée par une politique gouvernementale.	Faible
Stratégie 12b - Écoconception des véhicules – Matériaux plus légers	Potentiel important, seulement en considérant le remplacement d'une portion d'acier par de l'aluminium.	L'utilisation de matériaux plus légers permet d'éviter au total un maximum de 1 327 t d'acier sans autopartage et 1 507 t avec l'autopartage (ainsi que 8 t de cuivre et 0,5 t de lithium). Pas nécessairement au Québec.	Impact sur la consommation de carburant et la réduction des GES.	Fort
Stratégie 13 - Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées	Potentiel significatif dans un contexte d'électrification des transports. Les besoins de stockage en milieu décentralisés sont limités; il sera nécessaire de considérer les besoins à grande échelle pour les réseaux électriques.	La quantité maximale d'électricité stockée dans les systèmes avec batteries usagées pendant l'année 2050 atteint 3 326 GWh en hiver, ce qui correspond à 1 102 t/an de lithium au total. Dans le scénario S13b, ces quantités atteignent 8 408 GWh correspondant à 2 803 t/an de lithium au total.	Puisque l'électrification des transports entraînera une augmentation des besoins d'extraction du lithium, cette stratégie est d'autant plus pertinente.	Fort

Tableau 5-2. Évaluation de la faisabilité technico-économique de circularité des stratégies

Stratégie	Potentiel technico-économique de circularité	Commentaire	Faisabilité
Stratégie 1- Développement technologique pour une extraction plus efficace	<p>Objectif visant justement la réduction des coûts d'opération.</p> <p>Malgré des coûts d'investissement plus élevés, cette stratégie est optimale économiquement.</p> <p>Chaque mesure d'automatisation (ventilation, systèmes de géolocalisation) peut réduire les coûts d'opération d'en moyenne 15 % par année, par rapport à la référence sans automatisation, selon les technologies et les activités minières.</p> <p>Gain additionnel de 15 % par année avec une automatisation complète.</p>	L'investissement initial peut s'avérer dissuasif pour les plus petites entreprises qui démarrent ou pour celles dont les camions conventionnels sont encore bons.	Fort
Stratégie 2 - Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure	Selon le cas recensé dans la littérature, les faibles coûts d'opération après investissement initial pourraient faire en sorte que ces approches soient économiquement optimales, surtout pour les métaux qui ont une valeur importante sur les marchés.	Il est par contre difficile de se prononcer de manière générale.	Moyen
Stratégie 3 – Mines urbaines	<p>Pertinence économique de cette stratégie, par rapport à l'extraction conventionnelle, reste à démontrer.</p> <p>Plus les techniques de recyclage sont complexes, plus elles sont coûteuses et l'exploitation des gisements urbains de métaux pose de nombreux défis.</p>	Par contre, le développement technologique et l'augmentation du coût des métaux pourraient changer la situation, comme c'est devenu le cas pour le pétrole non conventionnel depuis quelques décennies par exemple.	Faible
Stratégie 4a - Récupération métaux précieux des boues anodiques	<p>Reconnue comme ayant un potentiel économique intéressant, confirmé par l'analyse.</p> <p>Les prix de l'or et de l'argent font en sorte qu'un revenu important peut être obtenu avec la vente des quantités récupérées.</p>	L'analyse ignore cependant les investissements initiaux qui ont été nécessaires pour mettre en place toute cette infrastructure de traitement des boues anodiques et de récupération des métaux.	Fort

Stratégie	Potentiel technico-économique de circularité	Commentaire	Faisabilité
Stratégie 4b - Récupération d'énergie thermique des laitiers	<p>Perspectives économiques devenant plus intéressantes globalement avec l'augmentation de la demande d'électricité et les incitatifs pour une production à partir des énergies renouvelables.</p> <p>Projet viable documenté aux usines d'Arcelor-Mittal en Espagne.</p> <p>Profits potentiels avec la vente d'électricité à Hydro-Québec.</p>	Un peu moins de valeur ajoutée pour le Québec, où les tarifs d'électricité sont peu élevés et l'électricité déjà renouvelable.	Moyen
Stratégie 4c - Séquestration du CO ₂ à partir de laitiers	<p>Potentiel économique intéressant.</p> <p>Avantage lié au fait que les laitiers sont disponibles à proximité de la source émettrice de CO₂, ce qui minimise les coûts d'exploitation.</p> <p>Le Québec dispose de source d'électricité à faibles coûts et d'un prix sur le carbone.</p> <p>Études de cas documentées confirmant que certains projets sont rentables.</p>	Potentiel d'autant plus intéressant dans un contexte avec cible ambitieuse sur les GES et contribuant à faire augmenter le prix de la tonne de GES.	Fort
Stratégie 5 - Fabrication additive	<p>Optimale du point de vue technico-économique.</p> <p>Gains potentiels sur les coûts de production de 50 %-80 % dans certains cas; les gains sont d'autant plus importants que la complexité de la pièce est grande.</p>	<p>Les coûts d'investissement importants sont dissuasifs pour les plus petites entreprises. Technologie non adaptée à la production de masse.</p> <p>Avec la diffusion des technologies sur le marché, les coûts sont amenés à diminuer.</p>	Fort
Stratégie 6a - Recyclage du fer des avions	<p>Les études de cas documentées et la modélisation technico-économique montrent que ces activités ne sont pas rentables.</p> <p>En partie attribuable à la baisse du prix de l'aluminium.</p>	Il serait nécessaire de considérer la vente d'autres sous-produits, comme les équipements électroniques.	Faible
Stratégie 6b - Recyclage du fer des trains	Les études de cas documentées et la modélisation technico-économique montrent que ces activités ne sont pas rentables.	Il serait nécessaire de considérer la vente d'autres sous-produits, comme les équipements électroniques.	Faible

Stratégie	Potentiel technico-économique de circularité	Commentaire	Faisabilité
Stratégie 6c - Recyclage du fer des voitures	Analyse insuffisante pour commenter.	Activité déjà en place donc l'on suppose que cela est rentable.	Fort
Stratégie 6d - Recyclage de la ferraille	Activité rentable et d'ailleurs déjà bien implantée au Québec.		Fort
Stratégie 7a - Recyclage du cuivre des ordinateurs	Les études de cas documentées et la modélisation technico-économique montrent que ces activités ne sont pas rentables.		Faible
Stratégie 7b - Recyclage du cuivre des cellulaires	Les études de cas documentées et la modélisation technico-économique montrent que ces activités ne sont pas rentables.	Les téléphones comportent des métaux rares et précieux, principale incitation au recyclage. La réduction de la valeur des composantes au cours des dernières décennies explique la faible rentabilité économique actuelle de leur recyclage.	Faible
Stratégie 7c - Recyclage du cuivre des câbles	Les études de cas documentées et la modélisation technico-économique montrent que ces activités sont rentables.		Moyen
Stratégie 7d - Recyclage du cuivre des circuits-imprimés	Les études de cas documentées et la modélisation technico-économique montrent que ces activités sont rentables.		Moyen
Stratégie 8a - Recyclage du lithium des batteries	Optimale du point de vue technico-économique. Intérêt de développer toute la chaîne au Québec, plutôt que d'envoyer les batteries en Colombie-Britannique. Quantité de batteries en augmentation, améliorant les perspectives de rentabilité.	Rentabilité incertaine dans un scénario de référence, avec évolution marginale du nombre de véhicules électriques et hybrides rechargeables au Québec. À long terme, la distribution des différentes technologies de batteries aura évolué : il est possible que la valeur qui peut être tirée d'une tonne de batteries ne compense plus les coûts.	Fort

Stratégie	Potentiel technico-économique de circularité	Commentaire	Faisabilité
Stratégie 8b - Recyclage du lithium du verre	Les études de cas documentées et la modélisation technico-économique montrent que ces activités ne sont pas rentables, notamment en comparaison du coût de l'enfouissement.	Une solution de collecte sélective très performante pourrait être mise en place pour la vente de verre recyclé. Ces conclusions ne s'appliquent pas au verre issu de la fenestration ou de la vitrocéramique.	Faible
Stratégie 9 - Modularités des équipements mécaniques et industriels	Il n'y a pas suffisamment d'information pour se prononcer à cet effet.		Faible (ou incertain)
Stratégie 10 - Écoconception des poutres en acier	Pas économiquement optimal actuellement selon l'analyse des freins et leviers. Marché des structures métalliques international très compétitif. Difficile d'ajouter une nouvelle variable environnementale dans les projets.		Faible
Stratégie 11 - Déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures	Pas économiquement optimal selon la revue de la littérature : salaires beaucoup plus élevés dans le secteur de la déconstruction. Temps de déconstruction trois fois plus grand. Les matériaux doivent être triés et envoyés sur les sites adéquats par types de contenus : cela ajoute du temps et des frais de transport.	En général, le coût de démolition est très inférieur au coût de déconstruction. Un exemple rentable a cependant été documenté.	Faible
Stratégie 12a - Écoconception des véhicules – Autopartage	Optimale du point de vue technico-économique.	Rentabilité en lien avec les économies d'énergies.	Moyen
Stratégie 12b - Écoconception des véhicules – Matériaux plus légers	Optimale du point de vue technico-économique.	Rentabilité en lien avec les économies d'énergies.	Fort
Stratégie 13 - Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées	Le coût devra évoluer pour atteindre des niveaux nettement inférieurs à ceux des systèmes avec batteries neuves pour être compétitifs, vu la durée de vie moindre.		Moyen

Tableau 5-3. Sommaire concernant le potentiel de circularité des stratégies et la faisabilité technico-économique

Stratégie	Modélisation NATEM (oui-non)	Potentiel de circularité (quantité)	Faisabilité technico-économique (coût)
Stratégie 1- Développement technologique pour une extraction plus efficace	Oui	Faible	Fort
Stratégie 2 - Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure	Non	Moyen	Moyen
Stratégie 3 – Mines urbaines	Non	Fort	Faible
Stratégie 4a - Récupération métaux précieux des boues anodiques	Non	Faible	Fort
Stratégie 4b - Récupération d'énergie thermique des laitiers	Oui	Faible	Moyen
Stratégie 4c - Séquestration du CO ₂ à partir de laitiers	Non	Moyen	Fort
Stratégie 5 - Fabrication additive	Oui	Fort	Fort
Stratégie 6a - Recyclage du fer des avions	Oui	Faible	Faible
Stratégie 6b - Recyclage du fer des trains	Oui	Fort	Faible
Stratégie 6c - Recyclage du fer des voitures	Non	Faible	Fort
Stratégie 6d - Recyclage de la ferraille	Oui	Fort	Fort
Stratégie 7a - Recyclage du cuivre des ordinateurs	Oui	Faible	Faible
Stratégie 7b - Recyclage du cuivre des cellulaires	Oui	Faible	Faible
Stratégie 7c - Recyclage du cuivre des câbles	Oui	Moyen	Moyen
Stratégie 7d - Recyclage du cuivre des circuits-imprimés	Oui	Faible	Moyen
Stratégie 8a - Recyclage du lithium des batteries	Oui	Fort	Fort
Stratégie 8b - Recyclage du lithium du verre	Oui	Faible	Faible
Stratégie 9 - Modularités des équipements mécaniques et industriels	Non	Faible	Faible (ou incertain)
Stratégie 10 - Écoconception des poutres en acier	Non	Moyen	Faible
Stratégie 11 - Déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures	Non	Fort	Faible
Stratégie 12a - Écoconception des véhicules – Autopartage	Oui	Faible	Moyen
Stratégie 12b - Écoconception des véhicules – Matériaux plus légers	Oui	Fort	Fort
Stratégie 13 - Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées	Oui	Fort	Moyen

6 LIMITES ET PISTES DE RECHERCHE

Les limites de l'analyse sont nombreuses. D'abord, il est important de mentionner que la revue de la littérature a permis de documenter les stratégies de circularité de manière partielle seulement. En fonction des données recueillies, et étant donné la nature très diversifiée de chaque stratégie, une approche spécifique par sous-stratégie a été privilégiée aux fins de la modélisation technico-économique. Les 13 stratégies n'ont donc pas fait l'objet d'une analyse technico-économique complète, mais partielle à l'aide de sous-stratégies spécifiques.

Cette section sert à résumer les principaux facteurs de l'analyse technico-économique qui nécessiteraient d'être approfondis afin de mieux évaluer le potentiel de circularité de chacune des stratégies de manière quantitative. Un certain nombre de données n'ont pu être obtenues pendant la durée du projet et de nombreuses hypothèses ont été effectuées. Conséquemment, ces limites constituent des pistes de recherche pertinentes.

Stratégie 1- Développement technologique pour une extraction plus efficace

- Documenter et analyser d'autres avancées technologiques pertinentes pour les plus petits volumes, comme les camions semi-automatisés.
- Quantifier le potentiel de circularité lié à une automatisation complète des mines.

Stratégie 2 - Entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure

- Documenter les quantités de résidus miniers existants au Québec, leurs compositions et leurs potentiels de récupération.
- Répertoire d'autres études de cas afin d'avoir une meilleure estimation du potentiel de rentabilité des diverses approches.

Stratégie 3 – Mines urbaines

- Quantifier l'ensemble des gisements urbains (stock) de métaux disponibles dans les infrastructures urbaines au Québec et leur évolution potentielle dans le temps à l'aide de modèles sophistiqués de stocks et de flux de matière.
- Appliquer les modèles d'estimation des stocks de métaux au cas du Québec spécifiquement.

Stratégie 4a - Récupération métaux précieux des boues anodiques

- Documenter les coûts d'investissement dans les capacités de traitement des boues anodiques.
- Mieux connaître les sources d'approvisionnement des boues anodiques, les quantités et leurs compositions, les coûts de transport et les coûts d'investissement additionnels pour l'augmentation de la capacité de traitement.

Stratégie 4b - Récupération d'énergie thermique des laitiers

- Revoir l'estimation de la quantité de laitiers produits et documenter les paramètres technico-économiques associés aux autres usages potentiels des laitiers.

Stratégie 4c - Séquestration du CO₂ à partir de laitiers

- Investiguer cette stratégie davantage et de manière générale pour chaque type de métaux en fonction des différentes technologies disponibles ou en développement.

Stratégie 5 - Fabrication additive

- Mesurer les impacts sur les activités d'extraction du fer et du cuivre au Québec globalement en tenant compte de tous les secteurs (pas juste l'aéronautique), les types de pièces et leurs compositions.
- Établir le lien avec les quantités de métaux contenu dans ses pièces et déterminer leur provenance afin de pouvoir faire un lien direct avec les activités d'extraction du Québec.

Stratégie 6 - Recyclage du fer

- Identifier et quantifier d'autres sources de fer.
- Revoir les quantités associées au recyclage des avions et des trains dans le contexte du Québec.

Stratégie 7 - Recyclage du cuivre

- Identifier et quantifier d'autres sources de cuivre.
- Revoir les quantités associées au recyclage des ordinateurs, cellulaires, câbles et circuits imprimés dans le contexte du Québec.
- Mieux analyser et comprendre l'impact du coût de transport ou de collecte des matières premières.

Stratégie 8 - Recyclage du lithium

- Déterminer le seuil de rentabilité d'une usine en fonction des quantités de batteries arrivant en fin de vie au Québec.

Stratégie 9 - Modularités des équipements mécaniques et industriels

- Déterminer la quantité de matière qui est sauvée par la conception modulaire, connaître la durée de vie des produits et leurs coûts respectifs de production et de maintenance.
- Comparer les impacts et les coûts de ces produits modulaires avec des produits ordinaires.

Stratégie 10 - Écoconception des poutres en acier

- Mieux documenter cette stratégie de manière générale : quantité d'acier concerné et coûts de l'écoconception.
- Mesurer les coûts additionnels de l'écoconception et vérifier la compétitivité de ces poutres sur le marché des structures métalliques.

Stratégie 11 - Déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures

- Recenser les bâtiments ou infrastructures pouvant faire l'objet de déconstruction.
- Faire des analyses de rentabilité sur plusieurs projets types.

Stratégie 12a - Écoconception des véhicules – Autopartage et Matériaux plus légers

- Documenter les autres aspects de l'écoconception des véhicules incluant la modularité et la résistance.
- Établir des scénarios plus optimistes quant à l'évolution du nombre de clubs d'autopartage.
- Analyser les perspectives quant à l'évolution des matériaux des véhicules de manière globale, et non seulement suivant un seul exemple : remplacement de l'acier par de l'aluminium.

- Appliquer la stratégie aux autres véhicules routiers (camions légers, camions lourds, autobus), aux trains, bateaux et avions.

Stratégie 13 - Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées

- Établir différentes projections de coûts des systèmes de stockage à partir de batteries usagées et neuves.
- Appliquer la stratégie aux besoins de stockage à grande échelle pour la distribution sur les réseaux.

Finalement, il serait intéressant d'analyser des scénarios, à l'aide du modèle NATEM, visant à minimiser la quantité de minerais extraits et incluant toutes les stratégies. Ces scénarios permettraient ainsi de mieux prioriser les stratégies, que lors de leur analyse individuelle. De plus, une telle approche permettrait de déterminer le potentiel global de circularité pour le Québec, découlant de la mise en œuvre complète de toutes les stratégies pour les trois métaux à l'étude, et plus intéressant encore, de déterminer si ce potentiel permettrait de contrer le besoin d'augmenter l'extraction primaire des métaux pour satisfaire l'augmentation de la demande.

7 CONCLUSION

Ce rapport présente les résultats d'une analyse technico-économique de 13 stratégies de circularité pour trois métaux stratégiques pour le Québec: le fer, le cuivre et le lithium. Le travail a essentiellement été réalisé en deux phases.

Une première phase a permis de documenter et d'intégrer la chaîne de valeur des trois métaux dans le modèle technico-économique NATEM afin d'établir le scénario de référence. Le modèle ainsi complété permet de mesurer et optimiser les flux de métaux et autres matériaux, ainsi que la consommation énergétique et les émissions de GES liées à ces industries. La modélisation des activités minières, de première transformation et de transformation métallique existantes au Québec actuellement, et leurs projections dans le temps, représente ainsi un effort de travail important, préalablement à l'analyse des stratégies proprement dite. La seconde phase a servi à documenter les stratégies de circularité elles-mêmes suivant : a) une revue de littérature visant à quantifier les paramètres technico-économiques de chacune des stratégies dans le contexte du Québec, sous forme de fiche technique, et b) une modélisation des stratégies les mieux documentées et leurs variantes à l'aide du modèle technico-économique NATEM.

Au final, le rapport fournit une synthèse du **potentiel de circularité** relatif à chacune des stratégies en termes de quantité : quelle est la quantité de métaux remise en circulation et combien de tonnes de minerai est-il possible d'éviter d'extraire avec la mise en œuvre de la stratégie? La discussion entourant le potentiel de circularité réfère donc ici autant à la quantité de métaux réutilisée ou recyclée, qu'à la quantité de métaux potentiellement non extraits, suite à la mise en œuvre d'une stratégie. Suivant cette synthèse, un indice de potentiel a été attribué à chacune des stratégies (fort, moyen, faible).

Les stratégies identifiées comme ayant un potentiel de circularité important selon la définition ci-dessus, et dont le potentiel est fort, sont (en ordre numérique): les mines urbaines (Stratégie 3) la fabrication additive (Stratégie 5), le recyclage du fer des trains (Stratégie 6b) et de la ferraille (Stratégie 6d), le recyclage du cuivre des ordinateurs (Stratégie 7a) et des câbles (Stratégie 7c), le recyclage du lithium des batteries (Stratégie 8a), la déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures (Stratégie 11), l'écoconception des véhicules – Matériaux plus légers (Stratégie 12b), le stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées (Stratégie 13).

Les stratégies identifiées comme ayant un potentiel de circularité moyen sont : l'entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure (Stratégie 2), la séquestration du CO₂ à partir de laitiers (Stratégie 4c), le recyclage du cuivre des circuits-imprimés (Stratégie 7d) et l'écoconception des poutres en acier (Stratégie 10). Les stratégies identifiées comme ayant un potentiel de circularité faible sont : le développement technologique pour une extraction plus efficace (Stratégie 1), la récupération de métaux précieux des boues anodiques (Stratégie 4a), la récupération d'énergie thermique des laitiers (Stratégie 4b), la modularité des équipements mécaniques et industriels (Stratégie 9), l'écoconception des véhicules – Autopartage (Stratégie 12a), le recyclage du fer des avions (Stratégie 6a) et des voitures (Stratégie 6c), le recyclage du cuivre des cellulaires (Stratégie 7b) et le recyclage du lithium du verre (Stratégie 8b).

Ensuite, le rapport fournit une synthèse de la **faisabilité technico-économique** relative à chacune des stratégies de circularité: est-ce que la stratégie est économiquement optimale? La discussion entourant la faisabilité technico-économique de circularité réfère ici à la rentabilité (pour une entreprise) ou à l'optimalité économique (pour un sous-ensemble de la société) de mettre en place une stratégie en fonction des connaissances existantes au sujet des technologies ou des

options disponibles. L'optimalité économique étant définie comme le coût minimal pour satisfaire des demandes en produits et services, dans un sous-ensemble de l'économie québécoise, selon la rationalité économique des modèles d'optimisation TIMES décrite à l'Annexe A. Le modèle utilisé permet de minimiser les coûts du système énergétique, incluant d'autres produits (matériaux, métaux), dans une perspective technico-économique, mais ne mesure pas les impacts de nature macroéconomique comme le produit intérieur brut et l'emploi. Suivant cette synthèse, un potentiel de faisabilité a été attribué à chacune des stratégies (fort, moyen, faible).

Les stratégies identifiées comme ayant un potentiel de faisabilité technico-économique fort, sont (en ordre numérique): le développement technologique pour une extraction plus efficace (Stratégie 1), la récupération de métaux précieux des boues anodiques (Stratégie 4a), la séquestration du CO₂ à partir de laitiers (Stratégie 4c), la fabrication additive (Stratégie 5), le recyclage de la ferraille (Stratégie 6d), le recyclage du lithium des batteries (Stratégie 8a) et l'écoconception des véhicules – Matériaux plus légers (Stratégie 12b).

Les stratégies identifiées comme ayant un potentiel de faisabilité technico-économique moyen, sont: l'entreposage adéquat des résidus miniers pour une extraction ultérieure (Stratégie 2), la récupération d'énergie thermique des laitiers (Stratégie 4b), le recyclage du cuivre des câbles (Stratégie 7c), le recyclage du cuivre des circuits-imprimés (Stratégie 7d), l'écoconception des véhicules – Autopartage (Stratégie 12a) et le stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées (Stratégie 13). Les stratégies identifiées comme ayant un potentiel de faisabilité technico-économique faible, sont: les mines urbaines (Stratégie 3), le recyclage du fer des avions (Stratégie 6a), des trains (Stratégie 6b) et des voitures (Stratégie 6c), le recyclage du cuivre des ordinateurs (Stratégie 7a) et des cellulaires (Stratégie 7b), le recyclage du lithium du verre (Stratégie 8b), la modularité des équipements mécaniques et industriels (Stratégie 9), l'écoconception des poutres en acier (Stratégie 10) et la déconstruction sélective des bâtiments et infrastructures (Stratégie 11).

REFERENCES

- ActuEnvironnement (2014). Recyclage des trains : une activité rentable. Video YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=5ndkMK4y17o&feature=youtu.be>
- ActuEnvironnement (2013). Trains-métros : vers une optimisation des filières. Actu-Environnement.com, 11 mars 2013 : <https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/transport-recyclage/optimisation-train-metro.php>
- Ahmadi A. Khezri M. Abdollahzadeh A. A. Askari M. (2015). Bioleaching of copper, nickel and cobalt from the low grade sulfidic tailing of Golgohar Iron Mine, Iran. Hydrometallurgy 154: 1-8. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X15000523>
- Alvarez E. A. Trashorras A. J. G. Cuesta J. M. S. Bernat J. X. (2012). Steel mill slags energy potential: the case of the steel factory of Arcelor-Mittal in Asturias (Spain). Clean Technologies and Environmental Policy 14 (5): 869-877. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-012-0455-8>
- Angel M. (2005). Démantèlement d'avions à Tarbes. Usinenouvelle.com, 10 février 2005: <http://www.usinenouvelle.com/article/demantelement-d-avions-a-tarbes.N44013>
- Arcelor Mittal (2017). Site Internet : Installation. Information disponible en ligne (consultée en juillet 2017): <http://www.transformerlavenir.com/installations/>
- ArcelorMittal (2015). Rapport de développement durable 2015. 92 p. <http://corporate.arcelormittal.com/~media/Files/A/ArcelorMittal/sdr-2015/country-reports/canada/canada2015-fr.pdf>
- ArcelorMittal (2014). Sustainability report 2014. Steel – The sustainability challenge. 135 p. <http://corporate.arcelormittal.com/~media/Files/A/ArcelorMittal/corporate-responsibility/global-corporate-responsibility-report-2014.pdf>
- ARPE – Association pour le recyclage des produits électroniques (2016). Mémoire de l'ARPE-Québec. Présenté dans le cadre de projets de Plan de gestion des matières résiduelles. 8 p. <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/memoire-arpe-quebec.pdf>
- ARPE – Association pour le recyclage des produits électroniques (2015a). Rapport annuel 2014. Mississauga (Ontario). <http://recyclermeselectroniques.ca/qc/a-propos-de-nous/a-propos-de-larpe/arpe-rapport-annuel/>
- ARPE – Association pour le recyclage des produits électroniques (2015b). Mémoire de l'ARPE-Québec. Présenté à la Communauté urbaine de Montréal dans le cadre du Projet de plan métropolitain de gestion des matières résiduelles 2015 – 2020 dans le cadre de projets de Plan de gestion des matières résiduelles. 9 p. <http://docplayer.fr/7882318-Memoire-de-l-arpe-quebec.html>
- AVEQ – Association des véhicules électriques du Québec (2017). Statistiques SAAQ-AVÉQ sur l'électromobilité au Québec en date du 31 décembre 2016. Information disponible en ligne (consultée en juin 2017): <http://www.aveq.ca/actualiteacutes/statistiques-saaq-aveq-sur-lelectromobilite-au-quebec-en-date-du-31-decembre-2016-infographique>

- AVÉQ – Association des véhicules électriques du Québec (2015). Gestion efficace des vieilles batteries de véhicules électriques. <http://www.aveq.ca/actualiteacutes/gestion-efficaces-des-vieilles-batteries-de-vehicules-electriques>
- Bertrand C. (2010). Modélisation de la séparation magnétique de basse intensité sur tambours rotatifs. Enrichissement du minerai Havre-Saint-Pierre de Rio Tinto, Fer et Titane. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Faculté des sciences et génie, Département du génie des mines, de la minéralurgie et des matériaux, 276 p.
- Bhuie A. Ogunseitan O. Saphores J.-D. Shapiro A. (2004). Environmental and Economic Trade-offs in Consumer Electronic Products Recycling: A case study of cell phones and computers. Scottsdale, AZ: IEEE. <http://ieeexplore.ieee.org/document/1299691/>
- Bihouix P. de Guillebon B. (2015). Quel futur pour les métaux? Raréfaction des métaux: un nouveau défi pour la société. EDP Sciences, France, 300 p.
- Birat J.-P. Zaoui A. (2002). The Cycle of Iron. Metallurgical Research and Technology 99 (10): 795-807. Récupéré sur <https://www.cambridge.org/core/journals/metallurgical-research-and-technology/article/cycle-of-iron/5481F543DEA74033000FC3DE8BBC27B7>
- Blengini G. Busto M. Fantoni M. Fino D. (2012). Eco-efficient waste glass recycling: Integrated waste management and green product development through LCA. Waste Management 32 (5): 1000-1008. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11004776>
- Bonenfant D. Kharoune L. Sauve S. Hausler R. Niquette P. Mimeault M. Kharoune M. (2008). CO₂ sequestration potential of steel slags at ambient pressure and temperature. Industrial & engineering chemistry research 47(20): 7610-7616. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie701721j>
- Breton D. (2017). Conférence Américana 2017. L'avenir de l'électrification des transports. Présentation, 27 p.
- Breton D. (2015). La Kia Soul électrique : Si seulement... Site Internet Roulez électrique.com. Information disponible en ligne : <http://roulezelectrique.com/la-kia-soul-electrique-si-seulement/>
- Brosseau J.-P. (2016). La filière du lithium au Québec. RCGT- Raymond Chabot Grant Thornton. Québec Mines 2016. Présentation, 32 p. <http://www.economistesquebecois.com/files/documents/7j/24/j-p-brosseau.pdf>
- Buyse N. Quiret M. (2013). Nord Ferro prêt à recycler les trains. LesEchos.fr, 19 juin 2013: https://www.lesechos.fr/19/06/2013/LesEchos/21460-098-ECH_nord-ferro-pret-a-recycler-les-trains.htm
- CAR - Center for Automotive Research. (2016). Assessing the Potential of Additive Manufacturing for Lower-Cost Tools in the Automotive Industry. Retrieved from stratasy.com: <http://www.stratasy.com/resources/white-papers/~media/478AB7F053F04B0EABFAF54510776763.ashx>
- Caumon P. (2011). Une seconde vie pour les batteries : les acteurs ne sont pas tous convaincus. La Mission pour la Science et la Technologie (MS&T) de l'Ambassade de France aux États-Unis. Information disponible en ligne : <https://www.france-science.org/Une-seconde-vie-pour-les-batteries.html>

- Cdiscount (2017). HP Pro All-in-One 3520 - Tout en un. Récupéré sur cdiscount.com: <http://www.cdiscount.com/informatique/achat-pc-ordinateur/hp-pro-all-in-one-3520-tout-en-un-1-x-core-i3/f-107082401-hew0887758201022.html>
- Cessieux B. (2015). Forsee donne une seconde vie aux batteries de véhicule électrique. IT – Industrie et Technologie : Veille technologique pour les professionnels de l’industrie. Information disponible en ligne : <https://www.industrie-techno.com/forsee-donne-une-seconde-vie-aux-batteries-de-vehicule-electrique.40896>
- Changzhou Optima Technology Co., Ltd. (2017). High quality OTD-300B Scrap copper wire separator machine. Alibaba.com, 6 juillet 2017: https://www.alibaba.com/product-detail/High-quality-OTD-300B-Scrap-copper_60627844972.html
- Charbonneau P. (2014). Analyse des pratiques de valorisation des rejets miniers. Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement et développement durable. Maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke, 112 p.
- Chartrand P. (2016). Métallurgie ferreuse fontes & aciers (partie 1). Note de cours GCH8107 : Procédés pyrométallurgiques. Département de génie chimique, Polytechnique Montréal, Hiver 2016.
- Ching-Hwa L. Chang-Tang C. Kuo-Shuh F. Tien-Chin C. (2004). An overview of recycling and treatment of scrap computers. Journal of Hazardous Materials 114 (1-3): 93-100. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438940400398X>
- Christopher J. Stöhr M. Diekerhof M. Ziegler C. Truong P. Riverso S. Mihaylov P. Croce V. (2016). ELSA - Energy Local Storage Advanced system. D5.1 First study of the economic impact in the local and national grid related to all demo sites. Report, 184 p. <http://elsa-h2020.eu/Results.html>
- CIM - Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (2014). CIM Definition Standards For Mineral Resources and Mineral Reserves. Prepared by the CIM Standing Committee on Reserve Definitions. Adopted by CIM Council on May 10, 2014. 9 p. Document available online: <http://web.cim.org/standards/MenuPage.cfm?sections=177&menu=178>
- CIRAIG - Chaire internationale de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services (2016). Évaluation des impacts du développement des hydrocarbures à Anticosti dans un contexte de lutte aux changements climatiques au Québec (Titre en révision). Phase 2 – Rapport Final. Préparé pour le Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC).
- Classen M. Althaus H.-J. Blaser S. Tuchschnid M. Jungbluth N. Doka G. Faist Emmenegger M. Scharnhorst W. (2009). Life Cycle Inventories of Metals. Final report ecoinvent data v2.1, No 10. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland. Version available online: www.ecoinvent.ch
- Cloutier J. (2015). Est-ce que le stockage d’énergie au Québec pourrait être avantageux d’un point de vue environnemental? Analyse du cycle de vie attributionnelle et conséquentielle. Université de Sherbrooke, Mémoire de maîtrise, 115 p. <http://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/7696>
- CME – Canadian Manufacturers and Exporters (2016). Industrie 2030: Accelerating adoption of advanced manufacturing technologies. <http://www.cme-mec.ca/download.php?file=59ry6m9pl.pdf>

- Coelho A. de Brito J. (2011). Economic analysis of conventional versus selective demolition—A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3): 382-392. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344910002417>
- Combiér E. (2017). Grâce à l'impression 3D, Boeing va économiser 3 millions de dollars par avion. Retrieved from LesEchos.fr: https://www.lesechos.fr/12/04/2017/lesechos.fr/0211966651296_grace-a-l-impression-3d-boeing-va-economiser-3-millions-de-dollars-par-avion.htm
- Consoglobe (2010). Pourquoi et comment recycler les métaux ? Rédigé le 24 juillet 2010. Consulté 22 août 2017, à l'adresse <https://www.consoglobe.com/recycler-metaux-4317-cg>
- Couture P. (2015). Hydro-Québec achète toujours à gros prix. Le Journal de Montréal, 28 janvier 2015. <http://www.journaldemontreal.com/2015/01/28/hydro-quebec-achete-toujours-a-gros-prix>
- Cunningham C.G. Zientek M.L. Bawiec W.J. Orris G.J. (2005). Geology and Nonfuel Mineral Deposits of Latin America and Canada. Open File Report 2005-1294B U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, 110 p. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20051294B>
- Danielo O. (2015). La très rapide chute du coût des batteries (Méta-étude, Nature Climate Change). Information disponible en ligne (consultée en août 2017) <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/la-tres-rapide-chute-du-cout-des-batteries-meta-etude-nature-climate-change-997/>
- Dansereau S. (2014). Rio Tinto expérimente la mine sans mineur. Les Affaires, 19 avril 2014. <http://www.lesaffaires.com/secteurs-d-activite/ressources-naturelles/rio-tinto-experimente-la-mine-sans-mineur/568152>
- Dantata N. Touran A. Wang J. (2005). An analysis of cost and duration for deconstruction and demolition of residential buildings in Massachusetts. *Resources, Conservation and Recycling*, 44(1): 1-15. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092134490400148X>
- De Song Technology Trading Co. (2017). Small DC electric ARC furnace. Alibaba.com (accessed July 2017): https://www.alibaba.com/product-detail/Small-DC-electric-ARC-furnace_60490472385.html?spm=a2700.7724838.2017115.81.2f898c122EArf7
- Debnath U. Ahmad I. Habibi D. (2014). Quantifying economic benefits of second life batteries of gridable vehicles in the smart grid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 63: 577-587. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061514003603>
- Delogu M. Del Pero F. Berzi L. Pierini M. Bonaffini D. (2017). End-of-Life in the railway sector: Analysis of recyclability and recoverability for different vehicle case studies. *Waste Management* 60: 439-450. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16305396>
- Demers S. (2016). Projet de déconstruction verte de l'édifice fédéral dans le port de Québec - Gare Maritime Champlain. Papier présenté au 19e Congrès annuel du 3RMCDQ, Drummondville.
- Despins E. (2013). La fermeture de l'usine Klareco permettra la mise en valeur du pôle Roland-Therrien. Récupéré sur mediasud.ca: <http://mediasud.ca/nouvelle1349-la-fermeture-de-l-usine-klareco-permettra-la-mise-en-valeur-du-pole-roland-therrien.html>

- Devie A. (2012) Caractérisation de l'usage des batteries Lithium-ion dans les véhicules électriques et hybrides. Application à l'étude du vieillissement et de la fiabilité. Thèse de doctorat. Université de Lyon, 245 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00783338/>
- Drake A. (2017). Canadian Reserves of Selected Major Metals and Recent Production Decisions. Natural Resources Canada, Minerals and Metals Sector. Information available online (retrieved in February 2017): <http://www.nrcan.gc.ca/mining-materials/exploration/8294>
- DSM Environmental (2011). Ohio Glass Recycling Study Final Report. ODNR-Division of recycling & Litter Prevention. Récupéré sur epa.ohio.gov: <http://epa.ohio.gov/Portals/51/Recycle/OhioGlassRecyclingStudy.pdf>
- Ducker Worldwide (2016). Aluminum Content in Cars. Information disponible en ligne : https://european-aluminium.eu/media/1721/european-aluminium-ducker-study-summary-report_sept.pdf
- Dunn J.B. Gaines L. Barnes M. Sullivan J. Wang M. (2012). Material and Energy Flows in the Materials Production, Assembly, and End of Life Stages of the Automotive Lithium Ion Battery Life Cycle. Argonne National Laboratory. <https://greet.es.anl.gov/publication-lib-lca>
- Dupuis S. (2014). Technique : La voiture électrique. automobile-sportive.com. Information disponible en ligne (consultée en juin 2017): <http://www.automobile-sportive.com/technique/voiture-electrique.php>
- Dussault V. (2013). Car2Go à Montréal, c'est parti! Roulezelectrique.com. Information disponible en ligne (consultée en juin 2017) : <http://roulezelectrique.com/car2go-a-montreal-cest-parti>
- EDDEC- Institut de l'environnement, du développement durable et de l'économie circulaire (2016). Choix des trois métaux pour le projet: Économie circulaire des métaux au Québec. 19 p.
- Elamari K. (1993). Traitement hydrométallurgique en milieux acides des boues anodiques d'électroaffinage de cuivre, Institut National Polytechnique de Lorraine, France. 189 p. <http://docnum.univ-lorraine.fr/public/INPL T 1993 ELAMARI K.pdf>
- Elibama. (s.d.). Li-ion Batteries Recycling. Récupéré sur elibama.files.wordpress.com: <https://elibama.files.wordpress.com/2014/10/v-d-batteries-recycling1.pdf>
- ELSA - Energy Local Storage Advanced system (2017). Energy Local Storage Advanced system. Information disponible en ligne (consultée en juillet 2017): <http://elsa-h2020.eu/>
- Environnement Canada (2013). Rapport d'inventaire national 1990-2013: Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada - Sommaire. Document disponible en ligne : <http://www.ec.gc.ca/ges-ghg/default.asp?lang=En&n=1357A041-1>
- Farrell F. (2001). Specific Cost Data for Metal Production and Abatement - Appendix N 3 - Cost Data for NFM industry. Final Report. IPTS, Seville, 28 p. <ftp://ftp.jrc.es/pub/EURdoc/AppendixN1.pdf>
- Ferland J.-F. (2012). Récupération des TI : ARPE-Québec dévoile ses modalités. Direction informatique. <http://www.directioninformatique.com/recuperation-des-ti-arpe-quebec-devoile-ses-modalites/14675>

- Firnborn J. Müller M. (2011). What will be the environmental effects of new free-floating car-sharing systems? The case of car2go in Ulm. *Ecological Economics* 70, 1519–1528. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800911001030>
- Fisher B.S. Schnittger S. (2012). Autonomous and Remote Operation Technologies in the Mining Industry: Benefits and costs. BEAconomics Pty Ltd, BEA Research Report 12.1. <http://www.baeconomics.com.au/wp-content/uploads/2010/01/Mining-innovation-5Feb12.pdf>
- Flexpipe (2017). Site Internet. Information disponible en ligne directement (accès en septembre 2017) : https://www.flexpipeinc.com/ca_fr/
- Ford.ca (2017). Site Web : Modèles et caractéristiques. Informations disponible en ligne (consulté en juillet 2017): <http://fr.ford.ca/cars/c-max/2017/models/>
- Fortier R. (2011). La déconstruction sélective du 11401, boulevard Pie-IX | Voir vert - Le portail du bâtiment durable au Québec. Consulté 22 août 2017, à l'adresse <http://www.voirvert.ca/projets/projet-etude/la-deconstruction-selective-du-11401-boulevard-pie-ix>
- Franks D.M. Boger D.V. Côte C.M. Mulligan D.R. (2011). Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources policy* 36 (2): 114-122. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420710000747>
- Gagné L. (2010). Le Verre. Recyc-Québec. Fiche informative, 8 p. <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-verre.pdf>
- Gagnon N. Poirier R. (2016). Institut national des mines : Colloque sur l'automatisation et la robotisation. Novembre 2016. CPA Automatisation, 36 p. http://www.inmq.gouv.qc.ca/RadFiles/Documents/DOCUMENTS/Powerpoints/conference01_transfert_savoir_faire_automatisation.pdf
- Gaines L. Sullivan J. Burnham A. Belharouak I. (2011). Life-Cycle Analysis for Lithium-Ion Battery Production and Recycling. Argonne: Argonne National Laboratory. https://www.researchgate.net/publication/265158823_Paper_No_11-3891_Life-Cycle_Analysis_for_Lithium-Ion_Battery_Production_and_Recycling
- Garoscio P. (2017). Ikea va vendre des batteries de stockage d'énergie solaire. Information disponible en ligne (consultée en août 2017) : <http://www.clubic.com/domotique/actualite-834886-ikea-vendre-batteries-stockage-energie-solaire.html>
- Geldron A. (2016). Métaux stratégiques: la mine urbaine française. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement* 82 (2): 67-73. <https://www.cairn.info/revue-responsabilite-et-environnement-2016-2-page-67.htm>
- Geldron A. (2012). Peut-on recycler à l'infini? *Pour la Science* 421: 15-16. http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/article-peut-on-recycler-a-l-infini-30546.php
- Geoffroy B. (2016). Plus de 500 nouveaux véhicules chez Communauto. L'offre du service Automobile double à Montréal et à Québec. <http://actualites.communauto.com/2016/04/19/550-nouveaux-vehicules-chez-communauto-loffre-auto-mobile-double-a-montreal-a-quebec>
- Gershenson J. Prasad G. Zhang Y. (2003). Product modularity: definitions and benefits. *Journal of Engineering design* 14(3): 295-313.

<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0954482031000091068?journalCode=cjen20>

- Gerst M. D. (2009). Linking Material Flow Analysis and Resource Policy via Future Scenarios of In-Use Stock: An Example for Copper. *Environmental Science & Technology* 43 (16): 6320-6325. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es900845v>
- Gervais H. Bahn O. Baptiste P. Margni M. Mousseau N. Savadogo O. Simon R. (2016). Métaux et économie circulaire au Québec - Synthèse des meilleures pratiques de circularité pour le cuivre, le fer et le lithium. Rapport de l'étape 2. Projet réalisé par l'Institut EDDEC pour le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 65 p.
- Gervais H. Bahn O. Margni M. Mousseau N. Normandin D. Savadogo O. (2017). Métaux et économie circulaire au Québec - Analyse des freins et leviers liés aux stratégies de circularité pour le cuivre, le fer et le lithium. Rapport de l'étape 3.1. Projet réalisé par l'Institut EDDEC pour le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 81 p.
- Geyer R. Blass V.D. (2009). The economics of cell phone reuse and recycling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 47 (5-8): 515-525. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-009-2228-z>
- Ghodrat M. Rahmadhani M. Brooks G. Corder G.D. (2016). Techno Economic Analysis of Electronic Waste Processing through Black Copper Smelting Route. *Journal of Cleaner Production* 120: 178-190. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616301007>
- Gilbert (2017). Site Internet. Information disponible en ligne directement (accès en septembre 2017) : <http://www.gilbert-tech.com/tout-terrain/equipements-tout-terrain/920/>
- Glencore (2017). Affinerie CCR - L'électro-affinage du cuivre et le traitement des boues anodiques. Glencore Canada. Information disponible en ligne (consultée en août 2017). <http://www.affinerieccr.ca/fr/Produits/Pages/Nos-procedes.aspx>
- Glencore (2015). Colloque annuel de l'ADICQ, Édition 2015. Affinerie CCR. Présentation, 30 p. <http://adicq.qc.ca/doc/doc-1427291295.pdf>
- Glencore Xstrata (2013). Half-Year Production Report 2013. 14 p. http://www.glencore.com/assets/investors/doc/reports_and_results/2013/GLEN-2013-Half-Yearly-Production-Report.pdf
- Glöser S. Soulier M. Tercero Espinoza L. (2013). Supporting Information: A dynamic analysis of global copper flows. Global stocks, postconsumer material flows, recycling indicators & uncertainty evaluation. Competence Center Sustainability and Infrastructure Systems, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, Karlsruhe, Germany, 45 p. http://pubs.acs.org/doi/suppl/10.1021/es400069b/suppl_file/es400069b_si_001.pdf
- GoldPrice.org (2017). Where the world checks the gold price. (2017, juillet 4). Récupéré sur <http://goldprice.org/>
- Gouvernement du Québec (2012). Plan d'action contre les changements climatiques 2013-2020. 55 p. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/plan-action-fonds-vert.asp>
- Government of Canada (2010). Renewable Fuels Regulations. *Canada Gazette*, Vol. 144, No. 18. <https://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/eng/regulations/detailReg.cfm?intReg=186>

- Grahl C. (2004). Glass Forming & Processing: Saving Energy with Lithium. Récupéré sur ceramicindustry.com: <http://www.ceramicindustry.com/articles/84228-glass-forming-processing-saving-energy-with-lithium>
- Greengate Metals (2017). Scrap Metal Prices 2017 Scrap Yard Manchester. Récupéré sur greengatemetals.co.uk: <https://www.greengatemetals.co.uk/scrapmetal/prices>
- Guideautoweb.com (2017). Spécifications techniques - Chevrolet volt 2017. Guideautoweb. Information disponible en ligne (consultée en juin 2017) : <http://www.guideautoweb.com/specifications/chevrolet/volt/lt/2017/>
- Hall N. (2017). 10 alternatives to lithium-ion batteries. Charged Website. Information available online: <http://charged.io/10-alternatives-lithium-ion-batteries>
- Huijgen W. J. Comans R. N. Witkamp G.-J. (2007). Cost evaluation of CO₂ sequestration by aqueous mineral carbonation. Energy Conversion and Management 48 (7): 1923-1935. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890407000520>
- Huijgen W. J. Witkamp G.-J. Comans R. N. (2005). Mineral CO₂ sequestration by steel slag carbonation. Environmental Science & Technology 39 (24): 9676-9682. <http://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es050795f>
- Huang R. Riddle M. Graziano D. Warren J. Das S. Nimbalkar S Cresko J. Masanet E. (2016). Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. Journal of Cleaner Production 135: 1559-1570. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615004849>
- ICA - International Copper Association. (2014). Copper Recycling. Récupéré sur copperalliance.org: <http://copperalliance.org/wordpress/wp-content/uploads/2017/03/ica-copper-recycling-1405-A4-low-res.pdf>
- ICSG - International Copper Study Group (2015). The World Copper Factbook 2015. Lisbon, 64 p. http://superiorazcwg.org/documents-data/world-copper-factbook-2015_international-copper-study-group/
- IEA – International Energy Agency (2011). Technology Roadmap Electric and plug-in hybrid electric vehicles. IEA, Paris, 52 p. Document available online : <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-electric-and-plug-in-hybrid-electric-vehicles-evphev.html>
- IIP - Institute for Industrial Productivity (2016). Industrial Efficiency Technology Database (IETD). Database available online (retrieved in February 2017): <http://ietd.iipnetwork.org/>
- Index Mundi (2017). Copper, grade A cathode Monthly Price - Canadian Dollar per Metric Ton. Information available online (retrieved in February 2017): <http://www.indexmundi.com>
- InvestmentMine (2017). Web Site. Information available online (accessed August 2017). <http://www.infomine.com/investment/metal-prices/ferro-titanium/>
- IRENA - International Renewable Energy Agency (2015). Battery storage for renewables: Market status and technology outlook. Report, 52 p. https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_battery_storage_report_2015.pdf
- ISQ - Institut de la statistique du Québec. (2016a). L'utilisation des technologies de pointe dans les entreprises au Québec - Rapport d'enquête. Document disponible en ligne:

<http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/science-technologie-innovation/technologie-pointe/technologies-pointe.pdf>

ISQ - Institut de la statistique du Québec (2016b). Estimation de la population des municipalités du Québec de 15 000 habitants et plus au 1er juillet des années 1996, 2001, 2006 et 2011 à 2016. Information disponible en ligne (consultée en juin 2017) : http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/population-demographie/structure/mun_15000.htm

JDN L. R. (2017). Les prix des métaux en juillet 2017. Journaldunet.com (accessed July 2017): <http://www.journaldunet.com/economie/industrie/1146972-prix-des-metaux/>

JRC - Joint Research Centre (2014). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries. European Commission Joint Research Centre, Reference Report – Final Draft, 1242 p. http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/NFM_Final_Draft_10_2014.pdf

Kaiser O.S. Eickenbusch H. Grimm V. Zweck A. (2008). The future of the car. Zukünftige Technologien Consulting of VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf. https://www.vditz.de/fileadmin/media/publications/pdf/Band_75_eng.pdf

Kemper F. (2014). How much would an average electric car weigh as opposed to a comparable gasoline powered car? quora.com. Information disponible en ligne (consultée en juin 2017) : <https://www.quora.com/How-much-would-an-average-electric-car-weigh-as-opposed-to-a-comparable-gasoline-powered-car>

King B. (2012). Recyclage ou extraction, les matières premières ont de beaux jours devant elles. La chronique Agora. Information disponible en ligne (consultée en juin 2017) : <http://la-chronique-agera.com/recyclage-extraction-matieres-premieres-beaux-jours-devant-elles/>

Labbé J.F. Christmann P. (2011). Panorama 2010 du marché du sélénium. Brgm Géosciences pour une terre durable. 91 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60202-FR.pdf>

Langlois P. 2009. Y a t'il suffisamment de lithium pour les batteries de 1 milliard de véhicules hybrides branchables? Électro Vert – Un blogue sur la mobilité durable et les énergies renouvelables. Information disponible en ligne (consultée en juillet 2017) : <http://electronvert.blogspot.ca/2009/02/y-til-suffisamment-de-lithium-pour-1.html>

Langlois-Blouin S. (2010). Les métaux. Recyc-Québec Fiches informatives, 8 p. <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-metaux.pdf>

Laseter T. Ovchinnikov A. Raz G. (2010). Reduce, Reuse, Recycle...or Rethink. Récupéré sur strategy+business:Corporate Strategies and News Articles on Global Business, Management, Competition and Marketing: <https://www.strategy-business.com/article/10406?gko=ec603>

Le blog de doc zaius (2012). Le Lithium, y en aura-t-il pour tout le monde ? Information disponible en ligne (consultée en juillet 2017) : <http://leblogdedoczaius.over-blog.com/article-le-lithium-y-en-aura-t-il-pour-tout-le-monde-104229654.html>

Le Forum des Magisterants et Doctorants Algériens (2012). L'Industrie automobile : Les matériaux légers remplacent l'acier. Information disponible en ligne (consultée en juin 2017) : <http://magisteresalgeriens.3oloum.org/t1361-l-industrie-automobile-les-materiaux-legers-remplacent-l-acier>

- Leviton (2017). Site Internet. Information disponible en ligne directement (accès en septembre 2017) : <http://french.leviton.com/en>
- Lih W. Yen J. Shieh F. Liao Y. (2012). Second Use of Retired Lithium-ion Battery Packs from Electric Vehicles. 2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6228326/>
- Live Palladium Price (2017). Kitco.com, 4 juillet 2017: <http://www.kitco.com/charts/livepalladium.html>
- LME Copper (2017). lme.com, 10 juillet 2017: <https://www.lme.com/metals/non-ferrous/copper>
- Lockwood Green (2000). Ironmaking Process Alternatives Screening Study - Volume I: Summary Report. 154 p. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/ironmaking_process.pdf
- Loulou R. Goldstein G. Kanudia A. Lehtila A. Remme U. (2016). Documentation for the TIMES Model. Energy Technology Systems Analysis Program (ETSAP) of the International Energy Agency (IEA). Document available online: <http://iea-etsap.org/index.php/documentation>.
- M. JQ (2017). La voiture électrique à l'origine du prochain boom ? Les echos. Information disponible en ligne (consultée en juin 2017) : https://www.lesechos.fr/08/02/2017/LesEchos/22379-122-ECH_la-voiture-electrique-a-l-origine-du-prochain-boom--.htm
- MAC- Mining Association of Canada (2015). Facts and Figures of the Canadian Mining Industry 2015. Ottawa, 112 p. <http://mining.ca/documents/facts-and-figures-2015>
- Marais F. (2015). En Haute-Marne, une voiture SNCF démantelée chaque jour. TracesEcritesNews, 23 mars 2015 : <http://www.tracesecritesnews.fr/actualite/en-haute-marne-une-voiture-sncf-demantelee-chaque-jour-53347>
- Marcaillou L. (2005). Un centre de démantèlement d'avions à Tarbes. LesEchos.fr, 10 novembre 2005: https://www.lesechos.fr/10/11/2005/LesEchos/19538-026-ECH_un-centre-de-demantelement-d-avions-a-tarbes.htm
- Marcotte O. (2016). Avantages comparés des différentes techniques de fabrication additive et exemples industriels. Centre de recherche industrielle du Québec – CRIQ. Journée formation ISQ : Nouveaux procédés performants. Présentation, 42 p.
- Massé I. (2014). Services d'autopartage: un frein à la voiture personnelle? lapresse.ca. Information disponible en ligne (consultée en juin 2017) : <http://affaires.lapresse.ca/finances-personnelles/consommation/201408/12/01-4791175-services-dautopartage-un-frein-a-la-voiture-personnelle.php>
- Maung K.N. Hashimoto S. Mizukami M. Morozumi M. Lwin C.M. (2016). Supporting Information: Assessment of the Secondary Copper Reserves of Nations. 10 p. http://pubs.acs.org/doi/suppl/10.1021/acs.est.6b04331/suppl_file/es6b04331_si_001.pdf
- Mayer N. (2015). Batteries : du potassium et du sodium pour remplacer le lithium. Futura Science. Information available online: <http://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/chimie-batteries-potassium-sodium-remplacer-lithium-60089/>

- McLaren J. Wright L. Parkinson S. Jackson T. (1999). A dynamic life-cycle energy model of mobile phone take-back and recycling. *Journal of Industrial Ecology* 3 (1): 77-91. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1162/108819899569403/epdf>
- Medles K. Senouci K. Tilmatine A. Descalescu L. (2009). Capability Evaluation and Statistical Control of Electrostatic Separation Processes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 1086-1094. <http://ieeexplore.ieee.org/document/4957520/>
- Mercier F. (2016). Chevrolet Volt 2017 : La voiture électrique qui n'est pas une. Site Internet Autonet – Essais routiers. Information disponible en ligne : <http://www.autonet.ca/fr/2016/12/19/chevrolet-volt-2017-la-voiture-electrique-qui-nen-est-pas-une>
- MERN – Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2012). DV 2012-01 - Rapport sur les activités minières au Québec 2011. Chapitre 6: Exploitation minière, 106 p. Document disponible en ligne: <https://mern.gouv.qc.ca/mines/publications/publications-rapports-2011.jsp>
- MERN – Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2016a). DV 2016-01 - Rapport sur les activités minières au Québec 2015. Chapitre 5: Mise en valeur, développement minier et mode surveillance et maintenance. Chapitre 6: Exploitation minière, 106 p. Document disponible en ligne: <https://mern.gouv.qc.ca/mines/publications/publications-rapports-2015.jsp>
- MERN – Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2016b). Choisir le secteur minier du Québec 2016. 68 p. Document disponible en ligne: <https://www.mern.gouv.qc.ca/publications/mines/secteur-minier.pdf>
- MERN – Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (2016c). Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec. Direction de la restauration des sites miniers, 82 p. Document disponible en ligne: <https://www.mern.gouv.qc.ca/mines/restauration/restauration-guide.jsp>
- Metal Miner (2009). Steel Production Cost Model - Steel Cost Breakdown. Excel file. Information available online (retrieved in February 2017): <https://agmetaminer.com/steel-production-cost-model/>
- Millette J. (2010). Réemploi des résidus de construction, de rénovation et de démolition au Québec. Mémoire de maîtrise. Université de Sherbrooke, Centre universitaire de formation en environnement. https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais2009/Millette_J_A09.pdf
- Ministère de l'Économie (2014). Note sur l'économie et le commerce - L'Inde. Rapport, 10 p. https://www.economie.gouv.qc.ca/fileadmin/contenu/documents_soutien/exportation/notes_economie/note_economie_inde.pdf
- Morency C. Verreault H. Demers M. (2015). Identification of the minimum size of the shared-car fleet required to satisfy car-driving trips in Montreal. *Transportation* 42 : 435–447. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11116-015-9605-2>
- Morneau L. (2009). Les résidus de construction, de rénovation et de démolition. Fiche informative. Recyc-Québec. 6 p. <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-crd.pdf>

- Mousseau N. Simon R. Baptiste P. Margni M. Savadogo O. Ngongo D.L. Napier-Linton L. Simard J.-M. (2016). Métaux et économie circulaire au Québec - Principes de l'économie circulaire et approches à l'étranger. Rapport de l'étape 2. Projet réalisé par l'Institut EDDEC pour le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 30 p.
- MTQ - Ministère des Transports du Québec (2015). Propulser le Québec par l'électricité: Plan d'action en électrification des transports 2015-2020. Publication réalisée par la Direction de la planification et éditée par la Direction des communications du ministère des Transports du Québec, 65 p. Document disponible en ligne : <http://medias.mtq.fabrique3.net.s3.amazonaws.com/wp-content/uploads/2015/10/CIAO-047 - MTQ - LGS - Rapport FR v5 V.pdf>
- Müller D. B. Wang T. Duval B. (2010). Patterns of Iron Use in Societal Evolution - Supporting Information. *Environmental science & technology* 45(1): 182-188. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es102273t>
- Mulliken B. (2009). Another Life for Car Fluff. *Green Energy News* 14 (2). <http://www.green-energy-news.com/arch/nrgs2009/20090026.html>
- Neubauer J. Pesaran A. (2011). The ability of battery second use strategies to impact plug-in electric vehicle. *Journal of Power Sources* 196: 10351–10358. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775311012377>
- NHTSA - National Highway Traffic Safety Administration (2011). Summary of Fuel Economy Performance. U.S. department of transportation. <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/performance-summary-report-12152014-v2.pdf>
- Nissan.ca (2017). Site Web : Changement de mode d'alimentation. Information disponible en ligne (consulté en juillet 2017): <http://www.nissan.ca/fr/electric-cars/leaf/charging-range/battery/>
- Nykvist B. Nilsson M. (2015). Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Climate Change* 5: 329–332. <http://www.nature.com/nclimate/journal/v5/n4/full/nclimate2564.html>
- OECD - Organisation for economic co-operation and development (2001). The application of biotechnology to industrial sustainability. p.129. <https://www.oecd.org/sti/biotech/1947629.pdf>
- OEE – Office de l'efficacité énergétique (2011). Base de données complète sur la consommation d'énergie. Database available online: http://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/menus/evolution/tableaux_complets/liste.cfm
- Olajire A.A. (2013). A review of mineral carbonation technology in sequestration of CO₂. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 109: 364-392. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410513000673>
- ONE – Office national de l'énergie (2013). Avenir énergétique du Canada en 2013 - Offre et demande énergétiques à l'horizon 2035 - Évaluation du marché de l'énergie. <https://www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/ft/2013/index-fra.html>

- Orfali P. (2008). Recyclage d'avions: le Canada emboîte le pas. La Presse, 10 novembre 2008. <http://affaires.lapresse.ca/economie/200901/06/01-684994-recyclage-davions-le-canada-emboite-le-pas.php>
- Païement J.-P. Skiadas N. Journeaux N. Simoneau R. Carignan D. Boyd A. Gagnon D. Shaded W. Pengel E. Michaud A. Bilodeau M. Buchanan M.-J. Boilard A. (2016). Feasibility Study Update on the Whabouchi Lithium Deposit and Hydromet Plant (Revised). Prepared by Met-Chem, Division of DRA Americas Inc. for Nemaska Lithium Inc. 366 p. <http://www.nemaskalithium.com/assets/documents/docs/2015-024%20Nemaska%20NI%2043-101%20May%2019%202016%20Final-SEDAR.pdf>
- Parreira J. (2013). An Interactive Simulation Model to Compare an Autonomous Haulage Truck with a Manually-Operated System. PhD Thesis, Mining engineering, The University of British Columbia, 228 p. <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0074111>
- Pasquier L-C Mercier G. Blais J-F Cecchi E. Kentish S. (2016). Technical & economic evaluation of mineral carbonation process using southern Québec mining wastes for CO₂ sequestration of raw flue gas with by-product recovery. International Journal of Greenhouse Gas Control 50: 147-157. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583616302122>
- Pasquier L-C. (2014). Procédé de piégeage du CO₂ industriel par carbonatation minérale de résidus miniers silicates (serpentinite) et valorisation des sous-produits. Thèse de doctorat, Université du Québec, 250 p. <http://espace.inrs.ca/2079/1/T000666.pdf>
- Pedlex (2017). Site Internet. Information disponible en ligne directement (accès en septembre 2017) : <http://www.pedlex.com/>
- Porter I. (2017). Recyclage du verre: une affaire réglée? Récupéré sur ledevoir.com: <http://www.ledevoir.com/politique/quebec/500288/titre-recyclage-du-verre-une-affaire-reglee>
- Potelle D. (2009). Les résidus des technologies de l'information et des communications. Recyc-Québec, Fiche informative, 13 p. <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-tic.pdf>
- Prix-métaux.com (2017). Aluminium. Récupéré sur prix-métaux.com. (Accès juillet 2017) <http://www.prix-metaux.com/aluminium.html>
- Québec PC (2017). Le recyclage de circuit électronique & Informatique. Information disponible en ligne (consultée en juillet 2017). <http://quebecpc.com/ou-vont-reellement-vos-appareils-electroniques-recycles-pour-etre-traites>
- RCGT - Raymond Chabot Grant Thornton (2015). La filière du lithium au Québec : Étude des retombées économiques potentielles. Préparé pour le Ministère de l'énergie et des Ressources naturelles (MERN), 65 p.
- Recyc-Quebec (2017). Indice des prix des matières. Information disponible en ligne (consultée en juillet 2017). <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/municipalites/collecte-selective-municipale/indice-prix-matieres>
- Recyc-Quebec (2016). Plan d'action 2016-2017 - Comité mixte sur la réduction à la source. Disponible: <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/plan-action-comite-mixte-2016-2017.pdf>

- Recyc-Quebec (2015). Bilan 2015 de la gestion des matières résiduelles au Québec. Disponible: <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2015.pdf>
- Recyc-Quebec (2008). Les véhicules hors d'usage. Fiche d'information 12p. <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-vehicules.pdf>
- Remus R. Aguado Monsonet M.A. Roudier S. Delgado Sancho L. (2013). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. European Commission Joint Research Centre, Reference Report, 627 p. http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/IS_Adopted_03_2012.pdf
- Renard F. (2014). 2020 cathode materials costcompetition for large scale applications and promising LFP best-in class performer in term of price per kWh. Montréal: OREBA 1.0. https://www.eiseverywhere.com/file_uploads/eb9b04cd75ee9da4619308dffffd78760_O-8.01RenardFabrice.pdf
- RénoCyclage. (2013). Rapport d'activités 2011-2013. Disponible: http://media.wix.com/ugd/c3ba22_c40b113d40e0292aa6a69e2f526d6feb.pdf
- Réseau Québec-3D. (2015). À propos du Réseau Québec-3D. Disponible: <http://www.reseauquebec3d.com/fr/a-propos-du-reseau-quebec-3d>
- Rettino-Parazelli K. (2016). Un projet envoyé au recyclage. LeDevoir.com, 25 février 2016. <http://www.ledevoir.com/economie/actualites-economiques/463903/demantelement-d-avions-un-projet-envoye-au-recyclage>
- Reynolds C., Kandlikar M. (2007). How hybrid-electric vehicles are different from conventional vehicles: the effect of weight and power on fuel consumption. Environmental Research Letters, 2(1), 014003. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/2/1/014003>
- Rio Tinto (2017). Nos produits. Information disponible en ligne (consultée en juillet 2017): <http://www.riotinto.com/canada/rtft/our-products-15035-fr.aspx>
- Rio Tinto (2015). Annual report 2015. http://www.riotinto.com/documents/RT_Annual_Report_2015.pdf
- RnCan - Ressources naturelles Canada (2017). Les faits : Le poids du véhicule a une incidence sur la consommation de carburant. Information disponible en ligne (consultée en juin 2017) <http://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/transports/voitures-camions-legers/achats/16756>
- Robinson M.-E. (2015). Évaluation d'impact environnemental de l'électrification des automobiles dans un contexte québécois. Rapport présenté dans le cadre des consultations sur la politique énergétique, 32 p. https://mern.gouv.qc.ca/energie/politique/pdf/lettre/HY_20150212_001_Marie_Eve_Robinson.pdf
- Rocha R. Rioux M. (2016). L'autopartage, un modèle d'avenir pour les uns, un irritant pour les autres. radio-canada.ca. Information disponible en ligne (consultée en juin 2017) : <http://ici.radio-canada.ca/nouvelles/special/2016/11/montreal-car2go-covoiturage-vignettes-stationnement>
- Rockaway Recycling (2017). Scrap Metal Prices. Rockawayrecycling.com (accessed August 2017) <https://rockawayrecycling.com/scrap-metal-prices/>

- Roussat N. Dujet C. Mehu J. (2009). Choosing a sustainable demolition waste management strategy using multicriteria decision analysis. *Waste Management*, 29(1), 12-20. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X08001256>
- Salmi A. Atzeni E. (2012). Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 62 (9/12): 1147-1155. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-011-3878-1>
- Schaub C. (2014). Mines urbaines, la quête en surface. *Liberation*, 9 mars 2014. http://www.liberation.fr/futurs/2014/03/09/mines-urbaines-la-quete-en-surface_985715
- Schiffman R. (2016). Pilot plant to turn CO₂ into house parts and paving stones. Consulté 4 septembre 2017, à l'adresse <https://www.newscientist.com/article/2082112-pilot-plant-to-turn-co2-into-house-parts-and-paving-stones/>
- Sergio C. Gorgolewski M. (2003). Reuse of Structural Steel at BedZED. Reuse-Steel Case Study 4. Consulté en juillet 2017: <http://www.reuse-steel.org/files/projects/bedzed/bedzed%20case%20study%205-5.pdf>
- SERI - Sustainable Europe Research Institute (2015). Bioleaching: Making mining sustainable. <http://web.mit.edu/12.000/www/m2015/2015/bioleaching.html>
- Sheng M. (2017). 35T small electric arc furnace price. Alibaba.com (accessed June 2017): https://www.alibaba.com/product-detail/35T-small-electric-arc-furnace-price_1992216131.html
- Shiau C.-S. N. Samaras C. Hauffe R. Michalek J. J. (2009). Impact of battery weight and charging patterns on the economic and environmental benefits of plug-in hybrid vehicles. *Energy Policy*, 37(7): 2653-2663. <http://www.cmu.edu/me/ddl/publications/2009-EP-Shiau-Samaras-Hauffe-Michalek-PHEV-Weight-Charging.pdf>
- Shin H. Kim N. Sohn J. (2005). Development of a metal recovery process from Li-ion. *Hydrometallurgy* 79 (3-4): 172 – 181. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X0500143X>
- Silverprice.org (2017). Where the world checks the silver price. (2017, juillet 4). Récupéré sur silverprice.org: <http://silverprice.org>
- Simbolotti G. Kempener R. (2012). Energy Supply Technology Data Source: Electricity Storage. Energy Technology Systems Analysis Program (ETSAP) of the International Energy Agency (IEA). http://www.iea-etsap.org/Energy_Technologies/Energy_Supply.asp
- Spatari S. Bertram M. Gordon R. B. Henderson K. Graedel T. (2005). Twentieth century copper stocks and flows in North America: A dynamic analysis. *Ecological Economics* 54 (1) : 37-51. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800904003921>
- St-Arnaud L. (2016). Éléonore : Automatisation appliquée et nature du travail. Présentation. Colloque Québec Mines, 20-22 novembre 2016, 27 p. http://www.inmq.gouv.qc.ca/RadFiles/Documents/DOCUMENTS/Powerpoints/conference03_automatisationEleonore.pdf
- Statistic Brain (2016). Computer Sales Statistics. Récupéré sur statisticbrain.com: <http://www.statisticbrain.com/computer-sales-statistics>

- Statistique Canada (2017a). Base de données sur le commerce international canadien de marchandises. Disponible en ligne: <http://www5.statcan.gc.ca/cimt-cicm/home-accueil?lang=fra>
- Statistique Canada (2017b). Ventes de véhicules automobiles neufs, Canada, provinces et territoires. Statistiques Canada, Tableau 079-0003. <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a26?lang=fra&retrLang=fra&id=0790003&&pattern=&stByVal=1&p1=1&p2=37&tabMode=dataTable&csid=>
- Statistique Canada (2012a). Approvisionnement et utilisation des produits pétroliers raffinés au Canada. Catalogue No 45-004-X. <http://www5.statcan.gc.ca/olc-cel/olc.action?ObjId=45-004-X&ObjType=2&lang=fr&limit=0>
- Statistique Canada (2012b). Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) Canada 2012. Catalogue No 12-501-X. <http://www.statcan.gc.ca/fra/sujets/norme/scian/2017/index>
- Statistique Canada (2011). Bulletin sur la disponibilité et écoulement d'énergie au Canada. Catalogue No 57-003-XIE. <http://www5.statcan.gc.ca/olc-cel/olc.action?ObjId=57-003-X&ObjType=2&lang=fr&limit=0>
- Steelonthenet.com (2017). Electric Arc Furnace Steelmaking Costs 2017. Steelonthenet.com (accessed on July 2017): <http://www.steelonthenet.com/cost-eaf.html>
- Steelonthenet.com (2016a). Basic Oxygen Furnace Route Steelmaking Costs 2016. Information available online (retrieved in February 2017): <http://www.steelonthenet.com/cost-bof.html>
- Steelonthenet.com (2016b). Electric Arc Furnace Steelmaking Costs 2016. Information available online (retrieved in February 2017): <http://www.steelonthenet.com/cost-eaf.html>
- Tesla.com (2017a). Site Web. Information disponible en ligne (consulté en juillet 2017): <https://www.tesla.com>
- Tesla.com (2017b). Site Web. Commandez votre Powerwal. Information disponible en ligne (consultée en août 2017) : <https://www.tesla.com/powerwall?redirect=no>
- Thomas D. Gilbert S. (2014). Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing. U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Special Publication 1176. 89 p. Retrieved from <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1176.pdf>
- TIC Mag. (2015). Un projet de recyclage des vieux téléphones au Cameroun. Récupéré sur ticmag.net: <http://www.ticmag.net/un-projet-de-recyclage-des-vieux-telephones-au-cameroun/>
- Tirado P. Margni M. Campoare U. Gervais H. Mousseau N. Saunier F. Savadogo O. Simon R. (2017). Métaux et économie circulaire au Québec - Analyse de flux de matières stratégiques du cuivre, du fer et du lithium. Rapport de l'étape 2.2. Projet réalisé par l'Institut EDDEC pour le Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 46 p.
- Tolouei R. Titheridge H. (2009). Vehicle mass as a determinant of fuel consumption and secondary safety performance. Transportation Research part D: transport and Environment, 14(6): 385-399. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136192090900011X>

- Tong S. Same A. Kootstra M. A. Park J. (2012). Off-grid photovoltaic vehicle charge using second life lithium batteries: An experimental and numerical investigation. *Applied Energy* 104: 740-750. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912008495>
- Trading Economics (2017). Steel Prices – Average 5-years. Information available online (retrieved in January 2017): <http://www.tradingeconomics.com/commodity/steel>
- TEFP – Projet Trottier pour l'avenir énergétique (2016). Défis et opportunités pour le Canada: Transformations pour une réduction majeure des émissions de GES. Document disponible en ligne : <http://iet.polymtl.ca/tefp>.
- U.S. DOE - U.S. Department of Energy. (2015). Chapter 6: Innovating Clean Energy Technologies in Advanced Manufacturing - Technology Assessments. Quadrennial Technology Review 2015, 36 p. Retrieved from: <https://energy.gov/sites/prod/files/2015/11/f27/QTR2015-6A-Additive%20Manufacturing.pdf>
- USGS – U.S. Geological Survey (2016). Mineral Commodity Summaries 2016: Copper. Available at: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/>
- USGS – U.S. Geological Survey (2014). 2014 Minerals Yearbook: Copper. Available at: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/>
- Van Wortswinkel L. Nijs W. (2009). Energy Supply Technology Data Source: Iron and Steel. Technology Brief No 102. Energy Technology Systems Analysis Program (ETSAP) of the International Energy Agency (IEA), 6 p. Document disponible en ligne : http://www.iea-etsap.org/Energy_Technologies/Energy_Supply.asp
- VanderPol M. (2014). Overview of E-waste Management in Canada. Environment Canada International E-waste Management Network (IEMN). Hanoi, Vietnam 14-17 July 2014. https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/canada_country_presentation.pdf
- Ville de Montréal (2014). Nombre de véhicules en circulation. Information disponible en ligne (consultée en juin 2017) : http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=6897,67889677&_dad=portal&_schema=PORTAL
- Ville de Montréal. (s. d.). Le carrefour Henri-Bourassa / PIE-IX. Consulté en juillet 2017 : <http://www.montreal-nord2020.com/documents/projets/carrefour-henri-bourassa-pie-ix/documentation/deconstruction-selective.pdf>
- Watling H. R. (2004). The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides – A review. *Hydrometallurgy* 84 (1-2): 81-108. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X06001125>
- whatIf? Technologies (2014). Canadian Energy System Simulator - CanESS. Version de 2014. Information available online: www.caness.ca
- Wietelmann U. Steinbild M. (2013). Lithium and Lithium Compounds. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Rockwood Lithium GmbH, Frankfurt-Main, Germany, 38 p. <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/14356007>
- Wang X. Gaustad G. Babbit C. Richa K. (2014). Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure. *Resources, Conservation and Recycling* 83: 53-62.

<https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/economies-of-scale-for-future-lithium-ion-battery-recycling-x7YmEnGr1R>

Wood E. Alexander M. Bradley T.H. (2011). Investigation of battery end-of-life conditions for plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources* 196: 5147-5154. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877531100379X>

WSA – World Steel Association (2016). *Steel Statistical Yearbook 2016*. Document available online: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/Steel-Statistical-Yearbook-.html>

Xstrata Copper Canada (2012). Sustainability report 2012. 46 p. <http://static.globalreporting.org/report-pdfs/2013/e81793648d8f2267242a0cd1c76ea63d.pdf>

Xstrata Copper Canada (2011). Sustainability report 2011. 45 p. <http://static.globalreporting.org/report-pdfs/2012/db258ce0cf777b9d7d7e2155c2726ed6.pdf>

Xstrata Copper Canada (2008). Sustainability report 2008. 44 p. <http://static.globalreporting.org/report-pdfs/2009/3e68c109b7c451f963a4414163bcf7ec.pdf>

Ybema J.R. Lako P. Gielen D.J. Oosterheert R.J. Kram T. (1995). Prospects for energy technology in the Netherlands: vol. 2: technology characterizations and technology results. *ECN Policy Studies* ECN-C-95-039, 308 p. <ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/report/1995/c95039.pdf>

Zakeri B. Syri S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42: 569–596. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008284>

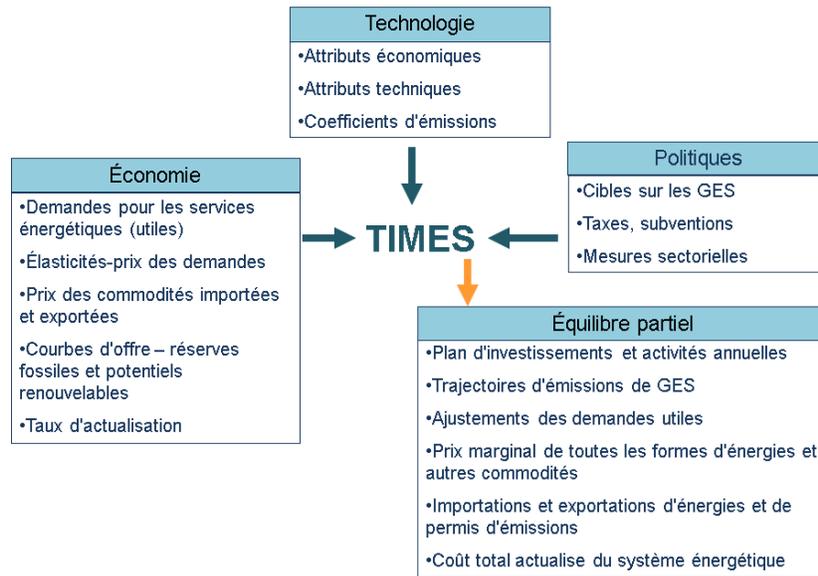
ANNEXE A – DESCRIPTION DU MODÈLE TECHNICO-ÉCONOMIQUE NATEM

A.1 La famille de modèles TIMES

Le modèle NATEM a été développé à partir du générateur de modèles d'optimisation le plus avancé, TIMES, supporté par un programme de l'Agence internationale de l'énergie et actuellement utilisé dans plus de 80 institutions réparties dans 70 pays depuis 1980 (Loulou et al., 2016). Il s'agit donc d'une méthodologie reconnue et principalement utilisée pour analyser les enjeux énergétiques et les politiques climatiques. Cependant, ces modèles peuvent également inclure des produits autres que les produits énergétiques, dont les matériaux et métaux. La Figure A-1 présente les principaux intrants et extrants associés à cette famille de modèles dont NATEM fait partie :

- **Intrants.** Ces modèles fonctionnent à partir d'un nombre de demandes utiles pour des services énergétiques (par ex. des passagers-kilomètres dans le secteur des transports), lesquelles sont spécifiées de manière exogène sur un horizon futur (par exemple, 2050). Ensuite, chaque étape du système énergétique (extraction, transformation, distribution, utilisation finale, importation, exportations, etc.) est décrite par le biais de technologies spécifiques, caractérisées par des paramètres économiques et techniques, évoluant dans le temps, ainsi que des coefficients d'émissions de GES. Ces technologies sont en concurrence pour satisfaire l'augmentation des demandes et remplacer les technologies existantes à la fin de leur vie utile
- **Calculs.** Ensuite, sous l'hypothèse que les marchés de l'énergie sont en concurrence parfaite, une seule optimisation, permettant de minimiser le coût total net du système énergétique pour la société, simule l'équilibre du marché sur toute la période. La minimisation du coût total concerne les coûts d'investissement dans les technologies, les coûts fixes et variables d'exploitation et de maintenance, ainsi que les coûts des combustibles importés, les revenus de combustibles exportés et la valeur résiduelle des technologies à la fin de l'horizon temporel.
- **Extrants.** Les principaux résultats concernent les investissements dans les capacités technologiques ainsi que les niveaux d'activités annuelles, et ce, à chaque période de temps. Parmi les autres extrants importants de ces modèles figure le prix implicite (valeur marginale) de chaque forme d'énergie et d'émission. Dans les scénarios de politiques climatiques, la réduction des émissions de GES se produit par des substitutions de technologies et de carburants, lesquels conduisent également à des améliorations d'efficacité énergétique, par la capture et la séquestration du carbone, et par des réductions endogènes de la demande (sous l'effet d'élasticité-prix).

Figure A-1. Principaux intrants et extrants des modèles TIMES



A.2 La structure du modèle NATEM

NATEM constitue une application du générateur de modèle TIMES pour le Canada. Plus spécifiquement, NATEM-Canada permet de représenter de manière très détaillée le système énergétique intégré des 13 provinces et territoires du Canada, leurs émissions de GES, ainsi que les flux d'énergie interprovinciaux et internationaux. Dans le cadre de ce projet, les analyses portent essentiellement sur la province de Québec, mais de manière dynamique dans un contexte canadien (et non de manière isolée). Tous les coûts sont en dollars canadiens de 2011. Le taux d'actualisation global a été fixé à 5 % pour cette étude.

Le modèle NATEM-Canada est dirigé par 70 segments de demandes utiles dans chaque région, dont le Québec, lesquelles sont projetées à l'horizon 2050. Globalement, la base de données comprend plus de 4 000 technologies et 450 produits pour chaque région, le tout logiquement interconnecté dans un système énergétique de référence, tel qu'illustré de manière simplifiée à la Figure A-2 :

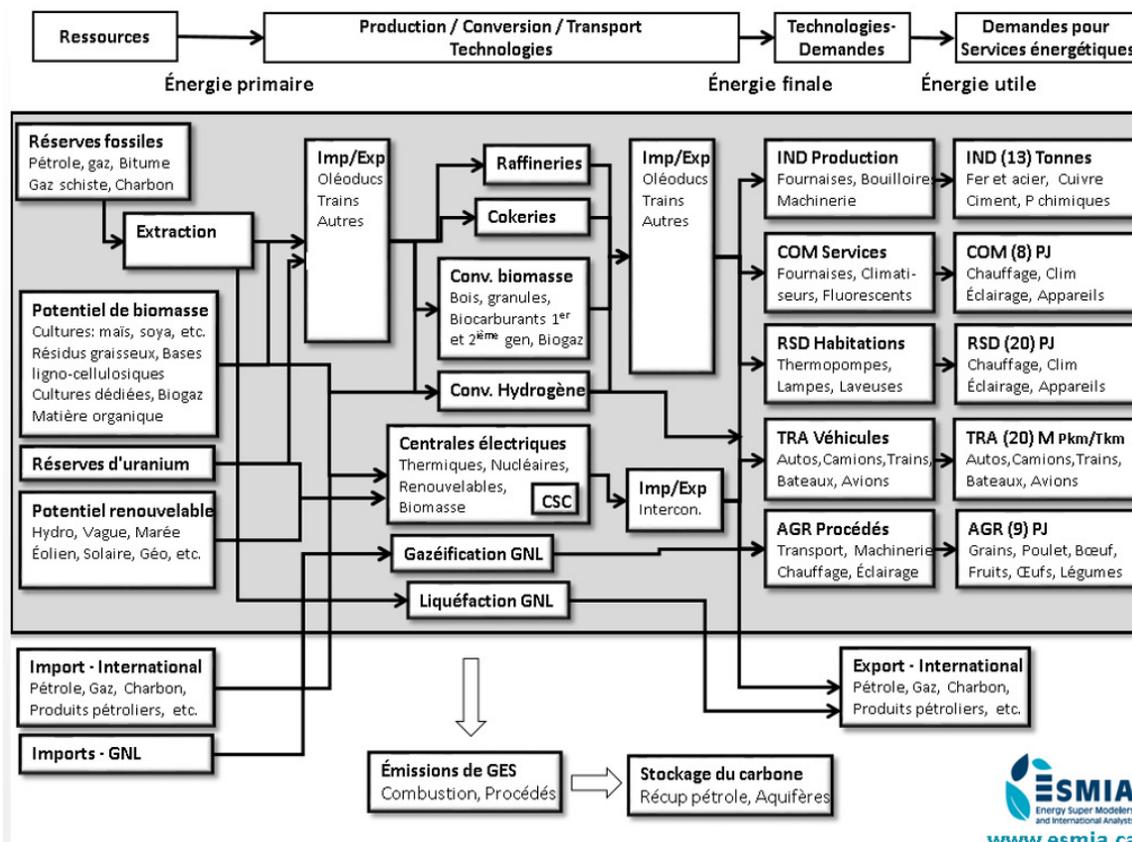
- **Consommation d'énergie finale.** Pour chacune des 70 demandes utiles, dans cinq secteurs économiques (agriculture, commercial, industriel, résidentiel et des transports), un répertoire comprend un grand nombre de technologies en compétition, incluant des versions améliorées des technologies existantes, ainsi que des technologies totalement nouvelles.
- **Conversion d'énergie secondaire.** Cette portion du système couvre toutes les technologies de conversion d'énergie, telles que les centrales électriques, les raffineries, les usines de production de biocarburants, d'hydrogène et de gaz naturel liquéfié.
- **Production d'énergie primaire.** La base de données comprend toutes les sources d'énergie primaires existant au Canada, comme les réserves fossiles conventionnelles et non conventionnelles, les potentiels d'énergies renouvelables, les réserves d'uranium et les potentiels de disponibilité de la biomasse.
- **Importations et exportations.** Toutes les formes primaires et secondaires d'énergie peuvent être échangées à l'intérieur et à l'extérieur du Canada. Les échanges domestiques, entre les

juridictions canadiennes, sont optimisés par le modèle. Les échanges internationaux entre le Canada et les autres pays, y compris les États-Unis, sont fixés par des bornes.

- **Émissions de GES.** Le modèle calcule les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane (CH₄) et d'oxyde nitreux (N₂O) provenant de la combustion de combustibles fossiles, ainsi que les émissions de sources fugitives dans le secteur de l'énergie. Le modèle calcule donc les émissions totales du secteur de l'énergie en tonnes de CO₂-équivalent (tCO₂-éq) en fonction du potentiel de réchauffement planétaire (PRP) de chaque type de GES. Les résultats concernant les émissions du scénario de référence sont présentés à l'Annexe C. L'impact des stratégies de circularité sur ces émissions est discuté lorsque pertinent.
- **Capture et la séquestration du carbone.** Des options de capture du carbone sont disponibles dans le secteur de l'électricité pour les nouvelles centrales au charbon et à la biomasse, ainsi que pour la séquestration: la séquestration chimique ou biologique, la récupération assistée du pétrole, les puits de pétrole et de gaz naturel, etc.

Le processus de calibrage des bilans énergétiques et des émissions de GES du modèle NATEM-Canada a été réalisé à partir de multiples sources de données, dont les statistiques officielles et les bases de données publiques pour les différentes juridictions canadiennes (ONE, 2013; Statistics Canada, 2011; 2012a; OEE 2011; Environnement Canada, 2013). Ce calibrage a aussi été effectué à l'aide du modèle de simulation CanESS (Canadian Energy System Simulator) développé par WhatIf Tehnologies (2014). Enfin, le calibrage est raffiné de façon constante lors de la réalisation de divers projets dans lesquels le modèle est utilisé au Québec (CIRAIG, 2016) ou au Canada (TEFP, 2016).

Figure A-2. Représentation simplifiée du système énergétique de référence



ANNEXE B – PARAMÈTRES TECHNIQO-ÉCONOMIQUES POUR LA CHAÎNE DE VALEUR DES TROIS MÉTAUX

B.1 Les paramètres technico-économiques de la filière du fer et de l'acier

Les paramètres technico-économiques des procédés proviennent de la littérature dans la mesure du possible, bien que les données de coûts soient généralement difficiles à trouver. De nombreuses hypothèses ont été nécessaires pour établir les coûts d'investissement et d'opération de tous les procédés de la chaîne. Cependant, il est possible de vérifier, pour les principaux parcours de production du fer et de l'acier, que l'ensemble des coûts est compatible avec les coûts de production trouvés dans la littérature et le prix de vente de l'acier sur le marché (rappelons que toutes les variables de coûts sont converties en dollars canadiens de 2011 en vue de l'intégration dans le modèle). Le Tableau B-1 présente le détail des hypothèses pour les principaux parcours de production du fer et de l'acier :

- **Colonnes A, B et C:** Les coûts d'investissement et la durée de vie des procédés de production du fer et de l'acier proviennent de la littérature directement (Van Wortswinkel and Nijs, 2009). Cette source fournit des estimations de coûts directement compatibles avec les modèles TIMES et établies à partir des données de Lockwood Green (2000). Ces coûts représentent des moyennes et/ou correspondent aux coûts des procédés les plus largement utilisés dans le monde. Les ordres de grandeur correspondent également à ce que l'on trouve dans IIP (2016).
- **Colonnes A, B et C:** Aux coûts d'investissement des procédés de production du fer et de l'acier, un 35 % supplémentaire a été ajouté pour les étapes de bouletage, un 5 % pour l'étape de concentration et un 15 % pour l'étape d'extraction.
- **Colonnes D et E:** Les coûts d'opération fixes ont été estimés à 10 % des coûts d'investissement à chaque étape respectivement et les coûts d'opération variables, excluant l'achat des matières premières et de l'énergie, à 1 %. Ces pourcentages sont compatibles avec ce que l'on trouve dans Ybema et al (1995) et Van Wortswinkel and Nijs (2009).
- **Colonne F:** La colonne F présente les coûts d'opération variables liée aux achats de matières premières et d'énergie seulement. Cette portion des coûts d'opération variables n'est pas incluse dans le modèle; elle sert plutôt à vérifier que la somme des composantes de coûts soit compatible avec les coûts de production recensés dans la littérature. En effet, le prix des produits énergétiques et des matériaux sont déterminés de manière endogène dans le modèle en fonction de l'offre et la demande (voir la description du modèle à l'Annexe A.1). Les achats de matières premières et d'énergie constituent la composante de coûts la plus importante et représentent 82 % du coût total de production. Ces pourcentages sont compatibles avec ceux trouvés dans la plupart des modèles de coût de production de l'acier trouvés en ligne (Metal Miner, 2009; Steelonthenet.com, 2016a; 2016b).
- **Colonne G:** À des fins de validation, les coûts totaux obtenus sont comparés au prix de l'acier. Le prix moyen de l'acier sur les marchés pour les cinq dernières années a été d'environ 356,50\$, avec une très grande fluctuation entre 103,50\$ et 632,50\$ (Trading

Economics, 2017). Les coûts totaux de production laissent donc une marge bénéficiaire de 17 % (pour la réduction directe) du prix moyen de l'acier des cinq dernières années.

Tableau B-1. Hypothèses de coûts utilisées pour la production du fer et de l'acier

Colonne	A	B	C	D	E	F	G
Paramètre*	Coût d'inv.	Durée de vie	Coût d'inv. annuel	Coût fixe	Coût variable, exc. énergie et minerais	Coût variable, énergie et minerais	Total
Unité	\$/t	Année	\$/t/an	\$/t	\$/t	\$/t	\$/t
Extraction	\$44,11	40	\$1,10	\$4,41	\$0,44		
Concentration	\$14,70	30	\$0,49	\$1,47	\$0,15		
Bouletage	\$102,92	30	\$3,43	\$10,29	\$1,03		
Réduction directe	\$188,80	20	\$9,44	\$9,44	\$1,89		
Four à arc électrique	\$105,25	30	\$3,51	\$5,26	\$1,05		
Total	\$455,77		\$17,97	\$30,87	\$4,56	\$242,77	\$296,17

* À noter que les coûts sont rapportés tels qu'utilisés dans le modèle NATEM. Les notions de coûts peuvent différer de ce qui est généralement rapporté dans la littérature ou utilisé dans d'autres méthodes d'analyse (analyse coûts-bénéfices, calcul de coûts de production, etc.). Les coûts d'investissement et les coûts d'opération fixes sont fournis par unité de capacité de chaque procédé, la capacité étant la quantité d'extrait pouvant être produit sur une année par le procédé. Les coûts d'opération variables sont fournis par unité d'activité de chaque procédé, soit la production d'extrait sur une année et excluent les coûts liés aux achats d'énergie, lesquels sont endogènes au modèle (le modèle calcule la valeur marginale à l'équilibre de chaque produit énergétique). Les coûts excluent les taxes, les immobilisations et toutes autres notions de coût fiscales.

En plus de leurs paramètres économiques, chaque technologie est caractérisée par ses paramètres techniques (Tableau B-2). Les flux d'énergie sont comptabilisés en pétajoules (PJ) alors que les flux de matières autres que l'énergie sont comptabilisés en millions de tonnes (Mt).

Tableau B-2. Paramètres des technologies impliquées dans la production du fer et de l'acier

Paramètre	Entrée		Sortie		Stock
Unité	Type	Mt ou PJ	Type	Mt	Mt
Préparation					
Extraction	Minerai brut	1,0101	Minerai extrait	1,0000	95,37
	Diesel	0,0250			
	Essence	0,0007			
	Mazout léger	0,0023			
	Mazout lourd	0,0024			
Concentration	Minerai extrait	3,3333	Minerai concentré	1,0000	28,61
	Électricité	0,0001			
	Liquides de gaz nat.	0,0001			
Bouletage	Minerai concentré	1,0171	Boulette	1,0000	9,89
	Ferraille	0,0010			
	Électricité	0,0004			
	Mazout lourd	0,1859			
	Essence	0,0036			
	Diesel	0,1278			
	Liquides de gaz nat.	0,0005			
	Coke	0,2911			
Production de fer					
Réduction directe	Boulette	1,4400	Fer de fonte	1,0000	1,28
	Minerai concentré	-			
	Charbon	2,1000			
	Électricité	5,3000			
	Gaz naturel	2,5000			
Production de fer à partir d'ilménite (excluant le titane)					
Procédé générique	Ilménite	7,3496	Fer de fonte	1,0000	0,50
	Électricité	0,0040			
	Essence	0,0099			
	Diesel	0,1814			
	Mazout léger	0,0449			
Production d'acier					
Four à arc électrique	Fer de fonte	0,3448	Acier brut	1,0000	1,33
	Ferraille	0,7729			
	Charbon	2,3265			
	Électricité	6,3000			
	Gaz naturel	3,8000			
Production de produits finis					
Procédé générique	Acier brut	1,0101	Produits semi-finis	1,0000	1,27
	Électricité	2,3679			
	Gaz naturel	5,5251			
	Pertes			0,0034	

Source: Classen et al (2009); Remus et al (2013); Statistics Canada, 2011; 2012b; WSA, 2016.

B.2 Les paramètres technico-économiques de la filière du cuivre

Les paramètres technico-économiques des technologies proviennent de la littérature dans la mesure du possible, bien que les données de coûts soient encore plus difficiles à trouver que pour la filière du fer et de l'acier. De nombreuses hypothèses ont été nécessaires pour établir les coûts d'investissement et d'opération de tous les procédés de la chaîne. Cependant, il est possible de vérifier que l'ensemble des coûts est compatible avec les coûts de production trouvés dans la littérature et le prix de vente du cuivre sur le marché (rappelons que toutes les variables de coûts sont converties en dollars canadiens de 2011 en vue de l'intégration dans le modèle). Le Tableau B-3 présente le détail des hypothèses :

- **Colonnes A, B et C:** Les coûts d'investissement et la durée de vie des procédés de production des anodes (fonderies primaires ou secondaires) et des cathodes (affineries) proviennent de la littérature directement (Farrell, 2001).
- **Colonnes A, B et C:** Aux coûts d'investissement des procédés de production du fer et de l'acier, un 5 % pour l'étape de concentration, un 15 % pour l'étape d'extraction et un 15 % pour l'étape de traitement des métaux rares.
- **Colonnes D et E:** Les coûts d'opération fixes ont été estimés à 10 % des coûts d'investissement à chaque étape respectivement et les coûts d'opération variables excluant l'achat des matières premières et de l'énergie à 1 %.
- **Colonne F:** La colonne F présente les coûts d'opération variables liée aux achats de matières premières et d'énergie seulement. Cette portion des coûts d'opération variables n'est pas incluse dans le modèle; elle sert plutôt à vérifier que la somme des composantes de coûts soit compatible avec les coûts de production recensés dans la littérature. En effet, le prix des produits énergétiques et des matériaux sont déterminés de manière endogène dans le modèle en fonction de l'offre et la demande (voir la description du modèle à l'Annexe A.1).
- **Colonne G:** À des fins de validation, les coûts totaux obtenus sont comparés au prix du cuivre. Le prix moyen du cuivre sur les marchés pour les cinq dernières années a été d'environ 7,309.70\$, avec une fluctuation entre 5,978.95\$ et 8,418.72\$ (Index Mundi, 2017). Les coûts totaux de production laissent donc une importante marge bénéficiaire comparativement au prix moyen de l'acier des cinq dernières années.

Tableau B-3. Hypothèses de coûts utilisées pour la production du cuivre

Colonne	A	B	C	D	E	F	G
Paramètre*	Coût d'inv.	Durée de vie	Coût d'inv. annuel	Coût fixe	Coût variable, exc. énergie et minerais	Coût variable, énergie et minerais	Total
Unité	\$/t	Année	\$/t/an	\$/t	\$/t	\$/t	\$/t
Extraction	\$689,93	40	\$17,25	\$68,99	\$6,90		
Concentration	\$229,98	30	\$7,67	\$23,00	\$2,30		
Fonderie primaire	\$3 790,74	30	\$126,36	\$379,07	\$37,91		
Fonderie secondaire (cuivre recyclé)	\$2 352,58	30	\$78,42	\$235,26	\$23,53		
Affinage électro-métallurgique	\$808,82	30	\$26,96	\$80,88	\$8,09		
Traitement des métaux rares	\$689,93	30	\$23,00	\$68,99	\$6,90		
Total –primaire	\$6 209,40		\$201,23	\$620,94	\$62,09	\$400,00	\$1 284,26
Total –secondaire	\$4 267,89		\$138,31	\$426,79	\$42,68	\$400,00	\$1 007,78

* À noter que les coûts sont rapportés tels qu'utilisés dans le modèle NATEM. Les notions de coûts peuvent différer de ce qui est généralement rapporté dans la littérature ou utilisé dans d'autres méthodes d'analyse (analyse coûts-bénéfices, calcul de coûts de production, etc.). Les coûts d'investissement et les coûts d'opération fixes sont fournis par unité de capacité de chaque procédé, la capacité étant la quantité d'extrait pouvant être produit sur une année par le procédé. Les coûts d'opération variables sont fournis par unité d'activité de chaque procédé, soit la production d'extrait sur une année et excluent les coûts liés aux achats d'énergie, lesquels sont endogènes au modèle (le modèle calcule la valeur marginale à l'équilibre de chaque produit énergétique). Les coûts excluent les taxes, les immobilisations et toutes autres notions de coût fiscales.

En plus de leurs paramètres économiques, chaque technologie est caractérisée par ses paramètres techniques (Tableau B-4). Les flux d'énergie sont comptabilisés en PJ alors que les flux de matières autres que l'énergie sont comptabilisés en Mt.

Tableau B-4. Paramètres des technologies impliquées dans la production du cuivre en 2011

Paramètre	Entrée		Sortie		Stock
Unité	Type	Mt ou PJ	Type	Mt	Mt
Préparation					
Extraction	Minerai sulfureux	10,000	Minerai extrait	1,000	0,417
	Électricité	0,574			
	Diesel	1,179			
	Essence	0,049			
	Mazout léger	0,010			
	Mazout lourd	0,037			
	Liquide de gaz nat.	0,053			
Concentration	Minerai extrait	5,200	Minerai concentré	1,000	0,080
	Électricité	0,257			
	Gaz naturel	0,443			
Production d'anodes - Fonderie					
Fonderie – Fonte, Conversion, Affinage anodique	Minerai concentré	3,146	Anodes Pertes	1,0000	0,187
	Cuivre secondaire	0,211			
	Électricité	7,000			
	Diesel	0,968			
	Gaz naturel	0,921			
	Mazout lourd	6,666			
	Coke	0,161			
Production de cathodes - Affinerie					
Affinage électro- métallurgique	Anode	1,009	Cathode	1	0,263
	Électricité	3,000			
	Gaz naturel	2,240			
Traitement des métaux rares					
Traitement des métaux rares					
Production de produits finis					
Procédé générique	Cathode	1,000	Produits semi-finis	1,0000	0,137
	Électricité	42,992			
	Gaz naturel	2,086			

Source: Classen et al (2009).

Les quantités de matière en entrée des technologies ont été définies en fonction des informations disponibles sur la production actuelle au Québec, ainsi que des informations générales de la littérature sur la concentration des matériaux en entrée et en sortie à chaque étape. Le Tableau B-5 présente le pourcentage de pureté de chaque produit et indique la quantité de produit nécessaire pour obtenir en sortie de transformation une cathode d'une pureté de cuivre de 99,99 %. La teneur en cuivre des minerais utilisés est estimée à 2,0 % (valeur très optimiste) et aucune perte n'est considérée lors du procédé de production. Il faut donc 50 unités de minerai pour obtenir 1 unité de cathode.

Tableau B-5. Quantité de matière nécessaire pour produire une unité de cathode de cuivre

Paramètre	Pureté (%)	Quantité nécessaire pour produire 1 unité de sortie à 99.99 %	Quantité (2011)	Quantité (2014)	Quantité en entrée par technologie pour produire 1 unité de sortie à 99.99 %
Unité	%	Unité	Mt		Mt
Minerai sulfureux	2	50,00	13,149	15,748	-
Minerai extrait et broyé	5	20,00	5,259	6,299	2,50
Minerai concentré	25	4,00	1,052	1,260	5,00
Matte	50	2,00	0,526	0,630	2,00
Blister	98,5	1,02	0,267	0,320	1,97
Anode	99,1	1,01	0,265	0,318	1,006
Cathode	99,99	1,00	0,263	0,315	1,009

B.3 Les paramètres technico-économiques de la filière du lithium

Les paramètres technico-économiques des technologies proviennent de la littérature dans la mesure du possible. Dans ce cas-ci, les coûts du projet de Nemaska Lithium Inc. ont été utilisés (Païement et al., 2016). Rappelons que toutes les variables de coûts sont converties en dollars canadiens de 2011 en vue de l'intégration dans le modèle (Tableau B-6).

Tableau B-6. Hypothèses de coûts utilisées pour la production du lithium

Paramètre*	Coût d'inv.	Durée de vie	Coût d'inv. annuel	Coût d'opération, exc. énergie et minerai
Unité	\$/t	Année	\$/t/an	\$/t
Extraction	\$142,76	40	\$3,57	\$4,57
Concentration	\$121,15	30	\$4,04	\$148,19
Production de carbonate de lithium	\$8 031,00	25	\$321,24	\$520,00
Production d'hydroxyde de lithium	\$11 840,00	25	\$473,60	\$767,00

* À noter que les coûts sont rapportés tels qu'utilisés dans le modèle NATEM. Les notions de coûts peuvent différer de ce qui est généralement rapporté dans la littérature ou utilisé dans d'autres méthodes d'analyse (analyse coûts-bénéfices, calcul de coûts de production, etc.). Les coûts d'investissement et les coûts d'opération fixes sont fournis par unité de capacité de chaque procédé, la capacité étant la quantité d'extrait pouvant être produit sur une année par le procédé. Les d'opération variables sont fournis par unité d'activité de chaque procédé, soit la production d'extrait sur une année et excluent les coûts liés aux achats d'énergie, lesquels sont endogènes au modèle (le modèle calcul la valeur marginale à l'équilibre de chaque produit énergétique). Les coûts excluent les taxes, les immobilisations et toutes autres notions de coût fiscales.

En plus de leurs paramètres économiques, chaque technologie est caractérisée par ses paramètres techniques (Tableau B-7). Les données correspondent à celles du projet Nemaska (Païement et al., 2016). Les flux d'énergie sont comptabilisés en PJ alors que les flux de matières autres que l'énergie sont comptabilisés en Mt.

Tableau B-7. Paramètres des technologies impliquées dans la production du fer et de l'acier

Paramètre	Entrée		Sortie		Stock
Unité	Type	Mt ou PJ	Type	Mt	Mt
Préparation					
Extraction	Minerai brut	1,000	Minerai extrait	1,000	-
	Diesel	0,052			
	Électricité	0,001			
Concentration	Minerai extrait	4,809	Minerai concentré Pertes	1,000 0,010	-
	Diesel	0,134			
	Électricité	0,257			
Production de lithium					
Production de lithium	Minerai concentré	6,933	Carbonate de lithium Hydroxyde de lithium	0,894 0,106	-
	Gaz naturel	15,873			
	Électricité	51,561			

ANNEXE C – RÉSULTATS DU SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE

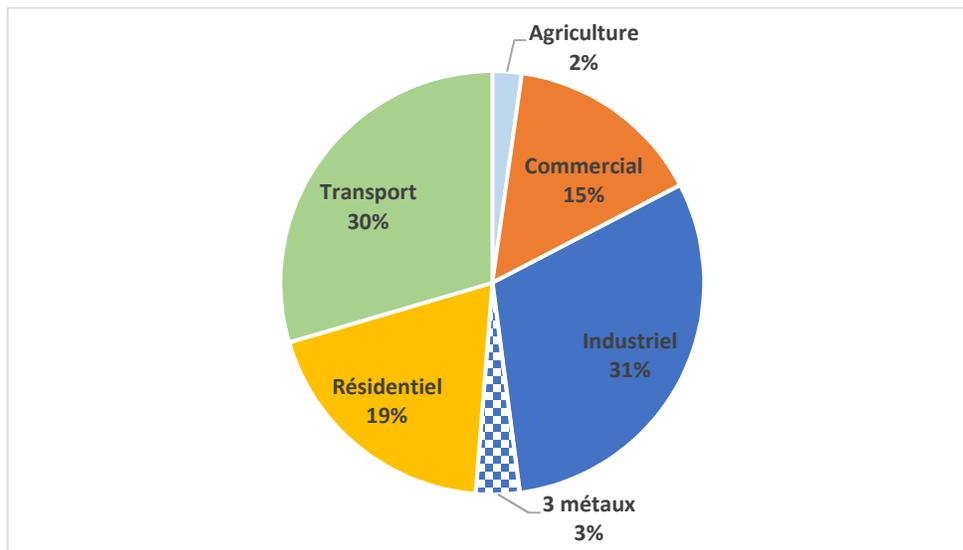
L'analyse des stratégies de circularité s'effectue à partir d'un scénario de référence. Il est utile de discuter brièvement des résultats obtenus avec le modèle NATEM pour l'horizon 2050, à laquelle toutes les stratégies sont comparées. Les principales hypothèses qui caractérisent le contexte socio-économique du scénario de référence sont les suivantes: i) un PIB qui devrait plus que doubler entre 2010 et 2050, passant de 1 461 à 3 080 milliards de dollars canadiens (G\$), ii) un taux moyen de croissance de la population de 0,98 % pour la période 2011-2035 et de 0,63 % au-delà de 2035, iii) un taux moyen de croissance du PIB par habitant de 1,86 % (2011-2035) et de 1,31 % au-delà de 2035.

De plus, ce scénario de référence comprend les politiques gouvernementales déjà en place, telles que: le *Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques pour le Québec* (Gouvernement du Québec, 2012), le *Plan d'action en électrification des transports* (MTQ, 2015), les normes d'efficacité CAFE (Corporate Average Fuel Economy) (NHTSA 2011), les réglementations fédérales et provinciales concernant la teneur minimale en contenu renouvelable dans l'essence (5 %) et le diesel (2 %) vendus au Canada (Government of Canada, 2010). L'existence du marché du carbone est également prise en compte par le biais d'un prix plancher, soit une taxe sur le carbone allant de 9,90 \$/tonne en 2012 à 66,00 \$/tonne en 2050 (\$2011).

C.1 Consommation d'énergie finale

Au Québec, le secteur industriel représentait 34 % de la consommation finale totale en 2011, l'année de référence du modèle, dont 3 % pour l'extraction, le traitement, la métallurgie primaire et la transformation métallique des trois métaux (Statistique Canada, 2011; 2012b). Ces proportions ont peu varié entre 2011 et 2015 (Figure C-1).

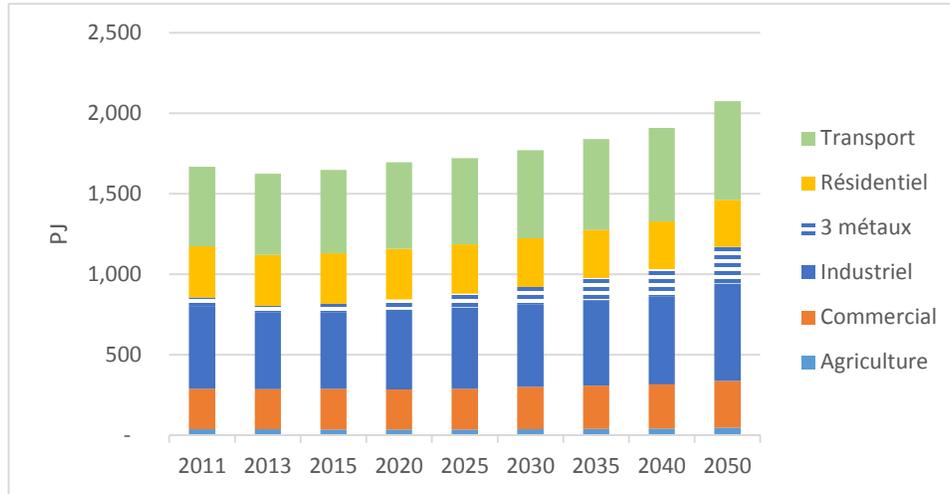
Figure C-1. La consommation énergétique finale du Québec par secteur entre 2011 et 2015



La consommation d'énergie finale est présentée par secteur pour le Québec (Figure C-2). Au total, la demande en énergie finale devrait augmenter de 24 % d'ici 2050. Alors que le secteur industriel représentait 34 % de la consommation finale totale en 2011, cette proportion atteint 40 % en 2050. En effet, le secteur industriel est celui dont la croissance est la plus importante à long terme;

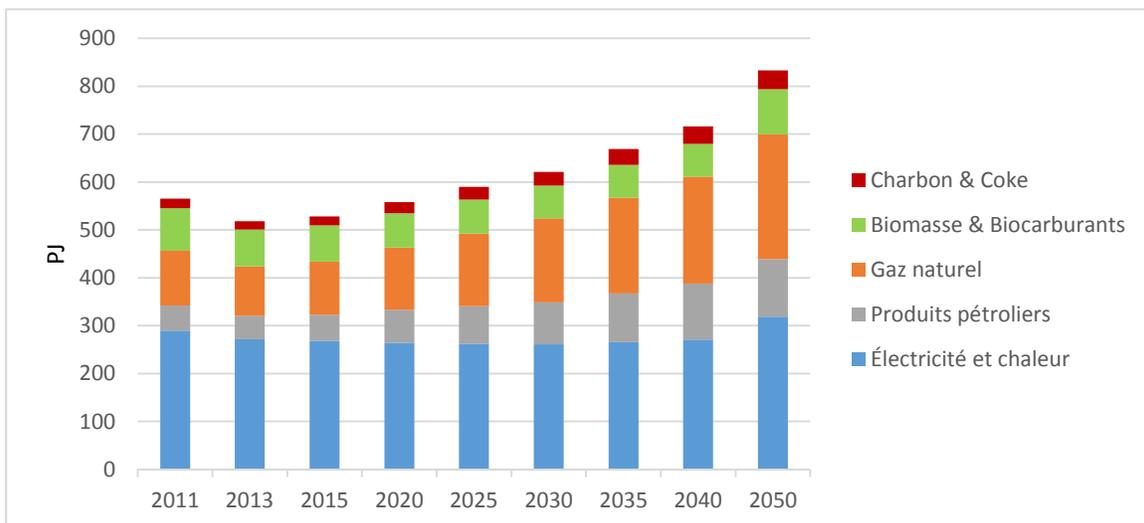
il est responsable des deux tiers de la demande additionnelle d'énergie finale entre 2011 et 2050. Quant à la proportion associée aux trois métaux, elle passe de 3 % en 2011 à 11 % en 2050, principalement due à l'augmentation de la demande (domestique et mondiale) pour les produits de l'acier.

Figure C-2. La consommation énergétique finale par secteur entre 2011 et 2050



La Figure C-3 montre l'évolution de la consommation d'énergie dans le secteur industriel. L'électricité comble environ 50 % des besoins industriels en 2011. À plus long terme, les besoins additionnels en énergie sont plutôt comblés par consommation accrue de gaz naturel (31 % du total en 2050) dans plusieurs secteurs industriels. Les proportions relatives de l'électricité et du gaz naturel peuvent être influencées par un grand nombre de facteurs comme le coût des futurs projets hydroélectriques et les sources d'approvisionnement en gaz naturel. L'analyse de ces enjeux dépasse le cadre du projet. Il est à noter qu'avec la réglementation en vigueur au Canada concernant les émissions liées à l'utilisation de charbon, cette forme d'énergie devrait être soit remplacée par une source d'énergie moins polluante, soit combinée avec une technologie de capture et stockage du carbone.

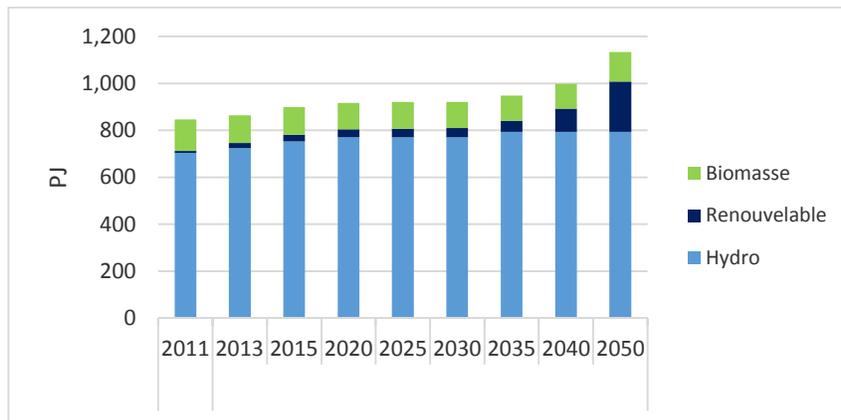
Figure C-3. Consommation d'énergie finale par type dans le secteur industriel



C.2 Source d'énergie

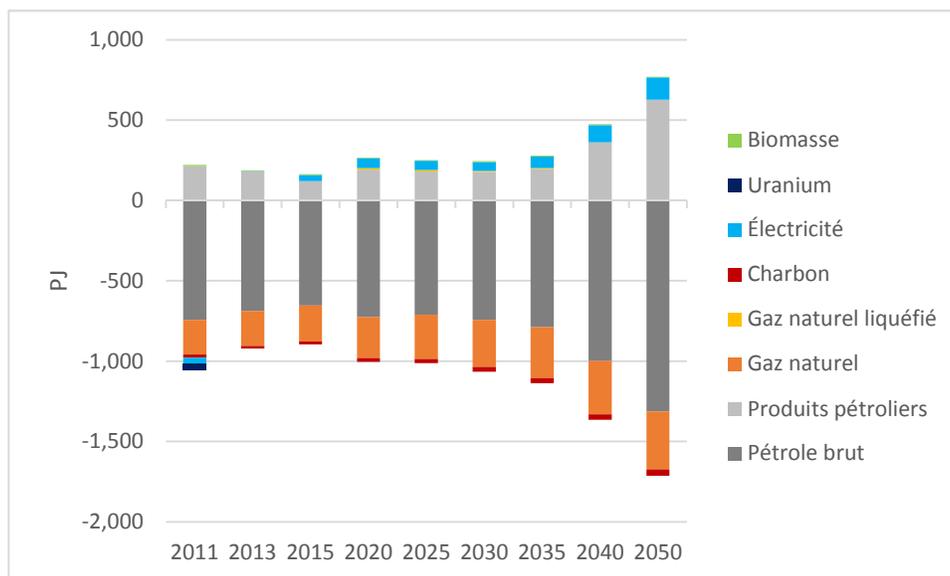
Au Québec, l'énergie provient de sources primaires ainsi que des importations canadiennes et internationales. La production d'énergie primaire au Québec est évidemment dominée par l'hydroélectricité (Figure C-4). Les ressources renouvelables intermittentes comprennent l'énergie éolienne produite à partir de parcs éoliens existants ou déjà prévue pour la construction future, ainsi que de nouveaux investissements dans l'énergie solaire décentralisée. La biomasse forestière joue également un rôle pour le chauffage de l'espace dans les secteurs résidentiel et commercial, ainsi que pour certains usages industriels.

Figure C-4. Production d'énergie primaire par type



À long terme, le Québec consoliderait sa position d'exportateur net d'électricité et de produits pétroliers provenant de ses deux raffineries (Figure C-5). Par contre, la province demeure un importateur net de pétrole brut pour alimenter les raffineries, de gaz naturel et de charbon. La plupart des importations proviennent des marchés internationaux, mais elles seraient progressivement remplacées par des importations de pétrole et de gaz naturel de sources non conventionnelles provenant du continent américain.

Figure C-5. Exportations nettes par type vers le reste du Canada et du monde



C.3 Émissions de GES

Le modèle calcul automatiquement les émissions de GES issues de la combustion des différentes formes d'énergie à partir de coefficients provenant de sources officielles (Environnement Canada, 2013). La trajectoire des émissions associées au scénario de référence augmente de 34 % jusqu'en 2050, par rapport à 2011 (Figure C-6). Le secteur des transports est celui qui contribue le plus aux émissions de GES avec plus de 50 % des émissions totales sur l'ensemble de l'horizon. Cela est dû à la dépendance du secteur à la consommation de produits pétroliers pour satisfaire la demande utile en transport des passagers et des marchandises à long terme. Les émissions du secteur industriel représentent 30 % du total en 2050. Rappelons que l'existence du marché du carbone est prise en compte par le biais d'un prix plancher.

Figure C-6. Émissions de GES par secteur

