Ernst & Young s.r.l./S.E.N.C.R.L.
Ernst & Young LLP
800, boul. René-Lévesque Ouest
Bureau 1900
Montréal (Québec) H3B 1X9

Tél./Tel: +1 514 875 6060
Téléc./Fax: +1 514 879 2600
ey.com

Benjamin Crespy
Chef de la Direction
FerroQuébec inc.
32 rue Plante
Port-Cartier (Québec) G5B2W8
Canada

25 mars 2015

Objet: Rapport d'empreinte carbone sur le silicium métal

M. Crepsy,

Il nous fait plaisir de vous remettre le rapport d'empreinte carbone comparative du silicium métal qui sera produit à l'usine de Port-Cartier de FerroQuébec. Cette évaluation, réalisée en parallèle avec l'étude d'impact environnemental, a permis de valider l'existence de l'avantage environnemental du projet en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre (GES) sur le cycle de vie du silicium métal.

Tel que requis dans la norme ISO 14044 pour les études comparatives destinées à être divulguées au public, la revue critique du rapport d'empreinte carbone a été réalisée par un comité d'experts. Le processus de revue critique a été dirigé par le Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG).

Vous trouverez ci-joint le rapport d'empreinte carbone. Le rapport de revue critique est également disponible en annexe.

Nous vous prions d'agréer nos salutations les meilleures.

Ernst & Young s.r.l./S.E.N.C.R.L.

Thibaut Millet
Associé délégué, Changements climatiques et développement durable

FerroQuébec Inc.

Empreinte carbone du silicium métal

Usine de Port-Cartier

Rapport d'empreinte carbone

25 mars 2015

Travailler ensemble
pour un monde meilleur

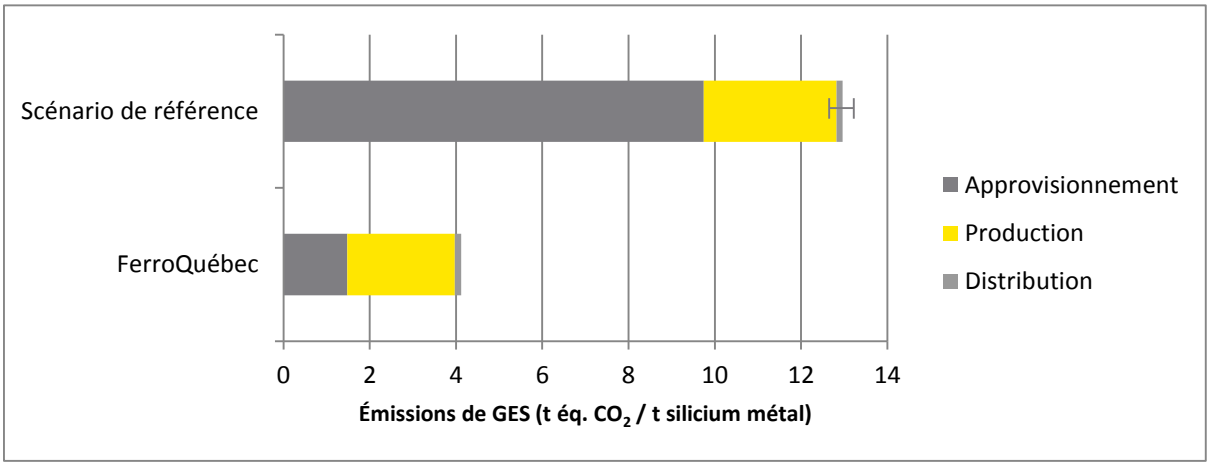
Sommaire exécutif

Dans le cadre de son projet d'usine à Port-Cartier (Québec), FerroQuébec a entrepris l'évaluation de l'empreinte carbone du silicium métal sur son cycle de vie. Cette évaluation est réalisée en parallèle avec l'étude d'impact environnemental exigée par la réglementation québécoise. Les émissions potentielles de gaz à effet de serre (GES) sur le cycle de vie de deux produits différents sont ainsi comparées: le silicium métal de FerroQuébec et le silicium de référence. Les émissions de GES de ces deux produits sont évaluées selon la norme ISO 14044, la spécification technique ISO 14067 et le *GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*.

Le silicium métal sert d'intrant dans la fabrication de différents produits, soit principalement les alliages d'aluminium, les silicones et le silicium polycristallin, lui-même utilisé pour produire les cellules photovoltaïques. Le silicium métal qui sera produit par FerroQuébec aura une teneur d'au moins 99,0% en silicium. Les phases d'utilisation du silicium métal et de fin de vie sont supposées identiques pour les deux scénarios comparés et sont par conséquent exclues des frontières de l'analyse. Les étapes du cycle de vie inclues dans l'analyse comparative sont donc du « berceau à l'entrepôt », soit: l'extraction et la transformation des matières premières, la production de silicium et le transport vers les entrepôts régionaux des distributeurs ou des clients.

Cette étude a pour principal objectif de comparer l'empreinte carbone du silicium métal de FerroQuébec à celle du silicium métal actuellement disponible sur le marché visé par FerroQuébec. Pour le scénario FerroQuébec, l'empreinte carbone du silicium métal est calculée pour l'année 2016 sur la base des données de conception de l'usine, en supposant que celle-ci fonctionne à capacité nominale (100,000 tonnes métriques de silicium métal par année). FerroQuébec prévoit distribuer sa production au Canada, aux États-Unis et au Moyen-Orient. Dans le scénario de référence, c'est-à-dire en l'absence de production de FerroQuébec, l'approvisionnement futur (2016) de chacune de ces régions est estimé en fonction de la production domestique et des pays d'où est actuellement importé le silicium métal. Dans le scénario de référence, l'approvisionnement en silicium métal de ces régions reposerait ainsi à la fois sur la production domestique et les importations des principaux exportateurs de silicium métal (Brésil, Afrique du Sud et Asie du Sud-Est).

Les résultats de l'empreinte carbone sont modélisés et exprimés en tonnes métriques d'équivalent CO_2 (éq. CO_2) selon les plus récents potentiels de réchauffement planétaire (PRP) publiés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Par tonne de silicium métal, les émissions de GES « du berceau à l'entrepôt » sont estimées respectivement à 4,1 t éq. CO_2 pour le scénario FerroQuébec et à 13,0 t éq. CO_2 pour la moyenne des deux variantes du scénario de référence considérées dans l'étude. Les résultats sont présentés par étape du cycle de vie dans la figure ci-dessous. La barre d'incertitude représente la différence entre les deux scénarios de référence.



Les émissions de GES du « berceau à l'entrepôt » du silicium métal de FerroQuébec sont environ 69% inférieures à celles du scénario de référence. Trois principaux facteurs expliquent cette différence:

- La faible empreinte carbone de l'électricité produite au Québec, soit de l'hydroélectricité à forte majorité.
- Le remplacement d'une partie du charbon, agent réducteur couramment utilisé dans le processus de fabrication du silicium métal, par du charbon de bois produit sur site.
- Les faibles émissions de GES associées à la production de charbon de bois par pyrolyse, comparativement à la production par fours conventionnels (Brésil, Afrique du Sud, Thaïlande).

Une revue critique dirigée par le Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG) a été réalisée par un comité d'experts indépendants. Le comité de revue est arrivé à la conclusion que les méthodes et données utilisées rencontrent les exigences prévues dans les normes ISO 14040 et ISO 14044 et que le rapport d'étude est transparent et cohérent.

Table des matières

1. Aspects généraux 1
   1.1 Contexte de l'étude 1
   1.2 Normes et lignes directrices 1
   1.3 Processus de fabrication du silicium métal 2
   1.4 Revue de littérature sur l'empreinte carbone du silicium métal 3
2. Objectifs de l'étude 5
   2.1 Raisons conduisant à réaliser l'étude 5
   2.2 Applications envisagées 5
   2.3 Public concerné 5
   2.4 Limitations 6
3. Champ de l'étude 7
   3.1 Fonction, unité fonctionnelle et flux de référence 7
   3.2 Frontières du système et description du système de produits 8
   3.3 Critères de coupure 10
   3.4 Scenario FerroQuébec et scenario de référence 10
   3.5 Principes et règles d'affectation 12
4. Analyse de l'inventaire 14
   4.1 Procédure de collecte des données 14
   4.2 Description qualitative des processus et sources des données 14
   4.3 Modes opératoires de calcul 15
   4.4 Description quantitative des principaux processus 15
   4.5 Qualité des données 24
5. Évaluation des impacts sur les changements climatiques 30
6. Interprétation 33
   6.1 Analyse de contribution 33
   6.2 Analyse d'incertitude 34
7. Revue critique 39
8. Références 40

Annexe A – Données d'activité et facteurs d'émission 44

Annexe B – Description des routes de distribution 55

Annexe C – Changement d'utilisation des terres 58

Annexe D – Rapport de revue critique 61

Ce rapport a été préparé pour FerroQuébec inc. Notre rapport ne considère pas d'éventuels enjeux reliés à son utilisation par des tierces parties. Toute tierce partie qui décidait d'utiliser ce rapport le ferait entièrement à ses propres risques. EY décline toute responsabilité liée à l'utilisation de ce rapport par des tiers.

© 2015 Ernst & Young s.r.l. / S.E.N.C.R.L.
Tous droits réservés.

Liste des figures

Figure 1.1 - Schéma simplifié du procédé de fabrication du silicium métal de FerroQuébec 2
Figure 1.2 - Schéma simplifié du procédé de fabrication du silicium métal de FerroQuébec 3
Figure 3.1 - Frontières du système 8
Figure 3.2 – Contribution des usines au scénario FerroQuébec et au scénario de référence..... 12
Figure 5.1 – Contribution des étapes du cycle de vie à l'empreinte carbone 31

Liste des tableaux

Tableau 3.1 – Spécifications du silicium métal de FerroQuébec 7
Tableau 3.2 – Capacité de production prévue pour l'usine de Port-Cartier 10
Tableau 3.3 – Projections du volume de silicium métal distribué par zone géographique 10
Tableau 3.4 – Estimation de l'approvisionnement actuel en silicium métal des marchés visés 10
Tableau 3.5 – Approvisionnement projeté (2016) en silicium métal des futurs clients de FerroQuébec 11
Tableau 4.1 – Sources de données pour les processus significatifs 14
Tableau 4.2 – Répartition des produits et intrants pour les usines de silicium métal 16
Tableau 4.3 – Propriétés des agents réducteurs 18
Tableau 4.4 – Calcul des émissions sur site pour l'usine FerroQuébec 19
Tableau 4.5 – Affectation économique pour le processus de fabrication de silicium métal 19
Tableau 4.6 – Mélange énergétique des pays et régions considérées dans l'étude 20
Tableau 4.7 – Changement d'utilisation des terres 21
Tableau 4.8 – Émissions dues au changement d'utilisation des terres 22
Tableau 4.9 – Facteurs d'affectation pour les résidus de bois québécois 23
Tableau 4.10 – Routes de distribution pour le scénario FerroQuébec 24
Tableau 4.11 – Routes de distribution pour le scénario de référence 24
Tableau 4.12 – Critères de qualité des données 25
Tableau 4.13 – Matrice d'évaluation de la qualité des données 25
Tableau 4.14 – Qualité des données pour le scénario FerroQuébec 26
Tableau 4.15 – Évaluation des critères de qualité des données pour le scénario FerroQuébec 27
Tableau 4.16 – Qualité des données pour le scénario de référence 27
Tableau 4.17 – Qualité des données pour le scénario de référence 28
Tableau 5.1 – Empreinte carbone pour le scénario FerroQuébec et les scénarios de référence 30
Tableau 5.2 – Empreinte carbone par étape du cycle de vie 30
Tableau 5.3 – Empreinte carbone par type de GES et étape du cycle de vie 31
Tableau 5.4 – Empreinte carbone du silicium métal disponible par région 32
Tableau 6.1 – Analyse de contribution pour le scénario FerroQuébec 33
Tableau 6.2 – Analyse de contribution pour le scénario de référence 33
Tableau 6.3 – Types d'incertitude 34
Tableau 6.4 – Analyse de scénario sur le marché desservi 35
Tableau 6.5 – Analyse de scénario sur la procédure d'affectation pour la production de silicium métal 36
Tableau 6.6 – Analyse de scénario sur la procédure d'affectation pour la production de silicium métal 36
Tableau 6.7 – Analyse de scénario sur la provenance du silicium métal aux États-Unis et en Chine..... 37
Tableau 6.8 – PRP des principaux GES 37
Tableau 6.9 – Analyse de scénario sur les PRP utilisés 37
Tableau 7.1 – Membres du comité de revue critique 39

1. Aspects généraux

1.1 Contexte de l'étude

FerroQuébec inc. (ci-dessous « FerroQuébec ») souhaite évaluer l'empreinte carbone sur le cycle de vie du silicium métal qui sera produit à son usine de Port-Cartier (Québec). Le silicium métal sert d'intrant dans la fabrication de différents produits (p. ex. alliages d'aluminium, silicones, cellules photovoltaïques). L'évaluation est réalisée dans le cadre de l'étude d'impact environnemental pour valider l'existence d'un avantage environnemental du projet en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre (GES) sur le cycle de vie.

Cette étude a pour objectif :

- D'évaluer l'empreinte carbone du silicium métal qui sera produit à l'usine de Port-Cartier (« scénario FerroQuébec »).
- De comparer cette empreinte carbone à celle du silicium métal actuellement disponible sur le marché visé par FerroQuébec, soit principalement le marché nord-américain (« scénario de référence »).

Cette étude est prospective dans la mesure où le démarrage de l'usine de Port-Cartier est prévu en 2016. L'empreinte carbone du silicium métal selon les deux scénarios est calculée sur la base du modèle de distribution anticipé par FerroQuébec pour les premières années d'opération de l'usine. Par conséquent, les émissions de GES et leur impact sur le réchauffement planétaire présentés sont potentiels et non réels. Il s'agit donc d'expressions relatives (à l'unité fonctionnelle notamment) qui ne permettent pas de prédire les impacts finaux ou le risque sur les milieux récepteurs et le dépassement des normes ou marges de sécurité.

L'évaluation de l'empreinte carbone a été réalisée par EY pour FerroQuébec, qui agit à titre de commanditaire de l'étude.

1.2 Normes et lignes directrices

L'étude a été réalisée en conformité avec les normes :

- ISO 14040, Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre (ISO, 2006a).
- ISO 14044, Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices (ISO, 2006b).

EY s'appuit également sur les bases méthodologiques présentées dans le *GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard* (ci-dessous "GHG Protocol Product Standard") (WRI et WBCSD, 2011) et la spécification technique ISO 14067 *Gaz à effet de serre - Empreinte carbone des produits - Exigences et lignes directrices pour la quantification et la communication* (ISO, 2013), ces documents portant spécifiquement sur les empreintes carbone de produits.

En l'absence de règle de catégories de produits (RCP) ou de ligne directrice sectorielle développée en conformité avec les normes ISO 14025 ou ISO 14067 et pertinente pour le produit étudié, l'empreinte carbone du silicium métal a été déterminée uniquement sur les bases méthodologiques présentées ci-

Préliminaire

dessus.

1.3 Processus de fabrication du silicium métal

La production de silicium métal repose sur la réduction du dioxyde de silicium (SiO_2) contenu dans le quartz par un agent réducteur (p. ex. charbon, coke de pétrole, charbon de bois, copeaux de bois). FerroQuébec prévoit utiliser comme agent réducteur une combinaison de charbon de bois, de houille (un type de charbon[1]) et de copeaux de bois produit par pyrolyse. Le charbon de bois sera produit par carbonisation de copeaux de bois. Le processus permettra également de générer de l'électricité par cogénération à partir des fines de bois (générées lors du déchiquetage des copeaux) et des gaz de pyrolyse. La chaleur récupérée est réutilisée dans les fours de carbonisation.

Tel que présenté à la Figure 1.1, le quartz est dans un premier temps criblé et lavé, puis mélangé avec les agents réducteurs (p. ex. charbon, charbon de bois, coke de pétrole, copeaux moyens ou plaquettes de bois) et du calcaire avant d'être introduit dans les fours de réduction. L'eau utilisée pour le lavage du quartz est traitée et les fines de quartz sont récupérées sans avoir subi de transformation chimique pour être vendu en tant que coproduit. Les gaz générés pendant la réduction sont captés, dépoussiérés et le dioxyde de silicium est habituellement récupéré sous forme de fumée de silice, un des principaux coproduits.

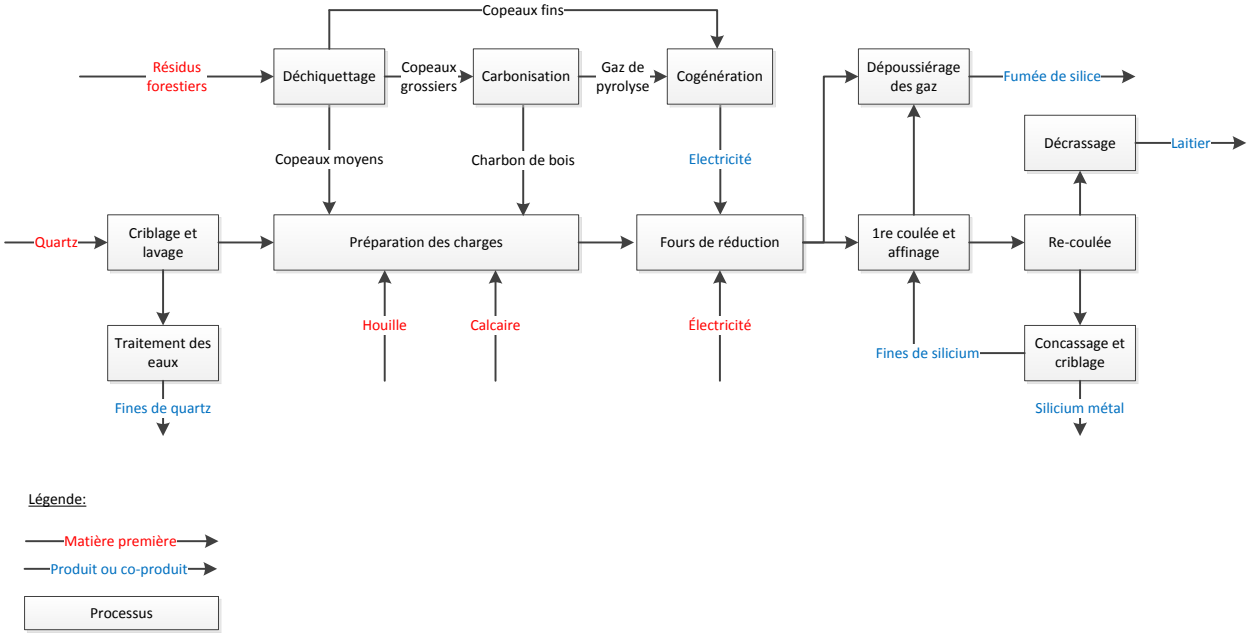


Figure 1.1 - Schéma simplifié du procédé de fabrication du silicium métal de FerroQuébec

[1] La houille est un type de charbon dont les caractéristiques la distinguent d'autres types comme la lignite ou l'anthracite. Dans ce rapport, le terme charbon englobe autant la houille que les autres types.

Le silicium métal à la sortie des fours est acheminé vers la station d'injection pour une première coulée lors de l'étape de l'affinage. L'objectif de cette étape est d'éliminer par oxydation l'aluminium et le calcium présent dans le silicium métal. Une fois oxydés, ces impuretés passent du métal vers le laitier (crasses) et peuvent ainsi facilement être éliminés lors de la recoulée en lingot. Le laitier, qui constitue l'autre principal coproduit du processus, est ainsi récupéré lors du décrassage suite à la recoulée. Les lingots de silicium métal sont concassés et criblés lors du conditionnement afin d'obtenir le produit final à la granulométrie souhaitée. Les fines de silicium générées lors du conditionnement sont captées par des dépoussiéreurs pour être refondues et recoulées en lingots. Un four de réduction typique est représenté à la Figure 1.2.

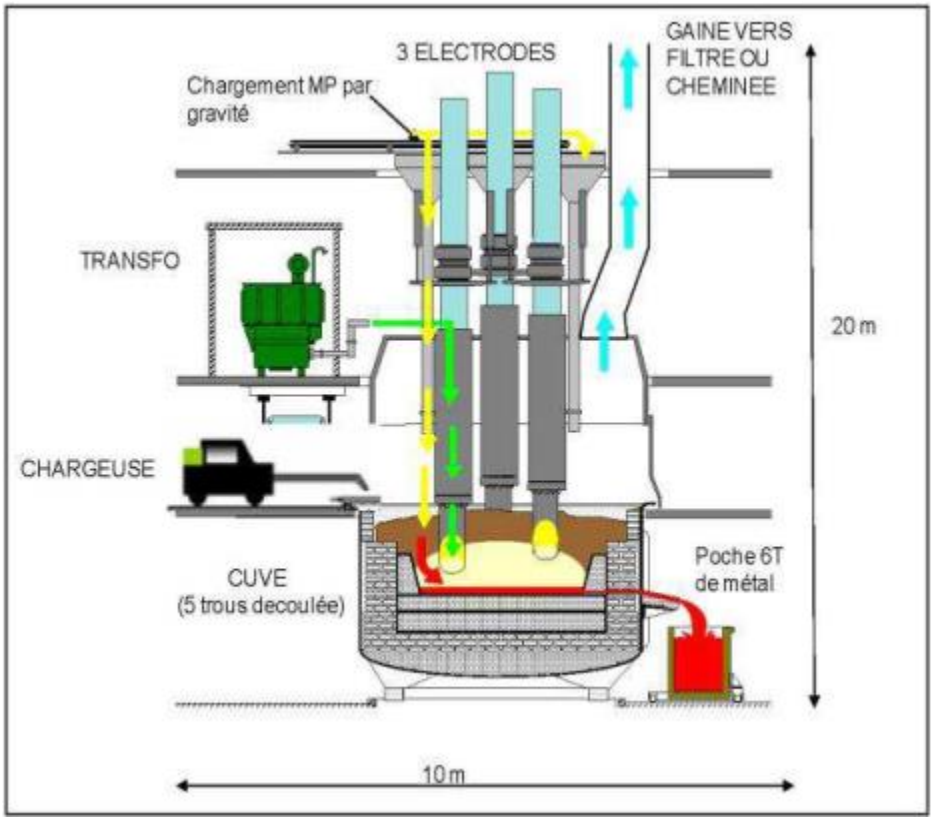


Figure 1.2 - Schéma simplifié du procédé de fabrication du silicium métal de FerroQuébec

1.4 Revue de littérature sur l'empreinte carbone du silicium métal

Une revue des études publiées concernant la production de silicium métal a été réalisée afin de déterminer des valeurs typiques de l'empreinte carbone de ce produit et identifier les étapes du cycle de vie les plus émettrices de GES.

Sur la base de cette revue, il apparaît que la quasi-totalité des analyses de cycle de vie ou d'empreinte carbone se concentre sur la production de silicium de très haute pureté (de qualité solaire, soit au

minimum 99,999 9% ou 6N[2] de Si ou de qualité électronique, soit 99,999 999 9% ou 9N de Si). Ces types de silicium étant parfois fabriqués à partir de silicium métal, les études recensées (Schmidt *et al.*, 2012; Stylos *et al*., 2014; Hsu *et al*., 2012) utilisent les valeurs de bases de données commerciales (ecoinvent ou eco-indicator) pour modéliser la fabrication du silicium métal.

Les analyses de cycle de vie comparatives entre différents procédés de fabrication du silicium de qualité solaire ou électronique, ou même de génération d'électricité à partir de panneaux photovoltaïques (Peng *et al*., 2013, De Wild-Schloten, 2013) ne couvrent pas la production du silicium métal dans le périmètre de l'étude puisque celle-ci est considérée comme identique pour les différents scénarios.

Par conséquent, aucune étude détaillée sur le processus de fabrication du silicium métal ne permettant d'identifier les principaux processus contributeurs à son empreinte carbone n'a été recensée.

[2] Le terme 6N ou 9N fait référence au nombre de neuf dans la teneur en silicium. Par exemple, 6N correspond à 99,999 9%.

2. Objectifs de l'étude

L'usine de FerroQuébec actuellement à l'étude vise à fabriquer du silicium métal. Au cours de la fabrication de silicium métal, deux principaux coproduits (fumée de silice et laitier) sont générés, récupérés et vendus. Cette étude est centrée sur l'empreinte carbone du produit principal. La récupération des coproduits est toutefois prise en compte dans l'empreinte carbone du silicium métal et une partie des impacts dûs au processus de fabrication leur est affectée (voir section 3.5).

Les produits étudiés sont :

- Silicium métal produit à Port-Cartier dès l'ouverture de l'usine en 2016.
- Silicium métal de référence, disponible en 2016 sur le marché visé par FerroQuébec.

L'inventaire de cycle de vie est développé selon une approche attributionelle, tel que recommandé dans le *GHG Protocol Product Standard* pour les empreintes carbone de produits. Cette approche repose sur l'utilisation de données primaires collectées auprès de FerroQuébec ou de données sectorielles représentatives.

2.1 Raisons conduisant à réaliser l'étude

FerroQuébec souhaite évaluer l'empreinte carbone du silicium métal qui sera produit à son usine de Port-Cartier (Québec). Cette évaluation est réalisée dans le cadre de l'étude d'impact environnemental afin de confirmer l'existence de certains avantages environnementaux du projet. Cet argument est d'autant plus important que l'établissement de FerroQuébec sera un important émetteur industriel québécois de GES suite à son entrée en fonction.

Dans ce contexte, FerroQuébec souhaite comparer cette empreinte carbone à celle du silicium métal actuellement disponible sur les marchés visés par FerroQuébec. L'entreprise prévoit vendre sa production le marché des États-Unis et du Canada, ainsi qu'au Moyen-Orient et en Asie.

2.2 Applications envisagées

Les résultats permettront à FerroQuébec d'améliorer sa compréhension des potentiels impacts environnementaux associés au cycle de vie d'une tonne de silicium métal et de confirmer les gains environnementaux par rapport au silicium métal produit ailleurs au monde. Les résultats seront également divulgués au public dans le cadre de la procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement du projet.

2.3 Public concerné

L'étude est préparée pour fins internes (pour FerroQuébec), mais également pour appuyer des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public, notamment dans le cadre de l'étude d'impact environnemental et de la séance d'information menée par le Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE).

2.4 Limitations

Les résultats présentés dans ce rapport sont uniquement basés sur les hypothèses et pratiques industrielles de FerroQuébec. Le scénario de référence a été conçu spécifiquement pour être comparé au modèle prévu de production et de distribution de FerroQuébec. Les résultats ne sont pas applicables à d'autres entreprises ou d'autres produits. Ainsi, les résultats des scénarios FerroQuébec et de référence ne pourront pas être utilisés par une tierce partie pour des comparaisons qui ne sont pas couvertes par le périmètre de cette étude. Même pour des produits similaires, les différences dans les processus et qualité des données pourraient conduire à des interprétations erronées.

Seuls les impacts potentiels sur le réchauffement planétaire sont couverts dans cette étude, de manière cohérente avec les objectifs de l'étude. Par conséquent, les comparaisons effectuées portent uniquement sur cette catégorie d'impact et aucune conclusion n'est tirée quant à la supériorité environnementale globale d'un scénario sur un autre.

Les procédures appliquées ne constituent pas un audit ou une vérification selon les normes généralement acceptées. Nous n'avons pas audité ni vérifié les informations qui nous ont été fournies pour réaliser ce mandat.

Les événements futurs étant imprédictibles, les résultats présentés dans cette étude ne s'appliquent que pour la période couverte et selon les hypothèses définies dans ce rapport.

3. Champ de l'étude

3.1 Fonction, unité fonctionnelle et flux de référence

Fonction

Les différentes variantes de produits (ou systèmes) sont analysées selon leur fonction. Le silicium métal se présente sous la forme de morceaux inertes gris/noir et brillants de taille variable (de la poudre jusqu'à des morceaux de 10 cm). Le silicium métal produit par FerroQuébec sera concassé, broyé, puis conditionné avant d'être expédié. Selon la classification de FerroAtlanticà, le silicium métal sera de type *High grade* (sous forme de granule) ou de type *SILMIL* (sous forme de poudre). Les produits peuvent être livrés en vrac (*High grade*) ou dans des sacs (*High grade et SILMIL*). Les spécifications du produit sont présentées au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 – Spécifications du silicium métal de FerroQuébec

Élément chimique	Unité	Teneurs *High Grade*	Teneurs *SILMIL*
Si	% massique	Min. 99,0	Min 99,0
Fe	% massique	0,2 – 0,3	0,1 – 0,4
Ca	% massique	0,01 – 0,10	0,02 – 0,05
Al	% massique	n.a.	0,05 – 0,4
Ti	% massique	Max. 0,035	0,01 – 0,05
B	ppm	n.a.	20 – 70
P	ppm	Max. 30	20 - 70

Le silicium métal est un produit intermédiaire utilisé dans la fabrication d'autres produits. Le silicium métal produit par FerroQuébec sera destiné à trois marchés principaux :

- Le marché de l'aluminium : principalement destiné au secteur automobile.
- Le marché photovoltaïque pour la fabrication de panneaux solaires.
- Le marché des silicones : principalement destiné au secteur de la construction (matériaux d'isolation).

La portion relative de silicium métal utilisé pour chacune de ces applications n'est pas connue avec précision. Toutefois, elle est considérée comme identique dans les scénarios FerroQuébec et de référence. Ainsi, l'inventaire de cycle de vie réalisé est de type « berceau à l'entrepôt» (*cradle to gate*). Autrement dit, les étapes considérées dans le périmètre de cette étude consistent en l'extraction de matières premières, l'acheminement des matières premières à l'usine, la fabrication de silicium métal et la distribution du silicium métal aux clients industriels.

Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle, qui est la référence quantitative utilisée pour le calcul d'inventaire et l'analyse d'impact, se définie comme suit :

"la production de 1 tonne métrique de silicium métal (contenant un minimum de 99,0% de Si) et transport à un entrepôt régional dans chacun des marchés ciblés par FerroQuébec en 2016"

Flux de référence

Comme l'étude est de type « berceau à l'entrepôt », le flux de référence coïncide avec l'unité fonctionnelle, soit une 1 tonne métrique de silicium métal, tel que recommandé dans WRI et WBSCD (2011).

3.2 Frontières du système et description du système de produits

Frontières

Poser les frontières du système permet l'identification des différentes étapes, processus et flux considérés dans l'ACV. Elles incluent les activités indispensables pour fournir la fonction étudiée. Aux prochains paragraphes sont décrites les frontières du système général, ainsi que les considérations géographiques. À la Figure 3.1 est illustré le cycle de vie du silicium métal (production des matières premières à la fin de vie).

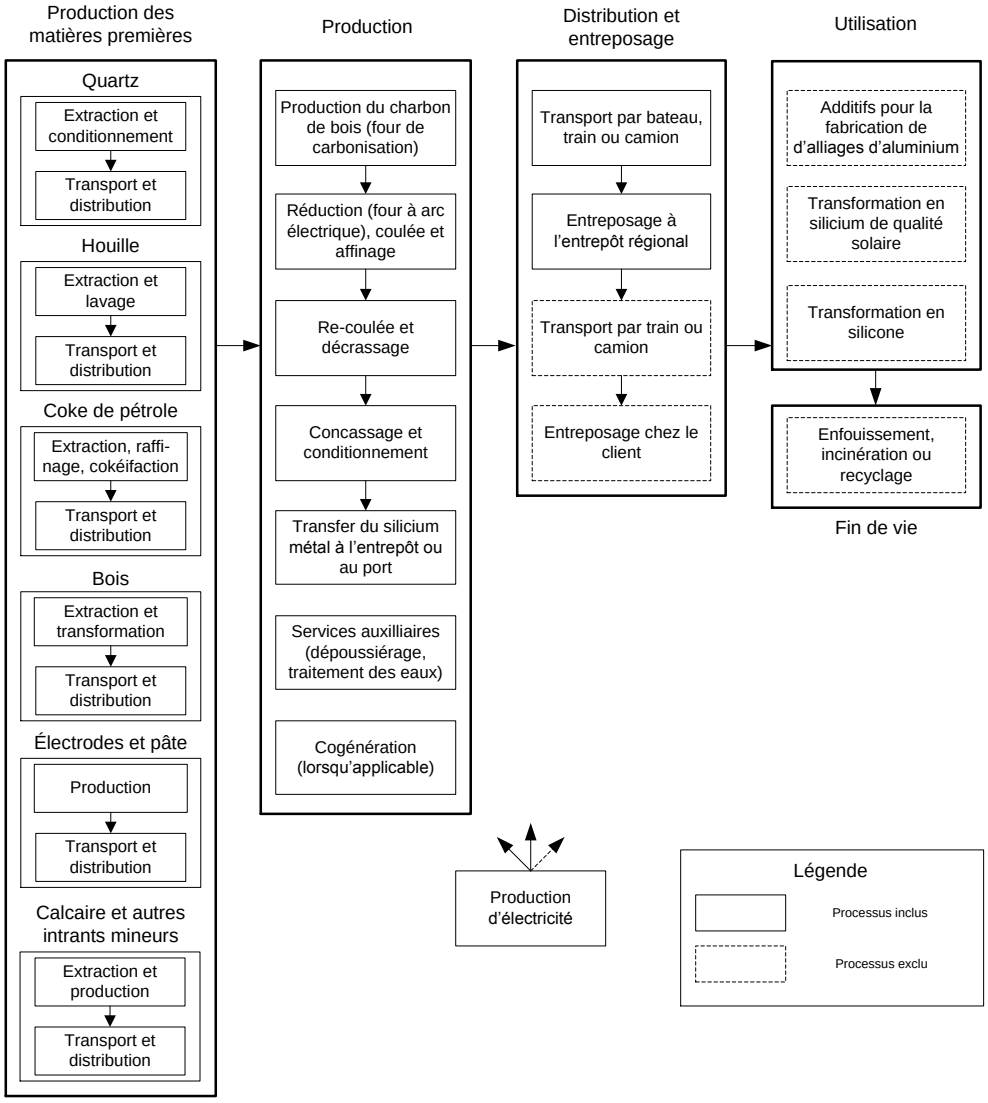


Figure 3.1 - Frontières du système

L'étape de production des matières premières comporte la production de quartz (silice), charbon, coke de pétrole, bois, électricité, électrodes et autres intrants mineurs. Les processus considérés pour les principales matières premières sont les suivants :

- Quartz : Extraction de la mine, concassage, lavage, tamisage.
- Charbon : Extraction de la mine, lavage, concassage, tamisage, séchage.
- Coke de pétrole : Extraction et raffinage du pétrole brut, traitement des résidus par cokéfaction.
- Bois : Opérations forestières et transport direct à l'usine de silicium métal, ou à la scierie si des résidus de la transformation du bois sont utilisés.
- Électricité : Production, transport et distribution de l'électricité consommée.
- Électrodes de graphite: Production des ingrédients, mélange, mise en forme, cuisson et usinage.
- Pâte Söderberg : Production des ingrédients et mélange.

Les principales matières premières arrivent en vrac (sauf en ce qui concerne les électrodes et la pâte Söderberg), après transport par train, bateau ou camion. L'usine de FerroQuébec où seront acheminées les matières premières sera localisée à Port-Cartier. Le transport pour l'approvisionnement des matières premières est modélisé selon l'emplacement connu ou le plus probable des fournisseurs.

L'étape de production comporte trois principales sous-étapes :

- La réduction de la silice.
- La coulée du silicium, l'affinage et la recoulée.
- Le concassage, broyage et conditionnement.

Les résidus forestiers qui arrivent à l'usine sont broyées en copeaux. La majorité des copeaux sont transformés au charbon de bois dans le four de carbonisation ou utilisés directement dans le procédé de réduction. Les résidus de broyage sont utilisés dans la chaudière de cogénération.

L'étape de distribution décrit le transport du produit fini depuis l'usine de production à Port-Cartier, jusqu'à un entrepôt régional.

Les étapes d'utilisation et de fin de vie décrivent l'utilisation du produit fini et la gestion des déchets en fin de vie. Le silicium métal est un produit intermédiaire utilisé dans la fabrication d'autres produits (p. ex. alliages d'aluminium, silicium de grade solaire, silicones). Le silicium métal est utilisé de la même façon quelle que soit sa provenance (usine de Port-Cartier ou une autre). Par ailleurs, la gestion de la fin de vie du silicium métal dépend de la gestion de fin de vie des produits finis (aluminium, panneaux solaires, silicones). Cette dernière ne dépend pas de l'origine du silicium métal. Ainsi, les étapes d'utilisation et de fin de vie du silicium métal ne dépendent pas de l'origine du silicium métal. Les inventaires associés sont donc les mêmes pour le scénario de référence et celui de FerroQuébec. Ces deux étapes sont donc exclues des frontières du système.

Les éléments suivants sont donc exclus des frontières du système :

- L'emballage des matières premières (transport en vrac ou en grande quantité).
- La construction des usines de silicium métal (considérée identique pour toutes les usines).
- Les étapes d'utilisation et de fin de vie.
- Le marketing, l'administration et autres activités corporatives.

3.3 Critères de coupure

Aucun critère d'inclusion ou de coupure n'a été appliqué pour la présente étude et tous les processus inclus dans les frontières du système ont été intégrés au modèle de quantification.

3.4 Scenario FerroQuébec et scenario de référence

Le scenario FerroQuébec considère la production du silicium métal à l'usine de Port-Cartier, ainsi que son transport vers les entrepôts régionaux. La capacité de production de l'usine prévue est indiquée au Tableau 3.2.

Tableau 3.2 – Capacité de production prévue pour l'usine de Port-Cartier

Produit et coproduits	Capacité de production (tonnes /an)
Silicium métal	100 000
Fumée de silice	40 000
Laitier	11 200

Sur la base de son plan d'affaires, FerroQuébec prévoit de vendre sa production selon les proportions au Tableau 3.3.

Tableau 3.3 – Projections du volume de silicium métal distribué par zone géographique

États-Unis	Canada	Moyen-Orient et Asie
50% à 85%	5% à 10%	10% à 40%

En ce moment les quantités qui seront vendues sur chacun des marchés ne sont pas connues avec exactitude, notamment car il y a des incertitudes par rapport aux conditions de marché qui prévaudront en 2016. Une analyse de sensibilité est effectuée à la section 6.2.2 pour évaluer la robustesse des conclusions selon différentes répartitions entre ces marchés.

Les clients potentiels localisés dans les marchés visés par FerroQuébec s'approvisionnent actuellement auprès de fournisseurs situés dans diverses régions (voir tableau 3.4).

Tableau 3.4 – Estimation de l'approvisionnement actuel en silicium métal des marchés visés

États-Unis		Canada		Moyen-Orient et Asie	
Pays / Région	%	Pays / Région	%	Pays	%
États-Unis	50%	Québec	49%	Chine	90%
Brésil	22%	Thaïlande	14%	Australie	5%
Afrique du Sud	10%	Brésil	10%	Thaïlande	5%
Australie	5%	France	9%		
Canada	5%	Norvège	4%		
Norvège	4%	États-Unis	4%		
Reste du monde	4%	Reste du monde	10%		

Les valeurs présentées pour le marché des États-Unis correspondent aux moyennes annuelles de 2011 à 2013 (U.S. Geological Survey, 2014; U.S. Department of Commerce, 2014). Les valeurs pour le

marché canadien sont basées sur les importations et la production domestique en 2013 et 2014 (Statistique Canada, 2014), en excluant la Chine, pour tenir compte du fait des tarifs anti-dumping imposés en 2013. En effet, les tarifs imposés depuis novembre 2013 sur le silicium métal chinois ont eu pour effet de freiner les importations en provenance de Chine au Canada. Ces tarifs sont en vigueur pour une période d'au moins 5 ans. Les valeurs pour le Moyen-Orient et de l'Asie sont les plus récentes communiquées lors de la Conférence ARABAL (Arab International Aluminium Conference) 2014.

À l'échelle mondiale, la production de silicium métal devrait probablement croître, portée par l'accroissement de la demande en énergie solaire photovoltaïque. Cette dernière entraîne un accroissement de la demande en silicium de qualité solaire qui implique à son tour une augmentation de la demande en silicium métal. Cette croissance de la production est essentiellement prévue dans les pays où l'accroissement de la demande est importante (Chine et États-Unis) et où le prix de l'électricité est bas (Québec, Norvège, France, Brésil) (CRU, 2013).

La répartition de la production de silicium métal entre les principaux pays producteurs au cours des prochaines années devrait être similaire à celle observée au cours des dernières années (CRU, 2013). Par conséquent, il est raisonnable de supposer qu'en 2016, les États-Unis, le Canada ainsi que le Moyen-Orient et l'Asie importeront leur silicium métal dans des proportions similaires à 2013 et 2014 et que leurs partenaires commerciaux resteront globalement les mêmes.

De manière plus spécifique, l'approvisionnement projeté des futurs clients de FerroQuébec situés aux États-Unis en silicium métal a été modélisé selon deux scénarios :

1. Selon la répartition actuelle des parts de marché (Tableau 3.4) avec de petits ajustements pour refléter la production accrue dans certaines régions, notamment aux États-Unis et en Thaïlande.
2. En supposant que les clients futurs de FerroQuébec aux États-Unis seront en priorité les clients qui importent actuellement leur silicium métal d'Afrique du Sud (plus longue distance pour atteindre l'Est des États-Unis) ou d'Australie (plus longue distance pour atteindre l'Ouest des États-Unis), dans la mesure où les coûts de transport pour ces provenances sont les plus élevés.

Tableau 3.5 – Approvisionnement projeté (2016) en silicium métal des futurs clients de FerroQuébec

États-Unis			Canada		Moyen-Orient et Asie	
Pays	Scénario 1	Scénario 2	Pays	%	Pays	%
États-Unis (US)	60%	42%	Canada (CAN)	50%	Chine (CN)	90%
Brésil (BR)	16%	11%	Thaïlande (TH)	18%	Australie (AUS)	5%
Afrique du Sud (RSA)	8%	26%	Brésil (BR)	11%	Thaïlande (TH)	5%
Australie (AUS)	4%	12%	France (FR)	11%		
Canada (CAN)	4%	3%	Norvège (NO)	5%		
Norvège (NO)	4%	3%	États-Unis (US)	5%		
Thaïlande (TH)	4%	3%				

Pour l'instant, il est difficile de savoir lequel des deux cas se concrétisera. Par conséquent, les deux cas sont considérés également probables et deux scénarios de référence seront modélisés pour tenir compte de cet éventail de possibilités.

La provenance du silicium métal de référence est illustrée à la Figure 3.2. Il s'agit d'un « mélange » de silicium métal produit par les usines de référence, réparti en premier lieu selon les marchés visés par FerroQuébec (États-Unis, Canada, Moyen-Orient et Asie), puis ensuite selon les régions qui approvisionneraient ces marchés au cours de l'année 2016, en l'absence de l'usine de FerroQuébec, selon les proportions au Tableau 3.4. Tel qu'illustré, le silicium métal de référence est composé à majorité de silicium métal provenant des États-Unis, de Chine, du Brésil et d'Afrique du Sud.

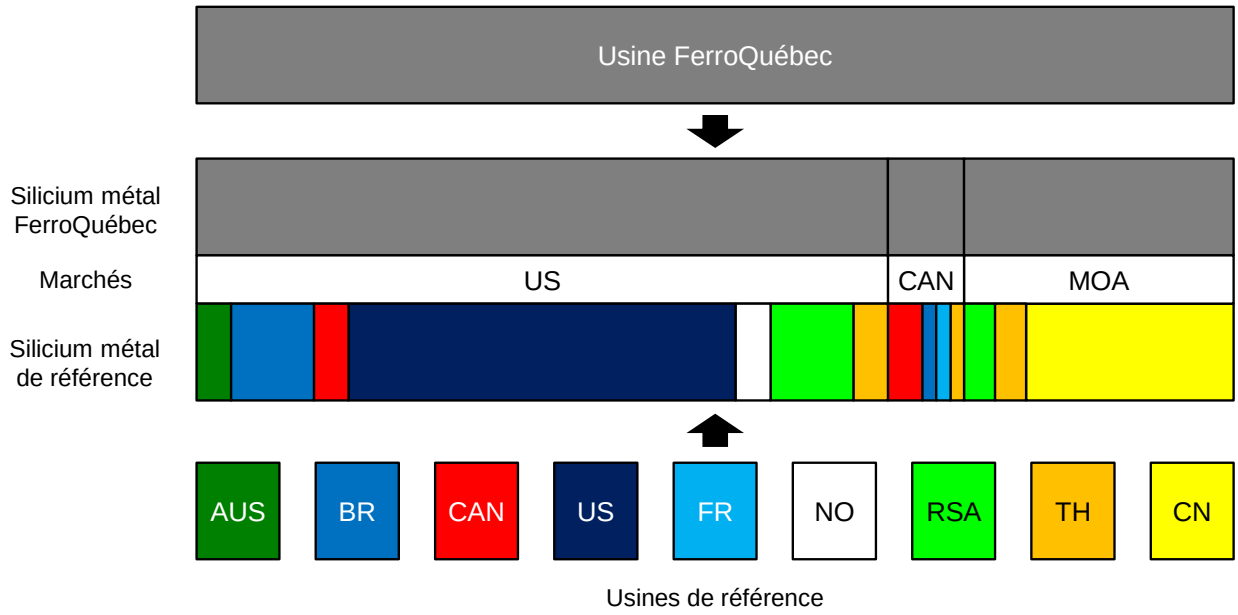


Figure 3.2 – Contribution des usines au scénario FerroQuébec et au scénario de référence

3.5 Principes et règles d'affectation

Il existe plusieurs façons d'affecter les entrants et les sortants d'un processus dans le cas où celui-ci génère des coproduits (ISO 14044, 2006b) :

- Par l'extension des frontières du système, en tenant compte de la substitution d'autres produits par les coproduits du système à l'étude.
- Sur la base d'une relation physique (massique, volumique, contenu énergétique, etc.)
- Sur une base économique, selon la valeur générée par le produits et les coproduits du système à l'étude.

Dans le cycle de vie du silicium métal, deux processus requièrent de procéder à une affectation :

- La production du silicium métal, qui génère deux principaux coproduits valorisables, soit la fumée de silice et le laitier.
- La production de copeaux de bois, dans le cas où ceux-ci sont des coproduits des opérations forestières ou de la transformation du bois en scierie.

Bien que le criblage du quartz en tout début de procédé génère des fines de quartz, un coproduit valorisé à l'externe, aucun impact n'y est affecté. Cette décision repose principalement sur le fait que le coproduit ne passe pas par les processus générant le plus d'émissions de GES. De plus, comme les

informations sur la génération de fines de quartz ne sont pas disponibles pour les usines de référence, il a été choisi de ne pas leur affecter d'impact, autant pour le scénario FerroQuébec que pour les scénarios de référence.

L'affectation des impacts dus à l'approvisionnement et à la production est réalisée selon la valeur économique du silicium métal et de chacun des coproduits, car aucune relation physique sous-jacente entre les entrants et les sortants ne peut être identifiée. De plus, l'intérêt de leur récupération repose avant tout sur leurs valeurs marchandes. Les valeurs des différents coproduits sur le marché utilisées pour procéder à l'affectation (communiquées par FerroAtlanticà) sont les suivantes :

- Silicium métal : entre 2700$US et 2900$US la tonne métrique.
- Fumée de silice : environ 250$US la tonne métrique.
- Laitier : environ 250$US la tonne métrique.

Les quantités de coproduits générées par tonne de silicium métal pour chacune des usines de même que les facteurs d'affectation économiques sont donnés à la section 4.4.1.

Tel que recommandé dans la norme ISO 14044 (ISO, 2006b) et la spécification technique ISO 14067 (ISO, 2013), l'affectation des entrants et sortants aux coproduits fait l'objet d'une analyse de sensibilité. La seconde approche envisagée est l'affectation basée sur l'extension des frontières du système, soit par la substitution de produits ayant une fonction équivalente par les coproduits. La fumée de silice se substitue typiquement au clinker dans la production de ciment et le laitier se substitue à d'autres sources d'oxyde de silicium (comme le quartz) dans divers procédés métallurgiques (p. ex. la fabrication d'acier et de magnésium). Cette analyse de sensibilité est présentée à la section 6.2.2.

Pour la production de copeaux de bois, l'affectation est également réalisée selon la valeur économique. Pour FerroQuébec, comme le processus québécois dans ecoinvent v3.1 (Weidema *et al.*, 2014) ne tenait pas compte de la récolte des résidus forestiers, les facteurs d'affectation ont été calculés sur la base des quantités de résidus et des valeurs disponibles dans les processus européens de récolte d'épinette. Le calcul des facteurs d'affectation pour les coproduits de l'exploitation forestière est présenté à la section 4.4.3.

4. Analyse de l'inventaire

4.1 Procédure de collecte des données

La réalisation d'un inventaire de cycle de vie requiert trois types de données :

- Des données sur les émissions directes déterminées par des mesures, des bilans de masse, des estimés de rendement théoriques ou d'autres méthodes similaires.
- Des données d'activité incluant les quantités de matières premières consommées, de produits finis et coproduits générés et d'autres données relatives aux procédés (ex. : consommation énergétique, distances parcourues).
- Des facteurs d'émission utilisés pour calculer les émissions de GES des activités (ex. : kg éq. CO_2 par kWh d'électricité ou par kg de matière première).

Selon la source des données, les données sont soit des données primaires, soit des données secondaires :

- Les données primaires sont spécifiques aux processus inclus dans les frontières du système pour les scénarios FerroQuébec et de référence. Elles sont collectées directement auprès de FerroQuébec, de ses fournisseurs ou dans d'autres sources pertinentes.
- Les données secondaires ne sont pas spécifiques aux processus étudiés et sont extraites de banques de données, de rapports d'industrie, de la littérature existante, etc.

4.2 Description qualitative des processus et sources des données

Les principales sources de données utilisées sont listées dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 – Sources de données pour les processus significatifs

Étapes	Sous-étape	Sources des données
Approvisionnement et prétraitement des matières premières	Extraction et distribution du quartz des fournisseurs vers l'usine	▸ FerroQuébec et scénario de référence : ecoinvent v3.1[1].
	Extraction des rondins ou des résidus forestiers et distribution des fournisseurs vers l'usine	▸ FerroQuébec : données du fournisseur sur la production de résidus forestiers et ecoinvent v3.1. ▸ Culture d'eucalyptus pour le scénario de référence (Brésil, Thaïlande, Afrique du Sud) : Bailis et al. (2013). ▸ Autres pays du scénario de référence (bois mou et bois dur): ecoinvent v3.1.
	Changement d'utilisation des terres dues à l'exploitation forestière	▸ Références gouvernementales ou d'organisations internationales sur l'aménagement des forêts, les surfaces récoltées et la déforestation. Voir la section 4.4.3 pour plus de détails.
	Production de charbon de bois	▸ FerroQuébec : étude d'impact environnemental. ▸ Production par fours conventionnels pour le scénario de référence (Brésil, Afrique du Sud, Thaïlande et Chine) : Bailis et al. (2013), Pennise et al. (2001). ▸ Production par pyrolyse pour le scénario de référence (Australie) : Szymkowski et Bultitude-Paull (1992).

Étapes	Sous-étape	Sources des données
	Extraction et distribution de la charbon des fournisseurs à l'usine	▸ FerroQuébec et scénario de référence : ecoinvent v3.1.
	Production et distribution des électrodes des fournisseurs à l'usine	▸ FerroQuébec et scénario de référence : ecoinvent v3.1.
	Génération et distribution de l'électricité	▸ FerroQuébec et scénario de référence : ecoinvent v3.1. Mélanges énergétiques régionaux ajustés tel que décrit à la section 4.4.2.
	Production et distribution des autres intrants mineurs.	▸ FerroQuébec et scénario de référence : ecoinvent v3.1.
Production	Production du silicium métal	▸ FerroQuébec : étude d'impact environnemental pour les données d'activité. ▸ Scénario de référence : rapports sectoriels sur les productions et rendements des usines de silicium métal dans le monde (CRU, 2013) et IPPC (2001) pour les données d'activité. ▸ FerroQuébec et scénario de référence : Réglementation québécoise pour les méthodes de calcul des émissions de GES et les facteurs d'émission (voir section 4.4.1). Émissions calculées à partir des données d'activité validées à l'aide des valeurs déclarées par les usines du Canada (Environnement Canada, 2014) et des États-Unis (USEPA, 2014a).
	Production de la fumée de silice (coproduit)	
	Production du laitier (coproduit)	
Distribution et entreposage de la production	Transport des produits finis de l'usine aux entrepôts régionaux	▸ FerroQuébec : distances calculées selon les canaux de distribution projetés. ▸ Scénario de référence : distances calculées entre la localisation des usines de silicium métal dans le monde (CRU, 2013) et la localisation approximative des entrepôts des distributeurs. ▸ Facteurs d'émissions pour le transport : ecoinvent v3.1.

Note 1 : la version de la banque de données ecoinvent v3.1 utilisée est « allocation, ecoinvent default », car le l'empreinte carbone réalisée est de type attributionelle.

4.3 Modes opératoires de calcul

Les données d'activités primaires et secondaires ainsi que les données primaires d'émissions sont compilées dans un chiffrier électronique. Ces données sont ensuite entrées dans le logiciel SimaPro (version 8.0) pour calculer l'inventaire sur le cycle de vie des deux scénarios ainsi que les résultats d'indicateurs d'impact sur le réchauffement planétaire.

4.4 Description quantitative des principaux processus

Les principaux processus abordés dans cette section sont la production de silicium métal (produits et intrants), la production d'électricité, la composition des agents réducteurs menant aux émissions de GES sur le site des usines, les opérations forestières et la distribution du silicium métal.

4.4.1 Production de silicium métal

La production et la consommation d'intrants des usines de silicium métal considérées dans la présente étude sont présentées au Tableau 4.2. Les sources de données sont spécifiées au Tableau 4.1, pour l'étude de production.

Tableau 4.2 – Répartition des produits et intrants pour les usines de silicium métal

Pays ou région	FQ	AUS	BR	CAN	CN	FR	NO	RSA	TH	US
Produits										
Silicium métal (t)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fumée de silice (t)	0,4	0,35	0,35	0,35	0,17[4]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Laitier (t)	0,11	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Intrants										
Quartz (t)	2,65	2,5	2,52	2,54	2,73	2,54	2,55	2,61	2,61	2,54
Charbon (t)	0,85	0,39	0	1,21	0,33	1,33	1,47	0,2	0	1,19
Coke de pétrole (t)	0	0	0	0	0,9	0,05	0	0,03	0,5	0
Électrodes (t)	0,016	0,08	0,1	0,11	0,1	0,018	0,1	0,02	0,1	0,09
Pâte Söderberg (t)	0,072	0	0	0	0	0,082	0	0,082	0	0
Bois - four à arc (t)	1,5[1]	0,98	0,5	2,54	0,23	1,64	1,70	1,69	0,52	2,54
Bois – charbon (t)	2,5[1]	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Charbon de bois (t)	0,55[2]	0,72	1,3	0	0,2	0	0	0,91	0,85	0
Calcaire (t)	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
Électricité (MWh)	12,0[3]	11,3	12,3	13,0	13,6	11,6	12,2	12,3	12,0	13,0

[1] Un total de 4,4 t de bois est consommé sur site, en incluant le bois nécessaire à la fabrication de charbon de bois (2,4 t) ainsi que les copeaux de petite taille (0,4 t) utilisées à la cogénération.

[2] Exclut les fines de charbon de bois générées sur site et utilisées dans la chaudière de cogénération (0,1 t).

[3] Exclut l'électricité générée sur site par cogénération (0,3 MWh).

[4] La valorisation de la fumée de silice est plus faible en Chine que dans les autres régions. Bien que la majorité des usines (environ 80%) récupèrent maintenant la fumée de silice, seule une fraction des usines la valorise (environ 60%), car son prix sur le marché a fortement baissé depuis 2008 (CRU, 2013).

Tel que présenté au Tableau 4.2, les agents réducteurs varient d'une région à l'autre, les pays du Sud (Australie - AUS, Brésil - BR, Chine – CN, Thaïlande - TH et Afrique du Sud - RSA) consommant plus de charbon de bois et les pays du Nord (Canada - CAN, France - FR, FerroQuébec - FQ, Norvège - NO et États-Unis - US) consommant plus de charbon. La quantité de quartz et d'électricité consommée est similaire pour l'ensemble des régions. Le choix d'un agent réducteur plutôt qu'un autre viendra affecter les émissions de GES lors de la production de silicium métal, car les agents issus de la biomasse sont essentiellement neutres (le CO_2 émis lors du processus de réduction a été capté lors de la croissance de la biomasse) alors que les agents fossiles résultent en des émissions nettes à l'atmosphère.

Les données détaillées, incluant les processus choisis pour modéliser la production de chacun des intrants et leur transport, sont disponibles à l'annexe A. Il existe une incertitude inhérente aux valeurs communiquées par les différentes compagnies pour la compilation des consommations des intrants dans l'analyse CRU (2013) et utilisées dans la présente étude. En effet, certains facteurs peuvent ne pas être pris en compte de manière uniforme d'une compagnie à l'autre (p. ex. quantité incluant ou non les pertes survenant avant le four à arc, ajustements pour la teneur en humidité des intrants, etc.) et

certaines données manquantes peuvent avoir été estimées (p. ex. certaines usines peuvent ne pas avoir communiqué leurs intrants et leur production pour toutes les années couvertes dans l'analyse historique). Toutefois, comme les principales usines de silicium métal sont incluses dans l'analyse de CRU (2013), il est raisonnable de croire que les données moyennes qui en sont tirées sont fiables.

Les émissions de GES lors de la production de silicium métal sont principalement dues aux réactions suivantes :

$$SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO \qquad \text{et} \qquad C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$$

En vertu de la température dans les fours, le CO et le CO_2 y cohabitent en permanence selon l'équilibre de Boudouard. En surface des fours, la température est de l'ordre de 350°C à 450°C (environ 650°K) et le CO n'existe à ce niveau que sous forme de traces. Par conséquent, la réaction d'ensemble de réduction est :

$$SiO_2 + C \rightarrow Si + CO_2$$

Les protocoles de calcul des émissions de GES tirés des lignes directrices de l'IPCC ou la réglementation prescrivent l'utilisation de bilan de masse pour le calcul des émissions des installations de production de silicium métal. Ces calculs reposent sur la teneur en carbone des différents intrants. L'équation fixée par le gouvernement québécois dans le *Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère* (RDOCECA) au protocole QC.19 est :

$$CO_2 = \sum[(ARxTC_{AR}) + (ELxTC_{EL}) + (MINxTC_{MIN}) + (AFxTC_{AF}) - (FEAxTC_{FEA}) - (MNAxTC_{MNA})]x3{,}664$$

Où
CO_2 = Émissions annuelles de CO_2 attribuables à la production de ferroalliages
AR = Consommation annuelle d'agents réducteurs
TC_{AR} = Teneur en carbone moyenne annuelle des agents réducteurs
EL = Consommation annuelle d'électrodes de carbone
TC_{EL} = Teneur en carbone moyenne annuelle des électrodes de carbone
MIN = Consommation annuelle de minerai
TC_{MIN} = Teneur en carbone moyenne annuelle du minerai
AF = Consommation annuelle de l'agent de flux
TC_{AF} = Teneur en carbone moyenne annuelle de l'agent de flux
FEA = Production annuelle de ferroalliages
TC_{FEA} = Teneur en carbone moyenne annuelle des ferroalliages produits
MNA = Production annuelle des matières autres que les alliages
TC_{MNA} = Teneur en carbone moyenne annuelle des matières produites autres que les alliages

Le protocole QC.19 prévoit également une méthode pour le calcul des émissions de CH_4 aux fours de réduction.

$$CH_4 = (FEAxFE)$$

Où
CH4 = Émissions annuelles de CH4 attribuables à la production de silicium métal
FEA= Production annuelle de silicium métal
FE = Facteur d'émission de CH4 du silicium métal (1,5 kg CH4 / tSi, chargement par lot)

Vu la faible teneur en carbone du minerai et des coproduits, les émissions de CO_2 sont essentiellement dues à la consommation d'agents réducteurs et d'électrodes. Les propriétés des agents réducteurs utilisés dans la présente étude sont énumérées au Tableau 4.3. La teneur en carbone des intrants pour le scénario de référence reflète les caractéristiques typiques des matières utilisées dans le secteur métallurgique. De plus, les émissions estimées à partir de ces teneurs sont validées pour les émissions déclarées par les entreprises au gouvernement pour les États-Unis et le Canada (voir section 4.5.2).

Tableau 4.3 – Propriétés des agents réducteurs

Intrant	Teneur en carbone (sec)	Teneur en humidité	Commentaires
Charbon, usines FerroAtlanticà (FerroQuébec, France, Afrique du Sud)	80,8%	12,5%	Analyse sur plusieurs échantillons par FerroAtlanticà en 2013.
Charbon, autres usines du scénario de référence	85%	5%	Propriété du charbon bitumineux de type *low volatile* ou *low ash* (US DOE, 2012) et IPCC (2006).
Copeaux de bois, épinette et sapin, FerroQuébec	49%	43%	Information provenant du fournisseur de FerroQuébec.
Copeaux de bois, eucalyptus (Brésil, Australie, Thaïlande, Afrique du Sud)	49%	25%	Séchage à l'air libre jusqu'à une teneur en humidité de 25% (base humide), Bailis et al. (2013)
Copeaux de bois, bois dur et bois mou, autres usines du scénario de référence	49%	25 à 40%	Séchage à l'air libre jusqu'à une teneur en humidité de 25% à 40% (base humide), Laurent (2011).
Charbon de bois, eucalyptus (Brésil, Thaïlande, Afrique du Sud)	71%	5%	Production par fours conventionnels. Teneur en carbone de Bailis et al. (2013) et teneur en humidité de FAO (1985)
Charbon de bois, eucalyptus (Australie)	90%	2,5%	Production par pyrolyse (*retort kilns*). Teneur en carbone et teneur en humidité de Szymkowski et Bultitude-Paull (1992).
Coke de pétrole calciné, usines de référence	95%	< 1%	IPCC (2006).
Électrodes de graphite, toutes les usines	99%	< 1%	Analyse de fournisseurs de FerroAtlanticà en 2013.
Pâte Söderberg, usines FerroAtlanticà (FerroQuébec, France, Afrique du Sud)	88%	< 1%	Analyse de fournisseurs de FerroAtlanticà en 2013.
Calcaire	11%	5%	Analyse d'un fournisseur canadien.

La combustion de diesel et de propane engendrent également des émissions de GES sur site (CO_2, CH_4 et N_2O) et celles-ci ont été calculées conformément au protocole QC.1 du RDOCECA.

$$CO_2 = (Combustible\ x\ FEG)$$

Où
CO_2 = Émissions annuelles de CO_2 attribuables à la combustion
Combustible=Volume de combustible brûlé
FEG=Facteur d'émission global (t CO_2 / m^3 dans le cas de liquide)

$$CH_4 ou\ N_2O = (Combustible\ x\ FEG\ x\ 0{,}001)$$

Où
CH_4 ou N_2O = Émissions annuelles de CH_4 ou de N_2O attribuables à la combustion
Combustible=Volume de combustible brûlé
FEG=Facteur d'émission global (kgCH_4 ou kgN_2O / m^3 dans le cas de liquide)

Le calcul des émissions de GES sur site est illustré au Tableau 4.4 pour l'usine de FerroQuébec. Le résultat pour les usines de référence est donné à l'annexe A. Ces émissions représentent les émissions totales de l'usine et le facteur d'affectation économique donné au Tableau 4.5 permet de déduire les émissions devant être affectées au silicium métal et aux autres coproduits.

Tableau 4.4 – Calcul des émissions sur site pour l'usine FerroQuébec

	A	B	C	D	E	F	A.(1-B).(C ou D).3,664	A.(1-B).E	A.(1-B).F
Intrant / produit	Quantité (humide)	Humidité (%)	Carbone sec (%)	FEG t CO_2	FEG kg CH_4	FEG kg N_2O	CO_2 (t)	CH_4 (kg)	N_2O (kg)
Quartz	2,65 t	s.o.	0	s.o.	s.o.	s.o.	0	0	0
Charbon	0,85 t	12,5%	80,9%	s.o.	s.o.	s.o.	2,20	0	0
Électrodes	0,016 t	0%	99%	s.o.	s.o.	s.o.	0,06	0	0
Pâte Söder.	0,072 t	0%	88%	s.o.	s.o.	s.o.	0,23	0	0
Bois – total	4,4 t	43%	49%	s.o.	s.o.	s.o.	4,50	0	0
Calcaire	0,044 t	5%	11%	s.o.	s.o.	s.o.	0,02	0	0
Propane	0,025m^3	s.o.	s.o.	1,51 /m^3	0,024	0,108	0,04	0,0006	0,0027
Diesel	0,007m^3	s.o.	s.o.	2,79 /m^3	s.o.	s.o.	0,02	0	0
Silicium métal	1 t	0%	s.o.	s.o.	1,5	s.o.	0	1,5	0
						Total (fossile)	**2,57**	**1,5006**	**0,0027**
						Total (biogénique, dû à l'oxydation de biomasse)	**4,50**	**0**	**0**

Note : le facteur d'émission global pour le diesel est exprimé en t éq. CO_2 et inclus les émissions de CH_4 et N_2O

Suivant l'approche présentée à la section 4.4.1, les facteurs d'affectation calculés pour chacun des coproduits du processus de fabrication sont donnés au Tableau 4.5. Ces facteurs servent à affecter l'inventaire des étapes d'approvisionnement et de production aux coproduits. À titre d'exemple, l'affection des émissions de CO_2 fossile sur site au silicium métal pour l'usine de FerroQuébec correspond aux émissions totales (2,57 tCO_2, voir Tableau 4.4) multiplié par le facteur d'affection du silicium métal (95,6%) pour un résultat de 2,46 tCO_2. Comme la valeur monétaire du silicium métal est largement supérieure à celle des coproduits, la grande majorité des émissions associés au processus de fabrication lui est affectée pour toutes les usines considérées.

Tableau 4.5 – Affectation économique pour le processus de fabrication de silicium métal

Pays ou région	**FQ**	**AUS**	**BR**	**CAN**	**CN**	**FR**	**NO**	**RSA**	**TH**	**US**
Produits										
Silicium métal (t)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fumée de silice (t)	0,4	0,35	0,35	0,35	0,17	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Laitier (t)	0,11	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Valeur marchande										
Silicium métal ($US/t)	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700
Fumée de silice ($US/t)	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Laitier ($US/t)	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Affectation économique										
Silicium métal (%)	95,6	96,1	96,1	96,1	97,6	96,1	96,1	96,1	96,1	96,1
Fumée de silice (%)	3,4	3,0	3,0	3,0	1,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Laitier (%)	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

4.4.2 Production d'électricité

Sur le cycle de vie du silicium métal, l'électricité est principalement consommée dans le four à arc électrique lors de la réduction de l'oxyde de silice. Certains services auxiliaires à l'usine de silicium ainsi que la production de la plupart des intrants requièrent aussi de l'électricité. Le mélange énergétique consiste en la proportion relative de différents modes de production d'électricité sur un territoire donné. Les mélanges énergétiques des pays considérés dans l'étude sont donnés au Tableau 4.6.

Tableau 4.6 – Mélange énergétique des pays et régions considérées dans l'étude

Pays ou région	Charbon	Mazout	Gaz	Nucléaire	Hydro	Autres*
Québec	0,03%	0%	0,08%	1,1%	96.4%	1,4%
Australie	68,8%	1,6%	19,9%	0%	5,7%	4,0%
Australie occidentale	*29,1%*	*1,4%*	*63,6%*	*0%*	*0,5%*	*5,4%*
Brésil	2,6%	3,5%	8,5%	2,9%	75,2%	7,3%
Chine	75,8%	0,1%	1,7%	2,9%	17,5%	2,9%
Chine (provinces Si)	*61,1%*	*0,1%*	*1,4%*	*0%*	*34,7%*	*2,7%*
Chine (région Sud-Ouest)	*39,5%*	*0,1%*	*0,9%*	*0%*	*57,0%*	*2,5%*
France	3,8%	0,8%	3,9%	75,4%	11,3%	2,9%
Norvège	0,1%	0%	1,8%	0%	96,7%	1,4%
Afrique du Sud	92,8%	0,1%	0%	5,1%	1,9%	0,2%
Thaïlande	20,0%	1,5%	70,3%	0%	5,2%	3.0%
États-Unis	37,7%	0,3%	30,6%	19,0%	6,7%	5,7%
États-Unis – NPCC	*10,3%*	*1,2%*	*41,8%*	*29,9%*	*12,1%*	*4,7%*
États-Unis – RFC	*59,4%*	*0,4%*	*9,8%*	*27,7%*	*0,6%*	*2,1%*
États-Unis - SERC	*50,9%*	*0,6%*	*19,2%*	*24,8%*	*2,8%*	*1,7%*

* Les autres sources incluent : biomasse, solaire, éolien, déchets, géothermie.

Les données pour le Québec proviennent d'Hydro-Québec (2013; 2014) pour 2012-2013. Les données pour les autres pays proviennent de l'IEA (2014) pour 2012. Le mélange énergétique de l'Australie, de la Chine et des États-Unis a été ajusté en fonction de l'emplacement des usines et de la production relative dans chacune de ces régions (CRU, 2013), puis selon le mélange énergétique de chacune de ces régions. Les informations pour l'Australie proviennent du Australian BREE (2013), celles pour les États-Unis sont tirées de USEPA (2014b) et celles pour la Chine de Friedley et al. (2013).

Comme la production de silicium métal est un procédé énergivore, le mélange énergétique viendra influencer les émissions de GES associés au silicium métal de chaque région. Les émissions les plus élevées étant associées aux régions dont la production d'électricité repose principalement sur les carburants fossiles (p. ex. Australie, Chine, Afrique du Sud, Thaïlande et États-Unis).

4.4.3 Changement d'utilisation des terres dues aux opérations forestières

Les usines de silicium métal utilisent toutes des copeaux de bois dans leurs fours à arc électrique et certaines d'entre elles utilisent également du charbon de bois (voir section 4.4.1). Comparativement aux autres étapes du cycle de vie du silicium métal, les émissions d'origine fossiles dues aux opérations forestières sont relativement faibles. De plus, le CO_2 capté lors de la croissance de la biomasse sera

libéré lors de son utilisation dans le procédé de réduction. Toutefois, les émissions dues au changement de l'utilisation des terres sont potentiellement significatives et ne sont pas habituellement traitées dans les banques de données commerciales (p. ex. ecoinvent v3.1). Par conséquent, elles sont déterminées pour FerroQuébec et chacun des scénarios de référence.
Les émissions biogéniques de CO_2 dues au changement d'utilisation des terres sont associées au changement du stock de carbone suite au passage d'un territoire donné d'un usage vers un autre. Le stock de carbone dans un territoire forestier se retrouve dans la biomasse (aérienne et racinaire), la matière organique morte au sol et la matière organique dans le sol.

Selon le GHG Protocol Product Standard (WRI et WBCSD, 2011), les émissions dues au changement d'utilisation des terres doivent être quantifiées si les conditions suivantes sont rencontrées :

- Le changement d'utilisation des terres résulte directement de la production de biomasse pour la fabrication d'un produit.
- Le changement du stock de carbone est causé par intervention humaine dans l'intention de fabriquer un produit.
- Le changement a lieu durant la période d'évaluation (au cours des 20 ans précédent la fabrication du produit ou durant la première période de récolte).

Dans la situation où un changement d'utilisation des terres est observé, il est recommandé d'affecter les émissions de manière égale à la biomasse produite dans les 20 ans suivant le changement ou à la première récolte, si celle-ci se déroule sur une période plus longue que 20 ans. L'existence d'un changement d'utilisation des terres découlant des opérations forestières pour chacune des usines considérées dans la présente étude est discutée au Tableau 4.7.

Tableau 4.7 – Changement d'utilisation des terres

Usine	Existence d'un changement d'utilisation des terres
FerroQuébec (Nord du Québec)	Oui. Bois (résineux) récolté sur la Côte-Nord du Québec. Passage d'une forêt primaire à forêt aménagée. Premier cycle de récolte car l'exploitation à grande échelle de la forêt boréale a débuté dans les années 1960 et que le cycle de récolte varie entre 75 et 120 ans.
Australie	Non. Bois (Jarrah) récolté en Australie occidentale en rotation sur des territoires en régénération (Government of Western Australia, 2014) ayant fait l'objet de récolte intensives même avant 1940 (Bradshaw, 1998).
Brésil	Oui. Bois (eucalyptus) provenant de plantations. La surface de forêt dédiée aux plantations est passée de 4 984 ha à 7 418 ha entre 1990 et 2010 (FAO, 2010). Ce qui indique qu'environ 33% des surfaces récoltées ont été converties de la forêt primaire vers les plantations au cours des 20 dernières années.
Chine	Oui. Bois (feuillus) provenant de coupe à blanc, méthode de coupe commune selon Ma et al. (2013). Le territoire ayant subi une déforestation peut être converti à divers usages, l'agriculture (UNEP, 2009) et les plantations (FAO, 2010) étant les plus communes. Par conséquent, il est supposé que le bois provient de forêts converties vers un usage agricole (riz ou blé) ou vers des plantations d'eucalyptus.
France	Non. Bois (feuillus) récolté à proximité des usines dans des forêts aménagées depuis plusieurs décennies. La surface des forêts en France s'accroit fortement depuis la deuxième moitié du 19e siècle. Depuis 1980, la progression est de 0,6% par an (IGN, 2014).

Usine	Existence d'un changement d'utilisation des terres
Norvège	Non. Bois (résineux) tiré de forêts aménagées depuis le début du 20e siècle (Hellberg et al., 2009). Le stock global de biomasse en Norvège augmente depuis plusieurs décennies, notamment en raison de reforestation de zones agricoles (Norway Climate and Pollution Agency, 2013).
Canada (Sud du Québec)	Non. Bois (feuillus et résineux) tiré de forêts près de l'usine (p. ex. Centre-du-Québec ou Mauricie) et aménagées depuis plus de 50 ans (MRN, 2013). L'âge des arbres dans la région du Centre-du-Québec est majoritairement de 50 ans ou moins, ce qui indique qu'il ne s'agit pas du premier cycle de récolte.
Afrique du Sud	Non. Bois (eucalyptus et acacia noir) provenant de plantations. La surface de forêt dédiée aux plantations est restée constante entre 1990 et 2010 (FAO, 2010). Ainsi, il est estimé que le bois récolté provient de territoires dédié aux plantations depuis plus de 20 ans.
Thaïlande	Non. Bois (eucalyptus) issu de plantations instaurées suite à l'interdiction de coupe dans les forêts primaires. La surface de forêt dédiée aux plantations est passée de 2 668 ha à 3 986 ha entre 1990 et 2010 (FAO, 2010). Toutefois, comme ces plantations ont été instaurées dans le cadre d'un programme national de reforestation (FAO, 1996), aucune émission due au changement d'utilisation des terres n'est prise en compte.
États-Unis	Non. Bois (feuillus et résineux) tiré de forêts aménagées dont la superficie est constante depuis plus de 30 ans (USDA, 2014). La majorité du bois récolté aux États-Unis provient du Sud où la croissance des arbres et rapide et où plusieurs cycles de récoltes ont été effectués.

Pour les usines dont la consommation de bois ou de charbon de bois est associée à un changement d'utilisation des terres, les émissions dues à ce changement par m^3 ou tonne de bois produit sont calculées au Tableau 4.8, sur la base du stock de carbone (C) de la forêt avant et après le changement d'utilisation des terres (par hectare), de la productivité de la forêt (m^3/hectare) et du nombre de cycles de récolte sur lequel les émissions sont réparties.

Tableau 4.8 – Émissions dues au changement d'utilisation des terres

	Productivité par période (m^3 ou t/ha)	Stock C avant (tC/ha)	Stock C après (tC/ha)	Période de récolte (années)	Nombre de récoltes (nb)	Récolte totale sur 20 ans	Émissions (tCO_2/m^3 ou t)
FerroQuébec	91m^3	114,3	106,4	75	1	91m^3	0,314 tCO_2/m^3
Brésil	250m^3	185	105	20	4	250m^3	0,293 tCO_2/m^3
Chine (agri.)	150m^3 (bois) 6,6t/ha.an (riz)	202	140	20	1 (bois) 20 (agri.)	90t (bois pr.) et 132t (riz)	1,023 tCO_2/t
Chine (plant.)	150m^3 (bois) 20m^3/ha.an (plant.)	202	152	20	1 (bois) 3 à 4 (plant.)	90t (bois pr.) et 300t (bois plant.)	0,555 tCO_2/t

Note : la densité pour le bois (primaire et plantations) en Chine est 0,6t/m^3. Les émissions dues au changement d'utilisation des terres pour la Chine sont égales à la moyenne des scénarios « agriculture » et « plantations ».

Pour le scénario FerroQuébec, la productivité et la période de récolte est tirée de Laurent (2011) et le stock de carbone avant et après aménagement des terres est tiré de Lessard (2013). Pour le Brésil, la productivité et le cycle de récolte sont tirés de Bailis et al. (2013) tandis que les stocks de carbone sont estimés à l'aide de l'outil FICAT (IFC, 2012) qui intègre les facteurs de IPCC (2006) pour le calcul des émissions associées au changement d'utilisation des terres. Pour la Chine, la productivité de la récolte de riz et le stock de carbone pour la terre agricole sont tirés de l'outil développé par Blonk Consultants (2014) conformément au GHG Protocol Product Standard, tandis que la productivité des plantations provient de Mead (2011). Les stocks de carbone de la forêt primaire et des plantations en Chine sont tirés de l'outil FICAT (IFC, 2012). L'affectation des émissions dues au changement des terres est effectuée sur une base massique, en fonction de la quantité totale de biomasse produite (bois et grains). Les paramètres utilisés pour évaluation du changement de stock de carbone au Brésil et en Chine sont donnés à l'annexe C.

4.4.4 Production forestières dans le Nord du Québec

Contrairement à la valorisation des coproduits issus de la transformation du bois en scierie (p. ex. copeaux, planures et écorces), la valorisation de la biomasse forestière (p. ex pieds, cimes et branches) n'est pas une pratique courante au Québec (MRNF, 2011). Par conséquent, le processus de production de rondins de bois pour le Québec disponible dans la banque de données ecoinvent v3.1 ne tient pas compte de la récolte des résidus de coupe forestière. Les facteurs pour l'affectation économique des impacts dus aux opérations forestières entre les divers coproduits (bois d'œuvre, bois pour l'industrie et résidus) ont été calculés sur la base des volumes et des valeurs marchandes disponibles dans ecoinvent v3.1 (processus de production d'épinette européens : Suède, Suisse et Allemagne). Les valeurs utilisées sont présentées au Tableau 4.9. Comme la valeur des résidus de coupe est plus basse que celle des autres coproduits, son facteur d'affectation économique est plus faible que la proportion volumique générée lors des activités forestières.

Tableau 4.9 – Facteurs d'affectation pour les résidus de bois québécois

Coproduit	Quantité (% pour 1 m^3 de bois)	Valeur unitaire (euro/m^3)	Valeur générée (euro)	Facteur d'affectation
Bois d'œuvre	66,2%	78,6	52,0	60,6%
Bois pour l'industrie	23,1%	129	29,8	34,7%
Résidus	10,7%	37,9	4,0	4,7%

4.4.5 Transport pour l'approvisionnement et la distribution

Autant pour l'usine FerroQuébec que pour les usines de référence, le quartz et les agents réducteurs représentent au moins 95% de la masse des intrants consommés. Lorsque possible, la distance et les modes de transport ont été déterminés en fonction de l'emplacement des usines et des fournisseurs. Dans les autres cas, les distances et modes de transport ont été estimés sur la base d'informations disponibles publiquement sur les sites web des producteurs de silicium ou sur la base de scénarios typiques. Les hypothèses posées sur la provenance et le transport des principaux intrants pour toutes les usines sont décrites à l'annexe B.

Pour le scénario FerroQuébec, les produits sont tous expédiés de l'usine de Port-Cartier vers les

différents clients potentiels :

- Canada : alumineries québécoises.
- États-Unis : alumineries et usines de production de silicones (Est des États-Unis) ainsi que usines de production de silicium polycristallin (Ouest des États-Unis).
- Moyen-Orient et Asie : alumineries et production de silicones.

Les routes de distribution typiques vers les clients potentiels sont décrites au Tableau 4.10.

Tableau 4.10 – Routes de distribution pour le scénario FerroQuébec

Destination	Route pour la distribution
Canada	Camion vers les entrepôts des clients (surtout au Québec).
États-Unis	Barge (bateau circulant sur les Grands Lacs ou *lakers*) de Port-Cartier vers un port des Grands Lacs, puis transport en train vers les entrepôts des clients. Lorsque le transport par bateau sur la voie maritime du Saint-Laurent (décembre à mars) n'est pas possible, transport en camion de Port-Cartier vers Baie-Comeau, puis en train de Baie-Comeau vers les entrepôts des clients.
Moyen-Orient et Asie	Bateau transocéanique de Port-Cartier vers les ports des clients.

Pour le scénario de référence, l'emplacement moyen des usines de référence pour chaque région a été établi sur la base des informations disponibles dans l'analyse CRU (2013) et les clients potentiels sont les mêmes que pour le scénario FerroQuébec. Les principales combinaisons « origine-destination » sont présentées au Tableau 4.11.

Les distances parcourues par camion ou par train sont estimées à l'aide de l'outil *itinéraire* dans *Google Maps* et les distances parcourues par bateau sont estimées à l'aide de l'outil *Distances and Time* de *SeaRates* (2014). Des détails supplémentaires sur les routes de distribution pour le scénario FerroQuébec et le scénario de référence sont disponibles à l'annexe B.

Tableau 4.11 – Routes de distribution pour le scénario de référence

Origine	Destination	Route pour la distribution
États-Unis	États-Unis	Camion vers les entrepôts des clients.
	Canada	Train vers un port des Grands Lacs, barge vers un port à proximité des clients, puis camion vers les entrepôts des clients.
AUS, BR, FR, CN, RSA, TH.	États-Unis et Canada	Camion vers un port situé à proximité de l'usine (lorsque nécessaire), bateau transocéanique vers les ports situés à proximité des clients, puis camion ou train vers les entrepôts des clients.
Chine, Australie et Thaïlande	Moyen-Orient et Asie	Camion ou train vers un port situé à proximité de l'usine (lorsque nécessaire) puis bateau transocéanique vers les ports des clients.

4.5 Qualité des données

La qualité des données utilisées dans les calculs est évaluée selon les critères présentés au Tableau 4.12 (WRI et WBCSD, 2011). L'évaluation qualitative de chacun des critères de qualité est pour sa part effectuée sur la base de la matrice de qualité présentée Tableau 4.13 (WRI et WBCSD, 2011).

Tel que recommandé dans le GHG Protocol Standard, le contexte est pris en compte dans l'application des critères d'évaluation. Ainsi, pour la représentativité historique, la gamme d'années acceptable pour les processus de production d'électricité est considérée plus élevée que pour les autres types de processus. Comme ces infrastructures ont une longue durée de vie, leur performance n'est pas susceptible de changer rapidement et les technologies utilisées sont sensiblement les mêmes maintenant qu'il y a 10 ans. De plus, les facteurs d'émissions pour la combustion sont considérés de bonne qualité, même s'ils ont plus de 10 ans, dans la mesure où ils sont tirés de la réglementation ou de lignes directrices internationales, comme celles du GIEC.

Tableau 4.12 – Critères de qualité des données

Critère de qualité	Description
Représentativité technologique	Indique à quel point les données sont représentatives des technologies utilisées.
Représentativité historique	Indique si les données décrivant les activités sont de nature récente (p. ex. date des données disponibles)
Représentativité géographique	Indique si les données sont spécifiques à l'emplacement géographique des activités qu'elles décrivent (p. ex. site ou pays).
Exhaustivité	Indique à quel point les données sont statistiquement représentatives des activités qu'elles décrivent. L'exhaustivité dépend de facteurs tels le nombre de site pour lesquels des données sont disponibles par rapport au nombre total de sites, la couverture de fluctuations saisonnières ou autres, etc.
Fiabilité	Indique à quel point les sources de données, les méthodes de collecte de données et les procédures de vérification sont fiables.

Tableau 4.13 – Matrice d'évaluation de la qualité des données

Qualité des données	Représentativité technologique	Représentativité historique	Représentativité géographique	Exhaustivité	Fiabilité
Excellente	Technologie identique	Moins de trois ans d'écart (ou cinq ans*)	Zone géographique identique	100% des sites sont couverts, les données ne sont pas biaisées par des fluctuations	Les donnes sont mesurées et vérifiées
Bonne	Technologie similaire	Moins de six ans d'écart (ou 10 ans*)	Zone géographique similaire	Plus de 50% des sites sont couverts, les données ne sont pas biaisées par des fluctuations	Les donnes sont mesurées mais non vérifiées OU Les données sont vérifiées mais en partie estimées
Acceptable	Technologie différente	Moins de dix ans d'écart (ou 15 ans*)	Zone géographique différente	Moins de 50% des sites sont couverts, les données ne sont pas biaisées par des fluctuations OU Plus de 50% des sites sont couverts mais les données peuvent être biaisées par des fluctuations	Les données, en partie estimées, ne sont pas vérifiées ou sont des estimations d'experts
Faible	Technologie différente	Plus de dix ans d'écart (ou 15 ans*) OU Date inconnue	Zone géographique inconnue	Moins de 50% des sites sont couverts et les données peuvent être biaisées par des fluctuations	Estimations de non-experts

* Pour les processus de production d'électricité.

Pour les principaux processus contributeurs, la qualité des données doit être excellente ou bonne sur la majorité des critères. De plus, pour ces mêmes processus, une description détaillée de la qualité des données et des efforts faits pour améliorer celle-ci est donnée.

4.5.1 Scénario FerroQuébec

L'évaluation de la qualité des données pour les principaux processus contributeurs pour le scénario FerroQuébec est présentée au Tableau 4.14.

Tableau 4.14 – Qualité des données pour le scénario FerroQuébec

Processus	Sources de données	Qualité	Amélioration de la qualité
Production de silicium métal	Activité : FerroAtlanticà et Biofilia (étude d'impact environnemental) Émissions : FerroAtlanticà (analyses en laboratoire)	Activité : Excellente pour tous les indicateurs, sauf pour la fiabilité des données d'activité (bonne) car le projet est au stade de la conception et que les données sont basées sur une modélisation et non des mesures à l'usine. Émissions : Excellente pour tous les indicateurs, le calcul des émissions est basé sur plusieurs analyses de laboratoire effectuées en 2013 sur les matériaux qui seront utilisés à l'usine.	Aucune action requise.
Production de bois, incluant les résidus forestiers	Activité et émissions : Laurent (2011) et Lessard (2013)	Activité : Excellente ou bonne, car données spécifiques aux opérations forestières dans la forêt boréale québécoise datant de la fin des années 2000. Émissions : Excellente ou bonne, car émissions dues au changement d'utilisation des terres estimées récemment pour la forêt boréale québécoise.	Les valeurs obtenues pour une parcelle par Lessard (2013) sont corroborées par celles provenant de la modélisation du territoire canadien par Kurz et al. (1998).
Transport par bateau trans-océanique	Activité et émissions : ecoinvent v3.1	Activité : Bonne, car valeurs basées sur de nombreux rapports techniques et articles scientifiques. Émissions : Bonne, car estimée à partir du carburant consommé et de ses caractéristiques.	Aucune action requise.
Transport par train diesel	Activité et émissions : ecoinvent v3.1	Activité : Bonne, données européennes adaptées au contexte des États-Unis. Émissions : Bonne, car estimée à partir du carburant consommé et de ses caractéristiques.	Aucune action requise.

L'évaluation de la qualité des données selon chacun des critères retenus est également donnée au Tableau 4.15. Dans l'ensemble, les données pour le scénario FerroQuébec sont excellentes et sont très bien adaptées au contexte de l'usine.

Tableau 4.15 – Évaluation des critères de qualité des données pour le scénario FerroQuébec

Processus	Données	Tech.	Hist.	Géo.	Exhaus.	Fiab.
Production de silicium métal	Activité	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente	Bonne
	Émissions	Excellente	Bonne	Excellente	Excellente	Excellente
Production de résidus forestiers	Activité	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente	Bonne
	Émissions	Excellente	Bonne	Excellente	Bonne	Bonne
Transport par bateau transocéanique	Activité	Bonne	Acceptable	Bonne	Bonne	Bonne
	Émissions	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne
Transport par train diesel	Activité	Bonne	Acceptable	Bonne	Bonne	Bonne
	Émissions	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne

4.5.2 Scénario de référence

L'évaluation de la qualité des données pour les principaux processus contributeurs pour le scénario de référence est présentée au Tableau 4.16.

Tableau 4.16 – Qualité des données pour le scénario de référence

Processus	Sources de données	Qualité	Amélioration de la qualité
Production d'électricité aux États-Unis (charbon et gaz naturel)	Activité et émissions : ecoinvent v3.1	Activité et émissions : Bonne ou excellente pour tous les critères. Données représentatives de la performance moyenne des centrales thermiques dans la banque de données eGRID 2006 publiée par le USEPA.	Mélange énergétique ajusté en fonction de l'emplacement des usines et de leur production respective.
Production d'électricité en Chine (charbon)	Activité et émissions : ecoinvent v3.1	Activité et émissions : Acceptable pour la plupart des critères. Les données représentent l'opération d'une centrale thermique au début des années 2000.	Mélange énergétique ajusté en fonction de l'emplacement des usines et de leur production respective.
Production d'électricité en Afrique du Sud (charbon)	Activité et émissions : ecoinvent v3.1	Activité et émissions : Bonne ou excellente pour la plupart des critères. Données estimées sur la base de statistiques nationales, en fonction du parc de centrales au charbon à la fin des années 2000.	Aucune action requise.
Production d'électricité en Australie (charbon et gaz naturel)	Activité et émissions : ecoinvent v3.1	Activité et émissions : Bonne ou excellente pour la plupart des critères. Données estimées sur la base de statistiques nationales, en fonction du parc de centrales au charbon à la fin des années 2000.	Mélange énergétique ajusté en fonction de l'emplacement des usines (Australie occidentale).
Production d'électricité en Thaïlande (gaz naturel et charbon)	Activité et émissions : ecoinvent v3.1	Activité et émissions : Bonne pour la plupart des critères. Caractéristiques des centrales basées sur des statistiques nationales et émissions estimées selon la composition des carburants.	Aucune action requise.
Production d'électricité au Brésil (hydro.)	Activité et émissions : ecoinvent v3.1	Activité et émissions : Bonne ou excellente pour la plupart des critères. Émissions de GES mesurées à des réservoirs situés au Brésil.	Aucune action requise.
Production de charbon de bois au Brésil	Activité et émissions : Bailis et al. (2013), Pennise et al. (2001).	Activité et émissions : En moyenne bonne pour l'ensembe des critères. L'étude de Bailis et al. (2013) porte spécifiquement sur la production de charbon de bois au Brésil.	Émissions dans Bailis et al. (2013) corroborées à partir de Pennise et al. (2001) et des propriétés du bois entrant et du charbon de bois sortant.

Processus	Sources de données	Qualité	Amélioration de la qualité
Production de charbon de bois en Afrique du Sud	Activité et émissions : Bailis et al. (2013), Pennise et al. (2001).	Activité et émissions : En moyenne bonne pour l'ensembe des critères. L'étude de Bailis et al. (2013) couvrant des sites au Brésil est complétée par l'étude de Pennise et al. (2001) couvrant des sites en Afrique.	Émissions dans Bailis et al. (2013) corroborées à partir de Pennise et al. (2001) et des propriétés du bois entrant et du charbon de bois sortant.
Production de silicium métal aux États-Unis et au Canada	Activité : CRU (2013) Émissions : voir section 4.4.1.	Activité : Bonne ou excellente pour tous les critères. Données issues d'une étude des coûts d'opération couvrant toutes les principales usines. Émissions : Bonne ou excellente pour tous les critères. Émissions calculées selon les propriétés des intrants, puis corroborées avec les données spécifiques aux principales usines.	Émissions calculées corroborées avec les émissions déclarées par les principales usines à l'USEPA et à Environnement Canada pour 2013.
Production de silicium métal en Australie, Chine, Norvège, et Afrique du Sud	Activité : CRU (2013) Émissions : voir section 4.4.1.	Activité : Bonne ou excellente pour tous les critères. Données issues d'une étude des coûts d'opération couvrant toutes les principales usines. Émissions : Bonne ou excellente pour tous les critères. Émissions calculées selon les propriétés des intrants.	Aucune action requise.

L'évaluation de la qualité des données selon chacun des critères retenus est également donnée au Tableau 4.17.

Tableau 4.17 – Qualité des données pour le scénario de référence

Processus	Données	Tech.	Hist.	Géo.	Exhaus.	Fiab.
Électricité aux États-Unis (charbon)	Activité	Bonne	Bonne	Excellente	Excellente	Excellente
	Émissions	Bonne	Bonne	Excellente	Excellente	Excellente
Électricité en Chine (charbon)	Activité	Bonne	Acceptable	Excellente	Acceptable	Acceptable
	Émissions	Bonne	Acceptable	Excellente	Acceptable	Acceptable
Électricité en Afrique du Sud (charbon)	Activité	Bonne	Bonne	Excellente	Excellente	Acceptable
	Émissions	Bonne	Bonne	Excellente	Excellente	Acceptable
Électricité en Thaïlande (gaz naturel et charbon)	Activité	Bonne	Bonne	Excellente	Excellente	Acceptable
	Émissions	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Acceptable
Électricité en Australie (gaz naturel et charbon)	Activité	Bonne	Bonne	Excellente	Excellente	Acceptable
	Émissions	Bonne	Bonne	Excellente	Excellente	Acceptable
Électricité au Brésil (hydro.)	Activité	Bonne	Bonne	Acceptable	Acceptable	Bonne
	Émissions	Excellente	Bonne	Excellente	Acceptable	Bonne
Charbon de bois au Brésil	Activité	Bonne	Excellente	Excellente	Acceptable	Bonne
	Émissions	Bonne	Acceptable	Excellente	Acceptable	Bonne
Charbon de bois en Afrique du Sud	Activité	Bonne	Excellente	Bonne	Acceptable	Bonne
	Émissions	Bonne	Acceptable	Bonne	Acceptable	Bonne
Production silicium métal (US, CA)	Activité	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente	Bonne
	Émissions	Excellente	Excellente	Excellente	Bonne	Excellente
Production silicium métal (AUS, CN, NO, RSA)	Activité	Bonne	Bonne	Excellente	Excellente	Excellente
	Émissions	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne

Dans l'ensemble, la qualité des données pour le scénario de référence est bonne. Lorsque pertinent, les données nationales moyennes ont été adaptées pour tenir compte des particularités à l'échelle des sites (production de silicium métal aux États-Unis) et à l'échelle des régions (production d'électricité aux États-Unis, en Chine et en Australie).

5. Évaluation des impacts sur les changements climatiques

Les résultats d'indicateurs d'impact sur le réchauffement planétaire seront calculés en utilisant les potentiels de réchauffement planétaire (PRP) publiés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) sur un horizon de 100 ans (Myrhe et Shindell, 2013). L'inventaire ne tient pas compte de pondérations de ces facteurs représentant des effets d'émissions retardées, de compensation ou d'évitement d'émissions.

Seuls les impacts potentiels sur le réchauffement planétaire sont couverts dans cette étude, de manière cohérente avec les objectifs de l'étude. Par conséquent, les comparaisons effectuées portent uniquement sur cette catégorie d'impact et aucune conclusion n'est tirée quant à la supériorité environnementale globale d'un scénario sur un autre.

Les résultats, exprimés en tonnes métriques d'éq. CO_2 sont rapportés par rapport à l'unité fonctionnelle (1 tonne de silicium métal à l'entrepôt régional) au Tableau 5.1, avec le détail sur les émissions ou absorptions fossiles, biogéniques et dues au changement d'utilisation des terres.

Tableau 5.1 – Empreinte carbone pour le scénario FerroQuébec et les scénarios de référence

Émissions (t éq. CO_2 / tSi)	**Scénario FerroQuébec**	**Scénario de référence 1** (clients potentiels selon marché moyen)	**Scénario de référence 2** (clients potentiels aux US, priorité à AUS et RSA)
Émissions fossiles et biogéniques (autres que le CO_2 biogénique)	3,35	12,48	12,99
Émissions de CO_2 biogénique (changement d'utilisation des terres)	0,77	0,25	0,21
Émissions / captation de CO_2 biogénique (neutre)	+ 4,54 / - 4,54	+ 3,96 / - 3,96	+ 4,31 / - 4,31
Total	4,12	12,73	13,20

L'empreinte carbone du scénario FerroQuébec représente environ le tiers de l'empreinte carbone des scénarios de référence. De plus, l'empreinte carbone des deux scénarios de référence est relativement similaire, avec une différence de seulement 6%. La contribution de chacune des étapes du cycle de vie à l'empreinte carbone totale est mise en évidence au Tableau 5.2.

Tableau 5.2 – Empreinte carbone par étape du cycle de vie

Étape	**Scénario FerroQuébec**		**Scénario de référence 1**		**Scénario de référence 2**	
	Émissions de GES (t éq. CO_2 / tSi)	(%)	Émissions de GES (t éq. CO_2 / tSi)	(%)	Émissions de GES (t éq. CO_2 / tSi)	(%)
Approvisionnement	1,48	35,9%	9,34	73,4%	10,14	76,8%
Production	2,49	60,5%	3,26	25,6%	2,90	21,9%
Distribution	0,15	3,6%	0,13	1,0%	0,16	1,2%
Total (berceau à l'entrepôt)	4,12	100%	12,73	100%	13,20	100%

Les résultats pour le scénario FerroQuébec et la moyenne des deux scénarios de référence sont représentés à la Figure 5.1. La barre d'incertitude représente la différence entre les deux scénarios de référence.

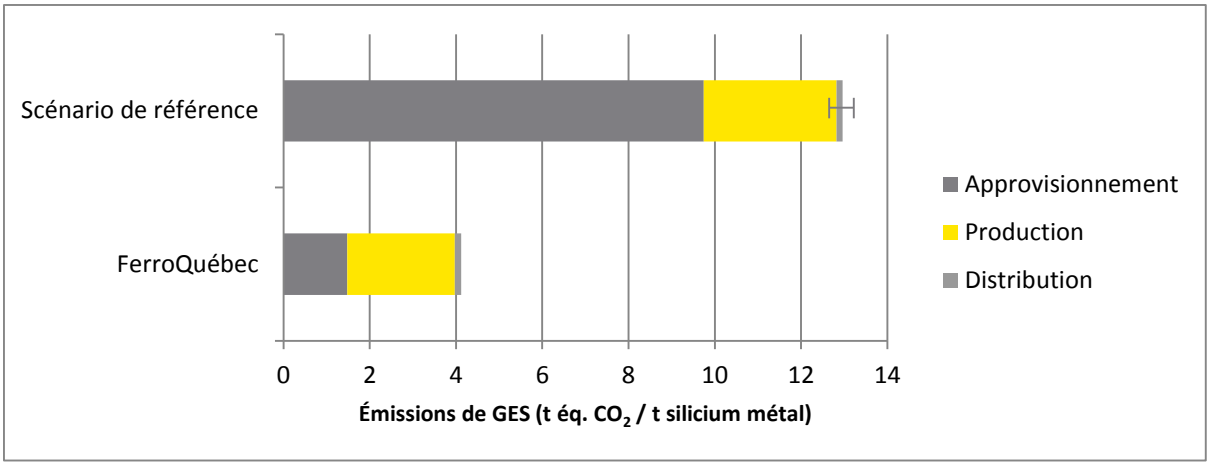


Figure 5.1 – Contribution des étapes du cycle de vie à l'empreinte carbone

Pour le scénario FerroQuébec, les émissions ont principalement lieu lors de l'étape de la production, dû à l'utilisation du charbon comme agent réducteur. Le profil des scénarios de référence suit la tendance inverse et c'est plutôt l'étape de l'approvisionnement qui contribue le plus à l'empreinte carbone totale. Dans ce cas, les émissions proviennent en majorité des centrales thermiques au charbon et au gaz naturel alimentant en électricité les usines de silicium métal.

Les émissions de GES, par type et par étape du cycle de vie, sont fournies au Tableau 5.3, en tonnes métriques d'équivalent CO_2.

Tableau 5.3 – Empreinte carbone par type de GES et étape du cycle de vie

Étape	**Scénario FerroQuébec**			**Scénario de référence 1**			**Scénario de référence 2**		
	Appro.	Prod.	Distri.	Appro.	Prod.	Distri.	Appro.	Prod.	Distri.
CO_2 fossile	0,62	2,45	0,14	7,73	3,22	0,12	8,47	2,86	0,15
CO_2 bio (émis)	0,20	4,34	0	1,22	2,73	0	1,41	2,90	0
CO_2 bio (capté)	4,54	0	0	3,95	0	0	4,31	0	0
CO_2 (terres)	0,77	0	0	0,25	0	0	0,21	0	0
CH_4	0,07	0,04	0,01	1,17	0,04	0,01	1,25	0,04	0,01
N_2O	0,02	0	0	0,14	0	0	0,16	0	0
Autres (HFC, PFC, SF_6, etc.)	0	0	0	0,05	0	0	0,05	0	0

Le CO_2 d'origine fossile apparait clairement comme le principal GES émis sur le cycle de vie du silicium métal, autant pour le scénario FerroQuébec que les scénarios de référence. Des émissions significatives de CH_4 sont également notées pour le scénario de référence, principalement générées lors de la production de charbon de bois par fours conventionnels. Les autres types de GES ont une contribution quasi-nulle à l'empreinte carbone du silicium métal.

Tel que présenté à la section 3.4, les différents marchés visés par FerroQuébec ne s'approvisionnent pas en silicium métal des mêmes régions productrices. Comme le silicium métal de chaque région

productrice possède une empreinte carbone distincte et que les distances pour la distribution sont différentes pour chaque marché, l'empreinte carbone du silicium métal moyen disponible sur chacun des marché (Canada, États-Unis, Moyen-Orient et Asie) est également appelé à varier. L'empreinte carbone du silicium métal disponible sur chacun de ces marchés est donnée au Tableau 5.4.

Tableau 5.4 – Empreinte carbone du silicium métal disponible par région

Émissions (t éq. CO_2e/t Si)	**Tous les marchés**	**Marché Canada**	**Marché États-Unis**	**Marché Moyen-Orient et Asie**
FerroQuébec	4,12	4,01	4,12	4,13
Scénario de référence 1	12,73	6,37	11,53	17,87
Scénario de référence 2	13,20	6,37	12,24	17,87

Le différentiel le plus élevé entre le scénario FerroQuébec et le scénario de référence est observé pour le marché du Moyen-Orient et de l'Asie, ces pays s'approvisionnant en majorité auprès d'usines chinoises. Le différentiel le plus faible est pour sa part observé pour le marché du Canada, celui-ci étant déjà desservi en grande partie par une usine située au Québec.

6. Interprétation

6.1 Analyse de contribution

Les principaux processus contribuant à l'empreinte carbone du silicium FerroQuébec sont énumérés au Tableau 6.1.

Tableau 6.1 – Analyse de contribution pour le scénario FerroQuébec

Étape	Processus	GES (t éq. CO_2 / tSi)	Contribution (%)
Approvisionnement	Opérations associées à la récolte des résidus forestiers	0,83	20,2%
	Transport par bateau transocéanique	0,71	6,8%
Production de silicium métal	Réduction dans le four à arc électrique	2,49	60,5%
Distribution	Transport par train diesel	0,12	3,0%

Le principal contributeur est de loin le processus de réduction dans les fours à arc électrique, résultant principalement en des émissions de CO_2 sur le site de l'usine. À elle seule, l'utilisation du charbon comme agent réducteur génère 2,20 t éq. CO_2. Le second processus en importance est la production de résidus forestiers, principalement utilisées pour la fabrication de copeaux et de charbon de bois. Les émissions liées à ce processus sont principalement associées à la conversion de la forêt boréale primaire en forêt aménagée, ce qui engendre une baisse des stocks de carbone (changement d'utilisation des terres).

Les principaux processus contribuant à l'empreinte carbone des deux scénarios de référence sont énumérés au Tableau 6.2. Seules les valeurs pour les principaux processus sont rapportées, ce qui explique pourquoi la somme des contributions relatives ne donne pas 100%.

Tableau 6.2 – Analyse de contribution pour le scénario de référence

Étape	Principaux processus	Scénario de référence 1		Scénario de référence 2	
		GES (t éq. CO_2 / tSi)	(%)	GES (t éq. CO_2 / tSi)	(%)
Approvisionnement	Production d'électricité aux États-Unis (charbon et gaz naturel)	3,69	29,0%	2,79	19,6%
	Production d'électricité en Chine (charbon)	2,78	21,8%	1,39	21,0%
	Production d'électricité en Afrique du Sud (charbon)	0,70	5,5%	2,67	17,1%
	Production d'électricité en Thaïlande (gaz naturel)	0,42	3,3%	0,35	2,8%
	Production d'électricité en Australie (gaz naturel et charbon)	0,34	2,7%	0,89	6,2%
	Production d'électricité au Brésil (hydro et gaz naturel)	0,23	1,8%	0,16	1,2%
	Production de charbon de bois au Brésil	0,30	2,4%	0,21	1,6%
	Production de charbon de bois en Afrique du Sud	0,06	0,5%	0,20	1,5%

Étape	Principaux processus	Scénario de référence 1		Scénario de référence 2	
		GES (t éq. CO_2 / tSi)	(%)	GES (t éq. CO_2 / tSi)	(%)
Production de silicium métal	Réduction dans le four à arc électrique (usine États-Unis)	1,55	12,2%	1,09	8,3%
	Réduction dans le four à arc électrique (usine Chine)	1,03	8,1%	1,03	7,8%
	Réduction dans le four à arc électrique (usine Canada)	0,24	1,9%	0,21	1,6%
	Réduction dans le four à arc électrique (usine Norvège)	0,15	1,2%	0,12	0,9%
	Réduction dans le four à arc électrique (usine Australie)	0,06	0,5%	0,15	1,1%
	Réduction dans le four à arc électrique (usine Afrique du Sud)	0,04	0,3%	0,14	1,0%

Les processus de production d'électricité à partir de combustibles fossiles (charbon et gaz naturel) contribuent en grande partie à l'empreinte carbone, surtout pour les États-Unis, la Chine et l'Afrique du Sud. Les émissions sur les sites des usines aux États-Unis et en Chine sont aussi significatives, à cause de l'utilisation de charbon et de coke de pétrole comme agent réducteur. Bien que faibles, les émissions dues à la production de charbon de bois au Brésil et en Afrique du Sud ne sont pas négligeables.

6.2 Analyse d'incertitude

Les incertitudes relatives à l'élaboration de l'inventaire de cycle de vie sont déterminées de manière qualitative. Il existe trois types d'incertitudes (WRI et WBCSD, 2011) énumérés au tableau 4.4 : celles liées aux paramètres du modèle, celles liées à l'élaboration des scénarios FerroQuébec et de référence et enfin celles liées à la modélisation.

Tableau 6.3 – Types d'incertitude

Type d'incertitude	Sources	Description
Incertitude liée aux paramètres du modèle	▸ Données sur les émissions directes ▸ Données d'opération et de production ▸ Facteurs d'émission ▸ Facteurs de réchauffement planétaire	Incertitudes sur l'exactitude des valeurs utilisées pour réaliser l'inventaire de cycle de vie.
Incertitude liée à l'élaboration des scénarios	▸ Choix méthodologiques	Incertitudes liées aux hypothèses sous-jacentes et méthodes de calculs relatives à l'affectation des intrants et sortants aux différents coproduits, à l'utilisation des produits ou à la gestion de leur fin de vie.
Incertitude liée à la modélisation	▸ Limites du modèle	Les incertitudes de modélisation sont dues à l'utilisation de modèles mathématiques pour représenter des phénomènes réels. Les incertitudes de modélisation peuvent être estimées sur la base d'une revue de la qualité des données et des analyses de sensibilité. Toutefois, certains aspects sont très difficilement quantifiables.

6.2.1 Incertitudes liées aux paramètres

Les incertitudes liées aux paramètres du modèle pour les émissions directes, les données d'opération et de production ainsi que les facteurs d'émission ont été analysées sur la base d'une revue de la qualité des données collectées (voir section 4.5). Autant pour le scénario FerroQuébec que pour le scénario de référence, la qualité des données pour les principaux processus contributeurs est considérée bonne ou excellente.

6.2.2 Incertitudes liées aux scénarios

Étant donné la nature du produit et les limites des frontières du système, les sources typiques des incertitudes liées à l'élaboration des scénarios (p. ex. profil d'utilisation des produits, gestion de fin de vie méthode d'affectation des entrants et sortants du recyclage) n'ont pas besoin d'être analysées.

L'analyse de scénarios est donc plutôt ciblée sur les paramètres considérés comme étant plus incertains :

- Le marché desservi par FerroQuébec.
- La procédure pour l'affectation des impacts au processus de production de silicium métal.
- Les principaux processus contributeurs (production d'électricité pour le scénario de référence et émissions sur site pour FerroQuébec).
- La méthode utilisée pour l'évaluation des impacts.

Marché desservi par FerroQuébec

Il a été mis en évidence au Tableau 5.4 que le silicium métal distribué sur le marché canadien a la plus faible empreinte carbone des trois marchés visés par FerroQuébec. L'empreinte carbone du scénario de référence a donc été évaluée pour la situation où 20% de la production de FerroQuébec était acheminée vers des clients canadiens. Les volumes distribués sur les autres marchés sont ajustés proportionnellement à la répartition par défaut (Tableau 3.3). Vu la taille du marché canadien et la répartition actuelle des parts de marché, il n'est pas réaliste d'aller au-delà de cette valeur. Les résultats de cette analyse sont donnés au Tableau 6.4.

Tableau 6.4 – Analyse de scénario sur le marché desservi

Émissions de GES (tCO_2e/tSi)	Par défaut	Distribution accrue au Canada
FerroQuébec	4,12	4,10
Scénario de référence 1	12,73	12,19
Scénario de référence 2	13,20	11,77
Différence moyenne	-68,8%	-65,2%

Bien que l'empreinte carbone du scénario de référence soit affectée à la baisse (environ -7%) dans le cas où une plus grande quantité de silicium métal est écoulée sur le marché canadien, l'empreinte carbone du scénario FerroQuébec demeure significativement plus faible.

Procédure pour l'affectation des impacts aux coproduits du silicium métal

Tel que décrit à la section 3.5, une approche économique a été retenue par défaut pour affecter les impacts de la production de silicium métal aux coproduits générés par le même fait, soit la fumée de silice et le laitier. L'approche consistant à procéder à l'extension des frontières a aussi été modélisée, dans le but d'évaluer l'impact de ce choix méthodologique sur les résultats. Dans cette situation, les

impacts des produits auxquels se substituent les coproduits (soit le clinker pour la fumée de silice et le quartz pour le laitier) sont soustraits des impacts totaux générés par la production de silicium métal. La comparaison des empreintes carbone calculées selon les deux approches est effectuée au Tableau 6.5.

Tableau 6.5 – Analyse de scénario sur la procédure d'affectation pour la production de silicium métal

Émissions de GES (tCO_2e/tSi)	Affectation économique	Extension des frontières
FerroQuébec	4,12	3,99
Scénario de référence 1	12,73	12,84
Scénario de référence 2	13,20	13,33
Différence moyenne	-68,8%	- 70,0%

L'approche par extension des frontières du système est plus favorable au scénario FerroQuébec qu'au scénario de référence. En effet, une réduction d'environ 3% de l'empreinte carbone du scénario FerroQuébec est observée, tandis que pour le scénario de référence, la hausse est d'environ 1%. Cette différence s'explique par le fait que la prise en compte des émissions totales de l'usine de silicium métal pour le scénario de référence représente une augmentation plus grande que la réduction associée à l'empreinte carbone d'une quantité équivalente de produits substitués, contrairement au scénario FerroQuébec. En d'autres mots, les émissions affectées aux coproduits selon l'approche économique sont supérieures aux émissions associées aux produits qu'ils substituent. Toutefois, le choix d'une approche ou d'une autre n'a presque pas d'influence sur les résultats totaux.

Consommation d'intrants à l'usine de FerroQuébec

FerroQuébec considère un mode de production alternatif où la consommation de charbon se verrait légèrement réduite (de 0,85t à 0,80t par t de silicium métal), son apport en carbone dans le procédé étant compensé par une consommation accrue de 0,3t de copeaux de bois. L'empreinte carbone du scénario FerroQuébec dans cette configuration est présentée au Tableau 6.6.

Tableau 6.6 – Analyse de scénario sur la procédure d'affectation pour la production de silicium métal

Émissions de GES (tCO_2e/tSi)	Par défaut (0,85t de charbon et 4,4t de bois)	Consommation accrue en bois (0,8t de charbon et 4,7t de bois)
FerroQuébec	4,12	4,05
Scénario de référence 1	12,73	12,73
Scénario de référence 2	13,20	13,20
Différence moyenne	-68,8%	- 69,3%

Une consommation réduite en charbon signifie des émissions de CO_2 fossiles plus faibles sur site pour le scénario FerroQuébec et par conséquent une empreinte carbone plus faible. Toutefois, l'effet sur l'empreinte carbone totale reste limitée et l'écart entre le scénario FerroQuébec et le scénario de référence demeure sensiblement le même.

Production d'électricité aux États-Unis et en Chine

Les processus de production d'électricité par les centrales au charbon aux États-Unis et en Chine ont été ciblés parmi les principaux contributeurs à la section 6.1. Dans ces pays, le mélange énergétique varie grandement d'une région à l'autre. Par conséquent, l'emplacement des usines desquelles s'approvisionnent les clients peut s'avérer un paramètre important. Dans le but d'évaluer l'influence de ce facteur, le scénario de référence a été évalué dans deux cas distincts :

- Le silicium métal provient des régions comptant le moins sur les centrales au charbon aux États-Unis (*Northeast Power Coordinating Council* ou NPCC) et en Chine (région du Sud-Ouest, regroupant notamment les provinces du Yunnan, Sichuan et Guizhou).
- Le silicium métal des États-Unis provient de la région comptant le plus sur l'électricité produite à partir de charbon (*Reliability First Corporation* ou RFC) et d'usines chinoises alimentées par le mélange énergétique national moyen.

L'empreinte carbone calculée pour le scénario de référence selon ces deux cas, en plus de l'approvisionnement moyen en électricité, est donnée au Tableau 6.7.

Tableau 6.7 – Analyse de scénario sur la provenance du silicium métal aux États-Unis et en Chine

Émissions de GES (tCO_2e/tSi)	Moyenne des régions productrices	Émissions réduites (US, NPCC et Chine, S-O)	Émissions accrues (US, RFC et Chine, national)
FerroQuébec	4,12	4,12	4,12
Scénario de référence 1	12,73	10,24	13,69
Scénario de référence 2	13,20	11,16	14,06
Différence moyenne	-68,8%	- 63,1%	-70,7%

L'emplacement des usines a un effet significatif sur l'empreinte carbone du scénario de référence. Celle-ci est inférieure d'environ 17% dans la situation où un mélange énergétique plus « propre » sert à alimenter les usines. Dans le cas inverse, lorsque l'électricité provient en plus grande partie de centrales thermique au charbon, l'empreinte carbone est plus élevée d'environ 7%. Toutefois, même en faisant l'hypothèse que les usines états-uniennes et chinoises sont localisées dans les régions où l'électricité est produite à l'aide de mode émettant moins de GES, le scénario FerroQuébec demeure largement favorable au scénario de référence.

Méthode d'évaluation des impacts sur les changements climatiques

Le PRP des GES est réévalué périodiquement et les valeurs reconnues internationalement sont publiées dans les rapports du GIEC. Pour les principaux GES, les PRP publiés en 2013 sont légèrement différents de ceux publiés en 2007 par le GIEC (voir Tableau 6.8).

Tableau 6.8 – PRP des principaux GES

GES	Formule chimique	GIEC 2007 PRP 100 ans (éq. CO_2)	GIEC 2013 PRP 100 ans (éq. CO_2)
Dioxyde de carbone	CO_2	1	1
Méthane (fossile)	CH_4	25	30
Méthane (biogénique)	CH_4	*22**	28
Oxyde nitreux	N_2O	298	265

*Valeur estimée selon le taux de dégradation du CH_4 en CO_2.

Les résultats d'empreinte carbone calculés selon les PRP publiés en 2007 et en 2013 sont comparés au Tableau 6.9 pour déterminer s'ils sont sensibles à ce paramètre.

Tableau 6.9 – Analyse de scénario sur les PRP utilisés

Émissions de GES (tCO_2e/tSi)	GIEC 2007	GIEC 2013
FerroQuébec	4,11	4,12
Scénario de référence 1	12,61	12,73
Scénario de référence 2	13,08	13,20
Différence moyenne	- 68,6%	-68,8%

La faible différence de résultats pour le scénario de référence s'explique par le PRP du méthane plus élevé retenu dans la dernière mise à jour du GIEC, cette substance étant principalement émise lors de la production de charbon de bois dans les fours conventionnels (Brésil, Afrique du Sud et Thaïlande). Toutefois, les résultats sont presque identiques selon les deux cas.

6.2.3 Incertitudes liées à la modélisation

La dernière source d'incertitude, qui n'est pas spécifique au produit étudié ici, est liée à l'exactitude des facteurs de réchauffement planétaire des différents gaz à effet de serre. Selon le GIEC, il y a une incertitude d'environ ±35% sur les PRP permettant d'exprimer les principaux GES en équivalent CO_2 (±40% pour le CH_4 et ±30% pour le N2O) (Myrhe et Schindell, 2013). Nous utilisons dans cette étude les derniers facteurs de réchauffement publiés par le GIEC. De plus, comme le principal GES émis par les différents systèmes de produits est le CO_2, cette incertitude n'affecte pas les comparaisons faites dans la présente étude.

7. Revue critique

La revue critique a été réalisée par un comité de revue indépendant présidé par Jean-François Ménard, analyste senior au Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG).

Tableau 7.1 – Membres du comité de revue critique

Membre	Titre et organisation	Rôle	Compétences
Jean-François Ménard, B.Ing.	Analyste senior, CIRAIG	Président du comité de revue critique	Plus de 10 ans d'expérience dans la réalisation d'ACV et d'empreinte carbone, incluant la participation au projet pilote empreinte carbone Québec.
Dimitrios Filippou, Ing., Ph.D.	Métallurgiste, Rio Tinto Fer et Titane	Réviseur externe	Plus de 15 ans d'expérience dans l'extraction hydrométallurgique (zinc, fer, arsenic et titane). Ingénieur titulaire d'un doctorat en génie métallurgique.
Claude Bazin, Ing., Ph.D.	Professeur, Département de génie des mines, de la métallurgie et des matériaux, Université Laval	Réviseur externe	Ingénieur titulaire d'un doctorat en génie métallurgique. 5 ans d'expérience dans l'industrie minière. Les matières enseignées à l'Université Laval incluent les procédés pyrométallurgiques et électrométallurgiques.

La revue critique a été réalisée en conformité avec les normes ISO 14040 et 14044 et tient compte des bonnes pratiques recommandées dans le *GHG Protocol Product Standard* et la spécification technique ISO 14067. Le processus suivi est décrit ci-dessous :

- La version préliminaire du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude a été envoyée à l'expert ACV le 3 décembre 2014.
- La première note de revue a été envoyée aux auteurs le 10 décembre 2014.
- La version préliminaire du rapport final de l'étude a été envoyé au comité de revue critique le 2 février 2015.
- La deuxième note de revue a été envoyée aux auteurs le 4 mars 2015.
- La version révisée du rapport final de l'étude a été envoyée au comité de revue critique le 16 mars 2015.
- Le rapport de revue critique, incluant le jugement global sur la qualité de l'étude, a été envoyé aux auteurs le 24 mars 2015.

Le comité de revue est arrivé à la conclusion que les méthodes et données utilisées rencontrent les exigences prévues dans les normes ISO 14040 et ISO 14044 et que le rapport d'étude est transparent et cohérent. Le rapport de revue critique préparé par le CIRAIG est disponible dans son intégralité à l'annexe D.

8. Références

Australian BREE (2013). Energy in Australia 2013, http://www.bree.gov.au/files/files/publications/energy-in-aust/bree-energyinaustralia-2013.pdf

Bailis, R., Rujanevich, C., Dwivedi, P., de Oliveira Vilelab, A., Changa, H., Carneiro de Mirandac, R. (2013). "Innovation in charcoal production : a comparative LCA of two kiln technologies in Brazil." *Energy for Sustainable Development*, Vol. 17, No. 2, pp. 189-201.

Blonk Consultants (2014). Direct Land Use Change Assessment Tool, http://blonkconsultants.nl/en/tools/land-use-change-tool.html

Bradshaw. F.J. (1998). Old Growth Mapping, http://www.fpc.wa.gov.au/content_migration/_assets/documents/environment/fsc/rfa-old-growth-mapping-report.pdf

CRU (2013). Silicon Cost Data Service, Londres (Royaume-Uni).

De Wild-Schloten, M.J. (2013). "Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 119, pp. 296–305.

Environnement Canada (2014). Recherche en ligne des données de Gaz à effet de serre – Données déclarées par les installations, http://ec.gc.ca/ges-ghg/donnees-data/index.cfm?do=search&lang=Fr

Government of Western Australia (2014). South West native forests in Western Australia, http://www.fpc.wa.gov.au/content_migration/_assets/documents/about_us/publications/swnf-1-overview.pdf

FAO (2011). 2010 Global Forest Assessment, http://www.fao.org/docrep/013/i1757e/i1757e.pdf

FAO Charcoal http://www.fao.org/docrep/X5555E/x5555e03.htm

FAO (1996). Reports Submitted to the Regional Expert Consultation on Eucalyptus - Volume II, http://www.fao.org/docrep/005/ac772e/ac772e0n.htm

FAO SOF http://www.fao.org/docrep/013/i2000e/i2000e.pdf

Friedley, D., Romankiewicz, J., Fino-Chen, C. (2013). China Energy Databook, http://china.lbl.gov/research-projects/china-energy-databook

Hellberg, E., Josefsson, T., Östlund, L. (2009). "The transformation of a Norway spruce dominated landscape since pre-industrial times in northern Sweden : the influence of modern forest management on forest structure". *Silva Fennica*, Vol. 43, No. 5, pp. 783–797.

Hsu, D.D., O'Donoughue, P., Fthenakis, V., Heath, G.A. Kim, H.C., Sawyer, P., Choi, J.-K., Turney, D. E. (2012). "Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation", *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 16, Issue Supplement s1, April 2012, pp. S122–S135.

Hydro-Québec (2013). Approvisionnements énergétiques et émissions atmosphériques, http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/pdf/approvisionnements_energetiques_et_emissions_atmospheriques_d_hydro_quebec_2012.pdf

Hydro-Québec (2014). Approvisionnements énergétiques et émissions atmosphériques, http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/pdf/approvisionnements_energetiques_et_emissions_atmospheriques_d_hydro_quebec_2013.pdf

IEA (2014). Statistics – Electricity and Heat, http://www.iea.org/countries/

IGN (2014). Inventaire forestier - La surface forestière en France métropolitaine, http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?rubrique11

IFC (2012). Forest Industry Carbon Assessment Tool, http://www.ficatmodel.org/landing/index.html

IPCC (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html

IPPC (2001). Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries, http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/nfm_bref_1201.pdf

ISO (2006a). 14040:2006 - Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre. International Standard Organization, Genève (Suisse).

ISO (2006b). 14044:2006 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices. International Standard Organization, Genève (Suisse).

ISO (2013). 14067:2013 - Gaz à effet de serre -- Empreinte carbone des produits -- Exigences et lignes directrices pour la quantification et la communication. International Standard Organization, Genève (Suisse).

Kurz, W.A., Beukema, S.J., Apps, M.J. (1998). "Carbon budget implications of the transition from natural to managed disturbance regimes in forest landscapes", *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 2, No. 4, pp. 405-421.

Laurent, B.A. (2011). Analyse du cycle de vie du bois lamellé-collé spécifique à la forêt boréale québécoise. Mémoire de maîtrise, UQAC.

Lessard, D. (2013). Effet de la transformation d'une forêt naturelle en forêt aménagée sur les bénéfices de séquestration inclus à l'empreinte carbone des produits du bois. Mémoire de maîtrise, UQAC.

Ma, Y., Geng, Y., Huang, Y., Shi,Y., Niklaus, P.A., Schmid, B., He, J.-S., "Effect of clear-cutting silviculture on soil respiration in a subtropical forest of China", *Journal of Plant Ecology*, Vol. 6, No. 5, pp. 335-348.

MRNF (2011). Profil des produits forestiers – Technologies de bioénergies à base de biomasse forestières, http://agroenergie.ca/pdf/Applications_commerciales/Technologies_bioenergies.pdf

MRN (2013). Ressources et industries forestières – Portrait statistique édition 2013, http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/portrait-statistique-2013.pdf

Myrhe, G., Schindell, D. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf

Norway Climate and Pollution Agency (2013). Greenhouse Gas Emissions 1990-2011 - National Inventory Report, http://www.miljodirektoratet.no/old/klif/publikasjoner/3030/ta3030.pdf

Peng, J., Lu, L., Yang. H. (2013). "Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 19, pp. 255–274.

Pennise, D.M., Smith, K.R., Kithinji, J.P., Rezende, M.E., Raad, T.J., Zhang, J., Fan, C. (2001). "Emissions of greenhouse gases and other airborne pollutants from charcoal making in Kenya and Brazil", "Journal of Geophysical Research : Atmospheres", Vol. 106, No. D20, pp. 24143–24155.

Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère, chapitre Q-2, r. 15, http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R15.HTM

Schmidt, M., Hottenroth, H., Schottler, M., Fetzer, G., Schlüter, B. (2012). "Life cycle assessment of silicon wafer processing for microelectronic chips and solar cells", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 17, No. 2, pp 126-144.

Sea Rates (2014). Distances and Time, http://www.searates.com/reference/portdistance/

Statistique Canada (2014). Base de données sur le commerce international canadien de marchandises, 280469 Silicium nda, http://www5.statcan.gc.ca/cimt-cicm/home-accueil?lang=fra&fpv=1130

Stylos, N., Koroneos, C. (2014). "Carbon footprint of polycrystalline photovoltaic systems", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 64, pp. 639-645.

Szymkowski, C.J., Bultitude-Paull, J.M. (1992). "The production of high-quality silicon metal at Simcoa", INFACON 6 Proceedings, Vol. 1. Johannesburg, SAIMM, pp. 185-191.

UNEP (2009). Vital Forest Graphics, http://www.unep.org/vitalforest/

USDA (2014). U.S. Forest Resource Facts and Historical Trends, http://www.fia.fs.fed.us/library/brochures/docs/2012/ForestFacts_1952-2012_Metric.pdf

US Department of Commerce (2014), Global Patterns of U.S. Merchandise Trade, http://tse.export.gov/TSE/TSEReports.aspx?DATA=NTD

US DOE (2012). Detailed Coal Specifications, http://www.netl.doe.gov/File%20Library/research/energy%20analysis/publications/QGESS_DetailCoalSpecs_Rev4_20130510.pdf

USEPA (2014a). 2013 Greenhouse Gas Emissions from Large Facilities, http://ghgdata.epa.gov/ghgp/main.do

USEPA (2014b). eGRID 2010 data, http://www.epa.gov/cleanenergy/energy-resources/egrid/

US Geological Survey (2014). Mineral Commodity Summaries – Silicon, http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf

Weidema, B.P.; Bauer, Ch.; Hischier, R.; Mutel, Ch.; Nemecek, T.; Reinhard, J.; Vadenbo, C.O.; Wernet, G, 2013, *The ecoinvent database : Overview and methodology*, Data quality guideline for the ecoinvent database version 3

WRI et WBCSD (2011). GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, Washington DC, United States.

Annexe A – Données d'activité et facteurs d'émission

A.1 Production de silicium métal – FerroQuébec

Sortants à la technosphère (produits)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Affectation économique	Données	Référence
Silicium métal, à l'usine	1	1	t	95,6%		FerroAtlanticà
Fumée de silice, à l'usine		0,4	t	3,4%		FerroAtlanticà
Laitier, à l'usine		0,11	t	1,0%		FerroAtlanticà
Produits évités						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Clinker		0,4	t	Clinker {CA-QC}| production	Ecoinvent 3.1	
Quartz (sable de silice)		0,11	t	Silica sand {DE}| production	Ecoinvent 3.1	
Produits évités (dans le cas de l'extension des frontières du système)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Quartz	2,53	2,65	t	Silica sand {DE}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Charbon	0,81	0,85	t	Hard coal {RLA}| mine operation	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Bois	4,21	4,4	t	Sawlog and veneer log, softwood, measured as solid wood under bark {CA-QC}| softwood forestry, mixed species, boreal forest (adapté)	Ecoinvent 3.1 (adapté)	FerroAtlanticà
Électrode (noyau)	15,3	16	kg	Graphite {RER}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Électrode (pâte)	68,8	72	kg	Anode, paste, for aluminium electrolysis {CA-QC}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Calcaire	42,1	44	kg	Limestone, crushed, for mill {CA-QC}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Propane	12,4	13	kg	Liquefied petroleum gas {RoW}| petroleum refinery operation	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Diesel	5,29	5,5	kg	Diesel, low-sulfur {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Électricité	11,5	12,0	MWh	Electricity, medium voltage {CA-QC}| market for	Ecoinvent 3.1 (adapté)	FerroAtlanticà
Transport camion	774	810	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RoW}	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Transport train	880	920	tkm	Transport, freight train {US}| diesel	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Transport barge	28,7	30	tkm	Transport, freight, inland waterways, barge {RoW}	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Transport bateau	23154	24 220	tkm	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Sortants à la nature (émissions)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Compartiment	Protocole	Référence
CO_2 (fossile)	2,46	2,57	t	Atmosphère	RDO QC.19	FerroAtlanticà
CO_2 (biogénique)	4,34	4,54	t	Atmosphère	RDO QC.19	FerroAtlanticà
CH_4	1,43e-3	1,5e-3	t	Atmosphère	RDO QC.19	FerroAtlanticà
N_2O	2,58e-6	2,7e-6	t	Atmosphère	RDO QC.19	FerroAtlanticà
Sortants à la technosphère (déchets)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus ou commentaire	Données	Reference
Aucun				Peu de déchets générés sur site		FerroAtlanticà

Note : Q aff éco = quantité avec affectation économique. Q ext fr = quantité selon extension des frontières.

A.2 Production de silicium métal – Scénario de référence

Australie

Sortants à la technosphère (produits)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Affectation économique	Données	Référence
Silicium métal, à l'usine	1	1	t	96,1%		
Fumée de silice, à l'usine		0,35	t	3,0%		IPPC (2001)
Laitier, à l'usine		0,1	t	0,9%		IPPC (2001)
Produits évités						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Clinker		0,35	t	Clinker {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Quartz (sable de silice)		0,1	t	Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Produits évités (dans le cas de l'extension des frontières du système)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Quartz	2,40	2,5	t	Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Charbon	0,37	0,39	t	Hard coal {AU}| market for	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Électrode (noyau)	76,9	80	kg	Graphite {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Bois	0,94	0,98	t	Wood chips, wet, measured as dry mass {RoW}| wood chips production, hardwood, at sawmill	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Charbon de bois	0,69	0,72	t	Charcoal {AU}| production	Szymkowski et Bultitude-Paull	CRU (2013)
Calcaire	42,3	44	kg	Limestone, crushed, for mill {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Électricité	10,9	11,3	MWh	Electricity, medium voltage {AU}| market for	Ecoinvent 3.1 (adapté)	CRU (2013)
Propane	12,5	13	kg	Liquefied petroleum gas {RoW}| petroleum refinery operation	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Diesel	5,29	5,5	kg	Diesel, low-sulfur {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Transport camion	1094	1138	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RoW}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Transport bateau	605	630	tkm	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Sortants à la nature (émissions)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Compartiment	Protocole	Référence
CO_2 (fossile)	1,52	1,58	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CO_2 (biogénique)	3,32	3,45	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CH_4	1,43e-3	1,5e-3	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
N_2O	2,58e-6	2,7e-6	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
Sortants à la technosphère (déchets)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus ou commentaire	Données	Reference
Aucun				Peu de déchets générés sur site		FerroAtlanticà

Note : Q aff éco = quantité avec affectation économique. Q ext fr = quantité selon extension des frontières.

Brésil

Sortants à la technosphère (produits)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Affectation économique	Données	Référence
Silicium métal, à l'usine	1	1	t	96,1%		
Fumée de silice, à l'usine		0,35	t	3,0%		IPPC (2001)
Laitier, à l'usine		0,1	t	0,9%		IPPC (2001)
Produits évités						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Clinker		0,35	t	Clinker {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Quartz (sable de silice)		0,1	t	Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Produits évités (dans le cas de l'extension des frontières du système)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Quartz	2,42	2,52	t	Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Électrode	96	100	kg	Graphite {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Bois	0,48	0,5	t	Roundwood, eucalyptus from plantations {BR}| softwood forestry,eucalyptus plantations	Bailis et al. Pennise et al.	CRU (2013)
Charbon de bois	1,25	1,3	t	Charcoal {BR}| production	Bailis et al. Pennise et al.	CRU (2013)
Calcaire	42	44	kg	Limestone, crushed, for mill {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Électricité	11,8	12,3	MWh	Electricity, medium voltage {BR}| market for	Ecoinvent 3.1 (adapté)	CRU (2013)
Propane	12,5	13	kg	Liquefied petroleum gas {RoW}| petroleum refinery operation	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Diesel	5,29	5,5	kg	Diesel, low-sulfur {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Transport camion	1094	1138	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 {RoW}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Sortants à la nature (émissions)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Compartiment	Protocole	Référence
CO_2 (fossile)	0,43	0,45	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CO_2 (biogénique)	4,06	4,22	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CH_4	1,43e-3	1,5e-3	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
N_2O	2,58e-6	2,7e-6	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
Sortants à la technosphère (déchets)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus ou commentaire	Données	Reference
Aucun				Peu de déchets générés sur site		FerroAtlanticà

Note : Q aff éco = quantité avec affectation économique. Q ext fr = quantité selon extension des frontières.

Canada

Sortants à la technosphère (produits)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Affectation économique	Données	Référence
Silicium métal, à l'usine	1	1	t	96,1%		
Fumée de silice, à l'usine		0,35	t	3,0%		IPPC (2001)
Laitier, à l'usine		0,1	t	0,9%		IPPC (2001)
Produits évités						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Clinker		0,35	t	Clinker {CA-QC}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Quartz (sable de silice)		0,1	t	Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Produits évités (dans le cas de l'extension des frontières du système)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Quartz	2,44	2,54	t	Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Charbon	1,16	1,21	t	Hard coal {RNA}| market for	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Électrode	106	110	kg	Graphite {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Bois	2,44	2,54	t	Pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark {RoW}| softwood forestry, pine, sustainable forest management	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Calcaire	42,3	44	kg	Limestone, crushed, for mill {CA-QC}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Électricité	12,5	13,0	MWh	Electricity, medium voltage {CA-QC}| market for	Ecoinvent 3.1 (adapté)	CRU (2013)
Propane	12,5	13	kg	Liquefied petroleum gas {RoW}| petroleum refinery operation	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Diesel	5,29	5,5	kg	Diesel, low-sulfur {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Transport camion	1113	1158	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RoW}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Transport bateau	2516	2618	tkm	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Sortants à la nature (émissions)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Compartiment	Protocole	Référence
CO_2 (fossile)	3,45	3,59	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CO_2 (biogénique)	2,98	3,10	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CH_4	1,43e-3	1,5e-3	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
N_2O	2,58e-6	2,7e-6	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
Sortants à la technosphère (déchets)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus ou commentaire	Données	Reference
Aucun				Peu de déchets générés sur site		FerroAtlanticà

Note : Q aff éco = quantité avec affectation économique. Q ext fr = quantité selon extension des frontières.

Chine

Sortants à la technosphère (produits)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Affectation économique	Données	Référence
Silicium métal, à l'usine	1	1	t	97,6%		
Fumée de silice, à l'usine		0,17	t	1,5%		IPPC (2001)
Laitier, à l'usine		0,1	t	0,9%		IPPC (2001)
Produits évités						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Clinker		0,17	t	Clinker {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Quartz (sable de silice)		0,1	t	Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Produits évités (dans le cas de l'extension des frontières du système)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Quartz	2,66	2,73	t	Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Charbon	1,18	1,21	t	Hard coal {CN}| market for	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Coke de pétrole	0,88	0,9	t	Petroleum coke {RoW}| petroleum refinery operation	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Électrode	97,6	100	kg	Graphite {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Bois	0,22	0,23	t	Roundwood {GLO}| harvest, primary forest (adapté)	Ecoinvent 3.1 (adapté)	CRU (2013)
Charbon de bois	0,22	0,23	t	Charcoal {CN}| production	Bailis et al. Pennise et al.	CRU (2013)
Calcaire	42,9	44	kg	Limestone, crushed, for mill {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Électricité	13,3	13,6	MWh	Electricity, medium voltage {CN}| market for	Ecoinvent 3.1 (adapté)	CRU (2013)
Propane	12,7	13	kg	Liquefied petroleum gas {RoW}| petroleum refinery operation	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Diesel	5,37	5,5	kg	Diesel, low-sulfur {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Transport camion	1441	1476	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 {RoW}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Transport train	782	801	tkm	Transport, freight train {CN}| diesel	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Sortants à la nature (émissions)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Compartiment	Protocole	Référence
CO_2 (fossile)	4,54	4,65	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CO_2 (biogénique)	0,87	0,89	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CH_4	1,43e-3	1,5e-3	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
N_2O	2,58e-6	2,7e-6	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
Sortants à la technosphère (déchets)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus ou commentaire	Données	Reference
Aucun				Peu de déchets générés sur site		FerroAtlanticà

Note : Q aff éco = quantité avec affectation économique. Q ext fr = quantité selon extension des frontières.

France

Sortants à la technosphère (produits)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Affectation économique	Données	Référence
Silicium métal, à l'usine	1	1	t	96,1%		
Fumée de silice, à l'usine		0,35	t	3,0%		IPPC (2001)
Laitier, à l'usine		0,1	t	0,9%		IPPC (2001)
Produits évités						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Clinker		0,35	t	Clinker {Europe without Switzerland}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Quartz (sable de silice)		0,1	t	Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Produits évités (dans le cas de l'extension des frontières du système)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Quartz	2,42	2,52	t	Silica sand {DE}| production	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Charbon	1,28	1,33	t	Hard coal {WEU}| mine operation	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Coke de pétrole	0,05	0,05	t	Petroleum coke {RoW}| petroleum refinery operation	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Électrode (noyau)	15,3	16	kg	Graphite {RER}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Électrode (pâte)	68,8	72	kg	Anode, paste, for aluminium electrolysis {CA-QC}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Bois	1,6	1,70	t	Pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark {CH}| softwood forestry, mixed species, sustainable forest management	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Calcaire	42,3	44	kg	Limestone, crushed, for mill {CH}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Électricité	11,1	11,6	MWh	Electricity, medium voltage {FR}| market for	Ecoinvent 3.1 (adapté)	CRU (2013)
Propane	12	13	kg	Liquefied petroleum gas {RoW}| petroleum refinery operation	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Diesel	5,29	5,5	kg	Diesel, low-sulfur {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Transport camion	1167	1214	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RoW}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Transport bateau	12612	13124	tkm	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Sortants à la nature (émissions)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Compartiment	Protocole	Référence
CO_2 (fossile)	3,90	4,00	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CO_2 (biogénique)	1,95	2,00	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CH_4	1,43e-3	1,5e-3	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
N_2O	2,58e-6	2,7e-6	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
Sortants à la technosphère (déchets)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus ou commentaire	Données	Reference
Aucun				Peu de déchets générés sur site		FerroAtlanticà

Note : Q aff éco = quantité avec affectation économique. Q ext fr = quantité selon extension des frontières.

Norvège

Sortants à la technosphère (produits)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Affectation économique	Données	Référence
Silicium métal, à l'usine	1	1	t	96,1%		
Fumée de silice, à l'usine		0,35	t	3,0%		IPPC (2001)
Laitier, à l'usine		0,1	t	0,9%		IPPC (2001)
Produits évités						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Clinker		0,35	t	Clinker {Europe without Switzerland}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Quartz (sable de silice)		0,1	t	Silica sand {DE}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Produits évités (dans le cas de l'extension des frontières du système)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Quartz	2,44	2,54	t	Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Charbon	1,16	1,21	t	Hard coal {RNA}| market for	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Électrode	96	100	kg	Graphite {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Bois	1,63	1,70	t	Pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark {RoW}| softwood forestry, pine, sustainable forest management	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Calcaire	42,3	44	kg	Limestone, crushed, for mill {CA-QC}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Électricité	11,7	12,2	MWh	Electricity, medium voltage {CA-QC}| market for	Ecoinvent 3.1 (adapté)	CRU (2013)
Propane	12,5	13	kg	Liquefied petroleum gas {RoW}| petroleum refinery operation	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Diesel	5,29	5,5	kg	Diesel, low-sulfur {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Transport camion	505	525	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RoW}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Transport train	1031	1073	tkm	Transport, freight train {Europe without Switzerland}| diesel	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Transport bateau	989	1029	tkm	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Sortants à la nature (émissions)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Compartiment	Protocole	Référence
CO_2 (fossile)	4,65	4,76	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CO_2 (biogénique)	2,02	2,07	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CH_4	1,43e-3	1,5e-3	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
N_2O	2,58e-6	2,7e-6	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
Sortants à la technosphère (déchets)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus ou commentaire	Données	Reference
Aucun				Peu de déchets générés sur site		FerroAtlanticà

Note : Q aff éco = quantité avec affectation économique. Q ext fr = quantité selon extension des frontières.

Afrique du Sud

Sortants à la technosphère (produits)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Affectation économique	Données	Référence
Silicium métal, à l'usine	1	1	t	96,1%		
Fumée de silice, à l'usine		0,35	t	3,0%		IPPC (2001)
Laitier, à l'usine		0,1	t	0,9%		IPPC (2001)
Produits évités						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Clinker		0,35	t	Clinker {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Quartz (sable de silice)		0,1	t	Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Produits évités (dans le cas de l'extension des frontières du système)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Quartz	2,51	2,61	t	Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Charbon	0,19	0,2	t	Hard coal {RLA}| market for	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Coke de pétrole	0,03	0,03	t	Petroleum coke {RoW}| petroleum refinery operation	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Électrode (noyau)	15,4	16	kg	Graphite {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Électrode (pâte)	69,2	72	kg	Anode, paste, for aluminium electrolysis {CA-QC}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Bois	1,6	1,69	t	Roundwood, eucalyptus from plantations {ZA}| softwood forestry,eucalyptus plantations	Bailis et al. Pennise et al.	CRU (2013)
Charbon de bois	0,9	0,91	t	Charcoal {ZA}| production	Bailis et al. Pennise et al.	CRU (2013)
Calcaire	42,3	44	kg	Limestone, crushed, for mill {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Électricité	12	12,3	MWh	Electricity, medium voltage {ZA}| market for	Ecoinvent 3.1 (adapté)	CRU (2013)
Propane	12,49	13	kg	Liquefied petroleum gas {RoW}| petroleum refinery operation	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Diesel	5,3	5,5	kg	Diesel, low-sulfur {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Transport camion	42	44	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RoW}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Transport camion	1268	1319	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 {RoW}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Transport bateau	3729	3880	tkm	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Sortants à la nature (émissions)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Compartiment	Protocole	Référence
CO_2 (fossile)	0,75	0,77	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CO_2 (biogénique)	4,56	4,67	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CH_4	1,43e-3	1,5e-3	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
N_2O	2,58e-6	2,7e-6	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
Sortants à la technosphère (déchets)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus ou commentaire	Données	Reference
Aucun				Peu de déchets générés sur site		FerroAtlanticà

Note : Q aff éco = quantité avec affectation économique. Q ext fr = quantité selon extension des frontières.

Thaïlande

Sortants à la technosphère (produits)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Affectation économique	Données	Référence
Silicium métal, à l'usine	1	1	t	96,1%		
Fumée de silice, à l'usine		0,35	t	3,0%		IPPC (2001)
Laitier, à l'usine		0,1	t	0,9%		IPPC (2001)
Produits évités						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Clinker		0,35	t	Clinker {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Quartz (sable de silice)		0,1	t	Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Produits évités (dans le cas de l'extension des frontières du système)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Quartz	2,51	2,61	t	Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Coke de pétrole	0,48	0,5	t	Petroleum coke {RoW}| petroleum refinery operation	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Électrode	96	100	kg	Graphite {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Bois	0,50	0,52	t	Roundwood, eucalyptus from plantations {TH}| softwood forestry,eucalyptus plantations	Bailis et al. Pennise et al.	CRU (2013)
Charbon de bois	0,82	0,85	t	Charcoal {TH}| production	Bailis et al. Pennise et al.	CRU (2013)
Calcaire	42,3	44	kg	Limestone, crushed, for mill {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Électricité	11,5	12,0	MWh	Electricity, medium voltage {TH}| market for	Ecoinvent 3.1 (adapté)	CRU (2013)
Propane	12,5	13	kg	Liquefied petroleum gas {RoW}| petroleum refinery operation	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Diesel	5,29	5,5	kg	Diesel, low-sulfur {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Transport camion	653	680	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 {RoW}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Transport bateau	1792	1865	tkm	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Sortants à la nature (émissions)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Compartiment	Protocole	Référence
CO_2 (fossile)	2,12	2,17	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CO_2 (biogénique)	2,85	2,92	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CH_4	1,43e-3	1,5e-3	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
N_2O	2,58e-6	2,7e-6	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
Sortants à la technosphère (déchets)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus ou commentaire	Données	Reference
Aucun				Peu de déchets générés sur site		FerroAtlanticà

Note : Q aff éco = quantité avec affectation économique. Q ext fr = quantité selon extension des frontières.

États-Unis

Sortants à la technosphère (produits)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Affectation économique	Données	Référence
Silicium métal, à l'usine	1	1	t	96,1%		
Fumée de silice, à l'usine		0,35	t	3,0%		IPPC (2001)
Laitier, à l'usine		0,1	t	0,9%		IPPC (2001)
Produits évités						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Clinker		0,35	t	Clinker {US}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Quartz (sable de silice)		0,1	t	Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	IPPC (2001)
Produits évités (dans le cas de l'extension des frontières du système)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus	Données	Référence
Quartz	2,44	2,54	t	Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Charbon	1,14	1,19	t	Hard coal {RNA}| market for	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Électrode	86	90	kg	Graphite {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Bois	2,44	2,54	t	Pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark {RoW}| softwood forestry, pine, sustainable forest management	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Calcaire	42,3	44	kg	Limestone, crushed, for mill {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Électricité	12,5	13,0	MWh	Electricity, medium voltage {East-US}| market for	Ecoinvent 3.1 (adapté)	CRU (2013)
Propane	12,5	13	kg	Liquefied petroleum gas {RoW}| petroleum refinery operation	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Diesel	5,29	5,5	kg	Diesel, low-sulfur {RoW}| production	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Transport camion	1110	1155	tkm	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RoW}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Transport train	2773	2886	tkm	Transport, freight train {US}| diesel	Ecoinvent 3.1	FerroAtlanticà
Transport bateau	1843	1918	tkm	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}	Ecoinvent 3.1	CRU (2013)
Sortants à la nature (émissions)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Compartiment	Protocole	Référence
CO_2 (fossile)	3,75	3,90	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CO_2 (biogénique)	2,99	3,11	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
CH_4	1,43e-3	1,5e-3	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
N_2O	2,58e-6	2,7e-6	t	Atmosphère	RDO QC.19	CRU (2013)
Sortants à la technosphère (déchets)						
Nom	Q aff éco	Q ext fr	Un.	Processus ou commentaire	Données	Reference
Aucun				Peu de déchets générés sur site		FerroAtlanticà

Note : Q aff éco = quantité avec affectation économique. Q ext fr = quantité selon extension des frontières.

A.3 Facteurs d'émission des principaux processus contributeurs

Scénario FerroQuébec et scénario de référence

Approvisionnement et prétraitement des matières premières					
Processus	Banque de données	Quantité	Unité	Émissions	Unité
Electricity, medium voltage {AU-WA}| market for	Ecoinvent v3.1 (adapté)	1	MWh	0,806	t éq CO_2
Electricity, medium voltage {BR}| market for	Ecoinvent v3.1	1	MWh	0,178	t éq CO_2
Electricity, medium voltage {CN} Si provinces| market for	Ecoinvent v3.1 (adapté)	1	MWh	0,928	t éq CO_2
Electricity, medium voltage { CA- QC}| market for	Ecoinvent v3.1 (adapté)	1	MWh	0,010	t éq CO_2
Electricity, medium voltage {TH}| market for	Ecoinvent v3.1	1	MWh	0,705	t éq CO_2
Electricity, medium voltage {East-US}| market for	Ecoinvent v3.1 (adapté)	1	MWh	0,721	t éq CO_2
Electricity, medium voltage {ZA}| market for	Ecoinvent v3.1	1	MWh	1,083	t éq CO_2
Charcoal {BR}| production	Bailis et al. (2013), Pennise et al. (2001).	1	t	2,063	t éq CO_2
Charcoal {ZA}| production	Bailis et al. (2013), Pennise et al. (2001).	1	t	1,302	t éq CO_2
Silica sand {RoW}| production	Ecoinvent v3.1	1	t	0,036	t éq CO_2
Production					
Les émissions sur site sont données à la section A.1					
Distribution					
Processus	Banque de données	Quantité	Unité	Émissions	Unité
Transport, freight train {US}| diesel	Ecoinvent v3.1	1	t.km	0,0599	$kgCO_2e$
Transport, freight, inland waterways, barge {RoW}	Ecoinvent v3.1	1	t.km	0,0521	$kgCO_2e$
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}	Ecoinvent v3.1	1	t.km	0,0116	$kgCO_2e$
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RoW}| transport, freight, lorry >32 metric ton,	Ecoinvent v3.1	1	t.km	0,0849	$kgCO_2e$

Annexe B – Description des routes de distribution

B.1 Approvisionnement - Scénario FerroQuébec

Principaux intrants					
Nom	Quantité	Unité	Provenance	Distance (km)	Mode
Quartz	2,65	t	Espagne	4750 100	Bateau Camion
Charbon	0,85	t	Mine en Colombie, lavoir au Portugal	12 500 600	Bateau Camion
Bois	4,4	t	Côte-Nord Québec	200	Train
Charbon de bois	0,55	t	Produit sur site	n.a.	n.a.

B.2 Approvisionnement - Scénario de référence

Principaux intrants – Australie					
Nom	Quantité	Unité	Provenance	Distance	Mode
Quartz	2,5	t	Australie occidentale	350	Camion
Charbon	0,39	t	Australie (processus de marché)	n.a.	n.a.
Bois	0,98	t	Australie occidentale	250	Camion
Charbon de bois	0,72	t	Produit sur site	n.a.	n.a.

Principaux intrants – Brésil					
Nom	Quantité	Unité	Provenance	Distance	Mode
Quartz	2,52	t	Brésil	400	Camion
Bois	0,98	t	Brésil	400	Camion
Charbon de bois	0,72	t	Brésil	400	Camion

Principaux intrants – Canada					
Nom	Quantité	Unité	Provenance	Distance	Mode
Quartz	2,54	t	Québec	250	Camion
Charbon	1,21	t	Amérique du Nord (processus de marché)	n.a.	n.a.
Bois	2,54	t	Québec	200	Camion

Principaux intrants – Chine					
Nom	Quantité	Unité	Provenance	Distance	Mode
Quartz	2,73	t	Chine	400	Camion
Charbon	0,39	t	Chine (processus de marché)	n.a.	n.a.
Coke de pétrole	0,9	t	Chine	800	Train
Bois	0,23	t	Australie occidentale	250	Camion
Charbon de bois	0,2	t	Chine, Russie, Thaïlande ou Birmanie	800	Camion

Principaux intrants – France					
Nom	Quantité	Unité	Provenance	Distance	Mode
Quartz	2,54	t	France	200	Camion
Charbon	1,32	t	Mine en Colombie, lavoir au Portugal	9 200 900	Bateau Camion
Bois	1,64	t	Europe de l'Ouest	500	Camion

Principaux intrants – Norvège					
Nom	Quantité	Unité	Provenance	Distance	Mode
Quartz	2,55	t	Norvège	200	Camion
Charbon	1,70	t	Norvège	500	Train
Bois	2,54	t	Europe de l'Ouest	200	Train

Principaux intrants – Afrique du Sud					
Nom	Quantité	Unité	Provenance	Distance	Mode
Quartz	2,61	t	Afrique du Sud	200	Camion
Charbon	0,2	t	Mine en Colombie, lavoir au Portugal	18 400 600	Bateau Camion
Bois	1,69	t	Afrique du Sud	250	Camion
Charbon de bois	0,91	t	Produit sur site	n.a.	n.a.

Principaux intrants – Thaïlande					
Nom	Quantité	Unité	Provenance	Distance	Mode
Quartz	2,61	t	Thaïlande	150	Camion
Coke de pétrole	0,5	t	Taiwan	3 130	Bateau
Bois	0,52	t	Thaïlande	200	Camion
Charbon de bois	0,85	t	Thaïlande	200	Camion

Principaux intrants – États-Unis					
Nom	Quantité	Unité	Provenance	Distance	Mode
Quartz	2,54	t	États-Unis (Alabama)	1000	Train
Charbon	1,19	t	Amérique du Nord (processus de marché)	n.a.	n.a.
Bois	2,54	t	Québec	200	Camion

B.1 Distribution - Scénario FerroQuébec

Transport leg 1					Transport leg 2					Transport leg 3				
Origine	Destination	Mode	Dist.		Origine	Destination	Mode	Dist.		Origine	Destination	Mode	Dist.	
Port Cartier	Baie-Comeau	Camion	170	km	Baie-Comeau	Toledo, OH	Barge	1630	km	Toledo, OH	Cincinnati	Train	330	km
Port Cartier	Baie-Comeau	Camion	170	km	Baie-Comeau	Cincinnati, OH	Train	2290	km					
Port Cartier	Baie-Comeau	Camion	170	km	Baie-Comeau	Duluth	Barge	2870	km	Duluth	Seattle, WA	Train	2700	km
Port Cartier	Saguenay	Camion	480	km										
Port Cartier	Dubai	Bateau transocéan.	14293	km										

B.2 Scénario de référence

Transport leg 1					Transport leg 2					Transport leg 3				
Origine	Destination	Mode	Dist.		Origine	Destination	Mode	Dist.		Origine	Destination	Mode	Dist.	
Charleston (West Virginia, USA)	Cincinnati (OH)	Camion	320	km										
Corinto (Minas Gerais, BR)	Rio de Janeiro (BR)	Camion	660	km	Rio de Janeiro (BR)	New York (NY)	Bateau	8830	km	New York (NY)	Cincinnati (OH)	Train	1000	km
(Quebec, CAN)	Toledo (OH)	Barge	1155	km	Toledo (OH)	Cincinnati (OH)	Train	330	km					
Bunbury (AUS)	Hampton Roads (VA)	Bateau	20500	km	Hampton Roads (VA)	Cincinnati (OH)	Train	1000	km					
Orkanger (NO)	Trondheim (NO)	Camion	50	km	Trondheim (NO)	New York (NY)	Bateau	6200	km	New York (NY)	Cincinnati (OH)	Train	1000	km
Ratchaburi (TH)	Bangkok (TH)	Camion	110	km	Bangkok (TH)	Seattle (WA)	Bateau	13200	km	Seattle (WA)	Seattle (WA)	Camion	10	km
Groblersdal (Limpopo, RSA)	Richard's Bay (RSA)	Camion	600	km	Richard's Bay (RSA)	New York (NY)	Bateau	14280	km	New York (NY)	Cincinnati (OH)	Train	1000	km
Bécancourt (Quebec,	Saguenay (QC)	Camion	350	km										
Ratchaburi (TH)	Bangkok (TH)	Camion	110	km	Bangkok (TH)	Port Alfred (QC)	Bateau	19930	km	Port Alfred (QC)	Saguenay (QC)	Camion	30	km
Grenoble (FR)	Marseille (FR)	Camion	300	km	Marseille (FR)	Port Alfred (QC)	Bateau	6850	km	Port Alfred (QC)	Saguenay (QC)	Camion	30	km
Corinto (Minas Gerais, BR)	Rio de Janeiro (BR)	Camion	660	km	Rio de Janeiro (BR)	Port Alfred (QC)	Bateau	10150	km	Port Alfred (QC)	Saguenay (QC)	Camion	30	km
Orkanger (NO)	Trondheim (NO)	Camion	50	km	Trondheim (NO)	Port Alfred (QC)	Bateau	5420	km	Port Alfred (QC)	Saguenay (QC)	Camion	30	km
Charleston (West Virginia, USA)	Cleveland (OH)	Train	400	km	Cleveland (OH)	Port Alfred (QC)	Barge	1450	km	Port Alfred (QC)	Saguenay (QC)	Camion	30	km
Lanzhou (Gansu, CN)	Shangai (CN)	Train	2000	km	Shangai (CN)	Dubai (EAU)	Bateau	10400	km					
Ratchaburi (TH)	Bangkok (TH)	Camion	110	km	Bangkok (TH)	Dubai (EAU)	Bateau	7900	km					
Bunbury (AUS)	Dubai (EAU)	Bateau	9400	km										

Annexe C – Changement d'utilisation des terres

C.1 Brésil

Stock de carbone de la forêt naturelle (avant plantations), de l'outil FICAT.

General Information | Land Use Information | Pools and Parameters

Pools/Parameters (units) [avg. (range)]	Default value	Enter new value	Bas...
Above Ground Biomass (tonnes/ha) [220,000000000 (210,000000000 - 280,000000000)]	220,000000000	220,000000000	Edit
Above Ground Biomass Carbon (tonnes C/ha)	110,000000000	110,000000000	
Root To Shoot Ratio R (tonne root/shoot d.m.) [0,240000000]	0,240000000	0,240000000	Edit
Biomass Total Carbon (tonnes C/ha)	136,400000000	136,400000000	
Forest Litter (tonnes C/ha) [2,100000000]	2,100000000	2,100000000	Edit
Mineral Soil SOCref (tonnes C/ha) [47,000000000]	47,000000000	47,000000000	Edit
Land Use Distubance Factor [1,000000000]	1,000000000	1,000000000	Edit
Total Soil Carbon (tonnes C/ha)	47,000000000	47,000000000	
Non-Soil Carbon (tonnes C/ha)	138,500000000	138,500000000	
Total Land Use Carbon (tonnes C/ha) [XX]	185,500000000	185,500000000	Edit

<< Previous | Save

Summary

Field	Value
Project Name	Brazil
Area (ha)	1
Project Life (years)	20
Land Use Type	Forest - Natural
Domain	Tropical
Land Type	Moist Forest
Continent Type	South America
Plant Type	
Plant Age	
Biomass Range	>125 tonnes/ha
Litter Carbon Stocks	
Tree Type	Broad Leaf Deciduous
Moisture	All
Soil Carbon Stocks	
Soil Type	Low Active Clay
Moisture Type	Humid

Stock de carbone des plantations d'eucalyptus, de l'outil FICAT.

General Information | Land Use Information | Pools and Parameters

Pools/Parameters (units) [avg. (range)]	Default value	Enter new value	Basis f...
Above Ground Biomass (tonnes/ha) [90,000000000]	90,000000000	90,000000000	Edit
Above Ground Biomass Carbon (tonnes C/ha)	45,000000000	45,000000000	
Root To Shoot Ratio R (tonne root/shoot d.m.) [0,240000000]	0,240000000	0,240000000	Edit
Biomass Total Carbon (tonnes C/ha)	55,800000000	55,800000000	
Forest Litter (tonnes C/ha) [2,100000000]	2,100000000	2,100000000	Edit
Mineral Soil SOCref (tonnes C/ha) [47,000000000]	47,000000000	47,000000000	Edit
Land Use Distubance Factor [1,000000000]	1,000000000	1,000000000	Edit
Total Soil Carbon (tonnes C/ha)	47,000000000	47,000000000	
Non-Soil Carbon (tonnes C/ha)	57,900000000	57,900000000	
Total Land Use Carbon (tonnes C/ha) [XX]	104,900000000	104,900000000	Edit

<< Previous | Save

Summary

Field	Value
Project Name	Brazil
Area (ha)	1
Project Life (years)	20
Land Use Type	Forest - Plantation
Domain	Tropical
Land Type	Moist Forest
Continent Type	South America
Plant Type	Eucalyptus sp.
Plant Age	
Biomass Range	>125 tonnes/ha
Litter Carbon Stocks	
Tree Type	Broad Leaf Deciduous
Moisture	All
Soil Carbon Stocks	
Soil Type	Low Active Clay
Moisture Type	Humid

C.2 Chine

Stock de carbone de la forêt naturelle (avant plantations), de l'outil FICAT.

General Information | Land Use Information | Pools and Parameters

Pools/Parameters (units) [avg. (range)]	Default value	Enter new value	Bas...
Above Ground Biomass (tonnes/ha) [180,000000000 (10,000000000 - 560,000000000)]	180,000000000	180,000000000	Edit
Above Ground Biomass Carbon (tonnes C/ha)	90,000000000	90,000000000	
Root To Shoot Ratio R (tonne root/shoot d.m.) [0,240000000]	0,240000000	0,240000000	Edit
Biomass Total Carbon (tonnes C/ha)	111,600000000	111,600000000	
Forest Litter (tonnes C/ha) [2,800000000]	2,800000000	2,800000000	Edit
Mineral Soil SOCref (tonnes C/ha) [88,000000000]	88,000000000	88,000000000	Edit
Land Use Distubance Factor [1,000000000]	1,000000000	1,000000000	Edit
Total Soil Carbon (tonnes C/ha)	88,000000000	88,000000000	
Non-Soil Carbon (tonnes C/ha)	114,400000000	114,400000000	
Total Land Use Carbon (tonnes C/ha) [XX]	202,400000000	202,400000000	Edit

<< Previous | Save

Summary

Field	Value
Project Name	China
Area (ha)	1
Project Life (years)	20
Land Use Type	Forest - Natural
Domain	Subtropical
Land Type	Humid Forest
Continent Type	Asia (continental)
Plant Type	
Plant Age	
Biomass Range	>125 tonnes/ha
Litter Carbon Stocks	
Tree Type	Broad Leaf Deciduous
Moisture	All
Soil Carbon Stocks	
Soil Type	High Active Clay
Moisture Type	Humid

Stock de carbone des plantations d'eucalyptus, de l'outil FICAT.

General Information | Land Use Information | Pools and Parameters

Pools/Parameters (units) [avg. (range)]	Default value	Enter new value	Basis f...
Above Ground Biomass (tonnes/ha) [100,000000000]	100,000000000	100,000000000	Edit
Above Ground Biomass Carbon (tonnes C/ha)	50,000000000	50,000000000	
Root To Shoot Ratio R (tonne root/shoot d.m.) [0,240000000]	0,240000000	0,240000000	Edit
Biomass Total Carbon (tonnes C/ha)	62,000000000	62,000000000	
Forest Litter (tonnes C/ha) [2,800000000]	2,800000000	2,800000000	Edit
Mineral Soil SOCref (tonnes C/ha) [88,000000000]	88,000000000	88,000000000	Edit
Land Use Distubance Factor [1,000000000]	1,000000000	1,000000000	Edit
Total Soil Carbon (tonnes C/ha)	88,000000000	88,000000000	
Non-Soil Carbon (tonnes C/ha)	64,800000000	64,800000000	
Total Land Use Carbon (tonnes C/ha) [XX]	152,800000000	152,800000000	Edit

<< Previous | Save

Summary

Field	Value
Project Name	China
Area (ha)	1
Project Life (years)	20
Land Use Type	Forest - Plantation
Domain	Subtropical
Land Type	Humid Forest
Continent Type	Asia
Plant Type	Other
Plant Age	
Biomass Range	>125 tonnes/ha
Litter Carbon Stocks	
Tree Type	Broad Leaf Deciduous
Moisture	All
Soil Carbon Stocks	
Soil Type	High Active Clay
Moisture Type	Humid

Stock de carbone des cultures de riz d'eucalyptus, de l'outil de Blonk Consultants.

1. Select the country of crop cultivation:	**China**
2. Select the crop:	**Rice, paddy**
Type of crop (predefined per crop, see Table 7)	*Paddy rice*
3. Select the climate:	Warm temperate, moist
4. Select soil type:	HAC soils
5. Select current cultivation tillage intensity:	Full
6. Select current cultivation input level:	Medium
7. Select the **previous** vegetation type:	Subtropical, humid

Calculation steps:

Calculation of total carbon stock of the expanding crop:

Soil carbon stock of expanding crop (ton C/ha)	96,8
Vegetation carbon stock of expanding crop (ton C/ha)	43,2
Total carbon stock of expanding crop (ton C/ha)	**140,0**

Annexe D – Rapport de revue critique

CIRAIG[MC]

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

RAPPORT DE REVUE CRITIQUE

FERROQUÉBEC INC. – EMPREINTE CARBONE DU SILICIUM MÉTAL – USINE DE PORT-CARTIER

24 MARS 2015

Préparé pour :

Bruno Gagnon
Conseiller senior
Changements climatiques et développement durable

Ernst & Young s.r.l./S.E.N.C.R.L. | Ernst & Young LLP
800, boul. René-Lévesque O., Bureau 1900
Montréal, QC
H3B 1X9

Ce rapport a été préparé par le Centre international de référence sur le cycle de vie des produits procédés et services (CIRAIG).

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 :

À l'exception des documents entièrement réalisés par le 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 projet et à ses résultats doit faire l'objet d'un consentement préalable écrit d'un représentant dûment mandaté du CIRAIG ou de Polytechnique Montréal.

Seul le rapport final de l'étude, sous format pdf, a été soumis au comité de revue critique, aucun fichier de modélisation, en format Excel ou autre, n'a été examiné. Il n'a donc pas été possible de vérifier l'intégralité des calculs.

Enfin, il est à noter que le but de la revue critique n'est pas de refaire l'étude d'empreinte carbone dans la perspective de vérifier les résultats obtenus, mais de mettre en œuvre une procédure de révision réalisée par plusieurs experts indépendants en vue de renforcer la crédibilité de l'étude. De plus, cette révision n'engage ni le CIRAIG ni les experts du comité de revue critique, quant à la validité des objectifs retenus par le mandataire ou des utilisations qui seront faites des résultats de l'étude.

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

Rapport soumis par :
BUREAU DE LA RECHERCHE ET CENTRE DE
DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE (B.R.C.D.T.)
POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

Campus de l'Université de Montréal
Case Postale 6079, succursale Centre-ville
Montréal (Québec) H3C 3A7

Équipe de travail

Réalisation

Jean-François Ménard
Président du comité de revue critique

Claude Bazin
Membre expert du comité de revue critique

Dimitrios Filippou
Membre expert du comité de revue critique

Collaboration

Valérie Patreau, M. Sc.A.
Directrice des opérations

Coordination du projet

Direction

Pr Réjean Samson, ing., Ph.D.
Directeur général

Table des matières

1 OBJECTIFS DE LA REVUE CRITIQUE 3

2 PROCESSUS DE LA REVUE CRITIQUE 3

3 CONTENU DE LA REVUE CRITIQUE 4

4 JUGEMENT GLOBAL SUR LA QUALITÉ DE L'ÉTUDE 4

5 CONFORMITÉ À ISO 14040/14044 DU RAPPORT DE DÉFINITION DES OBJECTIFS ET DU CHAMP DE L'ÉTUDE 4

6 COMMENTAIRES DE L'EXPERT ACV SUR LE RAPPORT DE DÉFINITION DES OBJECTIFS ET DU CHAMP DE L'ÉTUDE ET RÉPONSES DES AUTEURS 6

7 CONFORMITÉ À ISO 14040/14044 DU RAPPORT FINAL DE L'ÉTUDE 9

8 COMMENTAIRES DU COMITÉ DE REVUE CRITIQUE SUR LE RAPPORT FINAL DE L'ÉTUDE ET RÉPONSES DES AUTEURS 15

9 RÉFÉRENCES 29

1 OBJECTIFS DE LA REVUE CRITIQUE

Cette revue s'insère dans le processus de revue critique assuré par le CIRAIG dans le cadre de l'étude d'empreinte carbone du silicium métal réalisé par la firme Ernst & Young pour la compagnie FerroQuébec inc.

La revue critique a pour objectifs de vérifier que :

- Les méthodes et données utilisées par Ernst & Young pour réaliser l'empreinte carbone sont :
  - cohérentes avec les normes internationales (ISO 14040 et 14044) ;
  - valables d'un point de vue technique et scientifique ;
  - appropriées et raisonnables par rapport aux objectifs de l'étude ;
- Les interprétations reflètent les limitations identifiées et s objectifs de l'étude ;
- Le rapport d'étude est transparent et cohérent.

La revue critique du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude a été réalisée par un expert ACV, Jean-François Ménard (JFM), analyste au CIRAIG.

La revue critique du rapport final de l'étude a été réalisé par un comité de revue critique composé de :

- Jean-François Ménard (JFM), analyste au CIRAIG et président du comité de revue critique;
- Claude Bazin (CB), professeur au département de génie des mines, métallurgie et matériaux de l'Université Laval et membre expert du comité de revue critique;
- Dimitrios Filippou (DF), métallurgiste, produits du TiO_2 chez Rio Tinto Fer & Titane et membre expert du comité de revue critique.

Seul le rapport final de l'étude, sous format pdf, a été soumis au comité de revue critique, aucun fichier de modélisation, en format Excel ou autre, n'a été examiné.

Enfin, il est à noter que le but de la revue critique n'est pas de refaire l'étude d'empreinte carbone dans la perspective de vérifier les résultats obtenus, mais de mettre en œuvre une procédure de révision réalisée par plusieurs experts indépendants en vue de renforcer la crédibilité de l'étude. De plus, cette révision n'engage ni le CIRAIG ni les experts du comité de revue critique, quant à la validité des objectifs retenus par le mandataire ou des utilisations qui seront faites des résultats de l'étude.

2 PROCESSUS DE LA REVUE CRITIQUE

Le processus de revue critique s'est déroulé de manière itérative entre l'expert ACV et l'équipe de réalisation chez Ernst & Young et a suivi les étapes suivantes :

1. la version préliminaire du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude a été envoyé à l'expert ACV le 3 décembre 2014;
2. la première note de revue a été envoyée aux auteurs le 10 décembre 2014;
3. la version préliminaire du rapport final de l'étude a été envoyé au comité de revue critique le 2 février 2015;

4. la deuxième note de revue a été envoyée aux auteurs le 4 mars 2015;
5. la version révisée du rapport final de l'étude a été envoyée au comité de revue critique le 16 mars 2015;
6. la dernière note de revue, incluant le jugement global sur la qualité de l'étude, a été envoyée aux auteurs le 24 mars 2015.

3 CONTENU DE LA REVUE CRITIQUE

Ce rapport de revue critique comporte cinq sections :

1. Un jugement global sur la qualité de l'étude;
2. Une liste de contrôle qui a permis de vérifier la conformité aux normes ISO 14040 et 14044 du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude;
3. Tous les commentaires, remarques et questions de l'expert ACV sur le rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude ainsi que les réponses des auteurs;
4. La liste de contrôle qui a permis de vérifier la conformité aux normes ISO 14040 et 14044 du rapport final de l'étude;
5. Tous les commentaires, remarques et questions du comité de revue critique sur le rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude ainsi que les réponses des auteurs.

4 JUGEMENT GLOBAL SUR LA QUALITÉ DE L'ÉTUDE

Suite à la lecture du rapport final révisé et des réponses des auteurs aux commentaires du comité de revue critique, il est de l'opinion de ce dernier que :

- Les méthodes et données utilisées par Ernst & Young pour réaliser l'empreinte carbone sont :
  - cohérentes avec les normes internationales (ISO 14040 et 14044) ;
  - valables d'un point de vue technique et scientifique ;
  - appropriées et raisonnables par rapport aux objectifs de l'étude ;
- Les interprétations reflètent les limitations identifiées et les objectifs de l'étude ;
- Le rapport d'étude est transparent et cohérent.

Il est important de rappeler que seul le rapport final de l'étude a été soumis au comité de revue, aucun fichier de modélisation n'a été examiné.

5 CONFORMITÉ À ISO 14040/14044 DU RAPPORT DE DÉFINITION DES OBJECTIFS ET DU CHAMP DE L'ÉTUDE

Cette liste de contrôle a été préparée pour permettre à la revue critique de se conformer précisément aux lignes directrices des normes ISO.

Cette liste comporte quatre sections.

La Section 1 spécifie les exigences et les objectifs quant à la revue critique, en relation avec les objectifs de l'étude.

La Section 2 correspond à la Section 5.1 de la norme ISO 14044 et traite des exigences générales applicables à toutes les études ACV.

La Section 3 correspond à la section 5.2 de la norme ISO 14044 et traite des exigences additionnelles s'appliquant aux cas où les résultats de l'étude ACV sont communiqués à une tierce partie, c'est-à-dire à toute partie intéressée autre que le mandataire ou l'auteur de l'étude ACV.

La Section 4 correspond à la section 5.3 de la norme ISO 14044 et traite des exigences additionnelles en matière de communication dans le cas d'études ACV utilisées à l'appui d'une affirmation comparative destinée à être divulguée au public. Une affirmation comparative est définie par ISO (voir 3.6 de ISO 14044) comme étant une « déclaration relative à la supériorité ou à l'équivalence en matière d'environnement d'un produit par rapport à un produit concurrent qui remplit la même fonction »

SECTION 1: Exigences quant à la revue critique

La colonne (ou la boîte) de gauche est cochée pour indiquer “oui” et laissée vide pour indiquer que l’exigence ne semble pas avoir été satisfaite.

Exigences		Commentaires de l’expert ACV	Réponses des auteurs	Réponse de l’expert ACV
X	Le type et le champ de la revue critique sont définis à la phase de définition des objectifs et du champ de l’étude?			
X	Les commentaires des réviseurs, les commentaires des auteurs, incluant leurs réponses aux recommandations des réviseurs, sont inclus (ou vont être inclus) dans le rapport de l’étude ACV?			
	Les résultats de l’étude doivent servir de support à une affirmation comparative? ☐NON, si NON alors passer à la Section 2. ☒OUI, si OUI alors ☐La revue est réalisée par un comité de parties intéressées?	Il s’agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l’étude et sa revue n’est réalisée que par un seul expert ACV.		

SECTION 2: Exigences générales applicables à toutes les études ACV.

Exigences		Commentaires de l’expert ACV	Réponses des auteurs	Réponse de l’expert ACV
	Les résultats et conclusions de l'ACV sont communiqués de manière complète et précise au public concerné sans parti pris?	Il s’agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l’étude.		
	Les résultats, données, méthodes, hypothèses et limitations sont transparents et présentés de manière suffisamment détaillée pour permettre au lecteur de comprendre les complexités et les compromis inhérents à l'ACV?	Il s’agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l’étude.		
	Le rapport permet d'utiliser les résultats et leur interprétation de manière cohérente avec les objectifs de l'étude?	Il s’agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l’étude.		

SECTION 3: Exigences additionnelles s'appliquant aux cas où les résultats de l'étude ACV sont communiqués à une tierce partie.

Exigences		Commentaires de l'expert ACV	Réponses des auteurs	Réponse de l'expert ACV
	a) Aspects généraux: ☒commanditaire et réalisateur de l'ACV (interne ou externe); ☒date du rapport; ☒indication précisant que l'étude a été réalisée en conformité avec les exigences de la présente norme internationale.			
	b) Objectifs de l'étude: ☒raisons conduisant à réaliser l'étude; ☒applications envisagées; ☒public concerné; ☒indication précisant si l'étude va appuyer des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public.			
	c) Champ de l'étude: 1) fonction: ☐indication des caractéristiques de performance; ☐toute omission de fonctions supplémentaires dans les comparaisons; 2) unité fonctionnelle: ☒cohérence avec les objectifs et le champ de l'étude; ☒définition; ☐résultat de la mesure de la performance; 3) frontières du système: ☒omissions d'étapes du cycle de vie, de processus ou de besoins en données; ☐quantification des intrants et extrants énergétiques et matériels; ☐hypothèses sur la production d'électricité; 4) critères de coupure pour l'introduction initiale des intrants et des extrants: ☐description des critères de coupure et hypothèse; ☐effet de la sélection sur les résultats; ☐inclusion des critères de coupure de masse, d'énergie et	Spécifications techniques du produit à venir. Aucune fonction secondaire n'a été identifiée. Aucun critère de coupure n'est utilisé.	Spécifications techniques ajoutées dans le rapport d'empreinte carbone.	OK

	environnementaux.			
	d) Inventaire du cycle de vie: ☒méthodes de recueil des données; ☐description qualitative et quantitative des processus élémentaires; ☒source de la documentation publiée; ☒modes opératoires de calcul; validation des données: ☐évaluation de la qualité des données; ☐traitement des données manquantes; ☐analyse de sensibilité pour l'affinage des frontières du système; principes et règles d'affectation: ☒documentation et justification des règles d'affectation; ☐application uniforme des règles d'affectation.	Il manque la description quantitative des processus. Il s'agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude. Il s'agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude. Voir commentaire #8. Il s'agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude.	La description quantitative des processus a été ajoutée à la section 4.4.	OK
	e) Évaluation de l'impact du cycle de vie: ☐modes opératoires, calculs et résultats de l'évaluation de l'ACVI; ☐limitations des résultats de l'ACVI par rapport aux objectifs et au champ de l'ACV; ☐relation entre les résultats de l'ACVI et les objectifs et le champ de l'étude; ☐relation entre les résultats de l'ACVI et les résultats d'ICV; ☐catégories d'impact et les catégories d'indicateurs considérées, y compris une justification de leur sélection et une référence de leur source; ☒description ou référence de tous les modèles de caractérisation, des facteurs de caractérisation et des méthodes utilisés, y compris toutes les hypothèses et les limitations;	Il s'agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude. Pourraient être documentées davantage. Il s'agit d'une empreinte carbone seulement. Il s'agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude. Il s'agit d'une empreinte carbone seulement.	Exigences du comité à préciser.	

	☐ description ou référence de tous les choix de valeurs utilisés en rapport avec les catégories d'impact, les modèles de caractérisation, les facteurs de caractérisation, la normalisation, le regroupement, la pondération et, ailleurs dans l'ACVI, une justification de leur utilisation et de leur influence sur les résultats, les conclusions et recommandations; ☒ indication précisant que les résultats de l'ACVI sont des expressions relatives et qu'elles ne prédisent pas les effets sur les impacts finaux par catégorie, le dépassement des seuils, les marges de sécurité ou les risques; De nouvelles catégories d'impact, nouveaux indicateurs de catégories ou modèles de caractérisation sont utilisés dans le cadre de l'ACVI? ☒ NON, si NON alors passer à l'Interprétation du cycle de vie ☐ OUI, si OUI alors ☐ description et justification de la définition et de la description de toutes nouvelles catégories d'impact, de nouveaux indicateurs de catégorie ou de nouveaux modèles de caractérisation utilisés pour l'ACVI; ☐ indication et justification de tout regroupement des catégories d'impact; ☐ toutes les autres méthodes transformant les résultats d'indicateurs et une justification des références sélectionnées, des facteurs de pondération, etc.; ☐ toute analyse des résultats d'indicateurs, par exemple, les analyses de sensibilité et d'incertitude ou l'utilisation de données environnementales, y compris l'implication pour les résultats; ☐ données et résultats d'indicateurs obtenus avant toute opération de normalisation, regroupement ou pondération, ainsi que les résultats normalisés, regroupés ou pondérés.	Il s'agit d'une empreinte carbone seulement. Pourrait être explicitée davantage.	Exigences du comité à préciser.	
	f) Interprétation du cycle de vie: ☐ résultats; ☐ hypothèses et limitations associées à l'interprétation des résultats, en relation avec la méthodologie et les données;	Il s'agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude. Il s'agit du rapport de définition des objectifs et du champ de		

	☐évaluation de la qualité des données; ☐transparence totale en termes de choix de valeurs, justifications et appréciations d'expert;	l'étude. Il s'agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude. Il s'agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude.		
	g) Revue critique: ☒nom et affiliation des réviseurs; ☒rapport de revue critique; ☒réponses aux commentaires/recommandations.			

SECTION 4: Exigences additionnelles dans le cas d'études ACV utilisées à l'appui d'une affirmation comparative destinée à être divulguée au public

Exigences		Commentaires de l'expert ACV	Réponses des auteurs	Réponse de l'expert ACV
	Analyse des flux de matières et d'énergie pour justifier leur inclusion ou leur exclusion.	Il s'agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude.		
	Évaluation de la précision, de la complétude et de la représentativité des données utilisées.	Il s'agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude.		
	Description de l'équivalence des systèmes comparés conformément à 4.2.3.7 de la norme ISO 14044.	Il s'agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude.		
X	Description du processus de revue critique.			
	Évaluation de la complétude de l'ACVI.	Il s'agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude.		
	Mention indiquant si une acceptation internationale existe ou non pour les indicateurs de catégorie sélectionnés et une justification de leur utilisation	Il s'agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude.		
	Explication de la validité scientifique et technique et de la pertinence	Il s'agit du rapport de définition		

	environnementale des indicateurs de catégorie utilisés dans l'étude.	des objectifs et du champ de l'étude.		
	Résultats des analyses d'incertitude et de sensibilité.	Il s'agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude.		
	Évaluation de la signification des différences trouvées.	Il s'agit du rapport de définition des objectifs et du champ de l'étude.		
	Le regroupement est inclus dans l'étude ACV? ☒NON, si NON alors la liste est terminée. ☐OUI, si OUI alors ☐méthodes et résultats utilisés pour le regroupement; ☐indication précisant que les conclusions et les recommandations issues du regroupement sont basées sur des choix de valeurs; ☐justification des critères utilisés pour la normalisation et le regroupement (il peut s'agir de choix de valeurs personnels, organisationnels ou nationaux); ☐mention selon laquelle «l'ISO 14044 ne spécifie pas de méthodologie spécifique ni n'appuie les choix de valeurs sous-jacents utilisés pour regrouper les catégories d'impact»; ☐mention selon laquelle «les choix de valeurs et les jugements utilisés dans les méthodes de regroupement sont de la seule responsabilité du commanditaire de l'étude (par exemple le gouvernement, la communauté, l'entreprise)».			

6 COMMENTAIRES DE L'EXPERT ACV SUR LE RAPPORT DE DÉFINITION DES OBJECTIFS ET DU CHAMP DE L'ÉTUDE ET RÉPONSES DES AUTEURS

No.	Page ou section	Commentaires de l'expert ACV	Réponses des auteurs	Réponse de l'expert ACV
1	1.1	Le caractère prospectif n'est pas la seule raison pour laquelle les impacts évalués ne sont que potentiels, il faudrait donc distinguer	Modification apportée.	OK

		les deux aspects, la nature prospective de l'inventaire et la nature potentielle des impacts évalués. D'ailleurs il ne s'agit pas vraiment d'impacts sur les changements climatiques puisque l'indicateur utilisé ne représente que le forçage radiatif infrarouge des GES émis par le système de produit. Je recommande d'utiliser la phrase type suggérée par la norme ISO 14044 (section 5.2, paragraphe e)8).		
2	Figure 1.1	Selon la section 3.5, seuls le laitier et les fumées de silice semblent être vendus et donc être réellement des coproduits, il faudrait faire cette distinction sur la Figure 1.1. Si les fines de quartz et l'électricité sont totalement utilisées à l'interne par le processus, il ne s'agit pas de coproduits. Cette utilisation interne devrait être indiquée en liant les sous-processus producteurs et consommateurs. La chaleur produite par la cogénération pourrait être indiquée au même titre que l'électricité.	L'électricité générée par cogénération est utilisée à l'interne. Les fines de quartz sont un coproduit généré en tout début de procédé et n'est donc pas considéré au même titre que la fumée de silice ou le laitier.	OK Voir commentaire #3 concernant le rapport final de l'étude.
3	1.4	Il n'est pas clair quelle est la différence entre le silicium métal et le silicium de « qualité solaire », de « qualité électronique » et de « génération d'électricité photovoltaïque ». Il faudrait être plus précis, surtout si le rapport est divulgué à un public non expert. Il faudrait donner les références des bases de données ecoinvent et eco-indicator.	Des détails supplémentaires ont été ajoutés.	OK mais il n'est pas expliqué à quoi correspond le silicium de « génération d'électricité photovoltaïque ». Il s'agit de l'étude de l'empreinte carbone de l'électricité produite à partir de panneaux photovoltaïques. Précision apportée au rapport. OK
4	2.1 et 2.2	Il s'agit seulement d'une empreinte carbone, de nombreuses problématiques environnementales ne sont pas couvertes par ce type d'étude. Les seuls gains environnementaux qui pourront être confirmés par cette étude sont ceux qui ont trait aux émissions de GES. D'ailleurs, ce type d'étude ne peut que comparer les résultats d'indicateur de réchauffement global des différents systèmes étudiés, basés sur leurs inventaires GES respectifs.	Limitation mise en évidence à la section 5.	OK Voir commentaire #2 concernant le rapport final de l'étude.
5	2.4	Il faudrait ajouter la mise en garde demandée par ISO concernant les résultats de l'ACVI, à laquelle le commentaire #1 faisait référence. Il faudrait aussi regarder les mises en garde présentées à la section 4.4.5 de la norme ISO 14044 quant aux ACVI utilisées dans des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public et à la section 5.14 de la spécification technique ISO/TS 14067.	Voir commentaire #1. Discuté à la section 2.4. Le comité pourra indiquer si des explications supplémentaires sont requises.	OK OK

6	Figure 3.1	L'utilisation ne concerne pas uniquement la transformation du silicium métal mais aussi l'utilisation des produits finis contenants ce silicium métal. La fin de vie du silicium métal va également dépendre de la fin de vie de ces produits finis.	Le comité pourra indiquer si la figure 3.1 dans sa forme actuelle est satisfaisante.	Voir commentaire #5 concernant le rapport final de l'étude.
7	3.2	Il faudrait indiquer pourquoi et comment est utilisé le coke de pétrole puisqu'il s'agit de sa première mention.	Coke de pétrole indiqué à la figure 3.1. Son utilisation comme agent réducteur est indiquée à la section 1.3.	OK
8	3.5	La concentration en Si ne représente pas une relation physique sous-jacente entre les entrants et les sortants alloués et les coproduits, elle n'est qu'un attribut des coproduits. Par exemple, selon ma compréhension, les fumées de silice étant produites à partir du SiO_2 qui n'a pas réagi dans le four de réduction, il n'y a pas de lien direct entre cette substance et les émissions de CO_2 produites lors de la réduction, ainsi il serait possible d'argumenter sur la base d'une relation physique sous-jacente qu'aucune émission de CO_2 ne devrait être attribuée aux fumées de silice. Il serait plus pertinent d'utiliser le revenu relatif attendu de chaque coproduit plutôt que la valeur économique (basée sur le prix de vente par exemple). Est-ce que les coproduits ont des fonctions exclusives qui ne peuvent être fournies par aucun substitut? Là est la question afin de savoir si les coproduits vont permettre « d'éviter » la production d'autre produits. Si leur usage est exclusif alors il ne peut en résulter qu'un transfert de parts de marché, la production cédant ses parts étant ainsi en quelque sorte « évitée ». Je ne vois pas en quoi une importance relative des quantités de coproduits et un usage de ceux-ci identiques entre les différentes usines produisant du silicium métal justifie de ne pas considérer l'extension des frontières comme méthode de traitement des coproduits.	L'allocation sur une base économique a été retenue comme approche par défaut, puis comparée à l'allocation par extension des frontières dans une analyse de sensibilité.	OK
9	Tableau 4.1	Il manque à l'étape d'approvisionnement et prétraitement des matières premières, le coke de pétrole, le calcaire et les autres intrants mineurs. Il faudrait préciser davantage la version de la base de données ecoinvent utilisée puisque la version 3.1 est maintenant disponible.	Précisions apportées.	OK Mais les informations pour le coke de pétrole, le calcaire et les intrants mineurs n'ont pas été ajoutées. Il faudrait préciser la version exacte de la base de données qui a été utilisée, « Allocation, ecoinvent default » ou « Allocation, cut-off by classification ».

				Banque de données version « Allocation, ecoinvent default ». Note ajoutée sous le tableau 4.1 OK
10	5	Le traitement du carbone biogénique et surtout du carbone associé au changement d'utilisation des terres devrait être documenté davantage. Il faudrait indiquer clairement quels GES sont considérés dans le calcul de l'empreinte carbone (cf. section 7.1 de la spécification technique ISO/TS 14067). La mise en garde présentée à la toute fin de la section devrait être reprise à la section 2.4, voir aussi les commentaires #4 et #5.	Précision apportée. Limitation mentionnée à la section 2.4 en plus de la section 5.	OK

7 CONFORMITÉ À ISO 14040/14044 DU RAPPORT FINAL DE L'ÉTUDE

Cette liste de contrôle a été préparée pour permettre à la revue critique de se conformer précisément aux lignes directrices des normes ISO.

Cette liste comporte quatre sections.

La Section 1 spécifie les exigences et les objectifs quant à la revue critique, en relation avec les objectifs de l'étude.

La Section 2 correspond à la Section 5.1 de la norme ISO 14044 et traite des exigences générales applicables à toutes les études ACV.

La Section 3 correspond à la section 5.2 de la norme ISO 14044 et traite des exigences additionnelles s'appliquant aux cas où les résultats de l'étude ACV sont communiqués à une tierce partie, c'est-à-dire à toute partie intéressée autre que le mandataire ou l'auteur de l'étude ACV.

La Section 4 correspond à la section 5.3 de la norme ISO 14044 et traite des exigences additionnelles en matière de communication dans le cas d'études ACV utilisées à l'appui d'une affirmation comparative destinée à être divulguée au public. Une affirmation comparative est définie par ISO (voir 3.6 de ISO 14044) comme étant une « déclaration relative à la supériorité ou à l'équivalence en matière d'environnement d'un produit par rapport à un produit concurrent qui remplit la même fonction »

SECTION 1: Exigences quant à la revue critique

La colonne (ou la boîte) de gauche est cochée pour indiquer "oui" et laissée vide pour indiquer que l'exigence ne semble pas avoir été satisfaite.

Exigences	Commentaires du comité de revue critique	Réponses des auteurs	Réponse du comité de revue

				critique
X	Le type et le champ de la revue critique sont définis à la phase de définition des objectifs et du champ de l'étude?			
X	Les commentaires des réviseurs, les commentaires des auteurs, incluant leurs réponses aux recommandations des réviseurs, sont inclus (ou vont être inclus) dans le rapport de l'étude ACV?			
	Les résultats de l'étude doivent servir de support à une affirmation comparative? ☐NON, si NON alors passer à la Section 2. ☒OUI, si OUI alors ☐La revue est réalisée par un comité de parties intéressées?			

SECTION 2: Exigences générales applicables à toutes les études ACV.

Exigences		Commentaires du comité de revue critique	Réponses des auteurs	Réponse du comité de revue critique
X	Les résultats et conclusions de l'ACV sont communiqués de manière complète et précise au public concerné sans parti pris?			
	Les résultats, données, méthodes, hypothèses et limitations sont transparents et présentés de manière suffisamment détaillée pour permettre au lecteur de comprendre les complexités et les compromis inhérents à l'ACV?	Le rapport pourrait être plus transparent, notamment quant aux données et calculs.	Voir réponses à la section 8 aux commentaires relatifs à la transparence des sources de données et des calculs.	OK
X	Le rapport permet d'utiliser les résultats et leur interprétation de manière cohérente avec les objectifs de l'étude?			

SECTION 3: Exigences additionnelles s'appliquant aux cas où les résultats de l'étude ACV sont communiqués à une tierce partie.

Exigences	Commentaires du comité de revue critique	Réponses des auteurs	Réponse du comité de revue critique

	a) Aspects généraux: ☒commanditaire et réalisateur de l'ACV (interne ou externe); ☒date du rapport; ☒indication précisant que l'étude a été réalisée en conformité avec les exigences de la présente norme internationale.			
	b) Objectifs de l'étude: ☒raisons conduisant à réaliser l'étude; ☒applications envisagées; ☒public concerné; ☒indication précisant si l'étude va appuyer des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public.			
	c) Champ de l'étude: 1) fonction: ☒indication des caractéristiques de performance; ☐toute omission de fonctions supplémentaires dans les comparaisons; 2) unité fonctionnelle: ☒cohérence avec les objectifs et le champ de l'étude; ☒définition; ☐résultat de la mesure de la performance; 3) frontières du système: ☒omissions d'étapes du cycle de vie, de processus ou de besoins en données; ☒quantification des intrants et extrants énergétiques et matériels; ☒hypothèses sur la production d'électricité; 4) critères de coupure pour l'introduction initiale des intrants et des extrants: ☐description des critères de coupure et hypothèse; ☐effet de la sélection sur les résultats; ☐inclusion des critères de coupure de masse, d'énergie et environnementaux.	Aucune fonction secondaire n'a été identifiée. Aucun critère de coupure n'est utilisé.		
	d) Inventaire du cycle de vie: ☒méthodes de recueil des données; ☒description qualitative et quantitative des processus élémentaires;	Plus de détails pourraient être fournis sur les processus.	Voir section 8 pour les réponses aux commentaires	OK

	☒source de la documentation publiée; ☒modes opératoires de calcul; validation des données: ☒évaluation de la qualité des données; ☒traitement des données manquantes; ☐analyse de sensibilité pour l'affinage des frontières du système; principes et règles d'affectation: ☒documentation et justification des règles d'affectation; ☒application uniforme des règles d'affectation.	Plus de détails pourraient être fournis sur les calculs. L'évaluation de la qualité de données ne couvre pas toutes les données utilisées.	concernant les processus. Voir section 8 pour les réponses aux commentaires concernant les calculs. La qualité des principaux processus contributeurs est couverte, tel qu'exigé dans le *GHG Protocol Product Standard*. Voir section 8 (réponse au commentaire #14).	OK OK
	e) Évaluation de l'impact du cycle de vie: ☒modes opératoires, calculs et résultats de l'évaluation de l'ACVI; ☒limitations des résultats de l'ACVI par rapport aux objectifs et au champ de l'ACV; ☒relation entre les résultats de l'ACVI et les objectifs et le champ de l'étude; ☒relation entre les résultats de l'ACVI et les résultats d'ICV; ☐catégories d'impact et les catégories d'indicateurs considérées, y compris une justification de leur sélection et une référence de leur source; ☒description ou référence de tous les modèles de caractérisation, des facteurs de caractérisation et des méthodes utilisés, y compris toutes les hypothèses et les limitations; ☐description ou référence de tous les choix de valeurs utilisés en rapport avec les catégories d'impact, les modèles de caractérisation, les facteurs de caractérisation, la normalisation, le regroupement, la pondération et, ailleurs dans l'ACVI, une justification de leur utilisation et de leur influence sur les résultats, les conclusions et recommandations; ☒indication précisant que les résultats de l'ACVI sont des expressions	Plus de détails pourraient être fournis sur les calculs. L'analyse de contribution au niveau des GES pourrait être détaillée davantage. Il s'agit d'une empreinte carbone seulement. Il s'agit d'une empreinte carbone seulement.	Voir section 8 pour les réponses aux commentaires concernant les calculs. Analyse de contribution par type de GES et par étape du cycle de vie ajoutée (voir réponse au commentaire #15).	OK OK

	relatives et qu'elles ne prédisent pas les effets sur les impacts finaux par catégorie, le dépassement des seuils, les marges de sécurité ou les risques; De nouvelles catégories d'impact, nouveaux indicateurs de catégories ou modèles de caractérisation sont utilisés dans le cadre de l'ACVI? ☒NON, si NON alors passer à l'Interprétation du cycle de vie ☐OUI, si OUI alors ☐description et justification de la définition et de la description de toutes nouvelles catégories d'impact, de nouveaux indicateurs de catégorie ou de nouveaux modèles de caractérisation utilisés pour l'ACVI; ☐indication et justification de tout regroupement des catégories d'impact; ☐toutes les autres méthodes transformant les résultats d'indicateurs et une justification des références sélectionnées, des facteurs de pondération, etc.; ☐toute analyse des résultats d'indicateurs, par exemple, les analyses de sensibilité et d'incertitude ou l'utilisation de données environnementales, y compris l'implication pour les résultats; ☐données et résultats d'indicateurs obtenus avant toute opération de normalisation, regroupement ou pondération, ainsi que les résultats normalisés, regroupés ou pondérés.			
	f) Interprétation du cycle de vie: ☒résultats; ☒hypothèses et limitations associées à l'interprétation des résultats, en relation avec la méthodologie et les données; ☒évaluation de la qualité des données; ☒transparence totale en termes de choix de valeurs, justifications et appréciations d'expert;	Plus de détails pourraient être fournis sur les résultats. L'évaluation de la qualité de données ne couvre pas toutes les données utilisées.	La qualité des principaux processus contributeurs est couverte, tel qu'exigé dans le *GHG Protocol Product Standard*. Voir section 8 (réponse au commentaire #14).	OK
	g) Revue critique:			

	☒nom et affiliation des réviseurs; ☒rapport de revue critique; ☒réponses aux commentaires/recommandations.			

SECTION 4: Exigences additionnelles dans le cas d'études ACV utilisées à l'appui d'une affirmation comparative destinée à être divulguée au public

Exigences		Commentaires du comité de revue critique	Réponses des auteurs	Réponse du comité de revue critique
	Analyse des flux de matières et d'énergie pour justifier leur inclusion ou leur exclusion.			
X	Évaluation de la précision, de la complétude et de la représentativité des données utilisées.			
	Description de l'équivalence des systèmes comparés conformément à 4.2.3.7 de la norme ISO 14044.			
X	Description du processus de revue critique.			
	Évaluation de la complétude de l'ACVI.	Il s'agit d'une empreinte carbone seulement.		
X	Mention indiquant si une acceptation internationale existe ou non pour les indicateurs de catégorie sélectionnés et une justification de leur utilisation			
	Explication de la validité scientifique et technique et de la pertinence environnementale des indicateurs de catégorie utilisés dans l'étude.	Il s'agit d'une empreinte carbone seulement.		
X	Résultats des analyses d'incertitude et de sensibilité.			
	Évaluation de la signification des différences trouvées.			
	Le regroupement est inclus dans l'étude ACV? ☒NON, si NON alors la liste est terminée. ☐OUI, si OUI alors ☐méthodes et résultats utilisés pour le regroupement; ☐indication précisant que les conclusions et les recommandations issues du regroupement sont basées sur des choix de valeurs; ☐justification des critères utilisés pour la normalisation et le regroupement (il peut s'agir de choix de valeurs personnels,			

	organisationnels ou nationaux); ☐mention selon laquelle «l'ISO 14044 ne spécifie pas de méthodologie spécifique ni n'appuie les choix de valeurs sous-jacents utilisés pour regrouper les catégories d'impact»; ☐mention selon laquelle «les choix de valeurs et les jugements utilisés dans les méthodes de regroupement sont de la seule responsabilité du commanditaire de l'étude (par exemple le gouvernement, la communauté, l'entreprise)».			

8 COMMENTAIRES DU COMITÉ DE REVUE CRITIQUE SUR LE RAPPORT FINAL DE L'ÉTUDE ET RÉPONSES DES AUTEURS

No.	Réviseur	Page ou section	Commentaires du réviseur	Réponses des auteurs	Réponse du réviseur
1	JFM	Sommaire exécutif	Les résultats de l'empreinte carbone sont exprimés en en termes de tonnes d'équivalent CO_2. Il aurait été intéressant d'illustrer la variabilité du résultat pour le scénario de référence sur la figure au moyen d'une barre d'erreur. Le CIRAIG est maintenant le Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services. Revoir le temps des verbes utilisés pour faire référence à la revue critique, la version finale du rapport d'étude est post-revue.	Correction apportée. Une barre d'incertitude a été ajoutée. Modification apportée. Modification apportée.	OK OK OK OK
2	JFM	1.1	Le seul avantage environnemental que peut valider l'évaluation de l'empreinte carbone est une plus faible quantité de GES émis sur le cycle de vie (système « du berceau à l'entrepôt ») du silicium métal produit par FerroQuébec. Il faudrait donc limiter la portée de l'étude indiquée à celle-ci	Modification apportée.	OK
3	JFM	1.3	La distinction entre houille et charbon, bien que sémantiquement correcte, prête davantage à confusion puisque les deux termes sont utilisés dans le rapport de façon plus ou moins indistincte (et la modélisation de leur approvisionnement n'est pas différenciée). Je suggère donc de n'utiliser que le terme charbon, les caractéristiques du charbon utilisé par FerroQuébec, i.e. de la houille, sont d'ailleurs précisées au Tableau 4.5.	Modification apportée.	OK

			Il aurait été intéressant de préciser déjà à cette section que la production du charbon de bois se fera par pyrolyse. Est-ce que les fines de quartz (équivalentes aux fines de silicium?) sont utilisées à l'interne ou sont vendues/valorisées à l'externe et ainsi sont un vrai coproduit de l'usine? La distinction entre coproduits principaux et secondaire n'est pas pertinente. Il est un peu confus de faire référence à des produits semi-finis, ensuite aux produits finis et enfin au produit final, il faudrait clarifier. Est-ce que les produits finis qui peuvent être concassés et criblés incluent les lingots (?) de silicium métal et le laitier?	Détail ajouté. Les fines de quartz sont valorisées à l'externe et n'ont subi qu'une transformation physique mineure (criblage du quartz). Comme les informations sur les fines de quartz ne sont pas disponibles pour les usines de référence et que son importance massique et économique est marginale, aucun n'impact n'est alloué aux fines de quartz dans l'analyse. La précision est apportée dans le rapport. Le qualificatif coproduit secondaire est retiré. Par contre, la fumée de silice et le laitier sont toujours identifiés comme des coproduits principaux. Les étapes de l'affinage, de la recoulée et du conditionnement sont décrites plus clairement.	OK OK OK OK
4	JFM	Figure 1.1	Il serait bien de distinguer carbonisation (pyrolyse) et cogénération puisqu'il s'agit de deux processus distincts, le second alimenté par les résidus du déchiquetage des résidus forestiers et alimentant le premier en chaleur. Je doute qu'ils soient réalisés par la même unité dans l'usine. Il n'est pas fait mention dans le texte du processus de re-coulée, est-ce la refonte des produits semi-finis (lingots?) indiqués dans le texte? Le lien entre ce processus et le décrassage n'est pas clair, est-ce que la re-coulée permet le décrassage qui va générer le laitier et le silicium métal ainsi « décrassé »? Ne peuvent-ils pas ainsi être intégrés en un seul et même processus, suivi par le concassage et criblage?	La carbonisation et la cogénération sont décrites de manière plus détaillée. Les étapes de l'affinage, de la recoulée et du conditionnement sont décrites plus clairement.	OK OK
5	JFM	Figure 3.1	L'utilisation de résidus forestiers comme matière première n'implique pas leur transformation mais seulement leur extraction. Le processus de cogénération à partir des résidus de broyage des résidus forestiers est-il inclus à l'étape de production? Le décrassage est-il inclus dans les services auxiliaires? Au regard de l'Annexe A-1, ces derniers ne semblent pas avoir été modélisés? Cela devrait être clarifié (contour de la boîte en tirets?). Il manque une flèche entre les étapes de Production et de Distribution et entreposage. Je propose de remplacer le nom de l'étape Applications industrielles par Utilisation et fin de vie, et de n'avoir que trois boîtes pour cette	Pour certaines usines de référence, des résidus industriels sont utilisés. La transformation est donc conservée dans la figure. La cogénération se fait à l'usine et est incluse à l'étape de production (seulement pour le scénario FerroQuébec). La consommation d'électricité inclus les services auxiliaires pour l'usine FerroQuébec et les usines de référence. Flèche ajoutée. Noms modifiés.	OK OK OK OK OK

			étape : Secteur des alliages d'aluminium, Secteur des panneaux photovoltaïques, Secteur des silicones; le contour des boîtes pour les secteurs ainsi que pour l'étape au complet étant en tirets (= exclus), la légende étant modifiée afin de représenter les processus et les étapes exclus.		
6	JFM	3.2	Dans le cas de l'utilisation de résidus industriels de bois comme matière première, la transformation industrielle est-elle incluse? Les anodes sont-elles pré-cuites ou cuites dans le four à arc électrique comme dans les cuves Söderberg pour la production d'aluminium comme semble le suggérer l'expression « pâte d'anode »? Si c'est le deuxième cas, il n'y a donc pas de mise en forme, cuisson et usinage dans le cas de ces électrodes. Comment sont emballées les cathodes et la pâte d'anode? Le décrassage est-il inclus dans l'étape de production? Les infrastructures de l'usine de FerroQuébec ne semblent pas être incluses, est-ce bien le cas? Si oui, est-ce que les infrastructures incluses par défaut dans les jeux de données de la base de données ecoinvent ont également été exclues?	Pour les usines où des résidus industriels sont utilisés, la transformation industrielle est incluse. Les électrodes sont composites, un noyau d'électrode en graphite est enrobé de pâte d'anode (ou pâte Söderberg). La mise en forme, cuisson et usinage s'appliquent au noyau en graphite. Détail ajouté. Les emballages des produits sont exclus pour le scénario de référence et le scénario FerroQuébec, car leur contribution est jugée minimale. Détail ajouté. La construction de l'usine est exclue pour toutes les usines, car considérée identique pour le scénario FerroQuébec et le scénario de référence. Toutefois, pour les autres processus, les infrastructures sont conservées dans ecoinvent. Détail ajouté.	OK OK OK OK
7	JFM	Tableau 4.1	Après examen de l'Annexe A.1, il semble que les jeux de données de la base de données ecoinvent v3.01 de transformation et non de marché ont été utilisés pour les intrants et un transport séparé a été modélisé pour représenter leur livraison, il faudrait donc indiquer quelles étaient les hypothèses concernant ce transport (origine des intrants ou au moins modes et distances de transport). Il manque à l'étape d'approvisionnement et prétraitement des matières premières, le coke de pétrole, le calcaire et les autres intrants mineurs.	Une référence à l'annexe B pour le transport des intrants a été ajoutée à la section 4.4.5. Dans certains cas spécifiques, les processus de marché ont été considérés préférables au processus de transformation (voir annexe A). Ajout des intrants mineurs à l'étape d'approvisionnement.	OK OK
8	JFM	Tableau 4.2	Il aurait été intéressant de distinguer la quantité de bois utilisée pour la réaction d'oxydo-réduction et la cogénération. Est-ce que la quantité d'électricité indiquée pour le scénario FerroQuébec inclut la quantité produite par cogénération sur site ou seulement la quantité importée du réseau de distribution régional? Si oui, quelle est la part provenant de la cogénération? Est-ce que cette quantité inclut l'électricité consommée pour les services auxiliaires? Qu'en est-il du calcaire mentionné aux figures 1.1 et 3.1?	Le bois pour le four à arc est distingué du bois pour la cogénération. La quantité d'électricité pour le scénario FerroQuébec inclut uniquement la quantité importée du réseau. Détail ajouté. La part provenant de la cogénération est faible (environ 5% de la consommation totale). Pour toutes les usines, la consommation inclut également les services auxiliaires, de manière cohérente avec ce qui est présenté dans la section sur le champ d'étude. La consommation de calcaire est ajoutée au tableau.	OK OK OK

9	JFM	Tableau 4.4	Le mélange énergétique québécois indiqué ne correspond pas à celui qui est modélisé par les jeux de données de la base de données ecoinvent v3.1 « Electricity, high voltage {CA-QC}| market for | Alloc Def, U » ou « Electricity, high voltage {CA-QC}| market for | Alloc Rec, U », à moins que ceux-ci aient été modifiés, ce que l'Annexe A-1 ne semble pas suggérer. Il faudrait plutôt indiquer les mélanges énergétiques qui ont été utilisés dans le calcul des empreintes carbones du silicium métal.	Le mélange énergétique québécois dans ecoinvent v3.1 a été ajusté pour refléter les plus récentes statistiques données au tableau 4.4.	OK
10	JFM	4.4.3	Cette section devrait être intégrée à la 4.4.1 puisqu'elle concerne le processus de production de silicium métal, de cette manière toute l'information sur ce processus serait regroupée. Deux des réactions indiquées ne balancent pas : SiO2+ 2 C -> Si + 2 CO et SiO2 + C -> Si + CO2. Qu'en est-il de l'agent de flux? Correspond-il au calcaire? Si non, qu'en est-il de ce dernier qui est également ajouté dans le four et qui contient environ 12% de carbone?	Sections regroupées. Équations modifiées. L'apport en carbone de l'agent de flux est très faible comparativement à l'agent réducteur. Il est néanmoins pris en compte dans le calcul des émissions selon le protocole QC.19. La quantité consommée a été ajoutée au tableau 4.2 et le calcul des émissions sur site détaillé à la section 4.4.1.	OK OK OK
11	JFM	Tableau 4.5	Il manque les caractéristiques du charbon de bois utilisé par FerroQuébec. En combinant les valeurs des Tableaux 4.2 et 4.5, il semble que les quantités de carbone présentes dans le four soient très différentes entre les usines considérées, sans lien avec la quantité de quartz. Est-ce un artéfact des hypothèses sur les teneurs en carbone des intrants? Comment les incertitudes sur ces dernières influent les résultats et les conclusions de l'étude?	Les caractéristiques du charbon de bois ne sont pas nécessaires au calcul des émissions, car il est produit sur site à partir du bois dont les caractéristiques sont connues. La consommation de carbone en termes absolus dépend de la quantité de carbone fixe et de la réactivité des agents réducteurs. Par exemple, le charbon de bois a une teneur en carbone fixe et une réactivité plus élevée que la houille, ce qui explique la plus faible consommation de carbone dans les usines une forte proportion de charbon de bois. La consommation d'intrants dans chaque usine est basée sur des données d'industrie et est considérée fiable.	OK OK
12	JFM	Tableau 4.7	Il manque de transparence dans les calculs, notamment quelles densités ont été choisies pour le bois de la première récolte et celui des plantations dans le calcul pour la Chine. La valeur pour la Chine dans le cas d'une conversion vers des plantations me paraît très faible.	Les hypothèses et données détaillées sont fournies à l'annexe C. Le facteur pour la conversion vers des plantations en Chine a été ajusté : • Une plantation inconnue en Asie a été retenue plutôt qu'une plantation d'eucalyptus en Amérique du Sud (le résultat pour une plantation d'eucalyptus en Asie n'est pas disponible dans FICAT.	OK

				• Le type de sol a également été changé au regard des informations disponibles dans Blonk Consultants (2014). Pour le scénario de référence, les données sont approximatives et servent à quantifier l'ordre de grandeur des émissions. Ceci est considéré acceptable vu la faible contribution du changement d'utilisation des terres sur l'empreinte carbone totale (<2%).	
13	JFM	4.4.6	Comment est divisée la quantité visant le marché américain entre les usines de l'Est et celles de l'Ouest? Comment est déterminé si le transport par bateau est possible ou pas? Selon l'Annexe B.1, la même destination (Cincinnati, OH) est atteinte en bateau et en train. Comment est divisé la quantité transportée par bateau et celle par train pour une même destination? Il serait bien d'indiquer les parts relatives de chacune des routes de distribution aux Annexes B.1 et B.2. Pourrait-il y a avoir des pertes de produit lors de la distribution, les distances et les modes de transport n'étant pas les mêmes entre les scénarios comparés, ces pertes pourraient ne pas être les mêmes.	La production va majoritairement à l'Est des États-Unis. La répartition exacte constitue une information confidentielle. Il n'est pas nécessaire de la divulguer vu la faible contribution de la phase de distribution. Le transport est effectué en train lorsque la voie maritime du St-Laurent ne peut être empruntée en hiver. Détail ajouté. Les parts relatives de chacun des marchés visés sont déjà indiquées au Tableau 3.3. Les pertes durant le transport sont considérées négligeables et identiques d'un scénario à un autre. Des dispositions sont prises par les producteurs pour éviter les pertes car des coûts y sont associés.	OK OK OK OK
14	JFM	4.5.1	Il faudrait présenter les résultats de l'évaluation de la qualité des données pour tous les processus modélisés, de la même manière que dans les Tableau 4.14 et 4.16. Ceux-ci peuvent être présentés en annexe dans le cas des processus ayant une faible contribution à l'empreinte carbone. Il serait intéressant d'indiquer en même temps la contribution relative de chaque processus à l'empreinte carbone afin de permettre au lecteur de juger de l'influence de la qualité des données individuelles à la qualité globale des données utilisées et la fiabilité des résultats obtenus. Dans le cas des scénarios de référence, les processus présentés ne couvrent que 80% environ de l'empreinte (Tableau 6.2), contrairement à 93% dans le cas du scénario FerroQuébec (Tableau 6.1). Il aurait bien de présenter au Tableaux 4.15 et 4.16 les mêmes processus que ceux présentés au Tableau 6.2.	L'évaluation de la qualité des données est maintenant fournie pour les processus couvrant au moins 90% de l'empreinte pour les deux scénarios. Les lignes directrices du GHG Protocol Product Standard, qui stipulent que : "For significant processes, companies shall report a descriptive statement on the data sources, the data quality, and any efforts taken to improve data quality", sont respectées.	OK
15	JFM	5.2 (contribution)	Basé sur les Tableaux 4.2, 4.3 et 4.5, je trouve des émissions de CO2 fossiles supérieures aux résultats pour les scénarios de référence et cela sans tenir compte du calcaire, propane et diesel consommée à	Les résultats ont été calculés à partir de la moyenne des volumes distribués par zone géographique (Tableau 3.3), ce qui n'était pas le cas initialement. Par conséquent,	OK

			l'étape de production (selon l'Annexe A.2) et au méthane et protoxyde d'azote produits à cette étape. Inversement, je trouve des captations et émissions de CO2 biogénique, uniquement basées sur le contenu carbone des matières premières consommées à l'étape de production, bien inférieures aux résultats pour les scénarios de référence. Il faudrait donc expliciter les calculs puisque les reproduire ne semble pas direct.	l'ensemble des résultats à la section 5 et 6 ont été mis à jour. L'écart noté sur les émissions biogéniques est dû au fait que les émissions biogéniques n'ont pas uniquement lieu lors de l'étape de production, tel qu'assumé par le réviseur, mais aussi lors de l'approvisionnement (carbonisation du charbon de bois hors site pour les usines de référence). Le détail par type de GES et par étape du cycle de vie est donné pour plus de transparence.	
16	JFM	6.2.2	Il aurait été bien de montrer, en Annexe, les nouvelles parts de marché pour les scénarios comparés considérant 20% de plus de distribué à des clients canadiens. Des émissions évitées égales en termes absolus pour toutes les usines de silicium métal n'expliquent pas une hausse de l'empreinte carbone pour les scénarios de référence suite à l'extension des frontières, qui me semble plutôt expliquée par le fait que la prise en compte des émissions totales de l'usine de silicium métal représente une augmentation plus grande que la réduction associée à l'empreinte carbone d'une quantité équivalente de produits substitués, contrairement au scénario FerroQuébec. C'est-à-dire que les émissions affectées selon l'approche économique aux coproduits de l'usine de silicium métal sont supérieures aux émissions associées aux produits qu'ils substituent.	Pour l'analyse de sensibilité, le marché représente 20% du volume total écoulé. Les volumes distribués dans les autres régions sont répartis au prorata des volumes de base. Détail ajouté. La formulation proposée a été intégrée au rapport.	OK OK
17	JFM	Annexes A.1 et A.2	Il faudrait donner le nom complet de TOUS les jeux de données provenant de la base de données ecoinvent v3.1 qui ont été utilisés, par exemple « Sawlog and veneer log, softwood, measured as solid wood under bark {CA-QC}| softwood forestry, mixed species, boreal forest | Alloc Def, U ». Il faudrait indiquer pour chaque jeux de données, les quantités par unité fonctionnelle qui ont été utilisées dans le calcul de l'empreinte carbone, les valeurs dans le cas de l'allocation économique et celles dans le cas de l'extension des frontières présentées distinctement sur deux colonnes. Il est indiqué que du propane et du diesel sont utilisés à l'usine de silicium métal, surement comme carburant, les émissions associées à leur combustion ont-elles été incluses à l'empreinte carbone? Si oui,	Les jeux de données pour toutes les usines sont maintenant fournies à l'annexe A. Les quantités par usine sont également fournies, dans le cas de l'allocation économique et dans le cas de l'extension des frontières. Les données fournies permettent de reconstruire les scénarios de référence selon la répartition entre les marchés et les sources d'approvisionnement pour chacun des marchés. Les émissions de combustion ont été calculées selon le protocole QC.1. L'équation utilisée et les propriétés du carburant sont ajoutées (section 4.4.1.).	OK OK OK

			comment ont-elles été calculées? Il faudrait donner les détails du calcul des émissions de méthane et de protoxyde d'azote, auxquelles il aurait d'ailleurs fallu faire référence dans le corps du rapport. Il semble y a voir des erreurs dans les tableaux, par exemple le jeu de données « Lime, hydrated, packed, at plant/CH » est indiqué comme ayant été utilisé pour modéliser un transport par train dans le cas du scénario FerroQuébec. Il faudrait corriger les tableaux. Est-ce que le jeu de données « Charcoal {…}| production » de la base de données ecoinvent a été utilisé pour modéliser la production de charbon de bois dans le cas du scénario de référence, l'empreinte carbone de cet intrant tirée de la littérature semblait plutôt avoir été utilisée? La note #3 est confuse.	Les émissions de méthane résultent du procédé (protocole QC.19) et de la combustion (protocole QC.1). Le détail des calculs est désormais présenté dans le rapport (section 4.4.1.). Les erreurs quant aux processus choisis ont été corrigées. Les processus choisis pour toutes les usines de référence sont désormais fournis à l'annexe A. Par conséquent, la note 3 n'est plus nécessaire.	OK OK
18	CB	Général	Le rapport contient beaucoup d'informations malheureusement dispersées un peu partout dans le rapport. Pour vérifier des calculs il faut faire de nombreux allers-retours entre les sections. Il est aussi difficile de comprendre les scénarios et de vérifier les productions de CO2 associées à chacun de ces scénarios. Il faudrait peut-être que les auteurs expliquent un peu plus les scénarios en donnant des exemples et en montrant un exemple de la méthode de calcul de la production de CO2. Il manque de l'information sur les intrants (quartz, calcaire, charbon, charbon de bois…). D'où viendront le quartz et le charbon et les autres intrants? Il faut aussi fournir la concentration de SiO2 dans le concentré de quartz livré à FerroQuébec. La préparation du quartz et du charbon demande aussi de l'énergie, est-ce que cette énergie est prise en compte, ou bien est-ce que seulement le transport est considéré dans l'analyse? Les routes de distribution et longueurs de ces routes ne sont pas évidentes à identifier et devraient être clairement décrites pour les deux scénarios envisagés.	Les sections du rapport et leur contenu sont conformes à ce qui est exigé dans la norme ISO 14044. Pour plus de clarté, la section 4.4.3 a été intégrée à la section 4.4.1. Le calcul des émissions sur site est illustré à l'aide d'un exemple à la section 4.4.1 et les résultats sont maintenant donnés pour toutes les usines de référence à l'annexe A. La provenance, la distance de transport et les processus utilisés pour modéliser les principaux intrants sont maintenant donnés aux annexes A et B. La concentration de SiO2 du quartz livré n'est pas utilisée pour le calcul de l'empreinte carbone. Le quartz est presqu'uniquement composé de SiO_2. Les processus ecoinvent sont utilisés pour modéliser l'approvisionnement et incluent par conséquent toutes les étapes de l'extraction et du traitement, tel que décrit à la section 4.2.	OK OK OK
19	CB	Sommaire exécutif	Il faudrait être plus clair concernant les définitions « Scénario de référence » et « FerroQuébec ». On pense comprendre que l'absence de FerroQuébec conduit au scénario de référence, mais est-ce que le scénario de référence existe déjà? Si oui, l'ajout de FerroQuébec ne va pas exclure le scénario de référence puisque les usines existantes vont	Le scénario de référence et le scénario FerroQuébec sont décrits en détail à la section 3.4 et la composition du silicium métal de référence est illustrée plus clairement à la figure 3.2. Tel que spécifié à la section 2, l'approche retenue pour	OK

			continuer de produire. Il faudrait peut-être indiquer que l'avantage principal de FerroQuébec par rapport aux usines des autres pays, réside sur le fait que la production d'électricité du Québec génère très peu de GES. Le terme approvisionnement pourrait a priori être interprété comme celui des matières premières excluant l'électricité.	l'ACV est attributionelle et consiste en la comparaison de deux produits alternatifs. L'approche auquel le réviseur fait référence est plutôt de nature conséquentielle (évaluation de l'impact de l'ouverture de l'usine de FerroQuébec sur le marché mondial de silicium métal).	
20	CB	Figure 1.1	Est-ce qu'on ne devrait pas indiquer 'Électricité' autrement qu'à la sortie de la carbonisation et cogénération. Il y a un apport d'électricité autre que celui de la cogénération.	Modification apportée.	OK
21	CB	1.3	Le procédé de production du silicium métallique est décrit de façon très succincte dans le rapport. Une bonne description du procédé impliquerait une analyse thermodynamique mais ce n'est pas l'objectif du rapport. Il aurait peut-être été bon d'indiquer la puissance du ou des fours et montrer un schéma simplifié de ce(s) four(s). Ce serait peut-être bon d'expliquer un peu le rôle des copeaux de bois dans le procédé. Le bois ne sert pas que comme agent réducteur, mais assure la porosité de la charge en fusion. Pourquoi la poussière de SiO2 ne pourrait pas être recyclée au four? Une étape d'agglomération permettrait peut-être le recyclage de 40 000 tonnes de ce produit dont le prix de vente est de 250$ la tonne en 18 000 tonnes de silicium métal à $2700 la tonne. L'augmentation de la production de silicium métallique associée au recyclage des poussières de SiO2 réduirait probablement l'empreinte CO2 d'une tonne de silicium.	Le schéma des fours est présenté et le rôle des copeaux mentionné. Les détails techniques sur la configuration de l'usine (puissance des fours, technologies utilisées, etc.) sont donnés dans l'étude d'impact sur l'environnement, qui sera rendu public en même temps que le rapport d'empreinte carbone. Pour les fins de l'étude d'empreinte carbone, ces détails ne sont pas essentiels et ne sont pas intégrés au présent rapport.	OK
22	CB	3.2	On parle d'une pâte d'anode. De quoi veut-on parler? Est-ce que FerroQuébec va fabriquer ses électrodes? Le terme pâte d'anode est utilisé dans l'industrie de la production d'aluminium pour désigner le matériau utilisé servant à fabriquer les anodes pour le procédé d'électrolyse de l'aluminium. Ce matériau contient du charbon, du goudron et un autre produit. Est-ce qu'on parle de la même chose pour l'usine de FerroQuébec? Je ne suis pas certain que ce soit acceptable de parler d'oxydo réduction pour le procédé de fabrication du silicium. On fait plutôt la réduction du silicium. Qu'entend-t-on par la recoulée? Qu'entend-t-on par conditionnement du silicium?	Le terme pâte d'anode est remplacé par le terme pâte Soderberg pour plus de précision. Les électrodes utilisées par FerroAtlanticà sont « composites », un noyau d'électrode en graphite étant enrobé de pâte Söderberg. Il s'agit en effet d'un matériau similaire à la pâte d'anode utilisée dans l'industrie de la production d'aluminium. Le terme oxydo-réduction remplacé par réduction. Les étapes de recoulée et de conditionnement sont plus clairement décrites à la section 1.3.	OK OK
23	CB	Tableau 3.2	Je me suis demandé de quelle façon la distribution des 40 000 tonnes de fumée de silice (40% de la production de Si) et de 11 200 tonnes de laitier (11% de la production) contribuent à l'empreinte carbone. Je ne suis pas certain d'avoir retrouvé l'empreinte CO2 des livraisons de ces produits. Il faudrait indiquer dans le rapport de quelle façon la	L'affectation des impacts aux co-produits est présentée à la section 3.5. Une portion des impacts due à l'approvisionnement et à la production leur est affectée selon les approches prévues dans la norme ISO 14044. L'empreinte carbone porte sur le silicium métal et non	OK

			distribution de ces produits est prise en compte dans le calcul de l'empreinte CO2.	les coproduits, leur distribution n'est donc pas prise en compte. L'affectation des impacts de l'usine sur une base économique est illustrée à l'aide d'un exemple (émissions de CO_2 sur site) à la fin de la section 4.4.1.	
24	CB	Tableau 3.3	Le tableau devrait être retravaillé pour qu'il soit plus facile à comprendre. Le titre pourrait être 'Projections du volume de silicium métal distribué par FerroQuébec par zone géographique'. Les chiffres devraient être en tonnes de silicium. Où sont distribués la fumée de silice et le laitier?	Le tableau a été renommé. L'empreinte carbone porte sur le silicium métal et non les coproduits, leur distribution n'est donc pas prise en compte. L'affection des impacts de l'usine (émissions de CO_2) sur une base économique est illustrée à la fin de la section 4.4.1.	OK
25	CB	Tableau 3.4	Le tableau est très difficile à comprendre. Il me semble qu'un tableau doit aider à comprendre un texte et pas l'inverse. Mon interprétation du tableau 3.4 est que le silicium métal consommé aux États-Unis provient à 50% des États-Unis, 22% du Brésil, 10% de l'Afrique du Sud, 5% du Canada… En quoi cette information peut nous être utile dans le cadre de cette étude? Ne faudrait-il pas ajouter une colonne à coté de 50%, 22%, 10%... pour indiquer la nouvelle distribution avec l'usine de FerroQuébec.	Tel que décrit à la section 2, le but de l'étude n'est pas de comparer le marché nord-américain avant et après l'entrée en fonction de l'usine de FerroQuébec, mais plutôt de comparer deux produits : soit le silicium métal qui sera vendu par FQ et le silicium métal « moyen » que les futurs clients de FQ achètent en ce moment. Par conséquent, il est essentiel de savoir d'où provient actuellement le silicium métal sur les marchés visés par FQ. La composition du silicium métal de référence est illustrée plus clairement à la figure 3.2.	OK
26	CB	Tableau 3.5	Le tableau 3.5 est incompréhensible. Est-ce que les scénarios anticipent une consommation constante en tonnes de silicium? Pourquoi y a-t-il une baisse importante de la production interne aux États-Unis de 60 à 42%? Est-ce que des usines vont fermer ou est-ce que les États-Unis vont exporter une plus grande partie de leur production? Je pense qu'il est important de détailler les hypothèses sous-jacentes aux chiffres indiqués. Le scénario 1 (cas des États-Unis) ne correspond pas aux chiffres du tableau 3.4 alors qu'il me semble que ça devrait être le cas.	Le tableau 3.5 permet de décrire d'où vient actuellement le silicium métal que FerroQuébec remplacera. Le scénario 2 représente simplement le cas où le silicium métal de FQ remplace en priorité le silicium métal provenant d'Afrique du Sud et d'Australie, tel que décrit dans le paragraphe juste au-dessus du tableau. La composition du silicium métal de référence est illustrée plus clairement à la figure 3.2.	OK

27	CB	Tableau 4.1	Il faut donner les valeurs avec les références. Par exemple :
			• 2,65 tonnes de quartz par tonne de Si :
			  ○ Extraction du quartz : xx t de CO2/t de quartz;
			  ○ Préparation (concassage, tamisage, lavage, séchage…) : xx t de CO2/t de quartz;
			• Transport vers l'usine :
			  ○ Source 1 : yy km par camion : zz t de CO2/t de quartz;
			  ○ Source 2 : yy km par camion : zz t de CO2/t de quartz.
			Avec ces informations, il est assez simple de calculer l'empreinte CO2
				Les facteurs d'émissions pour les principaux intrants sont ajoutés à l'annexe A (section A.3). Toutefois, il n'est pas considéré pertinent de les présenter dans le corps du rapport.	OK

			d'une tonne de quartz et de calculer cette contribution à la production du silicium. Sans ces informations minimales, il faut aller fouiller dans les bases de données ce qui n'est certainement pas le but du rapport. Il faut que le lecteur ait accès à toutes les données utilisées dans les calculs.		
28	CB	4.4.1	Normalement, la réaction de réduction du SiO2 en Si nécessite une atmosphère fortement réductrice, ce qui permet de supposer que la composition des gaz est très riche en CO. Dans le pire des cas, la réaction est : SiO2 + 2 C -> Si + 2 CO. Soit 0.85 t de carbone par tonne de Si métallique. Le CO de la réaction provient aussi de la réaction de Boudouard. En pratique l'atmosphère à la sortie (surface) du four est un mélange de CO et CO2. Il faut cependant noter que le CO est brûlé en CO2 à la sortie du four sans que la chaleur soit nécessairement récupérée. C'est pourquoi les auteurs indiquent (page 16) que la concentration de CO à la surface des fours est très faible. Si la réaction de réduction était : SiO2 + C -> Si + CO2, alors la consommation de carbone serait 0.42 t de carbone par tonne de silicium. On peut par conséquent estimer la consommation théorique de carbone entre 0.85 et 0.42 tonne par tonne de silicium métallique, mais ce n'est pas le cas, la consommation de carbone pour l'extraction est supérieure à 0.85 t de carbone par tonne de silicium. Le chiffre de 0.85 t de carbone correspond assez bien à la consommation de charbon anticipée pour FQ (tableau 4.2) mais ce n'est qu'une coïncidence, je l'espère puisqu'une tonne de charbon sec contient 0.8 tonne de carbone. Je note que 4.4 et 0.55 tonnes de bois et de charbon de bois doivent aussi être utilisées pour produire une tonne de silicium. Ce qui donne une consommation de carbone supérieure à 1.5 tonne de carbone par tonne de silicium. Maintenant en connaissant les teneurs en carbone du bois, du charbon de bois et charbon il est possible d'évaluer l'excès de carbone utilisé pour la réduction. Un regroupement adéquat des informations des tableaux 4.2 et 4.5 permettrait une estimation rapide du carbone requis pour la production du silicium et de l'origine de ce carbone (fossile ou biomasse). La consommation théorique de carbone pour la production d'une tonne de silicium doit se situer entre 0.42 et 0.85 tonne de carbone. Le carbone excédentaire est utilisé pour le chauffage de la charge et l'évaporation de l'eau. Un bon travail d'analyse exigerait peut-être de séparer le carbone utilisé comme agent réducteur et comme source de chaleur, surtout si l'usine planifie récupérer une partie de la chaleur	La consommation de 4,4 tonnes de bois inclus la consommation de bois pour la production de charbon de bois. Les consommations ont été séparées (voir réponse au commentaire #8). La consommation des usines se base sur une consommation réelle et non un calcul de consommation théorique. La distinction entre le carbone agent réducteur et le carbone combustible n'est pas nécessaire pour l'évaluation des émissions de GES.	OK

			des gaz de combustion.		
29	CB	Tableau 4.2	il faut indiquer que FQ=FerroQuébec. Ne devrait-on pas retrouver parmi les intrants le calcaire? D'ailleurs la calcination du calcaire génère un peu de CO2 et ce n'est pas de la biomasse, donc il faut le comptabiliser. L'Annexe A donne 44 kg de calcaire (CaCO3) par tonne de Si, donc une production de 0.02 t CO2/t de Si. Il faut donner la composition du laitier ce qui permettrait d'évaluer la quantité des additifs et aussi si ces additifs sont générateurs de CO2. Idéalement, la teneur en carbone des différents agents réducteurs (bois, pâte d'anode, charbon…) devrait être donnée dans le tableau 4.2, bien qu'on retrouve cette information un peu plus loin (tableau 4.5). L'hydrogène de certains agents réducteurs pourrait peut-être aussi agir comme agent réducteur.	Référence à FerroQuébec ajoutée. Les données demandées ont été ajoutées. La section 4.4.3 a été intégrée à la section 4.4.1 pour plus de clarté.	OK OK
30	CB	Tableau 4.3	Je ne comprends pas l'utilité du tableau. L'unité de base est la tonne de Si. Pourquoi le répéter en disant que le Si est le produit le plus cher et qu'on l'utilise pour calculer les impacts.	Les valeurs présentées au tableau sont nécessaire pour procéder au calcul de l'affectation économique. Un exemple pour l'affectation des émissions de l'usine de FerroQuébec au silicium métal est ajouté	OK
31	CB	Tableau 4.5	Le tableau devrait donner le % de carbone appartenant à la biomasse.	La distinction entre carbone fossile et carbone de la biomasse est faible au tableau 4.4, ajouté pour illustrer le calcul des émissions sur site.	OK
32	CB	Tableau 4.9	Le tableau donne des itinéraires. Pourquoi ne pas utiliser un système de code comme C-xxx désigne un transport par camion sur une distance de xxx km, B-xxx un transport par bateau sur xxx km et T-xxx pour le train. IL faut aller à l'Annexe B pour trouver cette information.	Il n'a pas été jugé pertinent de détailler chaque segment de l'itinéraire de distribution des produits dans le corps du rapport, car le nombre de combinaisons usine – destination est relativement élevé et car la contribution de l'étape de distribution à l'empreinte carbone totale relativement faible. Le lecteur peut se référer à l'annexe B au besoin.	OK
33	CB	Tableau 5.1	Les titres des rangées du tableau doivent être définis correctement si le rapport est destiné à d'autres personnes que des experts dans le domaine des GES. Il faut s'assurer que le lecteur sache ce que veut dire biogénique dans le contexte du tableau 5.1.	La référence aux émissions biogéniques est ajoutée dans le tableau 4.4 (oxydation de la biomasse).	OK
34	CB	Tableau 6.1	Qu'est-ce qui est transporté par bateau transocéanique? Le charbon, le quartz?? Je suis un peu surpris que la production de CO2 associé à la récolte du bois compte pour 0.83 t CO2/t Si. Le transport d'une tonne de charbon génère probablement moins de CO2. Pourquoi alors utiliser du bois et du charbon de bois? Est-ce une question de coût?	Les routes de distribution pour les principaux intrants sont maintenant décrites à l'annexe B. Tel qu'expliqué sous le tableau 6.1, les émissions associées au bois sont dues au changement d'utilisation des terres et non au transport. Le remplacement du charbon par le bois et le charbon de bois est néanmoins avantageux, car les émissions dues à l'oxydation de la	OK

				biomasse sont considérées neutres.	
35	CB	Annexe A.1	j'ai beaucoup de difficultés à refaire les calculs pour la génération de CO2 associée à la production de Si. En théorie, la masse de carbone requis pour la réduction d'une tonne de silicium doit se situer entre 0.42 et 0.85, mais en pratique la masse de carbone dépasse 1 tonne puisqu'une partie du carbone sert au chauffage et à la vaporisation de l'eau. En me basant sur les données de l'annexe 1, du tableau 4.2 et du tableau 4.5, je réussis à trouver par tonne de Si: • Carbone du charbon 0.85 (masse de charbon) x 0.809 (teneur du charbon) x 0.878 (proportion de solide sec dans le charbon) = 0.60 t de carbone; • Carbone du bois : 4.4 (masse de bois) x 0.49 (teneur en carbone du bois) x 0.57 (proportion de solide sec) = 1.23 t de carbone; • Carbone du charbon de bois (tableau 4.2) : 0.55 x 0.8 x 0.97= 0.43 t de carbone (ici j'ai pris des valeurs moyennes); • Calcaire : 0.044 x 12/100 = 0.005 t de carbone; • Électrode pâte : 0.072 t de carbone; • Électrode noyau : 0.016 t de carbone; • Propane : 0.013 x 36/44 = 0.011 t de carbone; • Diesel : 0.009 x 0.80 = 0.007 t de carbone La masse de carbone consommé par tonne de silicium est donc : 2.37 tonnes qui devraient donner 8.7 tonnes de CO2 une valeur assez proche du 8 t de CO2 de l'Annexe A.1. Le chiffre de 12 MWh pour produire une tonne de silicium semble élevé, mais c'est possible puisque cette valeur est rapportée par toutes les usines. Donc la compagnie doit viser un four de 140 MW pour produire 11.7 tonnes de silicium métallique par heure soit environ 100 000 tonnes par an.	Le détail du calcul des émissions de CO2 sur site est désormais fourni à la section 4.4.1.	OK
36	DF	Figure 1.1	La réponse des auteurs au commentaire du rapport préliminaire de définition n'est pas claire. Est-ce que les fines de silice sont considérées ou non dans l'estimation de l'empreinte carbone?	Voir réponse au commentaire 3.	OK
37	DF	Figure 3.1	Après considération du contexte et des objectifs de l'étude, nous pouvons dire que la Fig. 3.1 est satisfaisante. (Il manque une flèche entre la colonne « Production » et la colonne « Distribution et entreposage ».)	Voir réponse au commentaire 5.	OK
38	DF	3.4	Le choix de deux scenarios de référence est très bien fondé. Cependant une comparaison entre le scenario FerroQuébec et un scenario Canada/Norvège pourrait offrir une réponse à la question s'il y une	Pour des raisons commerciales, FerroQuébec préfère ne pas procéder à des comparaisons ciblant un producteur spécifique, comme c'est le cas pour Elkem en Norvège.	OK

			diminution des émissions GES grâce aux facteurs autres que l'électricité (par ex., diminution de l'empreinte carbone grâce une amélioration technologique). L'addition d'une telle comparaison pourrait ajouter plus de poids à l'étude et au projet FerroQuébec.		
39	DF	3.5	Les auteurs n'ont pas répondu au commentaire du rapport préliminaire de définition qu'« *aucune émission de CO_2 ne devrait être attribuée aux fumés de silice* ».	Ce commentaire a été formulé car une affectation massique était initialement prévue pour les coproduits de la production de silicium métal. Toutefois, les méthodes d'affectation économique et par extension des frontières ont été retenues pour le rapport final.	OK
40	DF	Tableau 4.2	Pour la majorité des usines de référence la production de fumée de SiO_2 est 0,35 t par t de Si métal, mais l'usine chinoise (CN) produit juste 0,17 t de fumée de SiO_2 par t de Si métal. Des explications?	La valorisation de la fumée de silice est plus faible en Chine que dans les autres régions. Bien que la majorité des usines (environ 80%) récupèrent maintenant la fumée de silice, seule une fraction des usines (environ 60%) la valorise car son prix sur le marché a fortement baissé depuis 2008 (CRU, 2013). Explication ajoutée.	OK
41	DF	4.4.1	« *Certains facteurs peuvent ne pas être pris en compte… peuvent avoir été estimées.* » Quels facteurs? Quelles données? SVP, précisez.	Quelques exemples de facteurs et données manquantes sont fournies. Toutefois, comme les principales usines de silicium métal à travers le monde sont incluses dans l'analyse de CRU (2013), il est raisonnable de croire que les données moyennes qui en sont tirées sont fiables (précision ajoutée).	OK
42	DF	Tableau 4.15	Ligne « Production d'électricité en Chine (charbon) » : « *Les données représentent l'opération d'une centrale thermique au début des années 2000.* » Est-ce qu'il est possible que ces données ne sont plus valides aujourd'hui?	Tel qu'indiqué dans la section 4.5, les données sont considérées représentatives vu la durée de vie des infrastructures utilisées pour la production d'électricité (centrales thermiques). À titre d'exemple, la plupart des centrales au charbon des États-Unis ont plus de 30 ans[1].	OK (Cependant, le mélange d'énergie électrique (le « grid mix ») change beaucoup plus rapidement en Chine qu'aux ÉU.)
43	DF	4.4.3	Les 1e et 3e réactions ne sont pas complètes. Elles doivent être corrigées comme : SiO2 + **2** C $\rightarrow$ Si + 2 CO et SiO_2 + C $\rightarrow$ **Si +** CO_2	Équations corrigées.	OK
44	DF	Tableau 6.2	À l'étape « Production de silicium métal » et au processus « Oxydo-réduction dans le four à arc électrique (usine Chine) », les émissions de GES sont 0,52 t éq. CO_2 par t de Si métal. Cette quantité est inférieure aux émissions théoriques. (Selon la stœchiométrie de la réaction SiO_2 + C $\rightarrow$ Si + CO_2, la production d'une tonne de Si métal est	Les résultats au tableau 6.2 représentent la contribution des différentes usines au scénario de référence. Les usines chinoises contribuent seulement à une fraction du silicium métal de référence moyen. Ce concept est plus clairement illustré à la figure 3.2.	OK

[1] US E.I.A. (2013). How old are U.S. power plants? http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=110&t=3

			accompagnée d'une émission de 1,57 t de CO_2.) Pourquoi cette différence entre les émissions de GES en Chine et les émissions théoriques?		
45	DF	Annexe A.2	Colonne « Quantité ». Au lieu de « *variable* », donner la plage de valeurs.	Les données ont été fournies pour toutes les usines de référence.	OK

9 RÉFÉRENCES

Organisation internationale de normalisation (2006) *ISO 14040 — Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre*, 30p.

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

EY | Certification | Fiscalité | Services transactionnels | Services consultatifs

À propos d'EY

EY est un chef de file mondial des services de certification, services de fiscalité, services transactionnels et services consultatifs. Les points de vue et les services de qualité que nous offrons contribuent à renforcer la confiance envers les marchés financiers et les diverses économies du monde. Nous formons des leaders exceptionnels, qui unissent leurs forces pour assurer le respect de nos engagements envers toutes nos parties prenantes. Ce faisant, nous jouons un rôle crucial en travaillant ensemble à bâtir un monde meilleur pour nos gens, nos clients et nos collectivités.

EY désigne l'organisation mondiale des sociétés membres d'Ernst & Young Global Limited, lesquelles sont toutes des entités juridiques distinctes, et peut désigner une ou plusieurs de ces sociétés membres. Ernst & Young Global Limited, société à responsabilité limitée par garanties du Royaume-Uni, ne fournit aucun service aux clients.

Pour plus d'information, veuillez consulter le site ey.com/ca/fr

© 2015 Ernst & Young s.r.l./S.E.N.C.R.L. Tous droits réservés. Société membre d'Ernst & Young Global Limited.