

MÉTAUX ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE AU QUÉBEC

Rapport de l'étape 3.3 : Analyse du cycle de vie 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

14 mars 2018



CIRAIQ^{MC}

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

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

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

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

AVERTISSEMENT

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

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

CIRAIG

Centre international de référence
sur le cycle de vie des produits, procédés et services
Polytechnique Montréal
Département de génie chimique
2900, Édouard-Montpetit
Montréal (Québec) Canada
C.P. 6079, Succ. Centre-ville
H3C 3A7

www.ciraig.org

Équipe de travail

Réalisation :

- François Saunier, Analyste, CIRAIG
- Pablo Tirado, Analyste, CIRAIG

Direction :

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

Collaboration :

- Olivier Bahn, professeur, Département des sciences de la décision, HEC Montréal
- Mélanie McDonald, coordinatrice, Institut EDDEC, Campus Montréal
- Normand Mousseau, professeur, département de physique, Université de Montréal
- Kathleen Vaillancourt, ESMIA Consultants, Montréal
- Jean-François Ménard, , Analyste, CIRAIG

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 conséquentielle, et ce, dans un contexte spécifiquement québécois. Ce rapport d'étape présente la dernière étape, soit l'analyse des conséquences environnementales occasionnées par l'implémentation des stratégies de circularité sélectionnées.

Plus spécifiquement, l'objectif de cette partie de l'étude était de mettre en perspective le potentiel de circularité (évalué dans l'étape 3.2) avec une évaluation du risque de déplacement d'impacts en analysant les conséquences environnementales de l'implémentation de chaque stratégie.

Cette étude est destinée à alimenter les réflexions internes au MERN et ses partenaires dans le but d'améliorer leur compréhension sur les bénéfices et les risques de déplacement d'impact reliés aux stratégies de circularité retenues.

Des réponses ont été apportées à cette question en comparant, à l'aide de l'ACV, les profils environnementaux de scénarios prospectifs préalablement générés par le modèle NATEM (North American Technico Economical Model). NATEM est un modèle technico-économique à équilibre partiel qui détermine comment le système économique lié au secteur de l'énergie réagit et s'adapte à une perturbation, dans ce cas à l'implémentation des stratégies de circularité sélectionnées dans la précédente étape du projet. Le différentiel entre les scénarios qui incluent la stratégie de circularité et le scénario de référence (statu quo) est calculé et évalué à l'aide d'une ACV. Les résultats sont présentés pour quatre horizons de temps (2020, 2030, 2040 et 2050) et cinq indicateurs environnementaux : *Changement climatique*, *Santé humaine*, *Qualité des écosystèmes*, *Épuisement des ressources minérales* et *Épuisement des ressources énergétiques*.

Six des stratégies de circularité ayant fait l'objet d'une analyse technico-économique sont analysées dans cette étude : Recyclage du fer, Recyclage du cuivre, Recyclage du lithium, Écoconception des véhicules-Autopartage de véhicules, Écoconception des véhicules- Évolution des matériaux, Stockage d'énergie dans des batteries lithium-ion usagées. Les autres stratégies présentaient un changement trop faible ou un nombre insuffisant d'informations pour être traitées dans cette étude.

Le Tableau 1 montre les conclusions relatives aux différentes stratégies étudiées ainsi que le potentiel de circularité calculé dans le rapport technico-économique.

Tableau 1 : Synthèse des résultats de l'étude

Stratégie n °	Potentiel de circularité – analyse TE	Risque de déplacement d'impact
6 – Recyclage du fer	Fe : 66 976 t/an Cu : 142 t/an	Risque non significatif
7 – Recyclage du cuivre	Fe : 8151 t/an Cu : 6616 t/an	Risque non significatif
8 – Recyclage du lithium	Cu : 2161 t/an Li : 360 t/an	Risque non significatif
12a – Autopartage	Fe : 42-246 t/an Cu : 8 t/an Li : 0,5 t/an	Bénéfice environnemental attendu
12 b – Utilisation de matériaux plus légers	Fe : 1300-1500 t/an Cu : 8 t/an Li : 0,5 t/an	Bénéfice environnemental attendu à long terme
13 – Stockage d'énergie avec des batteries	Fe : 1100 t/an	Risque de déplacement d'impact à long terme
13 b – Stockage d'énergie avec des batteries (bas coût)	Fe : 2800 t/an	Risque de déplacement d'impact

En général, les stratégies basées sur le recyclage, qui montrent des potentiels de circularité intéressants, notamment pour le lithium et pour le cuivre, ne montrent pas des déplacements d'impacts significatifs. Pour l'indicateur *Épuisement de ressources minérales*, on trouve un résultat d'indicateur nettement inférieur pour les trois stratégies et des résultats variables pour les quatre autres indicateurs, avec une forte influence sur les résultats des variations des échanges avec d'autres régions.

Les stratégies autour du secteur des transports (autopartage et utilisation de matériaux plus légers) ne montrent pas autant de potentiel de circularité sur les quantités de métal, tel que calculé par le modèle technico-économique. Par contre, l'augmentation de l'efficacité d'utilisation des véhicules et la diminution de la consommation d'énergie engendrent des bénéfices environnementaux importants associés à l'implémentation des stratégies.

La stratégie de stockage d'énergie avec des batteries montre des potentiels de circularité intéressants, mais une augmentation du résultat de l'indicateur *Épuisement de ressources minérales* due à l'augmentation de la production et consommation d'électricité décentralisée. Des risques de déplacements d'impacts sont également identifiés pour les autres indicateurs dus aux effets indirects.

Les résultats de cette analyse pourront être utilisés en combinaison avec les résultats des autres étapes du projet pour mettre en perspective la convenance de chaque stratégie de circularité sélectionnée. Tel que mentionné précédemment, les résultats de cette analyse ne doivent pas être interprétés comme des

valeurs absolues, mais comme des risques potentiels de déplacements d'impacts issus de l'implémentation des stratégies.

L'utilisation des résultats doit tenir compte des limites de l'étude, notamment la contribution des conséquences indirectes des décisions modélisées dans le modèle NATEM face aux conséquences des stratégies de circularité. Les incertitudes liées aux modèles utilisés (NATEM, les données d'inventaire du cycle de vie, l'évaluation des indicateurs environnementaux) sont aussi une limite de l'étude.

TABLE DES MATIÈRES

Sommaire.....	iii
Table des matières.....	vi
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	x
1 Introduction.....	1
2 Objectifs et méthodologie.....	3
2.1 Objectifs de l'étude et application envisagée.....	3
2.2 Méthodologie générale.....	3
2.2.1 Méthodologie détaillée.....	4
2.3 Modèle NATEM (étapes 1 à 3).....	5
2.4 Scénarios étudiés (étape 4).....	7
2.5 Principaux choix de modélisation et hypothèses de l'ACV (étape 5).....	8
2.5.1 Fonction et unité fonctionnelle.....	8
2.5.2 Frontières des systèmes.....	8
2.6 Lien entre les résultats du modèle NATEM et les données d'ACV (étape 6).....	10
2.7 Évaluation des impacts environnementaux (étape 7).....	11
3 Résultats.....	13
3.1 Stratégie 6 : Recyclage du fer.....	15
3.2 Stratégie 7 : Recyclage du cuivre.....	20
3.3 Stratégie 8 : Recyclage du lithium.....	21
3.4 Stratégie 12a : Autopartage de véhicules.....	23
3.5 Stratégie 12 b : Écoconception- Utilisation de matériaux plus légers.....	26
3.6 Stratégie 13 : Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées.....	29
4 Discussion.....	34
4.1 Synthèse des résultats.....	34
4.2 Lien entre NATEM et ACV.....	36
4.3 Applications et limites de l'ACV.....	36
5 Conclusion.....	40

6	Références.....	42
	Annexe A - Résultats.....	43

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Méthodologie générale de l'étude.....	4
Figure 2-2 : Illustration des activités incluses dans les frontières du système lors du calcul de la substitution des énergies exportées pour le cas du diesel.....	9
Figure 3-1 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de recyclage du fer : indicateur Changement climatique (Mégatonnes de CO ₂ équivalent).	15
Figure 3-2 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de recyclage du fer : indicateurs Qualité des écosystèmes (million de pdf.m2.année) et Santé humaine (DALY).....	16
Figure 3-3 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de recyclage du fer : indicateurs Ressources énergétiques (Pétajoules équivalents) et Ressources minérales (kilotonnes équivalentes).....	17
Figure 3-4 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de recyclage du cuivre : indicateur Changement climatique (Mégatonnes de CO ₂ équivalent)....	20
Figure 3-5 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de recyclage du cuivre sans les échanges avec d'autres régions : indicateur Changement climatique (Mégatonnes de CO ₂ équivalent).....	21
Figure 3-6 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de recyclage du lithium : indicateur Changement climatique (Mégatonnes de CO ₂ équivalent)....	22
Figure 3-7 Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de recyclage du lithium sans les échanges avec d'autres régions : indicateur Changement climatique (Mégatonnes de CO ₂ équivalent).....	23
Figure 3-8 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie d'autopartage de véhicules : indicateur Ressources minérales (kilotonnes équivalentes).	24
Figure 3-9 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie d'autopartage de véhicules : indicateur Ressources énergétiques (Pétajoules équivalents).....	25
Figure 3-10 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie d'utilisation de matériaux plus légers : indicateur Ressources minérales (kilotonnes équivalentes).	27
Figure 3-11 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie d'utilisation de matériaux plus légers : indicateur Ressources énergétiques (pétajoules équivalents).....	28
Figure 3-12 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de stockage de batteries : indicateur Ressources minérales (kilotonnes équivalentes).	30
Figure 3-13 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de stockage de batteries : indicateur Ressources énergétiques (pétajoules équivalents).....	31

Figure 3-14 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de stockage de batteries sans les échanges énergétiques avec d'autres régions : indicateur Changement climatique. (Mégatonnes de CO₂ équivalent)..... 32

Figure 3-15 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de stockage de batteries avec diminution de coûts : indicateur Changement climatique (Mégatonnes de CO₂ équivalent)..... 33

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse des résultats de l'étude	iv
Tableau 2-1 : Stratégies de circularités ayant fait l'objet d'une analyse technico-économique.....	7
Tableau 3-1 : Synthèse des résultats de l'étude	34

1 INTRODUCTION

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

Le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN) a mandaté l'Institut EDDEC pour réaliser un projet de recherche en économie circulaire visant 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.

Dans les étapes précédentes du projet, une revue de littérature des meilleures pratiques en matière de circularité a été effectuée, en fonction de chacune des étapes du cycle de vie des métaux. Cela a permis d'identifier 41 stratégies de circularité, à l'échelle locale ou internationale, concernant les trois métaux étudiés (Gervais et coll., 2016)¹. Suite à une sélection de 13 stratégies jugées les plus pertinentes à la réalité québécoise, une analyse a été effectuée afin d'identifier les solutions technico-économiques optimales suite à la mise en place des stratégies pour le Québec jusqu'à l'horizon 2050 (Vaillancourt et coll., 2017).

Cette étude a été réalisée sur la base des normes ISO 14040 et 14044 (ISO, 2006a, b). L'ACV suit une approche holistique, c'est-à-dire qu'elle permet d'évaluer les impacts environnementaux potentiels relatifs au cycle de vie d'un système à l'étude et en considérant un large éventail d'indicateurs environnementaux. Sa grande force est donc d'éviter le déplacement des problèmes vers d'autres activités en amont ou en aval du cycle de vie ou vers d'autres problématiques environnementales (p. ex. réduction de la contribution au changement climatique au prix d'une augmentation de celle à la perte de biodiversité par l'utilisation d'une substance plus toxique).

Par contre, sa nature holistique et inclusive implique certaines limites. Ainsi, l'ACV n'est pas adaptée pour évaluer de manière précise et robuste les impacts spécifiques à une activité dans un contexte géographique donné (p. ex. l'impact de l'exploitation forestière sur le caribou forestier dans le nord du Québec), puisque les modèles utilisés sont génériques et le milieu récepteur exact n'est pas toujours connu. Cette méthode ne tient également pas compte des phénomènes de nature accidentelle (p. ex. un déversement de pétrole dans un cours d'eau, suite à un bris de pipeline). D'autres méthodologies telles que l'étude d'impact sur l'environnement ou l'analyse de risque permettent d'évaluer ce type d'impacts.

¹ Pour consulter le rapport « Synthèse des stratégies de circularité pour le cuivre, le fer et le lithium » de l'Institut EDDEC : <http://mern.gouv.qc.ca/publications/mines/metaux-economie-circulaire-quebec.pdf>

Ce rapport porte sur l'analyse des conséquences environnementales associées à l'implémentation des stratégies de circularité sélectionnées. Pour ce faire, il est proposé d'utiliser les résultats de l'analyse technico-économique afin de déterminer comment le système s'adapte dans le temps suite à l'introduction d'une stratégie de circularité donnée. Le différentiel en relation au scénario « statu quo » est modélisé et évalué par une analyse du cycle de vie. Ce rapport présente :

- les objectifs et la méthodologie suivie (Chapitre 2) ;
- les résultats de l'ACV et leur interprétation (Chapitre 3) ;
- une discussion de l'étude (Chapitre 4) ;
- les conclusions résultantes (Chapitre 5).

2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente les hypothèses à la base de l'étude et le cadre méthodologique utilisé pour réaliser cette ACV.

2.1 Objectifs de l'étude et application envisagée

Le but de cette étude est d'analyser les conséquences environnementales occasionnées par l'implémentation des stratégies de circularité sélectionnées.

Plus spécifiquement, l'objectif de cette partie de l'étude était de mettre en perspective le potentiel de circularité (évalué dans l'étape 3.2) avec une évaluation du risque de déplacement d'impact en analysant les conséquences environnementales de l'implémentation de chaque stratégie.

Des réponses ont été apportées à cette question en comparant les profils environnementaux de scénarios prospectifs préalablement générés par le modèle NATEM (North American Technico Economical Model), à l'aide de l'ACV. NATEM est un modèle technico-économique à équilibre partiel qui détermine comment le système économique lié au secteur de l'énergie réagit et s'adapte à une perturbation, dans ce cas à l'implémentation des stratégies de circularité sélectionnées dans la précédente étape du projet. Le différentiel entre les scénarios qui incluent la stratégie de circularité et le scénario de référence (statu quo) est calculé et évalué à l'aide d'une ACV.

Cette étude est destinée à alimenter les réflexions internes au MERN et ses partenaires dans le but d'améliorer leur compréhension des bénéfices et des risques de déplacement d'impact reliés aux stratégies de circularité retenues. Une publication externe des résultats au grand public est aussi envisagée.

Aucune revue critique externe n'a été effectuée pour cette étude.

2.2 Méthodologie générale

Type d'ACV réalisée

Il existe deux types d'ACV : l'analyse attributionnelle et l'analyse conséquentielle. Le premier type consiste à étudier le profil statique d'un produit ou service alors que l'objectif de la seconde est de modéliser les conséquences environnementales suivant une décision menant à un changement dans le cycle de vie d'un produit.

Il est généralement admis que l'analyse conséquentielle est mieux adaptée pour étudier les conséquences environnementales d'un changement alors que l'analyse attributionnelle est mieux adaptée pour dresser le profil environnemental d'un produit.

Concrètement, ces deux types d'ACV se réalisent en suivant les mêmes quatre phases. Il y a cependant plusieurs différences importantes entre elles, notamment dans la détermination des frontières du système étudié. En analyse attributionnelle, le système est composé des processus directement impliqués dans le cycle de vie du produit et reliés entre eux par des flux de matière et d'énergie. En analyse conséquentielle,

le système n'inclut que les processus affectés par le changement étudié. Ces processus peuvent appartenir ou non au cycle de vie du produit étudié et être reliés entre eux par des relations de type cause à effet, c'est-à-dire un processus influençant positivement ou négativement le niveau d'activité d'un autre processus.

Dans cette étude, une approche conséquentielle est utilisée et seuls les processus qui diffèrent entre le scénario de référence « statu quo » et les scénarios incluant les stratégies de circularité sont considérés dans l'analyse. Cette approche a l'avantage d'exclure des frontières du système les éléments dont la modélisation aurait été identique pour les scénarios comparés, diminuant ainsi le nombre de données d'inventaire nécessaires et facilitant l'interprétation des résultats et l'identification des processus affectés par l'implémentation des stratégies de circularité. Néanmoins, la modélisation des systèmes étant ainsi incomplète, il n'est pas possible, à partir des profils environnementaux partiels obtenus, d'identifier les points chauds du cycle de vie de chaque scénario.

2.2.1 Méthodologie détaillée

La méthodologie de cette étude est présentée dans la Figure 2-1 et les 7 étapes sont expliquées en dessous. Des explications plus détaillées sont présentées dans les sections 2.3 à 2.7. Ce rapport se concentre sur les étapes 5, 6 et 7, sur la base des informations générées dans le rapport à la précédente étape du projet traitant des étapes 1 à 4 (Vaillancourt et coll., 2017).

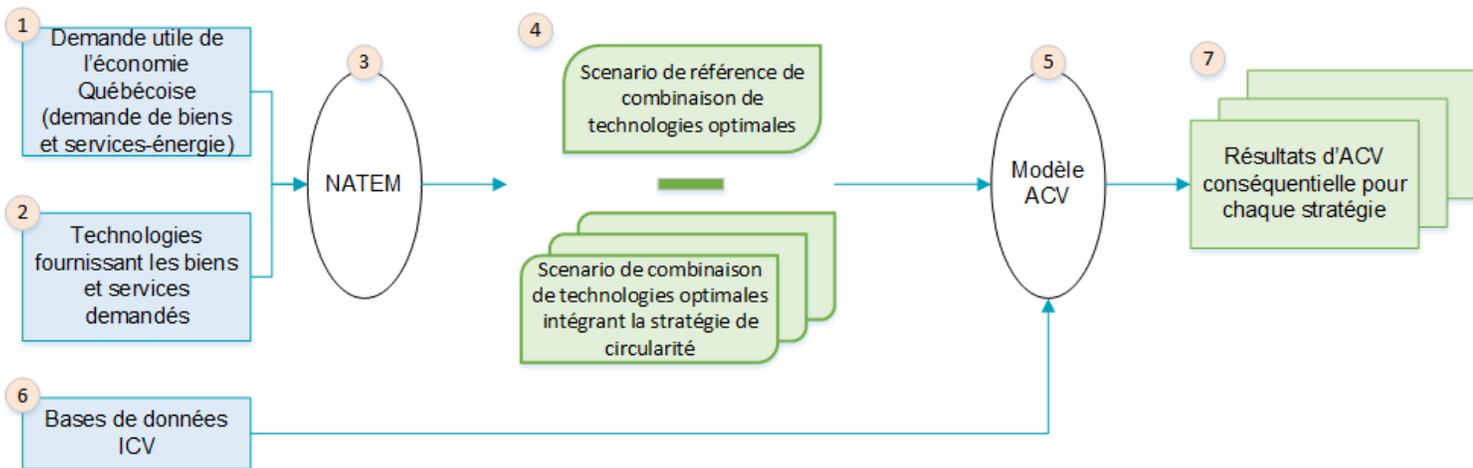


Figure 2-1 : Méthodologie générale de l'étude

1. Le modèle NATEM utilise en entrée des données sur la demande utile québécoise faisant appel à des services énergétiques (« Commodity demand ») pour chacun des cinq secteurs d'activités considérés, c'est-à-dire les secteurs industriel, commercial, résidentiel, des transports et agricole.
2. Le modèle d'optimisation cherche alors à minimiser les coûts économiques pour la société en choisissant les technologies disponibles permettant de répondre à cette demande en respectant les

contraintes imposées (économiques, technologiques, environnementales, etc.). Plusieurs technologies relatives à l'extraction, à la transformation et au recyclage des trois métaux ont été décrites et détaillées pour être ensuite intégrées au modèle NATEM avec les stratégies de circularité respectives.

3. Le modèle détermine ainsi la combinaison de technologies optimale pour répondre à la demande de ces trois métaux ainsi que l'ensemble de la demande utile québécoise aux horizons de temps définis, c'est-à-dire 2020, 2030, 2040 et 2050.
4. Divers scénarios avec la combinaison de technologies optimales pour satisfaire la demande utile québécoise sont calculés par le modèle NATEM : un scénario de référence et des scénarios intégrant les stratégies de circularité
5. Ces scénarios sont utilisés ensuite comme base pour la modélisation ACV. Le différentiel entre chaque scénario intégrant les stratégies de circularité avec le scénario de référence est d'abord calculé pour identifier les processus ou technologies affectés.
6. Ensuite, à l'aide des bases de données d'inventaire du cycle de vie, les entrants et sortants de matières et d'énergie, les émissions à l'environnement ainsi que les matières résiduelles sont quantifiés pour chaque processus ou technologie affectés.
7. Ces données sont ensuite converties pour chaque stratégie en résultats pour 5 indicateurs environnementaux : *Changement climatique, Santé humaine, Qualité des écosystèmes, Épuisement des ressources minérales et Épuisement des ressources énergétiques.*

2.3 Modèle NATEM (étapes 1 à 3)

Pour plus de détails sur le modèle NATEM, se référer au rapport de l'étape 3.2 (Vaillancourt et coll., 2017).

Pour simplifier les explications et la présentation des résultats, les processus et technologies composant le modèle NATEM ont été regroupés dans la suite du rapport entre les secteurs suivants :

- **Secteur énergétique** : regroupe toutes les activités de production d'énergie au Québec (extraction d'énergie, raffinage, production d'électricité...). Cette énergie est ensuite utilisée dans un des cinq secteurs répondant à la demande utile, ou exportée pour être utilisée en dehors du Québec.
- **Secteur industriel** : regroupe toutes les activités d'utilisation d'énergie à des fins de production industrielle (production de produits semi-finis) au Québec, afin de répondre à la demande utile.
- **Secteur des transports** : regroupe toutes les activités d'utilisation d'énergie à des fins de transport (de passagers ou de marchandises) au Québec, afin de répondre à la demande utile.
- **Secteur agricole** : regroupe toutes les activités d'utilisation d'énergie à des fins de production agricole au Québec, afin de répondre à la demande utile.
- **Secteur commercial** : regroupe toutes les activités d'utilisation d'énergie dans des bâtiments commerciaux au Québec, afin de répondre à la demande utile.

- **Secteur résidentiel** : regroupe toutes les activités d'utilisation d'énergie dans des bâtiments résidentiels au Québec, afin de répondre à la demande utile.
- **Importations** : regroupe les importations d'énergie ou de métaux (sous différentes formes) au Québec depuis d'autres provinces du Canada ou d'autres pays.
- **Exportations** : regroupe les exportations d'énergie ou de métaux (sous différentes formes) depuis le Québec vers d'autres provinces du Canada ou d'autres pays.

2.4 Scénarios étudiés (étape 4)

Les stratégies de circularité ayant fait l'objet d'une analyse technico-économique (Vaillancourt et coll., 2017) sont présentées dans le Tableau 2-1. Six d'entre elles sont analysées dans cette étude. Les stratégies restantes ne l'ont pas été faute de variations suffisantes par rapport au système de référence ou d'informations disponibles pour les modéliser.

Lorsque plusieurs versions d'une stratégie étaient disponibles, c'est celle avec un coût réduit qui a été analysée, car elle présente la meilleure implémentation de la stratégie, et donc les effets rebonds potentiels les plus importants.

Tableau 2-1 : Stratégies de circularités ayant fait l'objet d'une analyse technico-économique

Stratégie	Nom	Analysée dans ce rapport	Commentaire
1	Développement technologique pour une extraction plus efficace	Non	Variation du système négligeable par rapport au scénario de référence
4	Recyclage et symbiose industrielle	Non	Faible potentiel de circularité évalué par l'analyse technico-économique
5	Fabrication additive	Non	Circularité pas nécessairement au Québec
6	Recyclage du fer	Oui	Stratégie incluant les sous-stratégies de recyclage des avions, des trains et de la ferraille (véhicules inclus).
7	Recyclage du cuivre	Oui	Stratégie incluant les 4 sous-stratégies de recyclage des ordinateurs, des téléphones mobiles, des câbles et fils et des circuits imprimés.
8	Recyclage du lithium	Oui	Stratégie incluant les 2 sous-stratégies de recyclage des batteries et du verre.
12a	Écoconception des véhicules- Autopartage de véhicules	Oui	Stratégie introduisant l'autopartage de véhicules de tout type, conventionnels, électriques et hybrides rechargeables.
12 b	Écoconception des véhicules- Évolution des matériaux	Oui	Stratégie introduisant des véhicules contenant un plus grand pourcentage d'aluminium et à plus faible consommation.
13	Stockage d'énergie dans des batteries lithium-ion usagées	Oui	Stratégie introduisant l'utilisation de batteries lithium provenant de véhicules électriques comme stockage d'énergie combiné avec une augmentation de l'autoproduction électrique décentralisée

2.5 Principaux choix de modélisation et hypothèses de l'ACV (étape 5)

2.5.1 Fonction et unité fonctionnelle

Les scénarios de référence et ceux intégrant les stratégies de circularité retenues ont été évalués par le modèle NATEM sur la base de leur fonction qui est de répondre, en utilisant divers services énergétiques, à la demande utile québécoise pour les secteurs industriel, commercial, résidentiel, des transports et agricole québécois.

L'unité fonctionnelle, c'est-à-dire la référence à laquelle se rapportent les calculs d'inventaire et d'évaluation des impacts du cycle de vie, a été définie comme suit :

« Répondre à une demande utile des secteurs industriel, commercial, résidentiel, des transports et agricole québécois en 2020, 2030, 2040 et 2050 ».

Tel que mentionné dans la section 2.1, l'objectif de l'étude est d'évaluer les conséquences d'implanter une stratégie de circularité par rapport à une situation où la stratégie n'est pas implantée. De ce fait, seuls les éléments et quantités qui diffèrent entre les deux systèmes comparés (scénario de référence et scénario avec la stratégie de circularité implantée) sont inclus dans les résultats finaux. Les résultats de chaque scénario aux horizons temporels 2020, 2030, 2040 et 2050 sont obtenus par le modèle NATEM.

Il est à noter que les scénarios étudiés dans NATEM présentent toujours des demandes utiles identiques à un même horizon de temps. En effet, un changement de la demande utile signifierait que les scénarios ne sont plus fonctionnellement équivalents, c.-à-d. qu'ils ne rendent pas les mêmes services du point de vue qualitatif et/ou quantitatif et donc, ils ne seraient plus comparables dans le cadre d'une ACV.

2.5.2 Frontières des systèmes

Une approche différentielle est utilisée pour définir les processus à considérer dans les frontières du système analysé par l'ACV. Les résultats du modèle NATEM de chacun des scénarios intégrant les stratégies de circularité sont soustraits au scénario de référence. Seuls les processus affichant une différence sont retenus. Par conséquent, toutes les activités affichant un différentiel nul sont identiques entre les scénarios et sont exclues des frontières des systèmes puisque leurs contributions s'annulent.

La demande utile étant identique pour tous les scénarios, ceux-ci ne se différencient donc que par les proportions des divers modes de production et de consommation d'énergie finale, et de production métallique, afin de répondre à cette demande. Ces modes de production et de consommation d'énergie et de métaux ont été inclus dans les frontières du système.

Les exportations de vecteurs énergétiques ont également été considérées. Suivant les hypothèses du modèle NATEM, les sources énergétiques exportées trouveront un marché où elles seront consommées. Il est considéré que l'énergie exportée remplacera une source énergétique de même nature dont la source d'approvisionnement serait autre que le Québec (substitution) : dans ce cas, l'approvisionnement des sources énergétiques en provenance ou ayant transité par le Québec est pris en compte dans les frontières du système analysé, ainsi qu'un crédit environnemental associé à la diminution de production d'une source énergétique ailleurs dans le monde. Les émissions de combustions étant identiques, elles ont pu être exclues des frontières du système. La Figure 2-2 montre un schéma de ce principe d'exclusion.

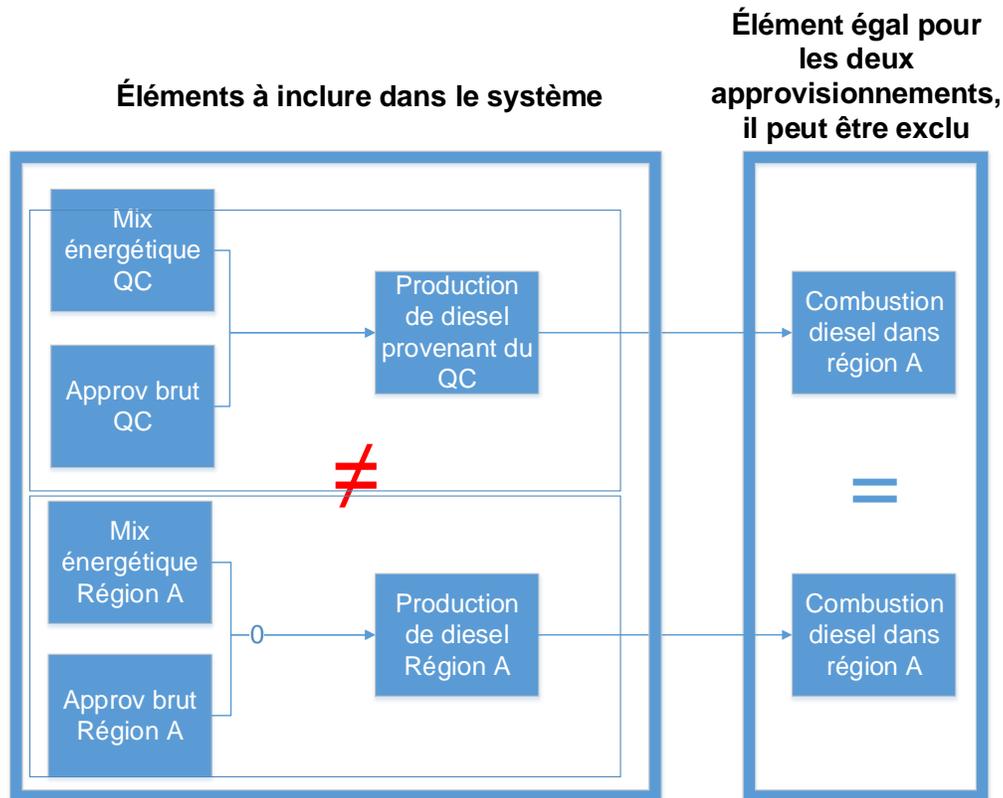


Figure 2-2 : Illustration des activités incluses dans les frontières du système lors du calcul de la substitution des énergies exportées pour le cas du diesel.

Une autre hypothèse pour traiter les exportations aurait été de considérer que l'énergie exportée sera utilisée en plus des sources énergétiques existantes (additivité). Dans ce cas, l'approvisionnement et la combustion des sources énergétiques exportées seraient pris en compte dans le calcul du profil environnemental. Cette hypothèse n'est pas couverte par l'étude, car elle demeure trop incertaine. Le modèle NATEM utilisé se limitant au Québec, il est plus incertain de poser des hypothèses sur les aspects conséquents en dehors des frontières de l'étude.

Pour les importations d'énergie, celles-ci sont modélisées pour chaque vecteur énergétique selon des valeurs moyennes basées sur les quantités et leur provenance (international ou autres provinces canadiennes).

2.6 Lien entre les résultats du modèle NATEM et les données d'ACV (étape 6)

Les processus suivants ont été inclus et sont modélisés lorsqu'il existe une différence d'intensité d'utilisation entre le scénario de référence et celui de la stratégie analysée :

- La production des diverses sources énergétiques : production de pétrole brut, de gaz naturel, d'électricité et de la biomasse ;
- Le traitement des diverses sources énergétiques : le raffinage du pétrole brut en produits pétroliers (diesel, essence, etc.), le traitement du gaz naturel (retrait de soufre, azote, CO₂, éthane, propane, butane, pentane et hexane excédentaire ainsi que la liquéfaction, lorsqu'applicable) et la production de biocarburants à partir de la biomasse ;
- Les émissions de combustions des sources énergétiques dans les différents secteurs d'activités : dans les véhicules, les chaudières industrielles, les bouilloires, les technologies de productions d'électricité, etc. ;
- Les infrastructures ou procédés spécifiques aux stratégies de circularité ;
- Les échanges d'énergie ou sources d'énergie avec d'autres régions ;
- L'extraction, traitement et recyclage des trois métaux à l'étude.

La qualité des résultats d'une ACV dépend de la qualité des données utilisées pour effectuer l'évaluation. Considérant l'ampleur de la modélisation à effectuer, cette étude se base principalement sur des données **secondaires**, c.-à-d. des données génériques ou théoriques issues de bases de données commerciales ou de la base de données interne du CIRAIG, d'informations transmises par des entrepreneurs, de rapports d'études divers ou d'autres sources publiées. Des données **primaires** collectées lors de l'étape 2.3 de ce projet sont néanmoins utilisées lorsque disponibles pour certaines activités d'extraction, de transformation ou de recyclage du fer, du cuivre ou du lithium.

La plupart de ces données secondaires proviennent des modules de données d'inventaire du cycle de vie (ICV) disponibles dans la base de données *ecoinvent* version 3.3 (www.ecoinvent.ch/).

Afin de modéliser les processus ayant lieu au Québec, les processus *ecoinvent* québécois ont été privilégiés. Dans le cas où un processus québécois spécifique n'existait pas, un processus nord-américain a été privilégié. S'il n'existait pas de processus québécois ou nord-américain, un processus européen ou mondial existant a été sélectionné. L'utilisation de données européennes ou mondiales pour représenter l'Amérique du Nord peut introduire un biais dans certains cas. Cependant, il est estimé que la cohérence et la complétude de cette base de données en font une option préférable à d'autres données disponibles pour la plupart des processus.

Le couplage des résultats du modèle NATEM avec les processus de la base de données d'inventaire du cycle de vie (ecoinvent v 3,3) ne peut pas se faire directement. En effet, les processus de la base de données contiennent toutes les activités nécessaires à la caractérisation d'un système, y compris les entrants énergétiques. Or, tel que les données issues de NATEM sont structurées, la production et la transformation d'énergie utilisée par le système sont comptabilisées en amont, dans un autre système. L'utilisation des processus ecoinvent sans modification entraînerait donc un double comptage. Afin d'éviter ce double comptage, les processus ecoinvent ont été modifiés de la façon suivante :

- La consommation d'électricité ainsi que l'approvisionnement en pétrole brut ont été systématiquement retirés des *processus ecoinvent décrivant la production des produits pétroliers* (p. ex. essence, diesel). Ces processus ne considèrent donc que les matières auxiliaires, les infrastructures, les matières résiduelles et les émissions directes associées au traitement de « X » kg de pétrole brut ;
- La consommation d'électricité ainsi que l'approvisionnement en combustibles (produits pétroliers, gaz naturel, charbon, etc.) ont été systématiquement retirés des *processus utilisant l'énergie finale afin de répondre à la demande utile* (p.ex. chaudière industrielle pour la production d'acier, véhicules pour le transport de passagers ou de marchandises). Ces processus ne considèrent donc que les matières auxiliaires, les infrastructures (limités aux véhicules et aux ampoules), les matières résiduelles et les émissions directes associées à l'utilisation de « X » kWh d'électricité ou kg/m³ de combustible.

Les processus ecoinvent suivants n'ont pas été modifiés, car ils correspondaient déjà à l'activité équivalente du modèle NATEM :

- Les processus d'extraction des ressources fossiles (pétrole brut, gaz naturel) ;
- Les processus de production d'électricité québécois.
- Les processus de transport des « marchés » n'ont pas été modifiés. Un possible double-comptage est donc possible, mais a été jugé non significatif considérant le transport relativement limité au Québec face au transport ayant lieu à l'extérieur.

Le logiciel SimaPro 8.4, développé par PRé Consultants (www.pre.nl), a été utilisé pour faire la modélisation des systèmes et réaliser le calcul de l'inventaire.

2.7 Évaluation des impacts environnementaux (étape 7)

Les impacts environnementaux potentiels du cycle de vie ont été évalués à l'aide de la méthode d'évaluation des impacts IMPACT World+². Les deux indicateurs de dommage suivants, vers lesquels converge l'ensemble des indicateurs d'impact (*), ont été retenus :

² (www.impactworldplus.org/en/presentation.php) ;

Note : en attente de publication scientifique, la documentation est disponible sur demande)

- **Santé humaine** : cette catégorie prend en compte les substances ayant des effets toxiques (cancérogènes et non cancérogènes) et respiratoires, des changements climatiques, produisant des radiations ionisantes et qui contribuent à la destruction de la couche d'ozone. Afin d'évaluer le facteur de dommage, la gravité de la maladie potentiellement causée par ces substances est exprimée en DALY - *Dissability Adjusted Life Years*, unité reflétant le dommage à la santé humaine.
- **Qualité des écosystèmes** : cette catégorie regroupe les impacts liés à l'écotoxicité aquatique, à l'acidification terrestre, océanique et aquatique, à l'eutrophisation aquatique et marine, aux effets d'émissions de radiations ionisantes sur les milieux aquatiques, aux changements climatiques et à l'occupation des terres. Elle est quantifiée en fraction d'espèces potentiellement disparues, pour une surface donnée et durant une certaine période de temps (PDF*m²*an).

La catégorie de dommage **Ressources et services écosystémiques** n'a pas été retenue, car elle n'est pas encore opérationnelle à ce stade de développement de la méthode.

Les résultats du profil environnemental de chaque scénario ont été complétés par les indicateurs suivants :

- **Changement climatique (GIEC 2013)** : les émissions de gaz à effet de serre anthropogéniques absorbent les radiations infrarouges émises par la surface terrestre maintenant l'énergie thermique dans la basse atmosphère. L'augmentation des gaz à effet de serre lors du siècle dernier a eu pour effet d'augmenter la température moyenne de l'atmosphère et des océans. Les résultats pour cette catégorie d'impact sont typiquement ceux rapportés dans les diverses études portant sur l'empreinte carbone.
- **Épuisement des ressources fossiles** (noté dorénavant *Ressources fossiles*) : présente la consommation de ressources fossiles limitant leur utilisation par les générations futures. Cet indicateur est exprimé en MJ d'énergie primaire.
- **Épuisement des ressources minérales** (noté dorénavant *Ressources minérales*) : présente la consommation de minéraux limitant leur utilisation par les générations futures. Cet indicateur est exprimé en kg équivalents de ressource. Plus une ressource est utilisée et plus son abondance est faible, plus le facteur de conversion est élevé.

Tout comme pour l'inventaire du cycle de vie, le logiciel SimaPro 8.4 a été utilisé pour calculer les résultats d'indicateurs de catégories de dommages et d'impacts associés aux émissions inventoriées.

3 RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats de l'analyse du cycle de vie conséquentielle aux horizons temporels 2020, 2030, 2040 et 2050 associés à la décision d'implémenter les stratégies de circularité en relation au scénario de référence, c.-à-d. le statu quo, ainsi que leur interprétation. Les résultats bruts sont disponibles à l'Annexe A.

Rappel :

L'approche différentielle ne considère que les processus du système énergétique présentant des changements à la suite de la mise en place des stratégies de circularité. Ce faisant, les résultats présentés permettent uniquement d'expliquer les différences entre les scénarios comparés dans le but de déterminer s'il y a des risques de déplacement d'impact associés à la décision d'implémenter la stratégie retenue. Il n'est donc pas possible à partir des profils environnementaux partiels obtenus d'identifier les points chauds du cycle de vie de chaque scénario.

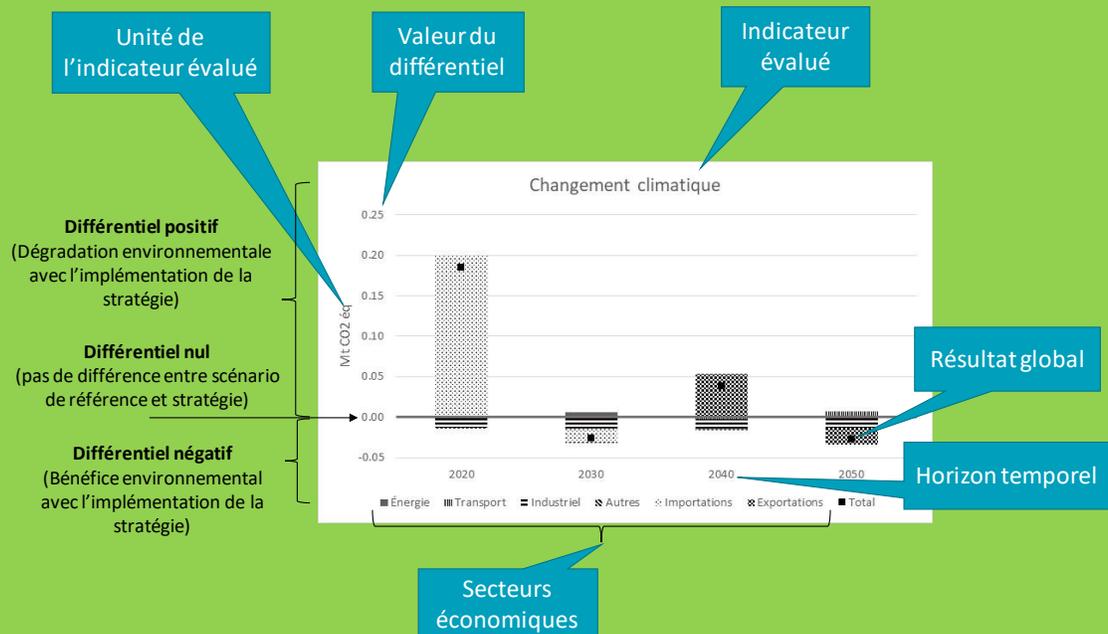
Interprétation des graphiques ACV :

Les graphiques ACV présentent les résultats différentiels entre le scénario de référence et chacun des scénarios intégrant les stratégies de circularité retenues, et ce, pour quatre horizons de temps (c.-à-d. 2020, 2030, 2040 et 2050) et cinq indicateurs environnementaux. Les résultats sont désagrégés pour chaque secteur économique et peuvent prendre une valeur positive (augmentation du résultat d'indicateur par rapport à celui pour le scénario de référence) ou négative (diminution). Le résultat global net (tous secteurs confondus) est représenté par le losange noir.

Chaque graphique présente les résultats pour un indicateur environnemental ; un histogramme affiche le différentiel entre résultats d'indicateur pour un horizon de temps donné pour deux scénarios NATEM définis :

- REF : le scénario de référence, considérant une situation « *statu quo* »
- SCx : le scénario avec implémentation de la stratégie de circularité numéro x

Les résultats sont présentés selon les secteurs économiques (voir section 2.3). Pour plus de clarté, les secteurs résidentiel, commercial et agricole sont regroupés en un secteur nommé « Autres ».



3.1 Stratégie 6 : Recyclage du fer

Cette section cherche à évaluer les impacts environnementaux potentiels de la mise en place de la stratégie 6, « Recyclage du fer ». Par rapport aux scénarios développés dans le rapport technico-économique (Vaillancourt et coll., 2017), le scénario utilisé pour modéliser cette stratégie est le scénario qui correspond au scénario de mise en place de la stratégie avec coûts très réduits afin d'en montrer le potentiel maximum. Ce scénario a été choisi, car il représente la variation la plus importante du système parmi les variantes de la stratégie 6. Les conséquences associées sont donc aussi celles qui sont susceptibles d'être les plus importantes.

Les Figure 3-1 à Figure 3-3 présentent les résultats pour les 5 indicateurs environnementaux, selon les secteurs économiques.

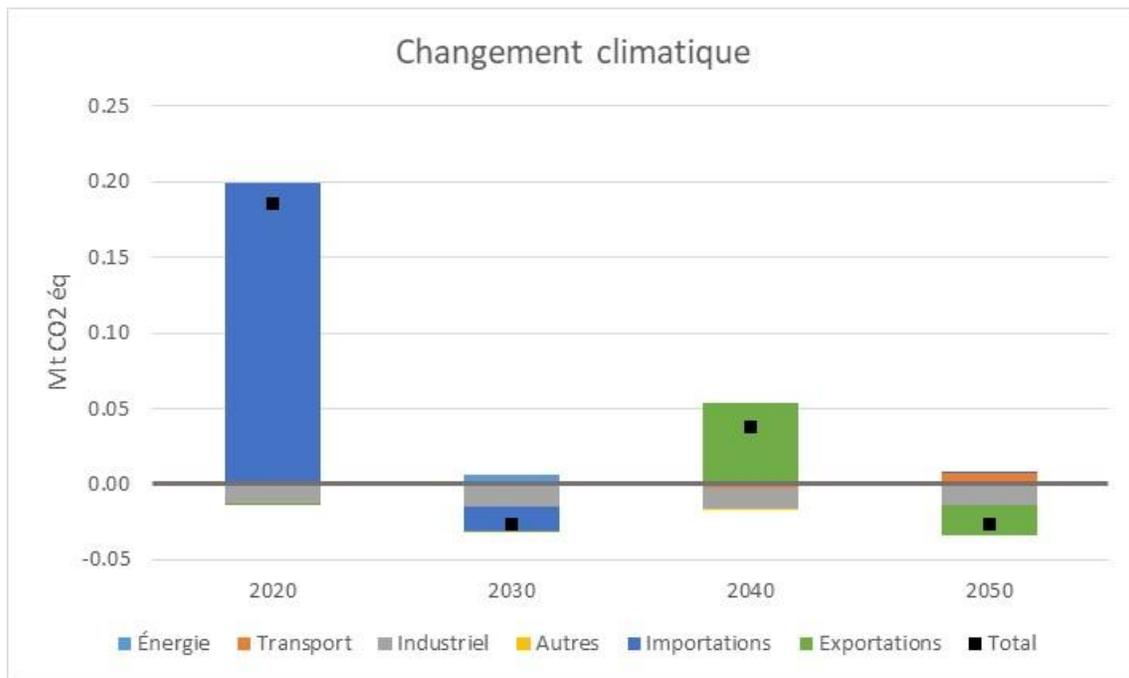


Figure 3-1 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de recyclage du fer : indicateur Changement climatique (Mégatonnes de CO₂ équivalent).

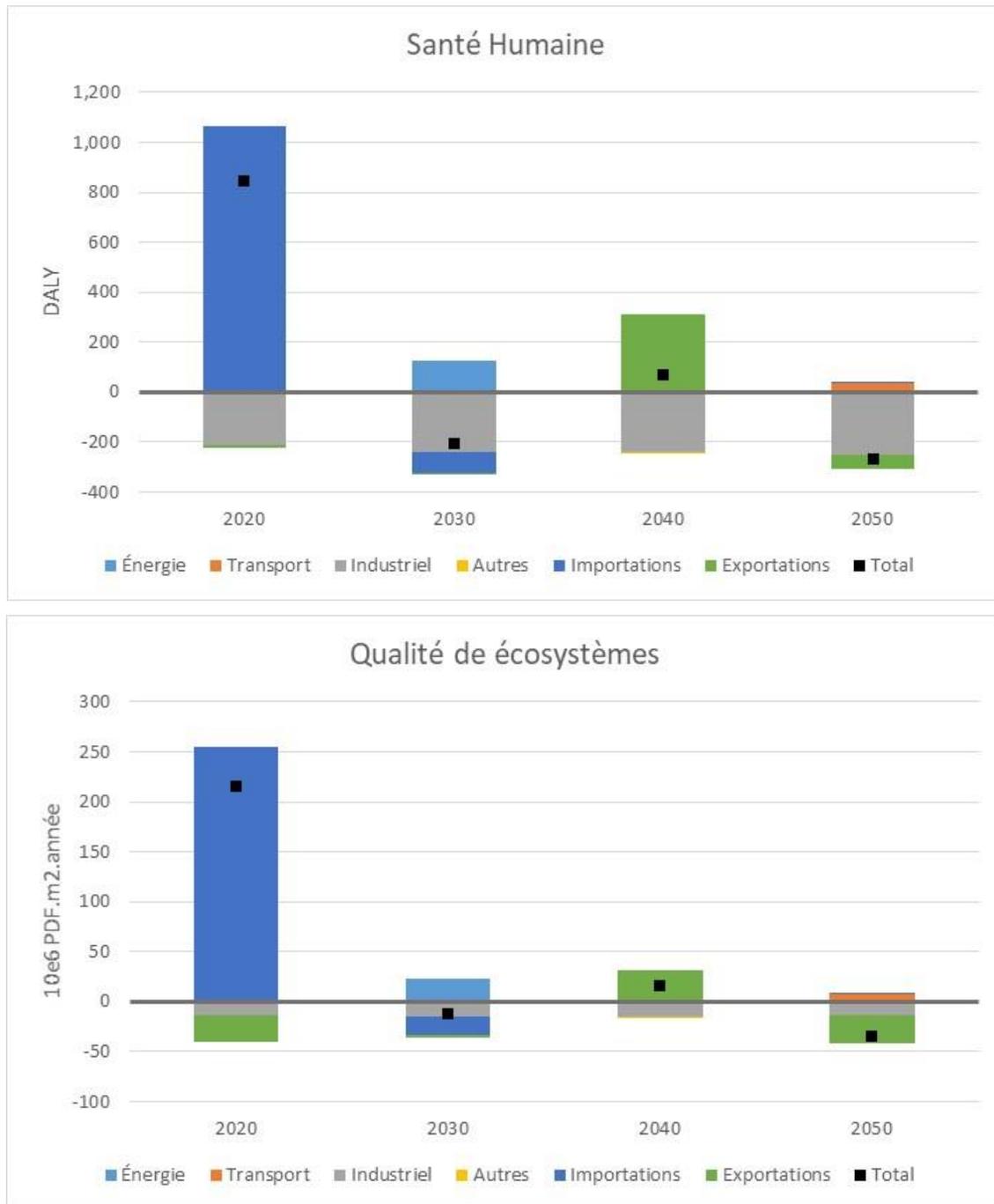


Figure 3-2 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de recyclage du fer : indicateurs Qualité des écosystèmes (million de pdf.m2.année) et Santé humaine (DALY).

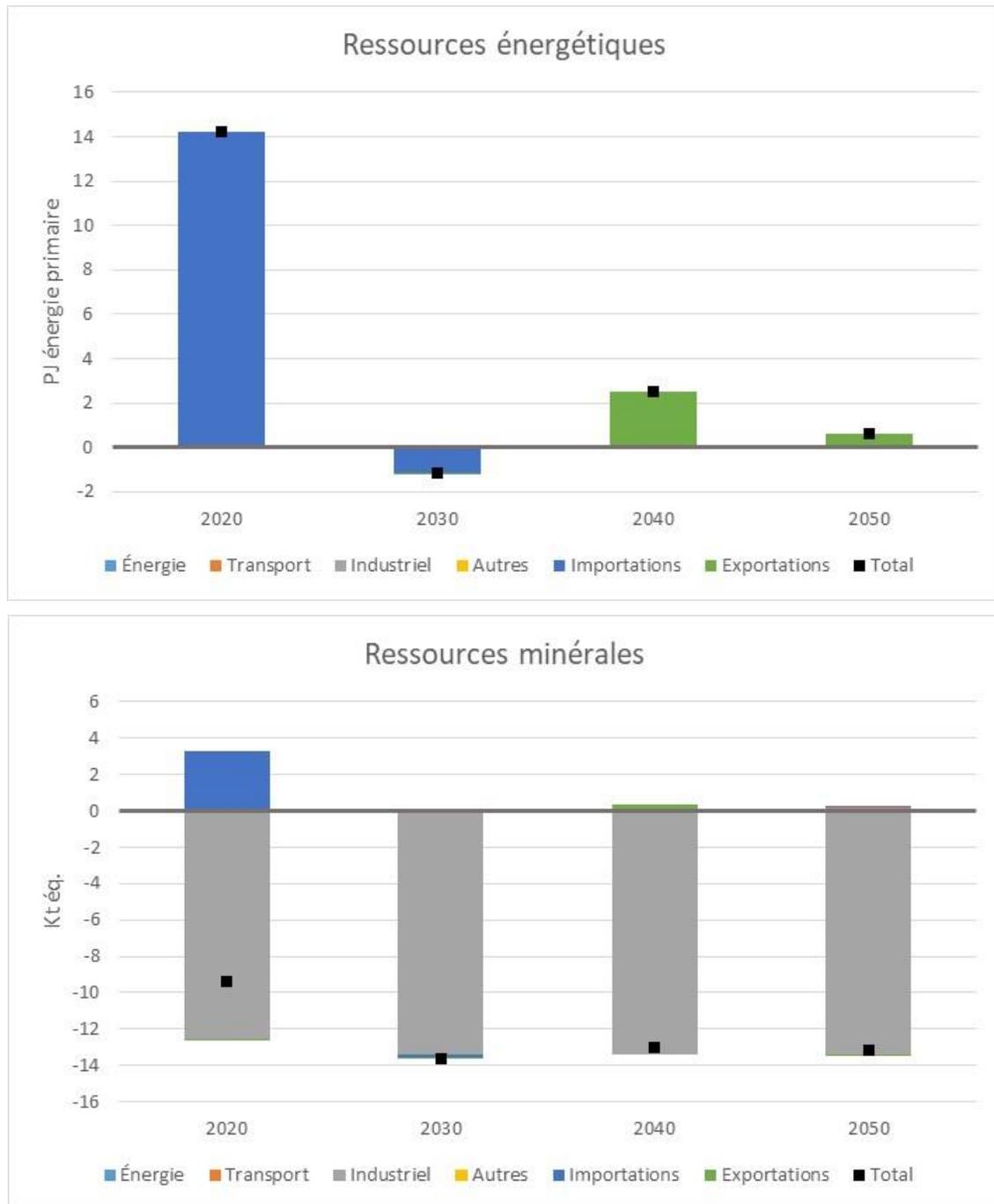


Figure 3-3 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de recyclage du fer : indicateurs Ressources énergétiques (Pétajoules équivalents) et Ressources minérales (kilotonnes équivalentes).

Bien que les résultats d'indicateurs entre les divers horizons de temps ne soient pas directement comparables, puisque les demandes utiles du Québec diffèrent entre les années, on observe la tendance suivante quant au résultat net pour chaque indicateur :

- **Changement climatique, Santé humaine, Qualité des écosystèmes, Ressources énergétiques** : La mise en place de la stratégie de circularité donne des résultats d'indicateurs nets qui **sont tantôt positifs, tantôt négatifs** selon l'horizon de temps ; principalement à cause de la variation des importations et des exportations d'énergie. Il est donc difficile de statuer sur un risque de déplacement d'impact.
- **Ressources minérales** : La mise en place de la stratégie de circularité montre une tendance à l'augmentation des bénéfiques pour cet indicateur. Les résultats nets sont négatifs à partir de 2030, en particulier pour le secteur industriel, grâce à l'augmentation des quantités recyclées et donc à la réduction des quantités de minerais extraits.

Les importations et les exportations d'énergie, que ce soit vers les autres provinces du Canada ou vers les autres pays, sont les principaux contributeurs à la variation des résultats d'indicateurs entre le scénario de référence et le scénario de la stratégie. Il est cependant difficile d'expliquer clairement comment la mise en place de la stratégie de circularité affecte ces importations et exportations. Ces effets sont des conséquences indirectes des décisions modélisées dans le modèle NATEM.

En mettant de côté toutes les importations et exportations, on observe la tendance suivante quant au résultat net pour chaque indicateur (voir Annexe A pour les résultats détaillés sans les importations et les exportations) :

- Le résultat net est **négatif** pour la plupart des indicateurs et horizons de temps considérés (la stratégie de recyclage présente alors un bénéfice environnemental). Ceci s'explique par un plus faible impact environnemental pour le recyclage de l'acier que pour sa production primaire (procédés de recyclage moins énergivores et extraction minière évitée).
- Seuls deux horizons de temps présentent un résultat net **positif** pour au moins un indicateur : l'horizon 2020 pour l'indicateur *Qualité des écosystèmes* et l'horizon 2050 pour l'indicateur *Ressources énergétiques*. Dans ces deux cas, les effets rebonds concernent respectivement le secteur de la production d'énergie et celui des transports. Ces résultats nets positifs sont toutefois difficilement explicables par les effets directs de l'introduction de la stratégie de circularité et représentent plutôt des effets rebonds marginaux modélisés dans le modèle NATEM.

Changement climatique :

- Les résultats négatifs pour le secteur industriel sont liés à la plus faible consommation énergétique (et donc moins d'émissions de GES associées) pour le recyclage de l'acier par rapport à sa production primaire, ainsi qu'aux émissions évitées de la production de concentré et de boulettes pour la voie primaire.
- Tel que discuté ci-dessus, les variations dans les secteurs des transports et de la production d'énergie sont des effets résiduels en arrière-plan du modèle. Ils ne modifient pas les conclusions pour cet indicateur.

Qualité des écosystèmes :

- Similaire à l'indicateur *Changement climatique*

Santé humaine :

- Similaire à l'indicateur *Changement climatique*

Ressources minérales :

- C'est pour cet indicateur que les effets de l'implémentation de la stratégie de circularité sont les mieux visibles. Le recyclage supplémentaire d'acier dû à l'implémentation de la stratégie conduit à une diminution de la consommation de minerais (boulettes ou concentré) pour la production d'acier primaire, et donc une réduction de son extraction au Québec par rapport au scénario de référence.
- Le résultat net est relativement constant pour les quatre horizons de temps, car les quantités d'acier supplémentaires disponibles pour recyclage dans le cas de la stratégie sont constantes selon les hypothèses du scénario.

Ressources énergétiques :

- Tel que précisé ci-dessus, le résultat net pour l'horizon 2050 est dû à des effets résiduels en arrière-plan du modèle NATEM.
- Pour le reste, les résultats négatifs pour le secteur industriel s'expliquent de la même manière que pour les indicateurs *Ressources minérales* et *Changement climatique*, par la plus faible consommation d'énergie pour produire d'acier recyclé par rapport à la production d'acier primaire.

Globalement, les ordres de grandeur des variations des résultats d'indicateurs sont faibles relativement aux résultats associés à la demande utile du Québec. À titre d'exemple, les émissions directes de GES à l'échelle de la province étaient de 82,1 Mt éq. CO₂ en 2014 (MDDELCC, 2016). Les variations mesurées ici représentent au maximum 0,002 % de ces émissions totales.

On peut donc conclure que la stratégie 6 sur le recyclage du fer affiche un potentiel de circularité impliquant une diminution des résultats nets pour l'indicateur *Ressources minérales*. L'analyse conséquentielle n'a pas permis de déceler un risque significatif de déplacement d'impact environnemental vers d'autres indicateurs.

3.2 Stratégie 7 : Recyclage du cuivre

Cette section cherche à évaluer les impacts environnementaux potentiels de la mise en place de la stratégie 7, « Recyclage du cuivre ». Par rapport aux scénarios développés dans le rapport technico-économique (Vaillancourt et coll., 2017), le scénario utilisé pour modéliser cette stratégie est le scénario qui correspond au scénario de mise en place de la stratégie avec coûts très réduits afin d'en montrer le potentiel maximum. Ce scénario a été choisi pour tester la variation la plus importante du système et les conséquences associées.

Les résultats pour cette stratégie sont présentés à l'Annexe A. Seuls les résultats pour l'indicateur *Changement climatique* sont présentés à la Figure 3-4. De manière générale, les résultats de cette stratégie sont très similaires à ceux pour la stratégie de recyclage du fer présentée à la section 3.1. Ils ne sont donc pas discutés en détail dans ce rapport. Le recyclage du cuivre présente aussi un bénéfice environnemental significatif dû à l'avantage du recyclage sur la production primaire, si l'on met de côté les importations et les exportations (Figure 3-5).

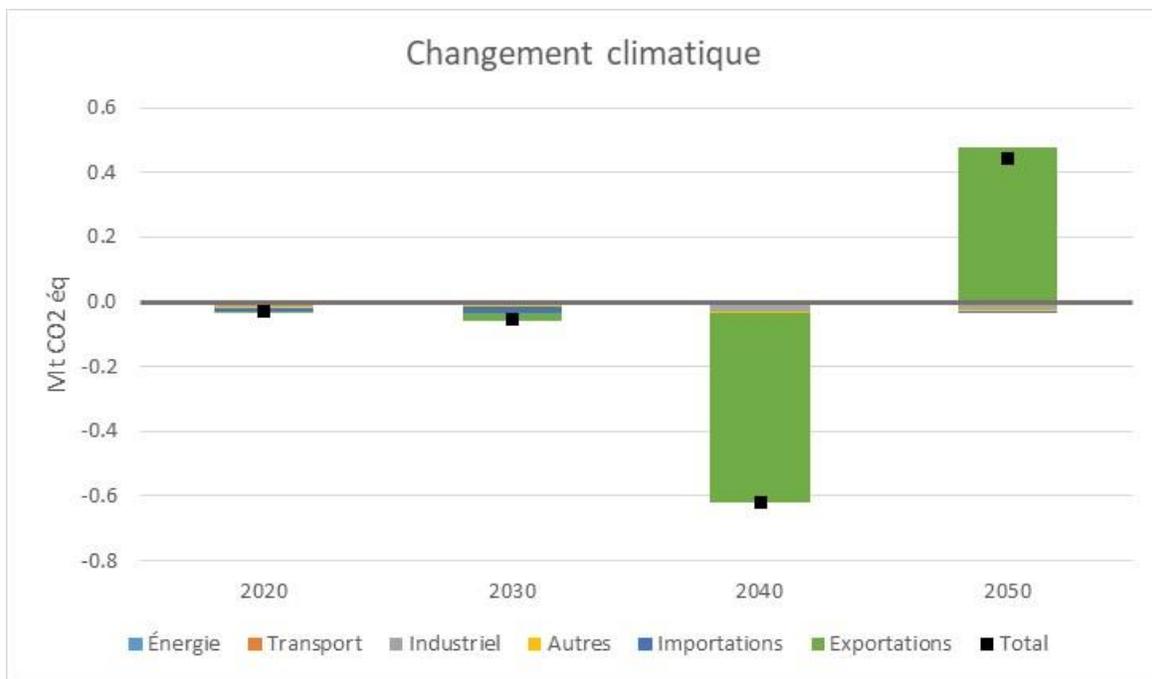


Figure 3-4 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de recyclage du cuivre : indicateur Changement climatique (Mégatonnes de CO₂ équivalent).

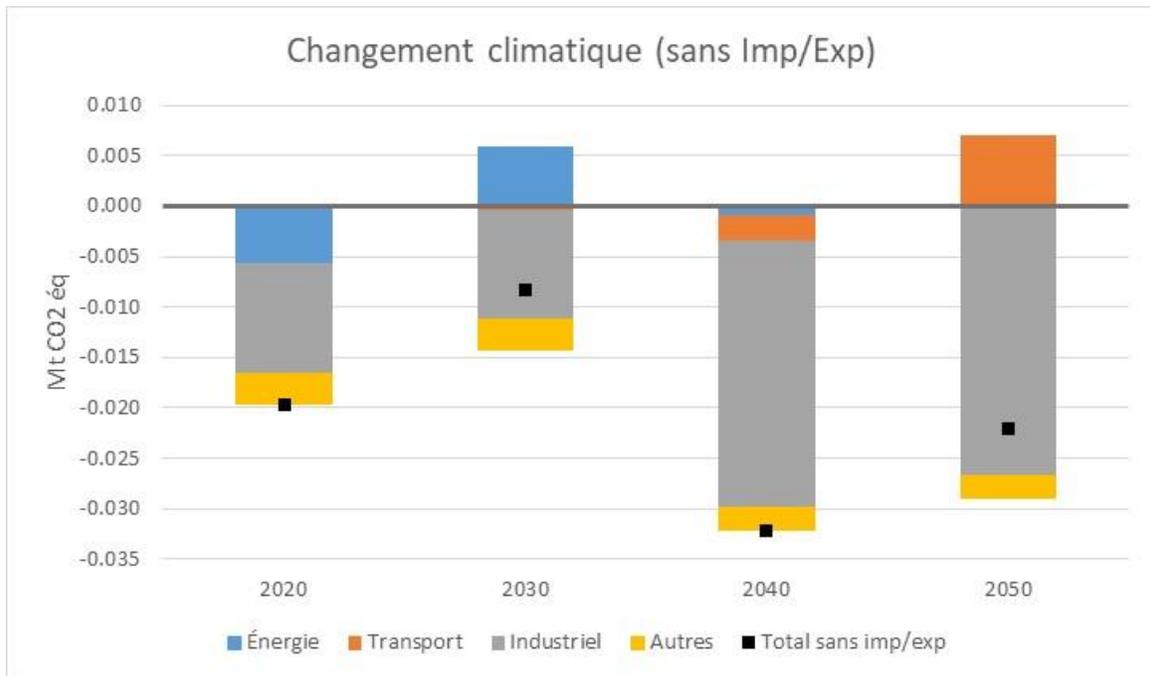


Figure 3-5 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de recyclage du cuivre sans les échanges avec d'autres régions : indicateur Changement climatique (Mégatonnes de CO₂ équivalent).

On peut donc conclure que la stratégie 7 sur le recyclage du cuivre affiche un potentiel de circularité impliquant une diminution des résultats nets pour l'indicateur Ressources minérales. L'analyse conséquentielle n'a pas permis de déceler un risque significatif de déplacement d'impact environnemental vers d'autres indicateurs.

3.3 Stratégie 8 : Recyclage du lithium

Cette section cherche à évaluer les impacts environnementaux potentiels de la mise en place de la stratégie 8, « Recyclage du lithium ». Par rapport aux scénarios développés dans le rapport technico-économique (Vaillancourt et coll., 2017), le scénario utilisé pour modéliser cette stratégie est le scénario qui correspond au scénario de mise en place de la stratégie avec coûts très réduits afin d'en montrer le potentiel maximum. Ce scénario a été choisi pour tester la variation la plus importante du système et les conséquences associées.

Les résultats pour cette stratégie sont présentés à l'Annexe A. Seuls les résultats pour l'indicateur *Changement climatique* sont présentés à la Figure 3-6. De manière générale, les résultats de cette stratégie sont très similaires à ceux de la stratégie de recyclage du fer présentée à la section 3.1. Ils ne

sont donc pas discutés en détail dans ce rapport. Comme on peut l'observer à la Figure 3-7, le recyclage du lithium présente aussi un bénéfice environnemental significatif dû l'avantage du recyclage sur la production primaire, si l'on met de côté les importations et les exportations. Les effets rebonds marginaux « parasites », conséquence indirecte des décisions modélisées dans le modèle NATEM, sont néanmoins plus importants pour cette stratégie, car elle concerne des volumes d'échange plus faibles.

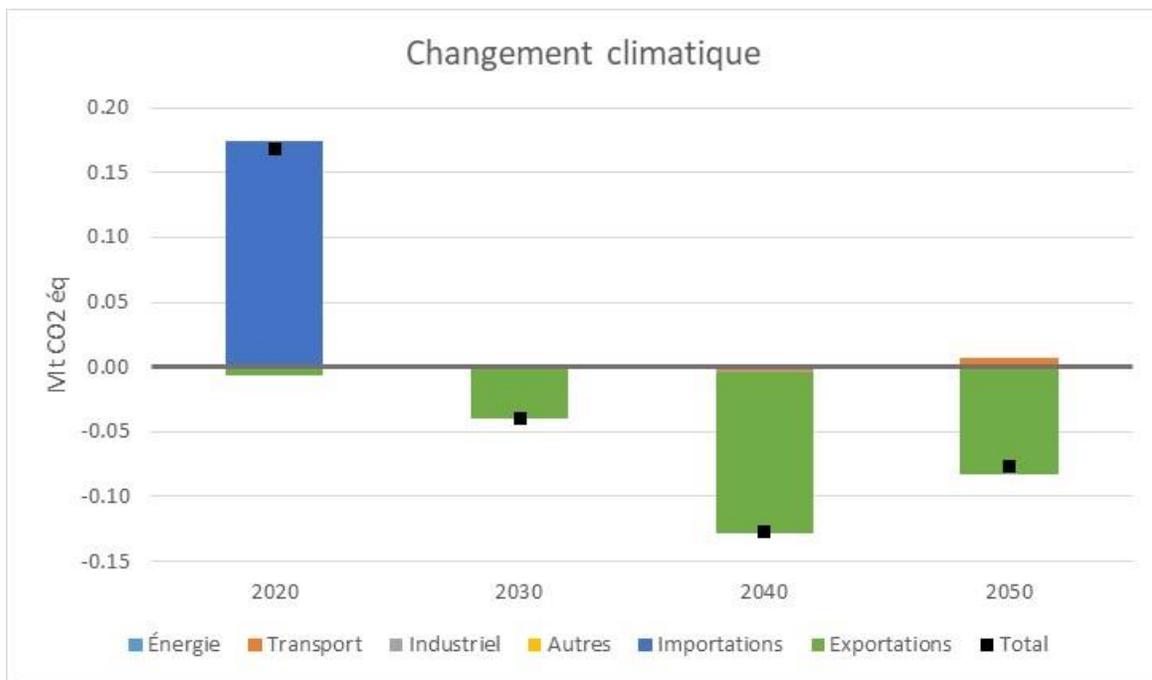


Figure 3-6 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de recyclage du lithium : indicateur Changement climatique (Mégatonnes de CO₂ équivalent).

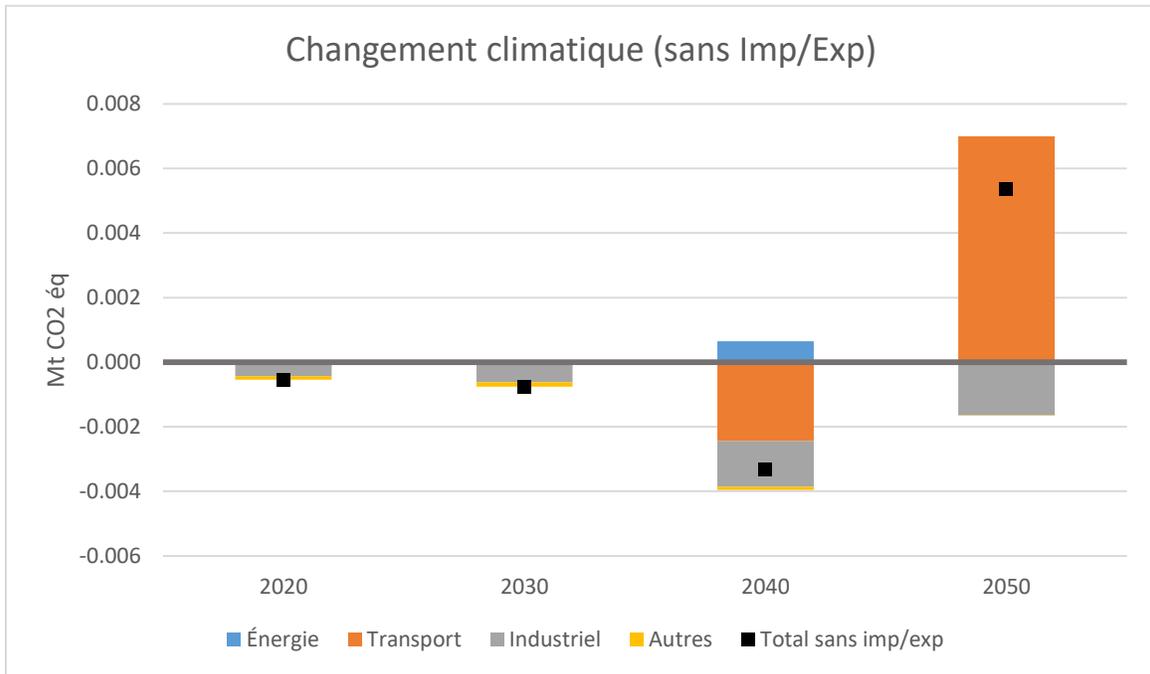


Figure 3-7 Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de recyclage du lithium sans les échanges avec d'autres régions : indicateur Changement climatique (Mégatonnes de CO₂ équivalent).

On peut donc conclure que la stratégie 8 sur le recyclage du lithium affiche un potentiel de circularité impliquant une diminution des résultats nets pour l'indicateur *Ressources minérales*. L'analyse conséquentielle n'a pas permis de déceler un risque significatif de déplacement d'impact environnemental vers d'autres indicateurs.

3.4 Stratégie 12a : Autopartage de véhicules

Cette section cherche à évaluer les impacts environnementaux potentiels de la mise en place de la stratégie 12, « Écoconception de véhicules ». Par rapport aux scénarios développés dans le rapport technico-économique (Vaillancourt et coll., 2017), le scénario utilisé pour modéliser cette stratégie est le scénario 12a Elc, qui correspond à la sous-stratégie de partage de véhicules électriques. Le service de partage 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.

Les résultats pour cette stratégie sont présentés à l'Annexe A. Seuls les résultats pour les indicateurs *Ressources minérales* et *Ressources énergétiques* sont présentés aux Figure 3-8 et Figure 3-9. Les résultats pour les indicateurs non présentés montrent les mêmes tendances que ceux pour l'indicateur *Ressources minérales*.

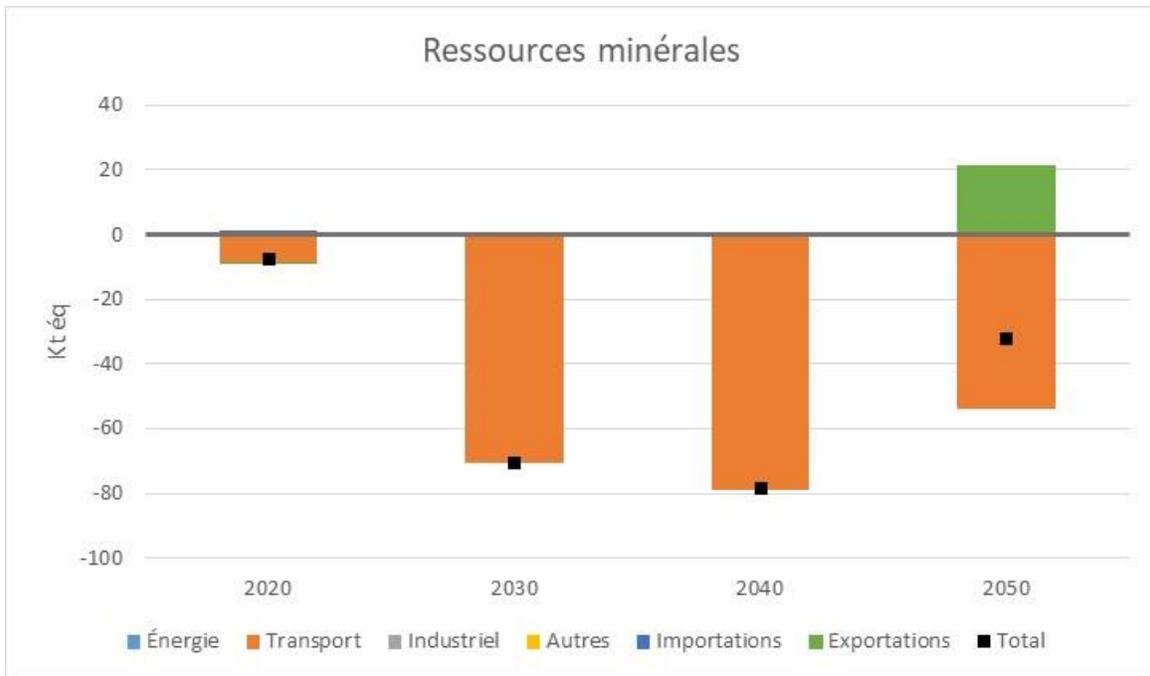


Figure 3-8 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie d'autopartage de véhicules : indicateur Ressources minérales (kilotonnes équivalentes).

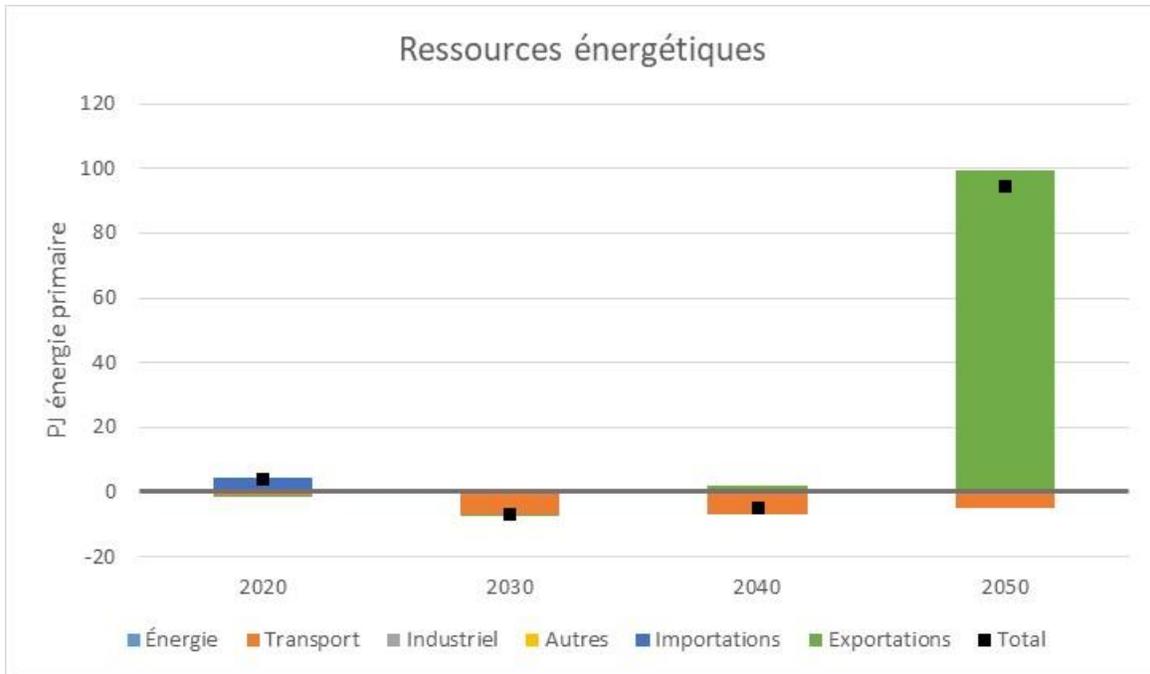


Figure 3-9 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie d'autopartage de véhicules : indicateur Ressources énergétiques (Pétajoules équivalents).

On peut observer une diminution des résultats d'indicateur nets associés à l'implémentation de la stratégie d'autopartage pour les quatre horizons de temps pour l'indicateur *Ressources minérales*. Cette diminution est plus notable aux horizons après 2020, quand la stratégie est plus étendue. La diminution nette est due principalement à la diminution pour le secteur des transports, qui apparaît comme le contributeur majoritaire pour tous les horizons de temps. À l'horizon 2050, l'augmentation de la consommation de combustibles fossiles à l'extérieur du Québec (liée à l'augmentation des exportations) apparaît aussi comme un grand contributeur et réduit le bénéfice de la stratégie par rapport au scénario de référence.

Quant à l'indicateur *Ressources énergétiques*, l'implémentation de la stratégie a peu d'effet par rapport au scénario de référence jusqu'à l'horizon 2050, où l'augmentation des exportations de combustibles fossiles vient annuler la diminution pour le secteur des transports.

Tel que mentionné auparavant, il est cependant difficile d'expliquer clairement le lien direct entre la mise en place de la stratégie de circularité et la variation des échanges énergétiques avec l'extérieur de la province. Si les échanges avec l'extérieur sont mis de côté, on observe une tendance à la diminution des résultats d'indicateurs similaire pour les cinq indicateurs. Cette diminution est principalement liée au secteur des transports, où la voiture conventionnelle et électrique est substituée par des voitures partagées (avec une plus grande présence de la voiture électrique).

Pour cette stratégie, les ordres de grandeur des variations des résultats sont non négligeables, relativement aux résultats associés à la demande utile au Québec. Pour le cas des émissions directes de GES, les variations mesurées ici représentent au maximum 3 % de ces émissions totales.

On peut donc conclure que la stratégie sur l'autopartage de véhicules affiche un potentiel de circularité impliquant une diminution des résultats nets pour l'indicateur *Ressources minérales*. L'analyse a permis de conclure que l'implémentation de la stratégie n'implique pas un déplacement d'impact environnemental vers d'autres indicateurs, mais plutôt une tendance à la diminution des résultats nets pour les autres indicateurs.

3.5 Stratégie 12 b : Écoconception- Utilisation de matériaux plus légers

Cette section cherche à évaluer les impacts environnementaux potentiels de la mise en place de la stratégie 12, « Écoconception de véhicules ». Par rapport aux scénarios développés dans le rapport technico-économique (Vaillancourt et coll., 2017), le scénario utilisé pour modéliser cette stratégie est le scénario 12 b, qui correspond à la sous-stratégie d'utilisation de matériaux plus légers. Les véhicules plus légers et donc à plus faible consommation, sont utilisés et remplacent les véhicules conventionnels.

Les résultats pour cette stratégie sont présentés à l'Annexe A. Seuls les résultats pour les indicateurs *Ressources minérales* et *Ressources énergétiques* sont présentés aux Figure 3-10 et Figure 3-11. Les résultats pour les indicateurs non présentés montrent les mêmes tendances que ceux pour l'indicateur *Ressources minérales*.

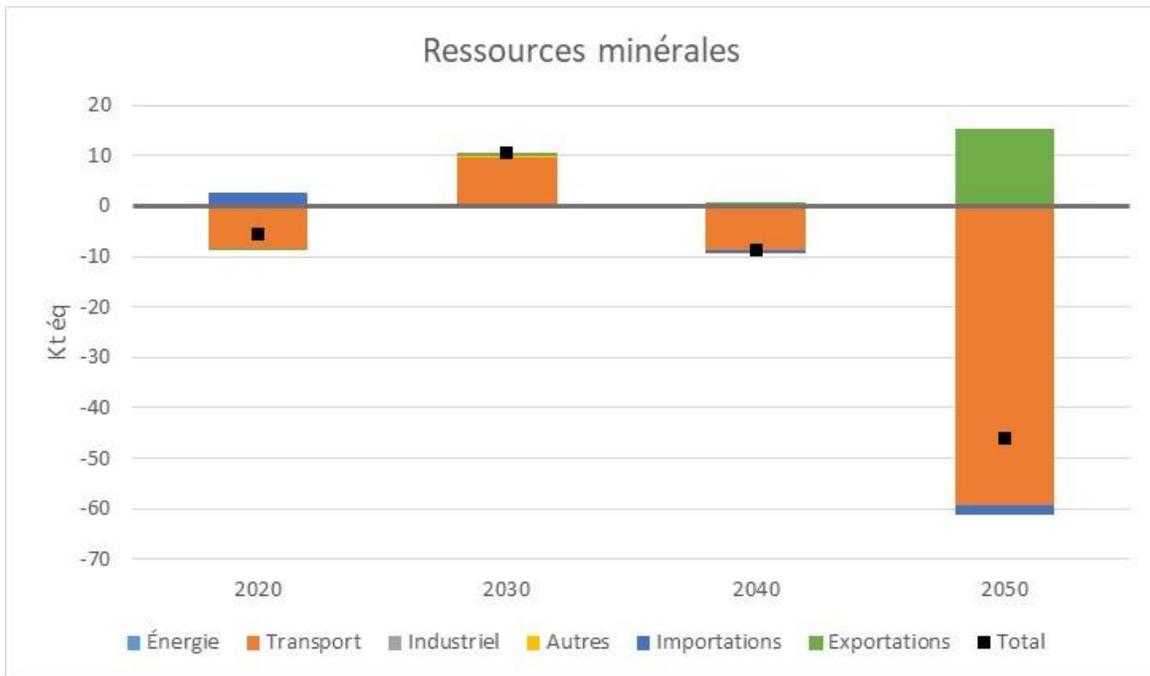


Figure 3-10 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie d'utilisation de matériaux plus légers : indicateur Ressources minérales (kilotonnes équivalentes).

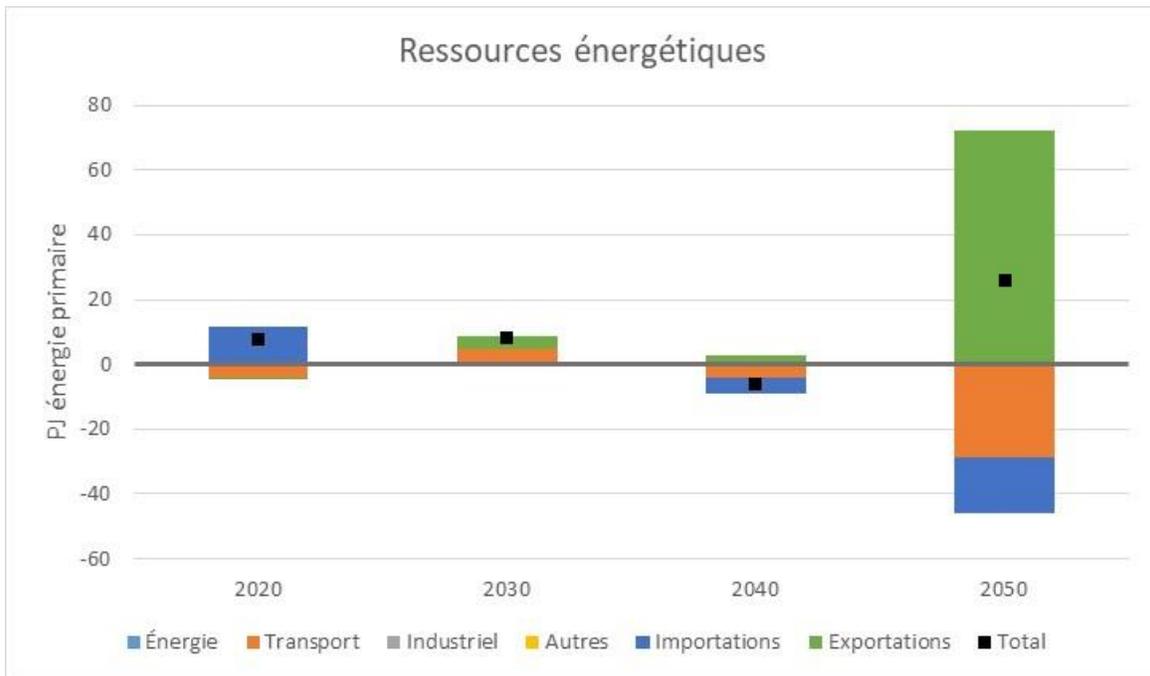


Figure 3-11 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie d'utilisation de matériaux plus légers : indicateur Ressources énergétiques (pétajoules équivalents).

On peut observer pour cette stratégie des résultats variables selon l'horizon de temps. Il y a une faible diminution des résultats nets pour l'indicateur *Ressources minérales* pour 2020 et 2040, tandis qu'il y a une augmentation, plus ou moins de la même ampleur en 2030, et une diminution plus importante en 2050. Les secteurs qui contribuent le plus aux variations entre les scénarios sont le secteur des transports et les exportations, ces dernières venant mitiger le potentiel de diminution de la stratégie à l'horizon 2050.

Quant à l'indicateur *Ressources énergétiques*, les résultats sont similaires à ceux pour les autres indicateurs, mais on observe une contribution importante des échanges avec d'autres régions en 2020 et 2050 ; en 2020, avec une légère augmentation du résultat net liée à l'augmentation des importations, et en 2050 avec une augmentation du résultat net surtout liée à l'augmentation des exportations.

Encore une fois, les conséquences indirectes des décisions modélisées dans le modèle NATEM font en sorte que les variations des échanges énergétiques avec l'extérieur de la province apparaissent comme un contributeur majeur. Si les échanges avec l'extérieur sont mis de côté, on observe une tendance à la diminution des résultats d'indicateurs nets similaire pour les cinq indicateurs, liée au secteur des transports, pour tous les horizons de temps, sauf 2030.

Pour cette stratégie, les ordres de grandeur des variations des résultats sont non négligeables, relativement aux résultats associés à la demande utile au Québec. Pour le cas des émissions directes de GES, les variations mesurées ici représentent jusqu'à 2 % de ces émissions totales.

On peut donc conclure que la stratégie sur l'utilisation de matériaux plus légers affiche un potentiel de circularité impliquant une diminution des résultats nets pour l'indicateur *Ressources minérales*, si on met de côté les effets liés aux variations des exportations. L'analyse a permis de conclure que l'implémentation de la stratégie peut impliquer un déplacement d'impact dû aux effets indirects des exportations, notamment pour l'indicateur

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

Cette section cherche à évaluer les impacts environnementaux potentiels de la mise en place de la stratégie 13, « Stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées ». Par rapport aux scénarios développés dans le rapport technico-économique (Vaillancourt et coll., 2017), le scénario utilisé pour modéliser cette stratégie est le scénario 13, qui correspond à la sous-stratégie de 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) combinée avec une augmentation de la production d'électricité décentralisée (principalement au moyen de panneaux photovoltaïques).

Les résultats pour cette stratégie sont présentés à l'Annexe A. Seuls les résultats pour les indicateurs *Ressources minérales* et *Ressources énergétiques* sont présentés aux Figure 3-12 et Figure 3-13. Les résultats pour les indicateurs non présentés montrent les mêmes tendances que ceux pour l'indicateur *Ressources minérales*.

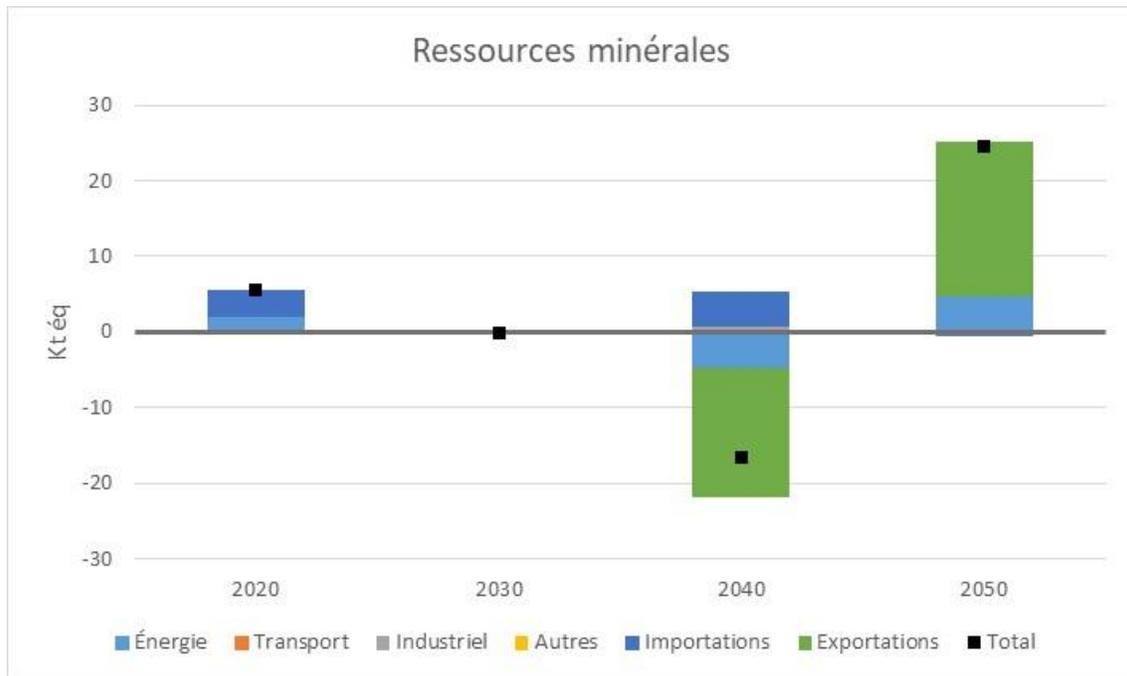


Figure 3-12 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de stockage de batteries : indicateur Ressources minérales (kilotonnes équivalentes).

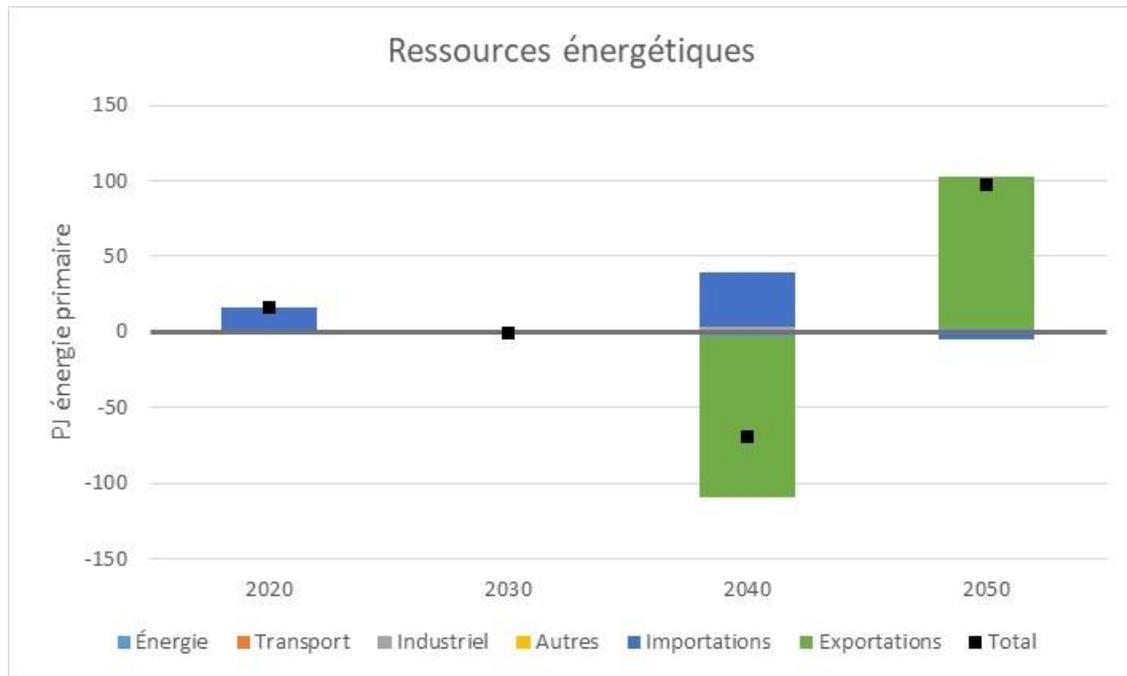


Figure 3-13 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de stockage de batteries : indicateur Ressources énergétiques (pétajoules équivalents).

On peut observer pour cette stratégie des résultats variables selon l'horizon de temps. En 2020 et 2030, il n'y a très peu sinon aucune variation du résultat d'indicateur net pour l'indicateur *Ressources minérales*, tandis qu'il y a une diminution en 2040 et une augmentation en 2050.

En 2040, les secteurs qui contribuent le plus au différentiel entre les scénarios sont les échanges énergétiques avec d'autres régions, avec une augmentation liée aux importations et une diminution liée aux exportations de produits pétroliers vers l'Ontario. La diminution de la contribution du secteur énergétique est liée à la plus faible quantité d'électricité photovoltaïque produite dans le cas du scénario d'implémentation de la stratégie.

En 2050, les exportations d'énergie sont le principal contributeur à l'augmentation du résultat net. L'augmentation de la production d'électricité photovoltaïque contribue aussi à l'augmentation du résultat net.

Quant à l'indicateur *Ressources énergétiques*, les résultats sont similaires à ceux pour les autres indicateurs, mais avec une contribution des importations et exportations seulement.

À la Figure 3-14, la comparaison des deux scénarios pour l'indicateur *Changement climatique* est présentée si les échanges énergétiques avec l'extérieur sont mis de côté. Les résultats pour les autres indicateurs montrent les mêmes tendances, une augmentation du résultat net en 2050 liée à l'augmentation du nombre d'installations photovoltaïques et des résultats comparables entre les deux scénarios pour les autres horizons de temps.

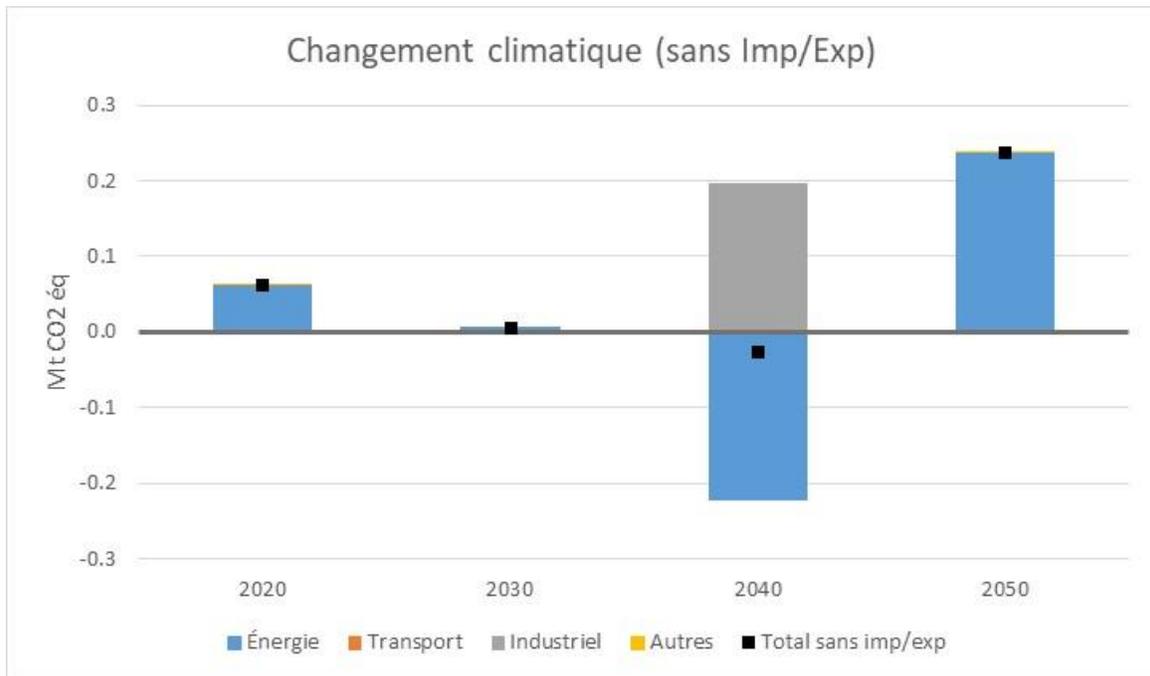


Figure 3-14 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de stockage de batteries sans les échanges énergétiques avec d'autres régions : indicateur Changement climatique. (Mégatonnes de CO₂ équivalent)

Pour cette stratégie, les ordres de grandeur des variations des résultats représentent jusqu'à un maximum 0,2 % des émissions de GES totales associées à la demande utile au Québec.

Afin d'avoir un portrait plus complet de cette stratégie, une variante de cette stratégie où le coût de la production décentralisée et du stockage diminue a été étudiée. La Figure 3-15 montre les résultats pour l'indicateur *Changement climatique* (résultats similaires pour les autres indicateurs).

On observe des variations pratiquement nulles entre les deux scénarios pour les deux premiers pas de temps. En 2040 et 2050, il y a une augmentation du résultat net avec l'implémentation de la stratégie due à la fabrication des panneaux photovoltaïques utilisés pour la production décentralisée. En effet, la diminution des coûts fait en sorte que cette technologie soit plus répandue et apparaisse plus tôt que dans le cas précédent.

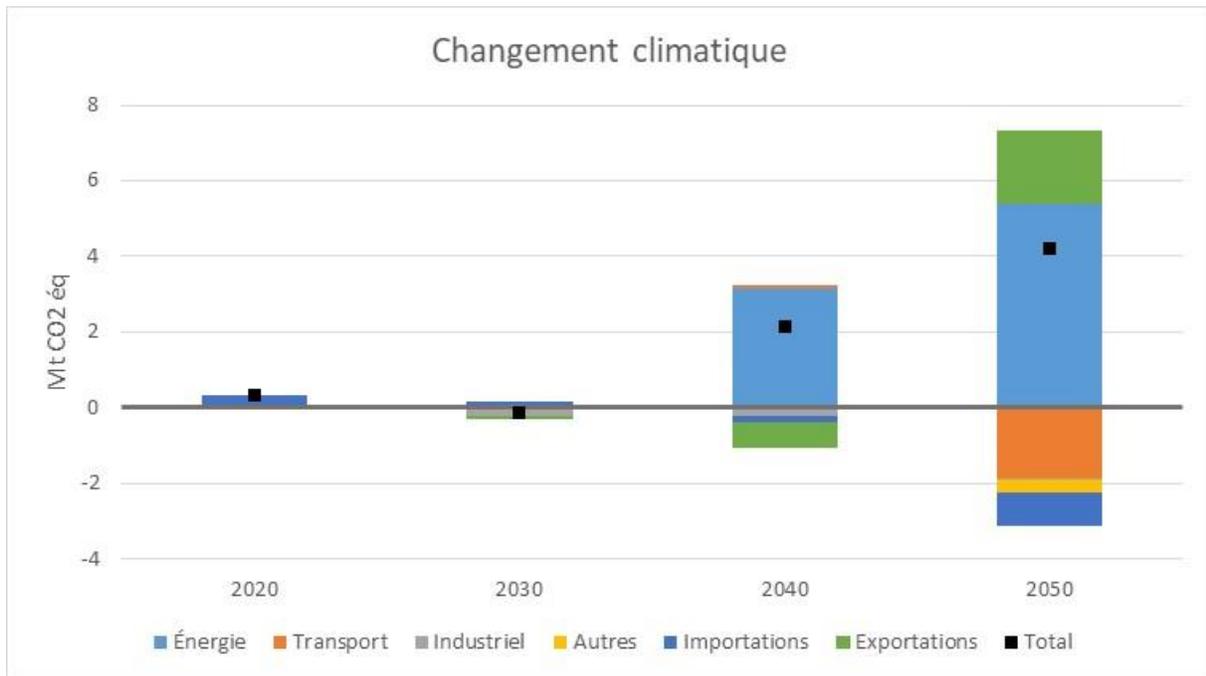


Figure 3-15 : Résultats différentiels d'indicateurs environnementaux entre le scénario de référence et la stratégie de stockage de batteries avec diminution de coûts : indicateur Changement climatique (Mégatonnes de CO₂ équivalent).

On peut donc conclure que la stratégie sur le stockage d'énergie avec des batteries lithium-ion usagées affiche un potentiel de circularité impliquant une augmentation des résultats nets pour l'indicateur *Ressources minérales*. L'analyse a permis de conclure que l'implémentation de la stratégie peut impliquer un déplacement d'impact vers l'indicateur *Ressources minérales* dû à la fabrication des panneaux photovoltaïques pour les horizons de temps où la stratégie est massivement implémentée. Des risques de déplacement d'impact sont également indiqués pour les autres indicateurs dus aux effets indirects.

4 DISCUSSION

4.1 Synthèse des résultats

Le Tableau 4-1 montre les conclusions relatives aux différentes stratégies étudiées ainsi que le potentiel de circularité calculé dans le rapport technico-économique (Vaillancourt et coll., 2017).

Tableau 4-1 : Synthèse des résultats de l'étude

Stratégie n °	Potentiel de circularité – analyse TE	Risque de déplacement d'impact
6 – Recyclage du fer	Fe : 66 976 t/an Cu : 142 t/an	Risque non significatif
7 – Recyclage du cuivre	Fe : 8151 t/an Cu : 6616 t/an	Risque non significatif
8 – Recyclage du lithium	Cu : 2161 t/an Li : 360 t/an	Risque non significatif
12a – Autopartage	Fe : 42-246 t/an Cu : 8 t/an Li : 0,5 t/an	Bénéfice environnemental attendu
12 b – Utilisation de matériaux plus légers	Fe : 1300-1500 t/an Cu : 8 t/an Li : 0,5 t/an	Bénéfice environnemental attendu à long terme
13 – Stockage d'énergie avec des batteries	Fe : 1100 t/an	Risque de déplacement d'impact à long terme
13 b – Stockage d'énergie avec des batteries (bas coût)	Fe : 2800 t/an	Risque de déplacement d'impact

En général, les stratégies basées sur le recyclage montrent des potentiels de circularité intéressants, notamment pour le lithium et pour le cuivre, alors que le risque de déplacement d'impact n'est pas significatif. Pour l'indicateur *Ressources minérales*, on trouve une diminution des résultats d'indicateur nets qui varie entre quelques centaines de tonnes et une dizaine de kilotonnes de minerais équivalent. Il est à noter que ces stratégies, affichant le potentiel de circularité le plus élevé parmi celles évaluées, présentent des résultats variables pour cet indicateur. Ceci est dû aux différences quant au calcul des deux indicateurs ; tandis que le potentiel de circularité ne tient compte que des trois métaux à l'étude et est basé sur les données du modèle technico-économique, l'indicateur *Ressources minérales* considère la consommation de ressources tout au long du cycle de vie des produits et services à l'étude (qui peut avoir lieu à l'extérieur du Québec), il inclut également d'autres métaux, dont l'extraction est pondérée en fonction de leurs rareté et fonctionnalité.

L'indicateur *Changement climatique* montre pour les trois stratégies de recyclage des variations de l'ordre du millier de tonnes de CO₂ équivalent (dizaines de milliers pour la stratégie de recyclage du cuivre). Ces variations ne représentent que 0,05 % des émissions de GES totales du Québec. Il n'est pas possible de calculer le résultat total pour le Québec pour les indicateurs *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes*, mais étant donné qu'ils sont, en général, fortement dominés par les effets des GES, on peut en conclure que, pour ces indicateurs, les variations resteront négligeables par rapport aux résultats totaux associés à la demande utile du Québec.

L'indicateur *Ressources énergétiques* montre pour les trois stratégies de recyclage des variations de l'ordre des dizaines de térajoules d'énergie primaire. Ces variations restent négligeables par rapport à la demande totale en énergie primaire du Québec, de l'ordre des milliers de pétajoules.

Les stratégies autour du secteur des transports (autopartage et utilisation de matériaux plus légers) ne montrent pas d'aussi bons potentiels de circularité, tels que calculés par le modèle technico-économique. Par contre, l'augmentation du taux d'utilisation des véhicules et la diminution de leur consommation d'énergie engendrent des bénéfices environnementaux importants associés à l'implémentation des stratégies. Dans le cas de l'indicateur *Ressources minérales*, les bénéfices sont de l'ordre de plusieurs dizaines de kilotonnes équivalentes.

Les variations pour l'indicateur *Changement climatique* sont de l'ordre de 1 à 2 mégatonnes de CO₂ éq., ce qui représente une variation par rapport aux émissions de GES totales du Québec de 2-3 %, sensiblement plus importante que celles pour les stratégies de recyclage. Comme dans le cas des stratégies de recyclage, on peut conclure que la variation pour les indicateurs *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* seront du même ordre étant donné que les émissions de GES dominent le résultat total pour ces deux indicateurs.

Les variations pour l'indicateur *Ressources énergétiques* sont de l'ordre de plusieurs pétajoules, ce qui représenterait près de 1 % de la demande totale du Québec en énergie utile.

La stratégie de stockage d'énergie avec des batteries montre des potentiels de circularité intéressants, bien qu'il n'ait pas été calculé pour le lithium par le modèle technico-économique. Par contre, l'augmentation de la production d'électricité décentralisée peut mener à une augmentation des résultats pour l'indicateur *Ressources minérales* due à la construction des panneaux photovoltaïques. Les variations peuvent atteindre plusieurs dizaines de kilotonnes équivalentes pour le sous-scénario à faible coût.

Les scores pour l'indicateur *Changement climatique* varient fortement entre les deux sous-scénarios (stockage et stockage à coût réduit) et peuvent atteindre plusieurs mégatonnes de CO₂ éq., ce qui représente jusqu'à 3 % des émissions de GES totales du Québec, une variation similaire à celle pour les stratégies liées au transport. Comme dans les cas précédents, on peut déduire le même ordre de grandeur de variation pour les indicateurs *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes*. Pour l'indicateur *Ressources énergétiques*, les deux sous-scénarios montrent des variations entre zéro et 60 pétajoules, qui représenteraient jusqu'à 3 % de la demande totale du Québec en énergie utile.

4.2 Lien entre NATEM et ACV

La section 3 illustre la complexité d'interprétation des résultats issus du modèle NATEM à l'aide d'une analyse du cycle de vie conséquentielle pour l'étude des stratégies de circularité. Bien que des bénéfices environnementaux liés à l'implémentation de certaines stratégies de circularité soient visibles pour plusieurs indicateurs environnementaux, des effets rebonds marginaux « parasitent » certains résultats. Ces effets sont visibles malgré que les stratégies évaluées impliquent des variations minimales par rapport à l'ensemble des échanges modélisés dans NATEM. Les différentiels d'activité économique entre certaines stratégies de circularité et les scénarios de référence respectifs restent négligeables comparativement aux changements technologiques analysés par NATEM.

Par exemple, certaines des stratégies étudiées ne concernent qu'une partie minimale du secteur impliqué, comme dans le cas du recyclage du fer, puisque l'industrie est déjà bien implantée au Québec. Dans ce cas-là, les processus affectés par l'implémentation de la stratégie de recyclage restent marginaux comparativement aux changements liés à l'optimisation des différentes technologies du modèle technico-économique. Ces changements, associés à la pénétration des différentes technologies, ressortent comme étant plus importants que le potentiel de circularité associé à la stratégie lorsqu'est calculé le différentiel entre les deux scénarios.

Dans d'autres cas, comme le cas du stockage d'énergie avec des batteries, le coût de la technologie trouvé dans la littérature ne permet pas qu'elle soit adoptée dans la solution optimale du modèle NATEM ou que de façon minimale. Dans ce cas-là, l'influence de la stratégie sur les résultats n'est pas clairement discernable. C'est seulement en forçant l'adoption des panneaux photovoltaïques, en diminuant leur coût, que l'on peut voir les possibles effets environnementaux et déplacements d'impacts.

Enfin, comme il a été mentionné dans la section précédente, les résultats calculés avec NATEM et avec l'ACV sont basés sur des choix de modélisation, hypothèses et perspectives différents et pas nécessairement cohérents à ce stade de développement méthodologique. Nous avons ainsi cherché par l'ACV conséquentielle des scénarios générés par NATEM qu'à déterminer s'il y a un risque (significatif ou pas) de déplacement d'impact associé à l'implémentation d'une stratégie de circularité, sans avoir la prétention de toujours pouvoir expliquer en détail la provenance de ces résultats.

4.3 Applications et limites de l'ACV

Cette ACV vise l'évaluation environnementale de l'évolution des mélanges de technologies proposée par le modèle NATEM et permettant de répondre à diverses contraintes liées à l'introduction de stratégies de circularité. Toute conclusion tirée de cette étude hors de son contexte original doit être évitée.

Les résultats de cette analyse pourront être utilisés en combinaison avec les résultats des autres étapes du projet pour mettre en perspective la convenance de chaque stratégie de circularité parmi celles sélectionnées. Tel que mentionné précédemment, les résultats de cette analyse ne doivent pas être interprétés comme des valeurs absolues, mais comme des risques potentiels de déplacement d'impact issus de l'implémentation des stratégies. En général, les variations étudiées n'ont pas d'effets majeurs lorsqu'on les compare à l'empreinte environnementale globale du Québec. Néanmoins, dans certains cas, ces déplacements d'impacts peuvent venir nuancer les effets positifs des stratégies.

De plus, ces conclusions doivent être interprétées en tenant compte des limites de l'étude et inhérentes à l'analyse technico-économique du modèle NATEM et à la modélisation ACV, ainsi que de leur combinaison.

Les principales incertitudes/limites de cette étude sont détaillées ci-après :

1. L'incertitude provenant du modèle NATEM

- Toutes les incertitudes liées aux hypothèses posées dans le modèle NATEM sont transférables à la modélisation ACV. En ce sens, cette étude se limite à l'évaluation des sources énergétiques dans les secteurs industriel, commercial, résidentiel, agricole et des transports au Québec ;
- D'autres hypothèses incluses au modèle NATEM doivent être mentionnées notamment :
 - Toutes les sources énergétiques exportées sont utilisées ;
 - Les développements technologiques sont définis selon les connaissances actuelles ;
 - L'appellation des technologies sous NATEM n'est pas toujours assez détaillée et force l'utilisation d'un mélange de technologies en ACV.

2. La qualité des données d'inventaire

- Les données relatives aux sources énergétiques proviennent presque exclusivement de la base de données *ecoinvent v3.3* ;
- Les données d'inventaire du cycle de vie des sources énergétiques ne sont pas représentatives des avancées technologiques (s'il y en a) liées à l'exploitation et à l'utilisation des diverses sources énergétiques. La seule notion d'avancement technologique considérée dans cette étude correspond à l'évolution de l'efficacité énergétique des technologies telle que considérée par le modèle NATEM, si et seulement si une technologie avait bien été identifiée. L'incertitude associée à l'évolution technologique est applicable à tous les scénarios évalués et augmente à mesure que l'on s'éloigne de la situation actuelle ;
- La différenciation quant à la composition des divers gisements pétroliers ou gaziers n'a pas été prise en compte ;
- Il est possible que les systèmes comparés présentent des incohérences dans leur arrière-plan, malgré les efforts consentis pour rendre les systèmes les plus comparables possible ;

- Les accidents (p. ex. déversement pétrolier) et anomalies (p. ex. durée de vie atypique des batteries des véhicules) n'ont pas été considérés dans l'étude, comme c'est généralement le cas en ACV. Il est difficile, voire impossible, de déterminer leur influence sur les conclusions de l'étude ;
- Certains flux (matières premières ou émissions) ont été modélisés à l'aide de données substitutives, en l'absence de données spécifiques, tirées de la base de données *ecoinvent* v3.3. Ces données peuvent donc influencer la validité des résultats.

3. Frontières temporelles et géographiques

Conformément à l'unité fonctionnelle sélectionnée, la présente étude se veut une ACV comparative de scénarios prospectifs du système énergétique québécois pour les années 2020, 2030, 2040 et 2050.

Toutefois, les données d'inventaire du cycle de vie utilisées sont basées sur des données actuelles ou passées, représentatives du contexte actuel. Faute d'information sur les développements technologiques futurs, ces derniers n'ont pu être modélisés. Par exemple, l'extraction minière utilise plusieurs produits chimiques pour le traitement des minerais ; la recette actuelle n'est potentiellement pas représentative de la recette qui sera utilisée en 2030 ou 2050. Il existe donc une incertitude grandissante en ce qui a trait à la représentativité des données à mesure que l'on s'éloigne du moment présent.

Par ailleurs, certains processus inclus dans les frontières des systèmes et nécessaires à la réalisation de l'unité fonctionnelle peuvent avoir lieu n'importe où dans le monde ou à n'importe quel autre moment. Par exemple, les processus associés à l'approvisionnement en sources énergétique peuvent avoir lieu au Québec ou ailleurs dans le monde.

De plus, certains processus peuvent générer des émissions sur une plus longue période que l'année de référence. Ces émissions sont néanmoins incluses dans le calcul des impacts potentiels.

4. L'absence de modèle pour l'évaluation de certains impacts

Plusieurs enjeux spécifiques ne sont pas captés par l'ACV environnementale et peuvent donc limiter l'interprétation des résultats. Les impacts non pris en compte incluent :

- Les retombées sociales et économiques.
- Les impacts aux biens humains (p.ex. détérioration des bâtiments) ;
- La pollution liée aux accidents ou à de mauvaises pratiques ;
- Le bruit et les odeurs ;
- La pollution lumineuse ;
- L'impact de la consommation de l'eau n'a pas été évalué puisque, d'une part, les données dans la base de données *ecoinvent* v3.3 sont très lacunaires et, d'autre part, les méthodes de caractérisation sont limitées ;
- L'analyse du cycle de vie n'est pas un outil approprié afin d'évaluer les risques de nature très localisée, qui dépendent par exemple de la géologie du sol et/ou de facteurs spécifiques aux sites. Dans de tels cas, les résultats d'ACV ne peuvent en aucun cas se substituer à une analyse de risques ou à une étude d'impact environnemental.

5. L'incertitude quant à la modélisation des impacts environnementaux

Il est important de comprendre que l'ACV diffère de l'analyse de risque. Contrairement à cette dernière, conduite dans un contexte réglementaire et qui utilise une approche conservatrice, l'ACV tente de fournir la meilleure estimation possible (Udo-de-Haes et coll., 2002). En effet, l'évaluation des impacts du cycle de vie tente de représenter le cas le plus probable, c.-à-d. que les modèles utilisés, soit les modèles de transport et de devenir des contaminants dans l'environnement et d'effet toxique sur les récepteurs biologiques, ne tentent pas de maximiser l'exposition et le dommage environnemental (approche du pire scénario), mais bien d'en représenter un cas moyen.

Il convient également de rappeler que les résultats de l'ACV représentent des impacts environnementaux potentiels et non réels.

5 CONCLUSION

Le but de cette étape de l'étude de la circularité des métaux au Québec était d'évaluer, à l'aide d'une ACV, les conséquences environnementales potentielles de l'implémentation des stratégies de circularité sélectionnées lors des étapes précédentes et les mettre en perspective par rapport à leur potentiel de circularité. Ces conséquences environnementales sont évaluées à l'aide de cinq indicateurs : *Changement climatique*, *Santé humaine*, *Qualité des écosystèmes*, *Épuisement des ressources minérales et Épuisement des ressources énergétiques*. Six des stratégies sélectionnées ont été analysées à cette étape. Les stratégies restantes ne l'ont pas été faute de variations suffisantes par rapport au scénario de référence ou d'informations disponibles pour les modéliser.

Les résultats calculés dans cette analyse utilisent les solutions optimales pour chaque stratégie proposées par le modèle NATEM. Une comparaison entre le scénario implémentant la stratégie et le scénario de référence a été faite pour différents horizons temporels (2020, 2030, 2040 et 2050). Une approche différentielle est utilisée pour déterminer les processus à inclure dans les frontières du système analysé. Les résultats du modèle NATEM pour le scénario de référence sont soustraits à ceux pour le scénario intégrant la stratégie de circularité. Seuls les processus affichant une différence sont retenus. Par conséquent, toutes les activités affichant un différentiel nul sont identiques pour les deux scénarios et sont exclues des frontières des systèmes puisque leurs contributions s'annulent dans la comparaison.

Les résultats présentés permettent uniquement d'expliquer les différences entre les scénarios comparés, sans avoir la prétention de toujours pouvoir expliquer en détail leur provenance, dans le but de déterminer s'il y a des risques de déplacement d'impact associés à la décision d'implémenter la stratégie de circularité. Il n'est donc pas possible à partir des profils environnementaux partiels obtenus d'identifier les points chauds du cycle de vie de chaque scénario.

En général, les stratégies basées sur le recyclage montrent des potentiels de circularité intéressants, notamment pour le lithium et pour le cuivre, mais ne montrent pas des déplacements des impacts significatifs. Pour l'indicateur *Épuisement de ressources minérales*, on observe une diminution des résultats d'indicateur nets pour les trois stratégies et des résultats variables pour les quatre autres indicateurs, avec une forte influence sur les résultats des variations des échanges (importations et exportations) avec d'autres régions.

Les stratégies autour du secteur des transports (autopartage et utilisation de matériaux plus légers) ne montrent pas un aussi bon potentiel de circularité, tel que calculé par le modèle technico-économique. Par contre, l'augmentation du taux d'utilisation des véhicules et la diminution de leur consommation d'énergie engendrent des bénéfices environnementaux importants associés à l'implémentation des stratégies.

La stratégie de stockage d'énergie avec des batteries montre des potentiels de circularité intéressants, mais une augmentation des résultats nets pour l'indicateur *Épuisement de ressources minérales* due à l'augmentation de la production d'électricité décentralisée au moyen de panneaux photovoltaïques. Des risques de déplacement d'impact sont également indiqués pour les autres indicateurs dus aux effets indirects modélisés par le modèle NATEM.

Les résultats de cette analyse pourront être utilisés en combinaison avec les résultats des autres étapes du projet pour mettre en perspective la convenance de chaque stratégie de circularité parmi celles sélectionnées. Tel que mentionné précédemment, les résultats de cette analyse ne doivent pas être

interprétés comme des valeurs absolues, mais comme des risques potentiels de déplacement d'impact issus de l'implémentation des stratégies.

L'utilisation des résultats doit tenir compte des limites de l'étude, notamment la contribution des conséquences indirectes des décisions modélisées dans le modèle NATEM face aux conséquences des stratégies de circularité. Les incertitudes liées aux modèles utilisés (NATEM, les données d'inventaire de cycle de vie, l'évaluation des impacts environnementaux) sont aussi une limite de l'étude.

6 RÉFÉRENCES

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.

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

ISO (2006a). *ISO 14040 : Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre*. Organisation internationale de normalisation, 24 pages.

ISO (2006 b). *ISO 14044 : Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices*. Organisation internationale de normalisation, 56 pages.

VAILLANCOURT, K. ; BAHN, O. ; AOUN, J. ; IBRAHIM, N. ; LACAZE, T. ; BAPTISTE, P. ; MARGNI, M. ; MOUSSEAU, N. ; SAVADOGO, O. ; SIMON, R. (2017). *Métaux et économie circulaire au Québec - Rapport de l'étape 3.2 : Analyse technico-économique des stratégies de circularité*.

MDELCC (2016). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2014 et leur évolution depuis 1990, 2016, 32 pages*. Disponible : <http://www.mdelcc.gouv.qc.ca/changements/ges/2014/Inventaire1990-2014.pdf>

ANNEXE A - RÉSULTATS

Voir le fichier Excel « Annexe_A_Résultats par stratégie_02-03-2018 » joint avec ce rapport.