

Électrification efficace des procédés industriels au Québec

En collaboration avec



Cc



Cette publication a été réalisée par :

Ressources naturelles Canada

CanmetÉNERGIE à Varennes

canmetenergy-canmetenergie@nrca-rncan.gc.ca

450 652-4621

1615, boul. Lionel-Boulet

Varennes (Québec) J3X 1P7

En collaboration avec :

Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie du Québec

info@economie.gouv.qc.ca

418 691-5950

Télécopieur : 418 644-0118

Sans frais : 1 866 680-1884

5700, 4e Avenue Ouest, 4e étage

Québec (Québec) G1H 6R1

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs du Québec

418 521-3830

Sans frais : 1 800 561-1616

Édifice Marie-Guyart,

675, boulevard René-Lévesque Est, 3e étage

Québec (Québec) G1R 5V7

Dépôt légal – Juin 2026

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

ISBN 978-0-662-34716-3 (version électronique)

Tous droits réservés pour tous les pays

© Gouvernement du Québec – 2026

Avertissement

Ressources naturelles Canada (RNCAN), le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) et le ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie (MEIE) ne sont pas responsables de l'exactitude et de l'intégralité des renseignements contenus dans le matériel reproduit. RNCAN, le MELCCFP et le MEIE doivent en tout temps être indemnisés et exemptés de toute réclamation qui découle de la négligence ou d'un autre manquement dans l'utilisation des renseignements contenus dans cette publication.

Produits d'une tierce partie

Certains documents figurant dans cette publication peuvent être assujettis aux droits d'auteur d'autres individus ou d'autres organisations. Pour obtenir de l'information sur la propriété et les restrictions en matière de droit d'auteur, veuillez communiquer avec RNCAN :

Courriel : canmetenergy-canmetenergie@nrcan-nrcan.gc.ca

Téléphone : (450) 652-4621

Droit d'auteur

Le contenu de cette publication peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnelles ou publiques, mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et le nom des organisations qui en sont les auteurs;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par RNCAN et que la reproduction n'a pas été faite en association avec RNCAN ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales sont interdites, sauf avec la permission écrite de RNCAN. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec RNCAN à droitdauteur.copyright@nrcan-nrcan.gc.ca.

Résumé

Une étude a été réalisée pour estimer le potentiel d'électrification de neuf secteurs industriels au Québec : les productions d'aluminium, d'alumine, de ciment et de chaux, les pâtes et papiers, la sidérurgie, les raffineries de pétrole, l'extraction de minerai de fer et l'extraction de minerai d'or et d'argent. Il est important de mentionner que ce rapport fait suite à un premier rapport intitulé *Inventaire de la consommation d'énergie et des émissions des gaz à effet de serre dans les procédés industriels au Québec*.

Deux scénarios d'électrification sont proposés dans une vision de carboneutralité à long terme : le scénario techno-optimiste et le scénario à niveau de maturité technologique élevé (ou NMT élevé). Le scénario techno-optimiste suppose que tous les sous-procédés industriels, théoriquement électro-substituables, sont électrifiés, quelle que soit la maturité des électrotechnologies. Le scénario NMT élevé suppose que seuls les projets pour lesquels les technologies sont actuellement commercialisées, ou sur le point de l'être, sont pris en compte.

La consommation totale d'énergie pour les neuf secteurs considérés était de 513 PJ en 2019, dont 196 PJ de combustibles fossiles, eux-mêmes répartis entre diverses applications soumises ou non à électrification. Selon le scénario d'électrification techno-optimiste, la consommation totale d'énergie pour les neuf secteurs peut être réduite de 6 % (31 PJ), ce qui se traduit par une réduction de 82 % des combustibles fossiles (161 PJ) et une augmentation de 51 % de la consommation d'électricité (**36 TWh**). Ce scénario d'électrification entraîne une réduction totale des GES de 11,5 Mt CO₂éq, résultant d'une réduction de 80 % des émissions liées aux combustibles fossiles (équivalent à 10,1 Mt CO₂éq) et d'une réduction de 30 % des émissions de procédé (1,4 Mt CO₂éq), sans changement dans les émissions biogéniques. Ce scénario entraînerait des coûts énergétiques supplémentaires de l'ordre de 725 millions de dollars par an (sur la base, entre autres, d'un coût de 6,30 \$/GJ pour le gaz naturel et 0,045 \$/kWh pour l'électricité), soit 63 \$/t CO₂éq, pour le changement de source d'énergie, en plus des coûts d'investissement dans les électrotechnologies et de leur installation.

Pour le scénario d'électrification à niveau de maturité technologique élevé, la consommation totale d'énergie pour les neuf secteurs peut être réduite de 3 % (15 PJ), ce qui se traduit par une réduction de 52 % des combustibles fossiles (102 PJ) et une augmentation de 35 % de la consommation d'électricité (**24 TWh**). Ce scénario d'électrification conduit à une réduction totale des GES de 5,9 Mt CO₂éq résultant d'une réduction de 46 % des émissions de combustibles fossiles et aucun changement dans les émissions de procédé et les émissions biogéniques. Ce scénario entraînerait un coût énergétique supplémentaire de l'ordre de 506 millions de dollars par année, soit 86 \$/t CO₂éq, pour le changement de source d'énergie, en plus des coûts d'investissement dans les électrotechnologies et de leur installation.

Dans l'ensemble, l'électrification offre la possibilité de réduire de manière significative, mais incomplète les émissions industrielles de gaz à effet de serre, tout en consommant des quantités importantes d'électricité supplémentaire.

Table des matières

Résumé.....	iii
Glossaire.....	1
Introduction	2
Faits saillants	3
L'électrification dans son contexte.....	5
Capacité de production et de transport du réseau électrique	5
Consommation d'électricité du secteur industriel	6
Électrification des consommateurs de combustibles fossiles en industrie	7
Consommation de combustibles fossiles du secteur industriel.....	8
Scénarisation des projets industriels d'électrification.....	12
Scénario d'électrification techno-optimiste	12
Scénario d'électrification NMT élevé	14
Caractérisation des projets d'électrification industriels.....	15
Autres scénarios	17
Conclusions	19
Annexe	a
Méthodologie et hypothèses.....	b
Liste des usines de pâtes et papiers	n
Graphiques supplémentaires.....	o
Bibliographie	p

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des neuf secteurs industriels	9
Tableau 2 : Tableau récapitulatif du scénario d'électrification techno-optimiste.....	13
Tableau 3 : Tableau récapitulatif du scénario d'électrification NMT élevé	14
Tableau 4 : Coût et facteur d'émissions des sources d'énergie de la situation de base	c
Tableau 5 : Tableau récapitulatif de l'électrification techno-optimiste du secteur de l'aluminium.....	d
Tableau 6 : Tableau récapitulatif de l'électrification NMT élevé du secteur de l'aluminium	e
Tableau 7 : Récapitulatif de l'électrification techno-optimiste et NMT élevé du secteur des raffineries de pétrole.....	e
Tableau 8 : Récapitulatif de l'électrification techno-optimiste du secteur de la sidérurgie .	f
Tableau 9 : Récapitulatif de l'électrification NMT élevé du secteur de la sidérurgie	g
Tableau 10 : Récapitulatif de l'électrification techno-optimiste et NMT élevé du secteur des pâtes et papiers	h
Tableau 11 : Récapitulatif de l'électrification techno-optimiste du secteur du minerai de fer	i
Tableau 12 : Récapitulatif de l'électrification NMT élevé du secteur du minerai de fer	i
Tableau 13 : Récapitulatif de l'électrification techno-optimiste et NMT élevé du secteur du ciment	j
Tableau 14 : Récapitulatif de l'électrification techno-optimiste et NMT élevé du secteur de l'alumine.....	k
Tableau 15: Récapitulatif de l'électrification techno-optimiste et NMT élevé du secteur du minerai d'or et d'argent	l
Tableau 16: Récapitulatif de l'électrification techno-optimiste et NMT élevé du secteur de la chaux	m

Liste des figures

Figure 1 : L'électrification dans son contexte de transition énergétique, décarbonation et Net Zéro	3
Figure 2 : Consommation d'énergie (PJ) (figure du haut) et émissions de GES (Mt CO ₂ éq) (figure du bas) des neuf secteurs industriels.....	4
Figure 3 : Consommation d'électricité au Québec en 2019 (TWh)	6
Figure 4 : Consommation de combustibles fossiles au Québec en 2019 (PJ).....	8
Figure 5 : Consommation de combustibles fossiles par utilisateur industriel en 2019	10
Figure 6 : Consommation de combustibles fossiles dans les neuf secteurs industriels en 2019 pour différents niveaux de température (figure du haut) et différents utilisateurs finaux (figure du bas) (PJ)	11
Figure 7 : Électricité supplémentaire par électrotechnologie et par secteur pour le scénario techno-optimiste (TWh).....	15
Figure 8 : Électricité supplémentaire par électrotechnologie et par secteur pour le scénario NMT élevé (TWh)	16
Figure 9 : Électricité supplémentaire en TWh par secteur et par électrotechnologie pour le scénario techno-optimiste.....	0
Figure 10 : Électricité supplémentaire en TWh par secteur et par électrotechnologie pour scénario NMT élevé.....	0

Glossaire

Expression	Description
BECS	Bioénergie avec captage et séquestration de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
CSC	Captage et séquestration de carbone
DAC	Direct Air Capture (Captage direct de l'air)
Elysis	La technologie des anodes inertes, développée par Alcoa et Rio Tinto, pour remplacer les anodes en carbone
GES	Gaz à effet de serre
GJ	Gigajoule
kWh	Kilowattheure
MOE	Molten Oxide Electrolysis (Électrolyse d'oxydes fondus)
Mt CO ₂ éq	Mégatonne d'équivalent CO ₂
MW	Mégawatt
NMT	Niveau de maturité technologique
PJ	Pétajoule
RNCan	Ressources naturelles Canada
t CO ₂ éq	Tonne d'équivalent CO ₂
TWh	Térawattheure

Introduction

Dans le but de soutenir le gouvernement du Québec dans ses objectifs de décarbonation et de transition énergétique vers les énergies renouvelables, cette étude propose une évaluation du potentiel de décarbonation des procédés industriels par le biais de l'électrification pour neuf secteurs industriels au Québec : les productions d'aluminium, d'alumine, de ciment et de chaux, les pâtes et papiers, la sidérurgie, les raffineries de pétrole, l'extraction de minerai de fer et l'extraction de minerai d'or et d'argent.

Le remplacement des combustibles fossiles par l'électricité décarbonée du Québec peut se faire sous plusieurs formes, mais la production de chaleur industrielle représente une part importante de la demande d'énergie dans l'industrie. L'accent est mis sur les activités à forte intensité carbone où il n'existe pas, à court terme, d'alternatives éprouvées, commercialement viables et à faible intensité carbone pour de nombreux aspects des processus de production.

Étant donné que la production d'électricité au Québec est principalement hydroélectrique (95 % de la production totale d'électricité en 2019), et qu'elle n'a donc pas d'impact significatif sur les émissions de CO₂, il est judicieux et prioritaire de considérer l'électrification comme un pilier des plans stratégiques de décarbonation pour tous les secteurs de l'économie. En général, la performance des systèmes énergétiques alimentés par l'électricité est plus élevée que celle des systèmes alimentés par des combustibles fossiles. Ainsi, l'électrification des usages finaux aurait le double bénéfice de réduire la croissance future de la demande d'énergie et de réduire considérablement les émissions de GES en raison de la nature du réseau électrique québécois. À cette fin, des projets d'électrification dans les neuf secteurs industriels visés sont proposés et évalués, par secteur et par équipement, afin d'estimer la consommation électrique supplémentaire au niveau provincial et la réduction des émissions de CO₂ qui en résulterait. Il convient de noter qu'en raison de la grande incertitude sur les coûts d'investissement des technologies émergentes, les évaluations technico-économiques des projets proposés ne sont pas fournies, à l'exception du surcoût de l'énergie pour chaque projet dans chaque secteur. Celui-ci est évalué basé sur la méthodologie présentée en annexe.

Faits saillants

Les projets d'électrification sont soumis à certaines conditions et à un certain contexte énergétique pour assurer leur succès dans l'industrie. Dans un contexte où l'incitation à la décarbonation conduit à examiner l'électrification en combinaison avec des projets d'efficacité énergétique et parfois en concurrence avec la bioénergie, l'identification des applications industrielles les plus prometteuses pour l'électrification n'est pas simple, comme l'illustre la Figure 1. Une décarbonation rapide requiert une combinaison avantageuse d'électrification, d'efficacité énergétique, de bioénergie et de captage de CO₂, ce qui ne correspond pas nécessairement aux scénarios d'électrification seule présentés dans ce rapport.

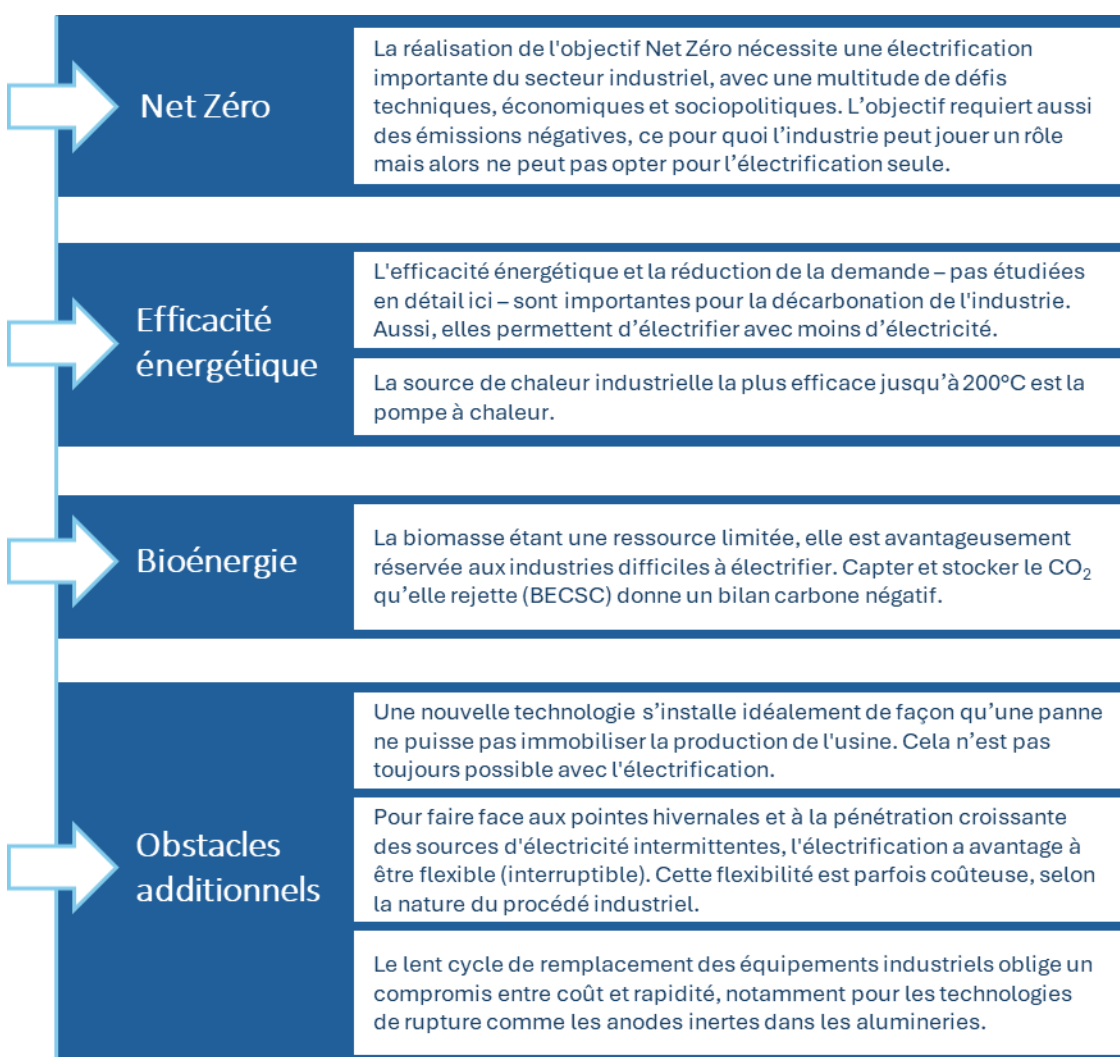


Figure 1 : L'électrification dans son contexte de transition énergétique, décarbonation et Net Zéro

Ce rapport quantifie, pour deux grands scénarios, le potentiel de décarbonation par l'électrification pour les neuf secteurs industriels visés. Ces deux scénarios diffèrent seulement au niveau de la disponibilité future de certaines technologies qui n'ont pas encore atteint un niveau suffisant de maturité technologique et commerciale.

Scénario techno-optimiste : Ce scénario suppose que les neuf secteurs industriels seront électrifiés en incluant les technologies émergentes qui ne sont pas encore sur le marché. Ce scénario entraînerait une augmentation de la consommation d'électricité d'environ **36 TWh (129,7 PJ)**, une réduction des combustibles fossiles de 160,9 PJ et une réduction totale des GES de 11,5 Mt CO₂éq par rapport à la situation de référence en 2019.

Scénario NMT élevé : Ce scénario suppose que les neuf secteurs industriels seront électrifiés en ne considérant que les projets pour lesquels les technologies sont actuellement commercialisées ou sur le point de l'être. Donc, ce scénario exclut les technologies telles que le chauffage par plasma dans tous les secteurs, les anodes inertes pour la production d'aluminium et l'électrolyse d'oxydes fondus (MOE) pour la production d'acier. Ce scénario entraînerait une augmentation de la consommation d'électricité d'environ **24 TWh (87,4 PJ)**, une réduction des combustibles fossiles de 102,0 PJ et une réduction totale des GES de 5,9 Mt CO₂éq par rapport à la situation de référence en 2019.

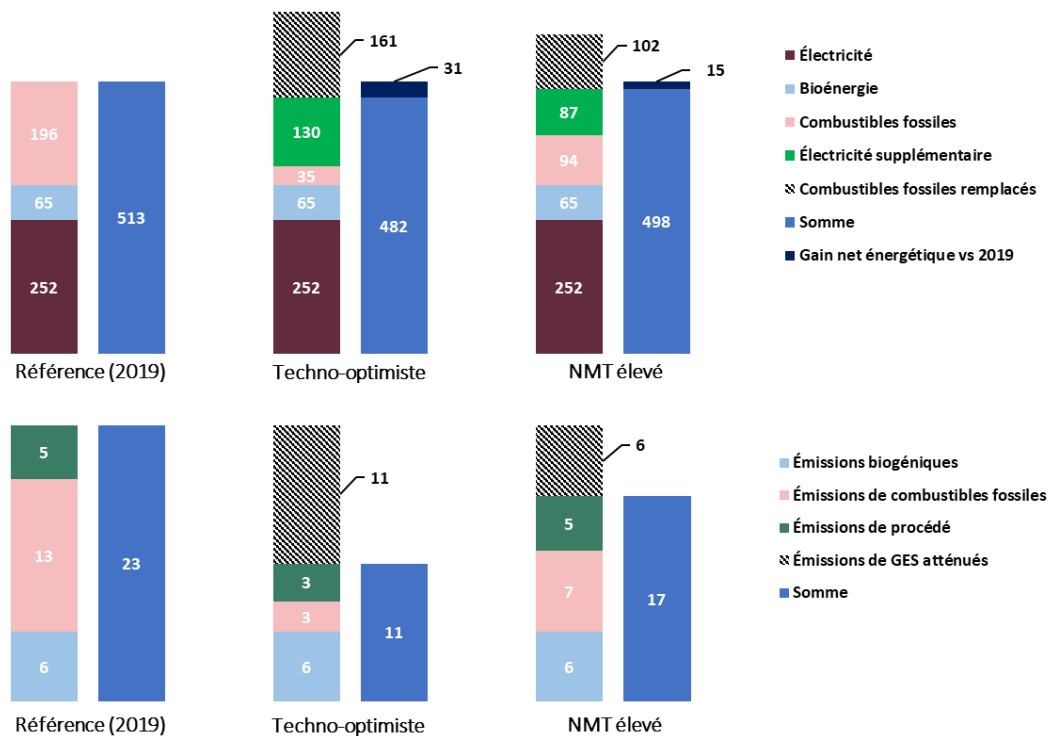


Figure 2 : Consommation d'énergie (PJ) (figure du haut) et émissions de GES (Mt CO₂éq) (figure du bas) des neuf secteurs industriels

L'électrification dans son contexte

L'électrification généralisée de tous les secteurs de l'économie québécoise, y compris l'industrie, entraînera une augmentation importante de la consommation d'électricité, ce qui pourrait mettre à rude épreuve la capacité du réseau actuel d'Hydro-Québec sur l'ensemble de la chaîne de production, de transport et de distribution. En outre, l'électrification entraînera des conséquences importantes sur les volumes d'exportation, qui pourraient diminuer si l'électrification n'est pas suivie d'une gestion efficace tant au niveau de la production que de la demande d'électricité. Il sera donc impossible d'accepter tous les projets d'électrification et il faudra faire des choix judicieux quant aux projets d'électrification et d'amélioration du réseau.

Capacité de production et de transport du réseau électrique

Selon Hydro-Québec ([Rapport annuel 2019, Voir grand avec notre énergie propre](#)), les ventes nettes d'électricité se sont élevées à 209,4 TWh pour une puissance installée totale de 37 243 MW en 2019.

62 centrales hydroélectriques fournissent environ 94% de l'électricité du Québec. Les autres sources d'énergie utilisées pour la production d'électricité sont, par ordre décroissant de production, l'éolien (5%), la biomasse/géothermie (0,7%), les produits pétroliers raffinés (0,2%), le gaz naturel (0,1%) et le solaire (<1%).

Avec environ 5 % de la production totale du Québec, l'énergie éolienne est la deuxième source de production d'électricité de la province. La capacité éolienne est estimée à 4 300 MW et représente 9 % de la capacité totale de la province, avec 47 sites répertoriés (source : [La filière éolienne - De la force du vent à l'énergie électrique](#)).

Avec moins de 1 % de la production totale, l'énergie solaire reste une source très marginale de production d'électricité au Québec. Les principales centrales solaires ont été mises en service en juin 2021 pour une capacité combinée de 9,5 MW. Les autres sources d'électricité comprennent le gaz naturel (principalement pour les pointes de demandes en période hivernale), le diesel (pour l'énergie dans les collectivités éloignées) et la biomasse.

Selon la Régie de l'énergie du Canada (Site web des profils énergétique des provinces pour 2019), les exportations interprovinciales et internationales d'électricité du Québec ont atteint 13,4 TWh. Hydro-Québec a accès à près de 5 428 MW d'électricité produite à la centrale hydroélectrique de Churchill Falls jusqu'en 2041 à un prix fixe de 0,2 cent/kWh. Une nouvelle entente de principe sécurise l'approvisionnement énergétique futur du Québec après 2041 en fixant le prix de l'électricité à 4 cents/kWh. Le Québec fait également du commerce d'électricité sur les marchés du Nord-Est des États-Unis, principalement en Nouvelle-Angleterre et dans l'état de New York. En 2019, ses

exportations brutes ont totalisé 25,9 TWh. Hydro-Québec exploite 34 802 km de lignes de transport d'électricité et 225 304 km de lignes de distribution.

Consommation d'électricité du secteur industriel

En 2019, la consommation d'électricité par habitant du Québec a été de 24 MWh, ce qui le place au premier rang au Canada, soit 60 % de plus que la moyenne nationale. Cela s'explique notamment par la présence de certaines industries, comme les alumineries, qui nécessitent de grandes quantités d'électricité. La majorité des Québécois utilisent également l'électricité pour le chauffage domestique.

Comme le montre la Figure 3 : Consommation d'électricité au Québec en 2019 (TWh), au Québec, c'est le secteur industriel qui affiche la plus forte consommation d'électricité en 2019, avec 93 TWh. Il est suivi par les secteurs résidentiel et commercial avec respectivement 71 et 40 TWh, tandis que le secteur des transports n'a consommé qu'un maigre 0,5 TWh (source : [Régie de l'énergie du Canada](#)).

Les neuf secteurs industriels considérés dans cette étude ont eu une demande d'énergie électrique de 70 TWh, ce qui équivaut à 75 % de la demande totale d'électricité du secteur industriel.

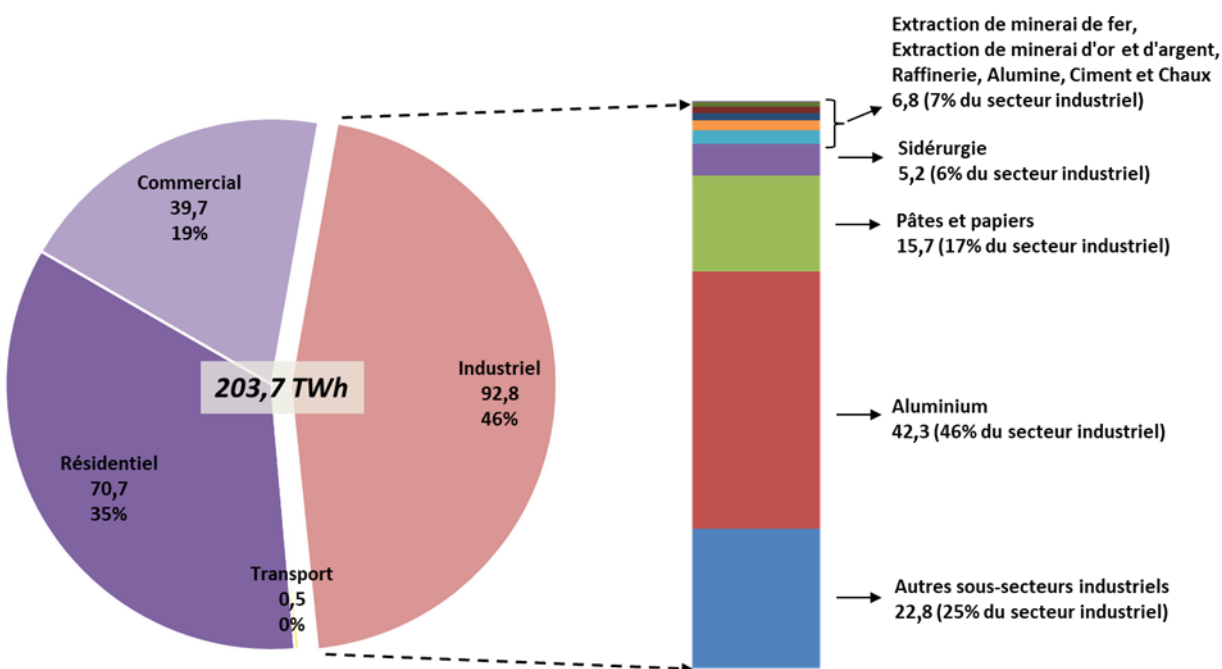


Figure 3 : Consommation d'électricité au Québec en 2019 (TWh)

Électrification des consommateurs de combustibles fossiles en industrie

L'estimation du potentiel d'électrification nécessite d'abord d'identifier les consommations de combustibles fossiles en milieu industriel, ensuite d'identifier quelle électrotechnologie peut se substituer à chaque équipement consommateur, et finalement de déterminer dans quelle proportion l'énergie fossile serait évitée et l'énergie électrique consommée.

L'électrification n'est pas toujours possible lorsqu'un combustible fossile est utilisé comme intrant non énergétique ou lorsque la combustion est captive, c'est-à-dire intrinsèquement requise par la nature du procédé. La réaction de réduction dans la production de fer à partir du minerai de fer, où le gaz naturel est utilisé comme agent réducteur, ou encore les anodes de carbone utilisées comme agents réducteurs dans la production d'aluminium en sont des exemples. Il existe toutefois quelques électrotechnologies émergentes pour ce faire, par exemple l'électrolyse d'oxides fondus dans le domaine de la sidérurgie, ou plus simplement l'utilisation d'hydrogène électrolytique comme agent réducteur ou comme combustible de remplacement. Pour l'électrolyse de l'aluminium, la technologie Elysis promet de remplacer les anodes en carbone par des anodes inertes, mais au prix d'une augmentation de la consommation électrique.

En ce qui concerne la chaleur de procédé, il n'existe théoriquement aucune limite de température au-delà de laquelle l'électrification est impossible. Au contraire, les combustibles fossiles sont peu performants à très haute température, et les applications les plus chaudes sont souvent déjà électrifiées avec des fours à arc, plasma, etc. Toutefois, seules les applications en deçà d'environ 700 °C peuvent être chauffées à faible coût et avec peu de pertes énergétiques en utilisant les résistances nickel-chrome. Ainsi, l'applicabilité des technologies d'électrification de la chaleur dépend fortement de la température :

- Jusqu'à 200 °C, toutes les technologies fonctionnent, notamment le chauffage par induction, par rayonnement (micro-ondes, infrarouge), et par résistance. Les chaudières électriques s'installent très facilement dans les procédés fonctionnant déjà à la vapeur. Les pompes à chaleur haute température sont nettement plus intéressantes en termes de consommation électrique, mais comme leur intégration au procédé relève du domaine de l'efficacité énergétique plutôt que de l'électrification, elles ne sont pas considérées dans cette étude (voir plus loin).
- Entre 200 °C et 700 °C, les mêmes technologies fonctionnent, sauf les pompes à chaleur. Le chauffage par résistance est généralement le plus simple, efficace et économique.

- Au-delà de 700 °C, les technologies tendent à être moins nombreuses, plus coûteuses et plus spécifiques à chaque procédé. Des technologies existantes ou innovantes telles que les fours à résistances électriques et les torches à plasma peuvent prendre le relais des combustibles fossiles dans certains procédés.
- La combustion d'hydrogène décarboné (électrification indirecte) peut également constituer une alternative intéressante, car l'hydrogène produit une flamme de 2100 °C lorsqu'il est brûlé dans l'air.

Il est donc important de déterminer la température de fonctionnement de chaque procédé afin de donner une première idée de l'applicabilité de chaque technologie d'électrification.

Consommation de combustibles fossiles du secteur industriel

Comme le montre la Figure 4 : Consommation de combustibles fossiles au Québec en 2019 (PJ), au Québec, le secteur des transports a consommé le plus de combustibles fossiles en 2019, avec 560 PJ. Il est suivi par les secteurs industriel et commercial avec respectivement 356 PJ et 92 PJ, alors que le secteur résidentiel n'a consommé que 46 PJ (source : [Régie de](#)

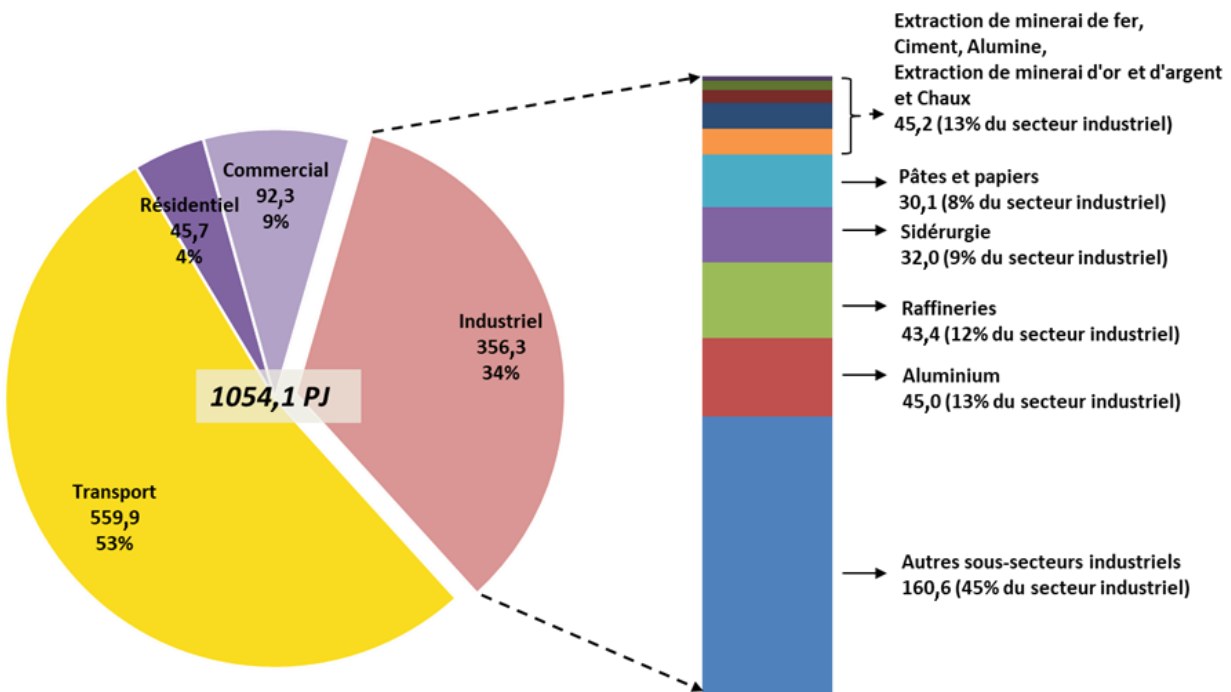


Figure 4 : Consommation de combustibles fossiles au Québec en 2019 (PJ)

[l'énergie du Canada](#)).

Les neuf secteurs industriels considérés dans cette étude ont eu une demande en énergies fossiles de 196 PJ, ce qui équivaut à 55 % de tout le secteur industriel. Le résumé des neuf secteurs est présenté dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Récapitulatif des neuf secteurs industriels

Secteur	Nombre d'usines	Noms des usines	Consommation d'électricité (PJ)	Consommation de combustibles fossiles (PJ)	Consommation de bioénergie (PJ)	Émissions des combustibles fossiles* (Mt CO ₂ éq.)	Émissions biogéniques (Mt CO ₂ éq.)	Émissions de procédé (Mt CO ₂ éq.)
Production d'aluminium	9	1. Alma 2. Alouette 3. Arvida 4. Arvida-Center AP60 5. Baie-Comeau 6. Bécancour 7. Deschambault 8. Grande-Baie 9. Laterrière	152,1	45,0	0,0	3,51	0,00	1,36
Raffineries de pétrole	2	1. Raffinerie Jean-Gaulin 2. Raffinerie Suncor de Montréal	4,3	43,4	0,0	2,48	0,00	0,00
Sidérurgie	5	1. ArcelorMittal Contrecoeur Est 2. ArcelorMittal Contrecoeur Ouest 3. ArcelorMittal Longueuil 4. Elkem Métal Chicoutimi 5. Rio Tinto Fer et Titane	18,8	32,0	0,0	1,94	0,00	0,20
Pâtes et papiers	77	Voir l'annexe	56,5	30,1	65,3	1,61	5,74	0,00
Extraction de minerai de fer	4	1. Mine du Lac Bloom 2. Mines de Mont-Wright et Fire Lake 3. Rio Tinto Fer et Titane Havre-Saint-Pierre 4. Usine de Bouletage de Port-Cartier	7,8	15,0	0,0	1,12	0,00	0,25
Production de ciment	4	1. Ciment McInnis 2. Ciment Québec 3. Ciment Saint-Constant 4. Usine de Joliette	2,4	14,9	0,0	1,14	0,00	2,25
Production d'alumine	1	1. Usine Vaudreuil	4,0	7,4	0,0	0,37	0,00	0,00
Extraction de minerai d'or et d'argent	6	1. Casa Berardi 2. Division Goldex 3. Division Laronde 4. La mine Doyon 5. Mine Canadian Malartic GP 6. Mine Éléonore	5,8	5,1	0,0	0,35	0,00	0,00
Production de chaux	2	1. Usine de Bedford 2. Usine de Marbleton	0,2	2,8	0,0	0,18	0,00	0,44
Totale	110		251,9	195,7	65,3	12,70	5,74	4,50
Estimation obtenue par réconciliation de plusieurs sources de données publiques								
* Dans cette étude, toutes les émissions provenant de combustibles fossiles, qu'ils soient brûlés ou utilisés comme matière de réaction, sont considérées comme des émissions de combustibles fossiles.								

Dans les neuf secteurs étudiés, comme le montre la Figure 5, l'utilisation finale consommant le plus de combustibles fossiles et ayant les plus fortes émissions de GES est le chauffage direct, qui a utilisé 76 PJ, soit 39% en termes d'énergie ou 36% en termes d'émissions. Le deuxième équipement consommateur de combustibles fossiles est la chaudière à vapeur, qui a consommé 40 PJ, soit 20% du total, dont environ 70 % en gaz naturel.

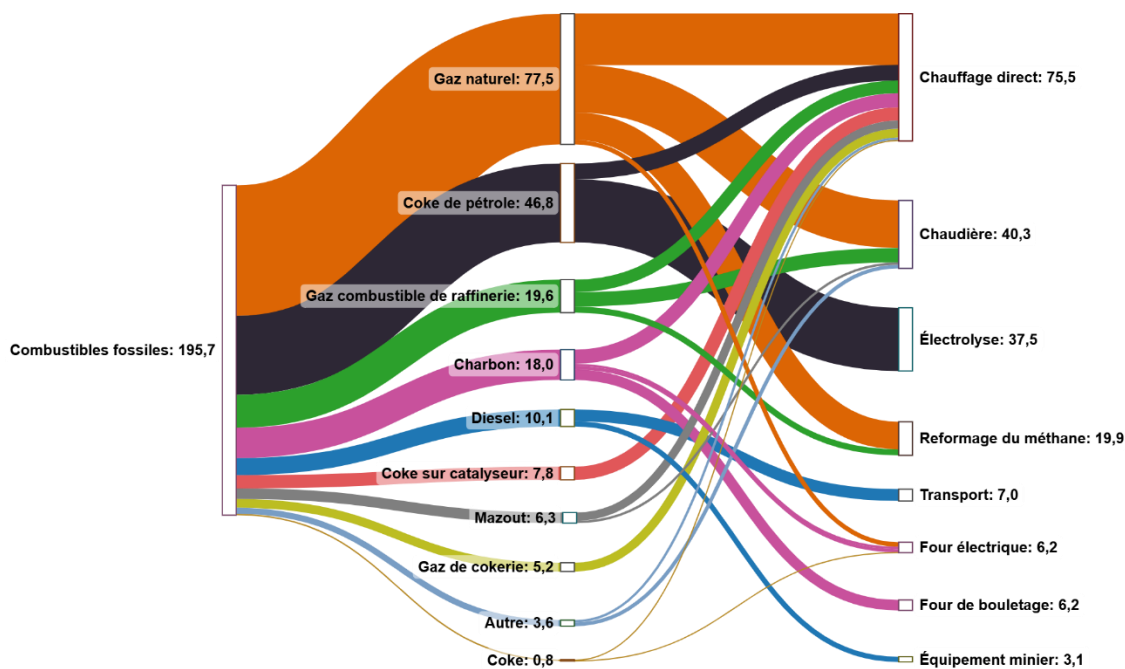


Figure 5 : Consommation de combustibles fossiles par utilisateur industriel en 2019

Tel qu'illustré à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, en général, la production de chaleur industrielle consomme plus d'énergie que toute autre utilisation finale de combustibles fossiles dans l'industrie et est responsable d'importantes émissions de GES dans ce secteur. Selon les résultats de l'inventaire énergétique des sous-procédés, plus de 53 % des combustibles fossiles sont consommés sous forme de chaleur industrielle dans les neuf secteurs considérés, dont 22 % à moins de 200°C, 7 % entre 200°C et 700°C et 23 % à plus de 700°C (Source : rapport *Inventaire de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre dans les procédés industriels au Québec*). Cela laisse tout de même 47% de l'énergie sous forme d'intrant non énergétique, de combustion captive ou de travail mécanique, le dernier principalement pour du transport hors route.

Il est important d'examiner les niveaux de température requis pour la chaleur industrielle dans les différents secteurs industriels, car ils peuvent donner une idée de l'applicabilité d'une technologie particulière. Par exemple, les technologies électriques telles que les pompes à chaleur, les technologies à micro-ondes et les technologies à infrarouges pourraient être envisagées pour la chaleur industrielle à basse température. Pour des

températures beaucoup plus élevées, des technologies telles que les fours électriques et les torches à plasma peuvent remplacer les technologies à base de combustibles fossiles dans certains procédés.

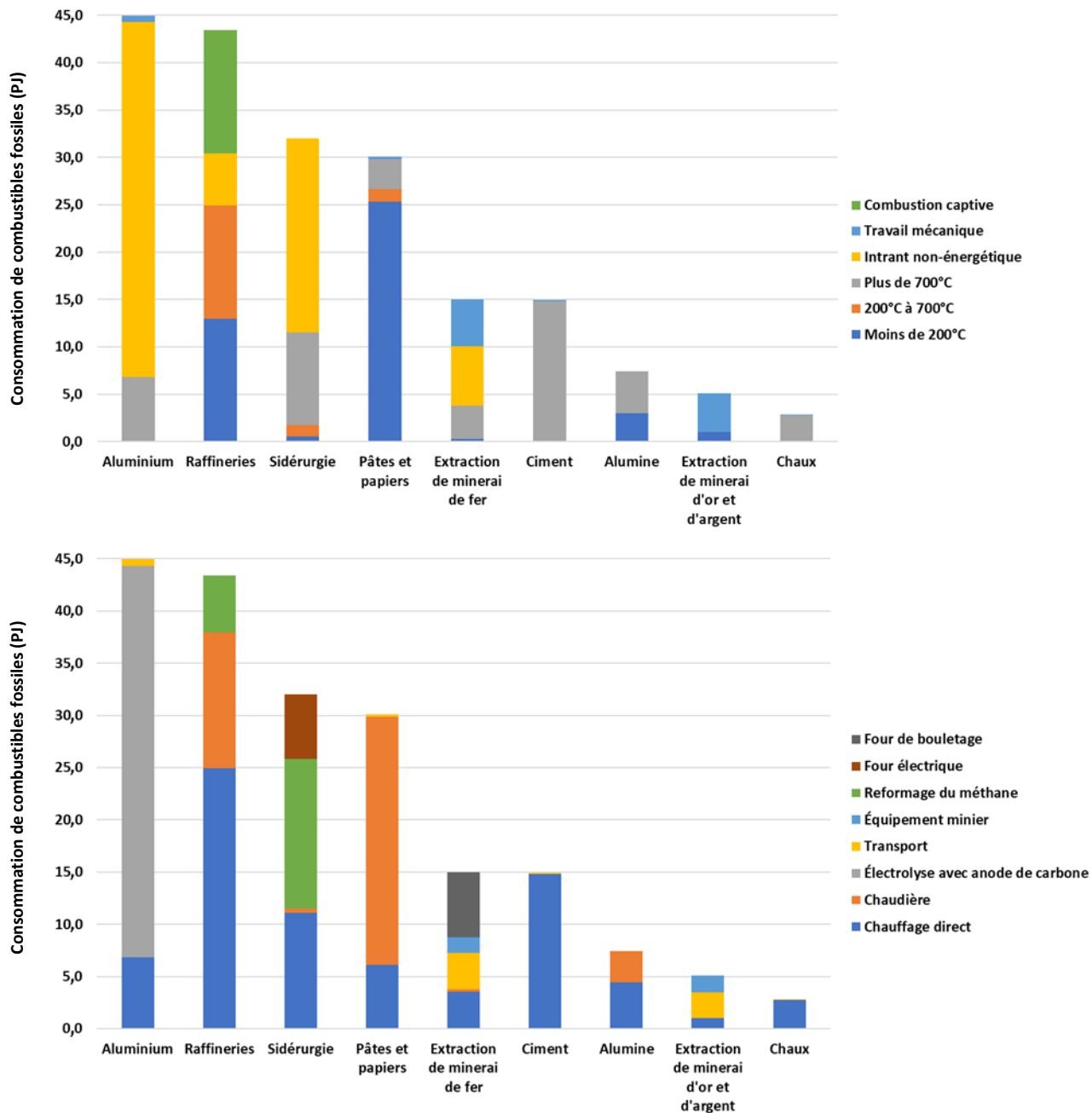


Figure 6 : Consommation de combustibles fossiles dans les neuf secteurs industriels en 2019 pour différents niveaux de température (figure du haut) et différents utilisateurs finaux (figure du bas) (PJ)

Scénarisation des projets industriels d'électrification

En se référant aux schémas-blocs pour chaque secteur industriel provenant du rapport *Inventaire de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre dans les procédés industriels au Québec*, les procédés consommateurs de combustibles fossiles représentés permettent de dresser une liste de projets potentiels d'électrification à analyser. Le choix de l'électrotechnologie la plus appropriée est basée sur la méthodologie présentée en annexe.

Scénario d'électrification techno-optimiste

Pour le scénario techno-optimiste, toutes les électrotechnologies, sans égard au niveau de maturité technologique et aux coûts d'investissement (CAPEX), sont considérées pour estimer le potentiel d'électrification. Il est clair que le deuxième scénario nécessite moins d'électricité supplémentaire que celui-ci.

Dans ce scénario, la consommation totale d'énergie pourrait être réduite de 6 % (soit l'équivalent de 31 PJ), ce qui se traduirait par une réduction de 82 % de la consommation de combustibles fossiles (ce qui équivaut à 161 PJ) et une augmentation de 51 % de la consommation d'électricité (ce qui équivaut à **36 TWh**). Ce scénario d'électrification se traduirait par une réduction totale des GES de 50 % (soit l'équivalent de 11,5 Mt CO₂éq), résultant d'une réduction de 80 % des émissions liées aux combustibles fossiles (soit 10,1 Mt CO₂éq) et d'une réduction de 30 % des émissions liées aux procédés (soit 1,4 Mt CO₂éq), sans aucun changement dans les émissions biogéniques.

Le coût de l'énergie additionnel pour ce scénario d'électrification serait d'environ 725 millions de dollars si l'on suppose un prix de l'électricité de 0,045 \$/kWh (voir le détail des prix en Annexe).

Tableau 2 : Tableau récapitulatif du scénario d'électrification techno-optimiste

Secteur	Procédé / équipement ciblé	Projet / procédé d'électrification proposé	Combustible fossile remplacé (PJ)	Électricité supplémentaire (TWh)	Réduction des GES (Mt CO ₂ éq)	Coût de l'énergie additionnel (M\$)
Production d'aluminium	Anode de carbone	Anode inerte	44,3	7,4	4,81	124
	Cuisson d'anode	Préparation d'anode inerte				
	Four de réchauffage	Chauffage par résistance				
Pâtes et papiers	Chaudière (gaz naturel et mazout)	Chaudière électrique	26,0	6,3	1,34	109
	Four à chaux	Chauffage par résistance				
	Séchoir	Chauffage par résistance				
Raffineries de pétrole	Chaudière	Chaudière électrique	30,1	8,1	1,48	296
	Reformage du méthane à la vapeur	Électrolyse de l'eau				
	Chauffage direct (gaz naturel et gaz de raffinerie)	Chauffage par résistance				
Sidérurgie	Reformage de méthane	Électrolyse d'oxyde fondu	22,5	6,1	1,25	153
	Fours de métaux	Chauffage par résistance				
	Séchoirs et calcinateurs	Chauffage par résistance				
	Chaudière	Chaudière électrique				
Extraction de minerai de fer	Four de bouletage (mazout)	Chauffage au plasma	8,7	1,7	0,64	-53
	Camion	Camion hybride				
	Train	Train hybride				
	Équipement d'extraction minière	Foreuse électrique				
	Chaudière	Chaudière électrique				
Production de ciment	Four de calcination	Chauffage par résistance	14,3	3,4	1,09	97
Production d'alumine	Chaudière	Chaudière électrique	7,4	1,8	0,37	33
	Four de calcination	Chauffage par résistance				
Production de chaux	Four de calcination	Chauffage par résistance	2,8	0,7	0,18	15
Extraction de minerai d'or et d'argent	Camion	Camion hybride	4,7	0,6	0,33	-49
	Équipement d'extraction minière	Foreuse électrique				
	Chauffage direct	Chauffage par résistance				
Total			160,8	36,1	11,49	725

Scénario d'électrification NMT élevé

Dans ce scénario, seules les électrotechnologies à NMT élevés ont considérées. Il convient de noter qu'en raison de l'incertitude entourant la maturité technologique de certaines technologies encore en développement, mais en phase active de démonstration (NMT supérieur à 5 ou 6), le concept de chauffage à haute température avec des résistances électriques, dont la commercialisation est assez probable pour 2030 et certaine pour 2050, est prise en compte dans ce scénario. Cette hypothèse pourrait toutefois se heurter à des difficultés d'intégration technologique spécifique à chaque procédé.

Tableau 3 : Tableau récapitulatif du scénario d'électrification NMT élevé

Secteur	Procédé / équipement ciblé	Projet / procédé d'électrification proposé	Combustible fossile remplacé (PJ)	Électricité supplémentaire (TWh)	Réduction des GES (Mt CO ₂ éq)	Coût de l'énergie additionnel (M\$)
Production d'aluminium	Anode de carbone	-	2,3	0,5	0,12	9
	Cuisson d'anode	-				
	Four de réchauffage	Chauffage par résistance				
Pâtes et papiers	Chaudière (gaz naturel et mazout)	Chaudière électrique	26,0	6,3	1,34	109
	Four à chaux	Chauffage par résistance				
	Séchoir	Chauffage par résistance				
Raffineries de pétrole	Chaudière	Chaudière électrique	30,1	8,1	1,48	296
	Reformage du méthane à la vapeur	Électrolyse de l'eau				
	Chauffage direct (gaz naturel et gaz de raffinerie)	Chauffage par résistance				
Sidérurgie	Reformage de méthane	-	8,2	2,0	0,53	60
	Fours de métaux	Chauffage par résistance				
	Séchoirs et calcinateurs	Chauffage par résistance				
Extraction de minerai de fer	Chaudière	Chaudière électrique	6,3	0,9	0,46	-64
	Four de bouletage (mazout)	Chauffage par résistance				
	Camion	Camion hybride				
	Train	Train hybride				
	Équipement d'extraction minière	Foreuse électrique				
Production de ciment	Four de calcination	Chauffage par résistance	14,3	3,4	1,09	97
Production d'alumine	Chaudière	Chaudière électrique	7,4	1,8	0,37	33
	Four de calcination	Chauffage par résistance				
Production de chaux	Four de calcination	Chauffage par résistance	2,8	0,7	0,18	15
Extraction de minerai d'or et d'argent	Camions	Camion hybride	4,7	0,6	0,33	-49
	Équipement d'extraction minière	Foreuse électrique				
	Chauffage direct	Chauffage par résistance				
Total			102,1	24,3	5,9	506

Dans ce scénario, la consommation totale d'énergie pourrait être réduite de 3 % (soit l'équivalent de 15 PJ), ce qui se traduirait par une réduction de 52 % de la consommation de combustibles fossiles (ce qui équivaut à 102 PJ) et une augmentation de 35 % de la

consommation d'électricité (ce qui équivaut à **24 TWh**). Ce scénario d'électrification se traduirait par une réduction totale des GES de 26 % (soit l'équivalent de 5,9 Mt CO₂éq), résultant d'une réduction de 46 % des émissions liées aux combustibles fossiles (soit 5,9 Mt CO₂éq) sans aucun changement dans les émissions de procédés et les émissions biogéniques.

Le coût de l'énergie additionnel pour ce scénario d'électrification serait d'environ 506 millions de dollars canadiens si l'on suppose un prix de l'électricité de 0,045 \$/kWh.

Caractérisation des projets d'électrification industriels

Comme indiqué dans la section précédente, étant donné que le plus gros consommateur de combustibles fossiles dans l'industrie est le chauffage direct, les électrotechnologies de chauffage direct, comme le chauffage par résistance, sont les principales technologies envisagées pour la plupart des neuf secteurs étudiés. La deuxième électrotechnologie la plus proposée est la chaudière électrique pour remplacer les chaudières au gaz naturel, qui fournissent un chauffage indirect par l'entremise de la vapeur.

La Figure 7 : Électricité supplémentaire par électrotechnologie et par secteur pour le scénario techno-optimiste (TWh) illustre les électrotechnologies proposées pour les neuf secteurs étudiés et la quantité d'électricité supplémentaire requise. Comme cela

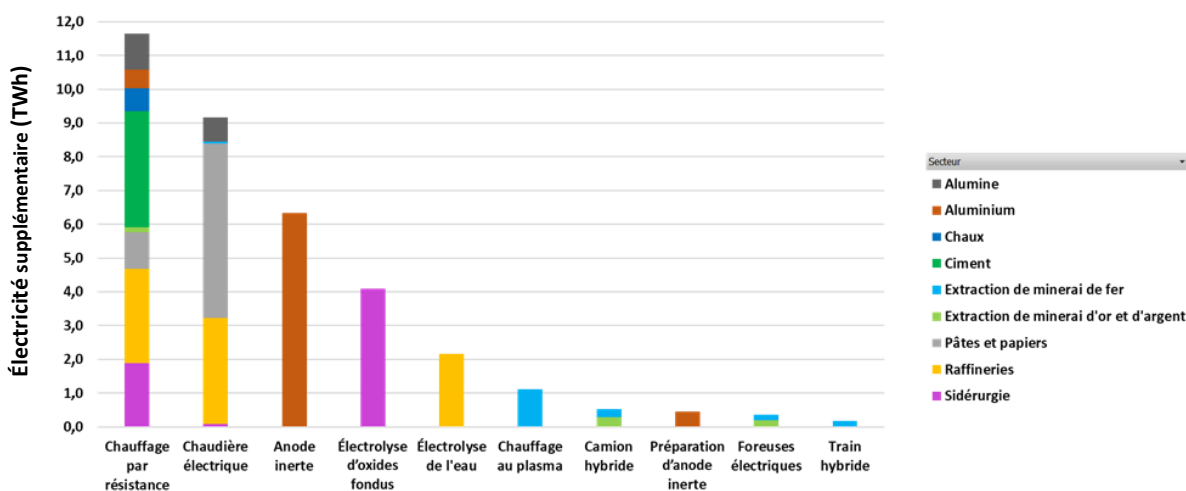


Figure 7 : Électricité supplémentaire par électrotechnologie et par secteur pour le scénario techno-optimiste (TWh) inclut des technologies à faible niveau NMT, ces résultats illustrent le premier scénario dit « techno-optimiste ».

Dans ce scénario d'électrification techno-optimiste la principale électrotechnologie serait le chauffage par résistance, qui nécessiterait 11,6 TWh d'électricité supplémentaire pour remplacer 48,3 PJ de combustibles fossiles. La deuxième électrotechnologie serait la chaudière électrique, qui nécessiterait 9,2 TWh d'électricité supplémentaire pour remplacer 38,1 PJ de combustibles fossiles.

La Figure 8 montre les électrotechnologies proposées et la quantité d'électricité supplémentaire requise pour le deuxième scénario d'électrification dit à « NMT élevé », c'est-à-dire basé seulement sur des technologies relativement matures.

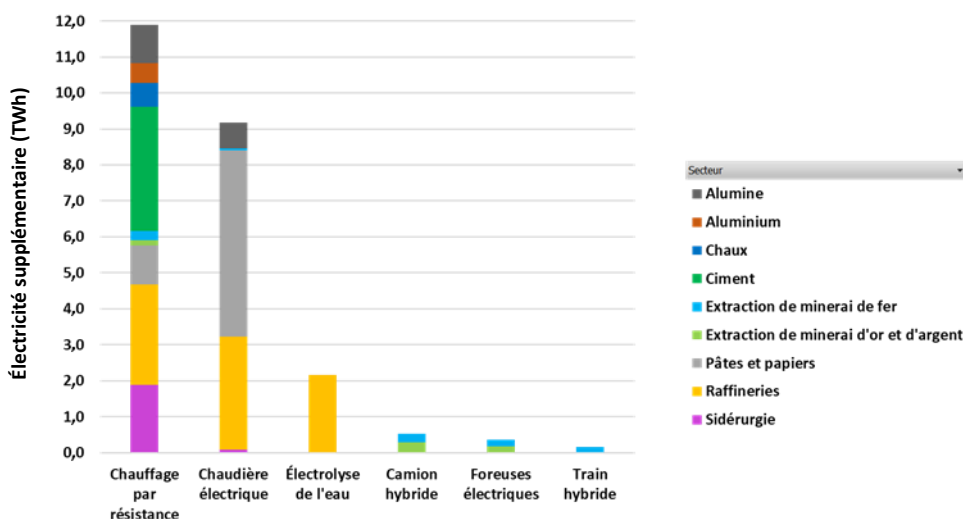


Figure 8 : Électricité supplémentaire par électrotechnologie et par secteur pour le scénario NMT élevé (TWh)

Dans le scénario d'électrification NMT élevé les deux principales électrotechnologies restent les mêmes, mais les suivantes (anode inerte, électrolyse d'oxydes fondus, chauffage au plasma et préparation d'anode inerte) sont éliminées en raison de leur faible maturité technologique.

La conclusion générale pour les deux scénarios est que les chaudières électriques et le chauffage par résistance deviennent les principaux utilisateurs d'électricité supplémentaire. Pour le scénario NMT élevé, ils utilisent 87 % de l'électricité supplémentaire requise, et pour le scénario techno-optimiste, ils utilisent 58 % du total.

Il est à noter que dans ces évaluations, les chaudières à combustibles fossiles sont entièrement remplacées par des chaudières électriques pour fournir la chaleur habituellement requise à basse température. Cependant, dans certains cas, ces unités pourraient être totalement ou partiellement remplacées par des pompes à chaleur haute température qui valorisent des rejets thermiques en chaleur utile. L'installation de pompes à chaleur haute température étant généralement considérée comme une mesure d'efficacité énergétique, elle n'est pas incluse dans les projets évalués. En première

approximation, on peut estimer qu'en procédant à la décarbonation par récupération et par pompage de chaleur plutôt qu'avec des chaudières électriques, l'électricité supplémentaire serait comprise entre 2,3 et 6,1 TWh plutôt que de 9,2 TWh. Une estimation plus précise nécessiterait une analyse poussée afin d'évaluer la performance d'un système bien intégré au procédé pour chaque site.

Il convient de mentionner que le chauffage par plasma a uniquement été envisagé dans le secteur de l'extraction du minerai de fer en raison d'une étude de cas détaillée menée par l'équipe de CanmetÉNERGIE à Varennes. Aucune autre utilisation du chauffage par plasma n'a été envisagée dans le cadre de ce travail, car il est supposé que le chauffage par résistance avec un NMT élevé, serait applicable à tous les secteurs industriels.

Autres scénarios

Jusqu'ici, seule la maturité technologique a été utilisée comme critère déterminant pour identifier quels procédés sont les plus susceptibles d'être électrifiés en premier. En réalité, plusieurs autres facteurs auront un impact, par exemple :

- L'électrification des secteurs de la sidérurgie et des raffineries de pétrole suppose que de nouvelles utilisations seront trouvées pour les gaz résiduels de procédé. En attendant que ces nouvelles utilisations soient identifiées, il peut valoir mieux limiter l'électrification.
- Certaines technologies, comme le chauffage par résistance, posent des défis d'intégration propres à chaque procédé. Même si la technologie est simple, l'ingénierie peut être complexe, introduisant des délais variables d'une application à une autre.
- Le besoin d'allouer efficacement une quantité limitée d'électricité disponible pourrait favoriser les technologies les plus efficaces et qui réduisent davantage les émissions de GES par kWh.
- La disponibilité de la biomasse comme alternative pourrait inciter à renoncer à l'électrification là où la biomasse a les meilleurs avantages comparatifs, tels qu'une grande économie de kWh par unité de biomasse utilisée, et la possibilité de la combiner avec le captage et la séquestration de carbone (CSC) à des fins d'émissions négatives.
- Le très lent cycle de remplacement des équipements industriels et la dynamique propre à chaque entreprise pourraient créer des opportunités d'électrifier à un endroit plutôt qu'à un autre pour des raisons uniquement circonstancielles. Être le premier à adopter une technologie en milieu industriel est perçu comme un risque trop grand pour certains, mais acceptable pour d'autres.

La scénarisation de la décarbonation industrielle fait l'objet de travaux parallèles à cette étude basés, entre autres, sur une revue d'études Net Zéro dans le monde qui ne seront

pas présentés dans ce rapport. Notons seulement qu'à l'échelle mondiale, le CSC apparaît inévitable pour la décarbonation profonde de certains secteurs industriels tels que la sidérurgie, le ciment et la chimie. Cela crée une possible synergie pour la production d'émissions négatives dans ces mêmes secteurs, via la bioénergie avec CSC (BECSC), au détriment de l'électrification et des technologies d'émissions négatives plus énergivores comme le captage direct du CO₂ de l'atmosphère (Direct Air Capture en anglais ou DAC). Comme le Québec dispose d'une quantité de biomasse disponible relativement grande, notamment sous forme de résidus forestiers, il pourrait bénéficier d'une telle approche. Ainsi certaines industries québécoises, attirées par la possibilité de futurs revenus d'émissions négatives tout en évitant une hausse des coûts en électricité, pourraient mettre l'électrification sur pause le temps de voir si la BECSC ne serait pas une meilleure option. Cela pourrait notamment être le cas des secteurs du ciment, de la chaux, du bouletage du minerai de fer, du raffinage de pétrole, des deux grands sites sidérurgiques et de quelques usines de pâte chimique.

Conclusions

Les technologies d'électrification comme la chaudière électrique, le chauffage par résistance et les technologies de véhicules hors route électriques à batteries permettent de substituer les combustibles fossiles en industrie. C'est seulement en identifiant dans quel contexte ces technologies ont le plus de potentiel qu'il est possible de dresser une liste de projets prioritaires pour la décarbonation du secteur industriel. Le travail présenté dans ce rapport repose sur le rapport *Inventaire de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre dans les procédés industriels au Québec* précédemment publié.

La différence entre les scénarios techno-optimiste et NMT élevé montre que la modélisation de la décarbonation en vue des objectifs de décarbonation dépend grandement de la capacité des technologies de pointe à se commercialiser et à réaliser leur plein potentiel. L'adaptation de ces technologies aux procédés industriels existants restera somme toute un enjeu à surmonter, indépendamment de la maturité technologique, particulièrement lorsque la nouvelle technologie pose un risque sur la production en cas de panne. C'est pourquoi il est important de considérer la flexibilité ou la capacité interruptible de chacune des technologies et de son application, notamment lorsqu'il s'agit de faire face aux pointes hivernales et à la pénétration des énergies renouvelables à production intermittentes. Il est aussi possible que certains sites industriels aient intérêt à ne pas s'électrifier, lorsque d'autres stratégies de décarbonation apportent des avantages particuliers, par exemple un potentiel d'émissions négatives et/ou la séquestration des émissions de procédé.

Parmi les neuf secteurs industriels considérés, la production d'aluminium, les raffineries de pétrole, la sidérurgie et les pâtes et papiers sont les quatre principaux consommateurs d'énergies fossiles. Les secteurs des pâtes et papiers et de la sidérurgie sont plus faciles à électrifier que les secteurs de l'aluminium et des raffineries de pétrole, notamment en raison de leurs principaux utilisateurs finaux de combustibles fossiles, à savoir les chaudières pour le secteur des pâtes et papiers et le chauffage direct pour la sidérurgie, par rapport aux anodes en carbone pour le secteur de l'aluminium et le reformage du méthane pour les raffineries de pétrole.

Annexe

Méthodologie et hypothèses

Une méthodologie d'évaluation du potentiel d'électrification du secteur industriel a été conçue et un outil d'analyse pour l'évaluation de ce potentiel a été développé. L'outil peut être utilisé pour une usine spécifique ou pour un secteur industriel en entier dans une province ou un pays s'il y a suffisamment de similitudes entre les procédés de toutes les usines du secteur.

Cette méthodologie repose sur un nombre d'hypothèses et de limites concernant les quantités produites et sur un scénario statique : elle n'intègre aucune évolution de la production, ni nouvelle infrastructure (c'est-à-dire, nouvel investissement), ni gain d'efficacité technologique. Les hypothèses sur l'efficacité des procédés et des électrotechnologies s'appuient sur les connaissances actuelles.

Le potentiel d'électrification est calculé sur la base d'un remplacement total ou partiel des combustibles fossiles, en fonction des applications et des technologies considérées. Il est étudié indépendamment des autres mesures de décarbonation. Par conséquent, dans un scénario diversifié incluant d'autres mesures de décarbonation (ex. bioénergie, séquestration de carbone), les résultats de l'électrification seront affectés notamment en raison d'effets croisés entre ces mesures.

Le modèle d'évaluation des technologies d'électrification suit les six étapes principales suivantes :

1. Création de profils de production et d'énergie pour l'industrie étudiée.
2. Collecte de données sur les équipements ou procédés consommateurs de combustibles fossiles (informations provenant du rapport *Inventaire de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre dans les procédés industriels au Québec*).
3. Collecte de données sur les technologies d'électrification (économies d'énergie, consommation d'électricité et potentiel de remplacement des combustibles fossiles).
4. Identification des différentes technologies d'électrification qui peuvent remplacer chaque équipement ou procédé consommant des combustibles fossiles, et calcul des réductions de GES et de l'électricité supplémentaire requise pour chaque technologie identifiée, en utilisant les données des points 2 et 3.
5. Attribution des différents projets à l'un des deux scénarios (scénario techno-optimiste ou scénario NMT élevé) et addition de leurs potentiels d'électrification individuels pour évaluer le potentiel total de chaque scénario.

6. Évaluation économique liée au changement de source d'énergie.

Des jeux de données statistiques existent également au niveau québécois (inventaire des GES, État de l'énergie, publications d'Hydro-Québec). Toutefois, les données produites au niveau fédéral ont été privilégiées en raison de la plus grande disponibilité d'informations publiques détaillées et de leur cohérence méthodologique à l'échelle canadienne. Bien que certaines divergences puissent exister entre sources provinciales et fédérales, notamment en raison de différences méthodologiques, ce choix n'a pas d'incidence significative sur les principaux constats de l'étude.

Pour les analyses sectorielles qui suivent, les valeurs utilisées pour calculer l'impact sur les coûts énergétiques par rapport à la situation de base sont indiquées dans le tableau suivant.

Tableau 4 : Coût et facteur d'émissions des sources d'énergie de la situation de base

Source d'énergie	Coût* (\$/GJ)	Facteur d'émission de GES (kg CO ₂ éq/GJ)
Gaz naturel	6,3	49,9
Charbon	1,1	78,7
Coke de pétrole	4,3	82,8
Coke métallurgique	6,3	86,3
Diesel	17,9	72,8
Mazout	11,4	74,0
Électricité	12,5 (soit 0,045 \$/kWh)	0,0

*Les coûts d'énergie n'incluent pas la taxe sur le carbone.

Ces coûts concernent la consommation électrique supplémentaire liée à l'électrotechnologie choisie pour chaque équipement industriel, ainsi que les combustibles fossiles remplacés dans ces mêmes équipements, et n'incluent donc pas les investissements nécessaires. Ces choix sont présentés dans les sections suivantes, par secteur industriel.

Production d'aluminium

Les principaux consommateurs de combustibles fossiles dans le secteur de l'aluminium sont le four de réchauffage et la cuisson des anodes en carbone, qui consomment respectivement 2,3 PJ et 4,5 PJ de combustibles fossiles (principalement du gaz naturel). Toutefois, le CO₂ et les perfluorocarbures émis lors de l'électrolyse, formés par le carbone des anodes consommables, représentent respectivement 64% et 28% des émissions de GES du secteur. Or, ce carbone provient du coke de pétrole, intrant non énergétique équivalent à 37,5 PJ. Par conséquent, les mesures de décarbonation pour ce combustible doivent également être prises en compte.

Pour l'électrification techno-optimiste, trois électrotechnologies (anode inerte, préparation d'anode inerte et four à résistance électrique) sont combinées pour obtenir une réduction de près de 100 % des combustibles fossiles utilisés. Ce scénario augmente la consommation d'électricité de 17 %, entraînant un surcoût annuel de 124 M\$ pour l'énergie. Ce scénario diminue les GES de près de 100 %.

Il existe également d'autres alternatives de changement de procédé pour cette industrie, comme le procédé carbothermique qui utilise le carbone comme agent réducteur dans un procédé non électrochimique. Le procédé carbothermique est une technologie émergente qui n'est pas suffisamment mature (NMT estimé à 2) pour être mise en œuvre dans un proche avenir. La consommation d'électricité dans ce procédé est réduite, tandis que la consommation de carbone augmente par rapport au procédé Hall-Héroult conventionnel. Bien que ce procédé élimine les émissions des perfluorocarbures du procédé Hall-Héroult (estimées à 1,35 Mt CO₂éq au Québec), il augmente les émissions provenant de la consommation de coke de pétrole par rapport au procédé classique de production d'aluminium. Dans l'ensemble, Les émissions totales de GES pour le procédé carbothermique sont inférieures d'environ 8 % à celles d'une cellule Hall-Héroult moderne (Source : [U.S. Aluminum Production Energy Requirements: Historical Perspective, Theoretical Limits, and New Opportunities](#)).

Tableau 5 : Tableau récapitulatif de l'électrification techno-optimiste du secteur de l'aluminium

Procédé / équipement ciblé	Projet / procédé d'électrification proposé	Combustible fossile remplacé (PJ)	Électricité supplémentaire (TWh)	Réduction des GES (Mt CO ₂ éq)	Coût de l'énergie additionnel (M\$)
Anode de carbone	Anode inerte*	44,3	7,4	4,81	124
Cuisson d'anode	Préparation d'anode inerte				
Four de réchauffage	Chauffage par résistance				

* L'électrolyse avec anode inerte est un changement de procédé qui nécessite de nouveaux pots d'électrolyse. Le remplacement n'interviendra que lorsqu'une usine subira une rénovation majeure, et devrait se faire progressivement entre 2030 et 2060.

Pour l'électrification NMT élevé, seul le remplacement du four de réchauffage par four à résistance est proposé, ce qui entraîne une réduction de la consommation de combustibles fossiles de près de 5 %. Ce scénario augmente la consommation d'électricité de 1 %, entraînant un surcoût annuel de 9 M\$ pour l'énergie. Ce scénario diminue les GES de près de 2 %.

Tableau 6 : Tableau récapitulatif de l'électrification NMT élevé du secteur de l'aluminium

Procédé / équipement ciblé	Projet / procédé d'électrification proposé	Combustible fossile remplacé (PJ)	Électricité supplémentaire (TWh)	Réduction des GES (Mt CO ₂ éq)	Coût de l'énergie additionnel (M\$)
Four de réchauffage	Chauffage par résistance	2,3	0,5	0,12	9

Raffineries de pétrole

Les principaux consommateurs de combustibles fossiles dans le secteur des raffineries de pétrole sont les chaudières, le reformage du méthane à la vapeur et le chauffage direct, qui consomment respectivement 13,0 PJ, 5,5 PJ et 12,0 PJ de combustibles fossiles. Environ 7,8 PJ de coke sur catalyseur sont également brûlés lors de la régénération du catalyseur utilisé dans le procédé de craquage catalytique en lit fluidisé. Dans le procédé de cokéfaction retardée, environ 5,2 PJ de gaz de cokerie sont brûlés. Ces deux dernières applications sont considérées comme de la combustion captive, peu propice à l'électrification.

Pour l'électrification techno-optimiste et NMT élevé, trois électrotechnologies (chaudière électrique, électrolyse de l'eau et chauffage par résistance électrique) sont combinées pour obtenir une réduction de 69 % des combustibles fossiles. Chacun des scénarios augmente la consommation d'électricité de 670 %, entraînant un surcoût annuel de 296 M\$ pour l'énergie. Chacun des scénarios diminue les GES de 60 %.

On suppose que l'électrification de ce secteur industriel a lieu en même temps que l'on trouve de nouvelles utilisations non polluantes pour le gaz de raffinerie. Au fur et à mesure que les raffineries de pétrole s'électrifient, leurs besoins en gaz de raffinerie pour produire de la chaleur et de l'électricité diminuent. Il existe des possibilités d'utiliser ces gaz de manière non polluante. Les exemples incluent la production d'hydrogène bleu avec CSC ou l'utilisation comme matière première non énergétique.

Tableau 7 : Récapitulatif de l'électrification techno-optimiste et NMT élevé du secteur des raffineries de pétrole

Procédé / équipement ciblé	Projet / procédé d'électrification proposé	Combustible fossile remplacé (PJ)	Électricité supplémentaire (TWh)	Réduction des GES (Mt CO ₂ éq)	Coût de l'énergie additionnel (M\$)
Chaudière	Chaudière électrique	30,1	8,1	1,48	296

Procédé / équipement ciblé	Projet / procédé d'électrification proposé	Combustible fossile remplacé (PJ)	Électricité supplémentaire (TWh)	Réduction des GES (Mt CO ₂ éq)	Coût de l'énergie additionnel (M\$)
Reformage du méthane à la vapeur	Électrolyse de l'eau				
Chauffage direct	Chauffage par résistance				

Sidérurgie

Les principaux consommateurs de combustibles fossiles dans le secteur de la sidérurgie sont le reformage de méthane (pour utilisation au four de réduction directe), les fours de métaux à haute température, les fours électriques (à arc et à réduction), les réacteurs, les séchoirs et les calcinateurs ainsi que les chaudières, qui consomment respectivement 14,4 PJ, 6,6 PJ, 4,8 PJ, 3,1 PJ, 1,2 PJ et 0,4 PJ de combustibles fossiles. Il est supposé que 2,0 PJ de charbon soit consommée dans les fours électriques (à arc et à réduction). Les 6,6 PJ de charbon restant produisent environ 4,8 PJ de gaz de procédé lors du procédé de réduction. Ce gaz de procédé est ensuite utilisé comme source de chaleur.

Pour l'électrification techno-optimiste, trois électrotechnologies sont envisagées pour les fours à métaux à haute température, les séchoirs et calcinateurs, et les chaudières, ainsi qu'un changement de procédé pour réduire le minerai de fer par électrolyse de l'oxyde fondu rendant caduque le reformage de méthane. Ce scénario réduit de 70 % la consommation de combustibles fossiles, et augmente la consommation d'électricité de 116 %, entraînant un surcoût annuel de 153 M\$ pour l'énergie. Ce scénario diminue les GES de 58 %. Il est supposé que l'électrification se fait en même temps que l'on trouve de nouvelles utilisations non polluantes pour le gaz de procédé.

Tableau 8 : Récapitulatif de l'électrification techno-optimiste du secteur de la sidérurgie

Procédé / équipement ciblé	Projet / procédé d'électrification proposé	Combustible fossile remplacé (PJ)	Électricité supplémentaire (TWh)	Réduction des GES (Mt CO ₂ éq)	Coût de l'énergie additionnel (M\$)
Reformage de méthane	Électrolyse de l'oxyde fondu				
Fours de métaux	Chauffage par résistance	22,5	6,1	1,25	153
Séchoirs et calcinateurs	Chauffage par résistance				

Procédé / équipement ciblé	Projet / procédé d'électrification proposé	Combustible fossile remplacé (PJ)	Électricité supplémentaire (TWh)	Réduction des GES (Mt CO ₂ éq)	Coût de l'énergie additionnel (M\$)
Chaudière	Chaudière électrique				

Pour l'électrification NMT élevé, trois électrotechnologies sont envisagées pour les fours à métaux à haute température, les séchoirs et calcinateurs, et les chaudières. Ce scénario réduit de 26 % la consommation de combustibles fossiles, et augmente la consommation d'électricité de 38 %, entraînant un surcoût annuel de 60 M\$ pour l'énergie. Ce scénario diminue les GES de 25 %.

Tableau 9 : Récapitulatif de l'électrification NMT élevé du secteur de la sidérurgie

Procédé / équipement ciblé	Projet / procédé d'électrification proposé	Combustible fossile remplacé (PJ)	Électricité supplémentaire (TWh)	Réduction des GES (Mt CO ₂ éq)	Coût de l'énergie additionnel (M\$)
Fours de métaux	Chauffage par résistance	8,2	2,0	0,53	60
Séchoirs et calcinateurs	Chauffage par résistance				
Chaudière	Chaudière électrique				

Pâtes et papiers

Les principaux consommateurs de combustibles fossiles dans ce secteur sont la chaudière, le four à chaux et les séchoirs qui consomment respectivement 23,7 PJ, 3,2 PJ et 1,3 PJ de combustibles fossiles (principalement du gaz naturel).

Pour l'électrification techno-optimiste et NMT élevé, trois électrotechnologies sont envisagées pour la chaudière, le four à chaux et les séchoirs. Chacun des scénarios réduit de 86 % la consommation de combustibles fossiles, et augmente la consommation d'électricité de 40 %, entraînant un surcoût annuel de 109 M\$ pour l'énergie. Chacun des scénarios diminue les GES de 18 %.

Il convient de noter que plus de 78 % des émissions de ce secteur sont des émissions biogéniques liées aux chaudières à biomasse et à liqueur de cuisson non considérées ici. Dans la pratique, le potentiel d'électrification peut être plus faible lorsqu'il y a un excédent de résidus forestiers et que l'on préfère les utiliser pour la décarbonation, tandis qu'il peut

être plus élevé lorsque les résidus forestiers sont très demandés et qu'une électrification plus importante peut avoir lieu pour remplacer les chaudières à biomasse.

Tableau 10 : Récapitulatif de l'électrification techno-optimiste et NMT élevé du secteur des pâtes et papiers

Procédé / équipement ciblé	Projet / procédé d'électrification proposé	Combustible fossile remplacé (PJ)	Électricité supplémentaire (TWh)	Réduction des GES (Mt CO ₂ éq)	Coût de l'énergie additionnel (M\$)
Chaudière	Chaudière électrique	26,0	6,3	1,34	109
Four à chaux	Chauffage par résistance				
Séchoir	Chauffage par résistance				

Extraction du minerai de fer

Les principaux consommateurs de combustibles fossiles dans ce secteur sont le four de bouletage, les camions, le train, l'équipement d'extraction minière ainsi que la chaudière, qui consomment respectivement 9,7 PJ, 2,0 PJ, 1,5 PJ, 1,5 PJ et 0,2 PJ de combustibles fossiles. Il est à noter que 6,2 PJ de charbon consommés lors de l'étape de bouletage sont considérées à la fois comme intrant non énergétique et comme source de chaleur. Cette utilisation du charbon n'est pas visée par les projets d'électrification, notamment en raison de la difficulté technique d'amener la chaleur directement au centre de chaque boulette par voie électrique, dans les fours existants.

Pour l'électrification techno-optimiste, cinq électrotechnologies sont envisagées pour le four de bouletage, les camions, le train, l'équipement d'extraction minière et la chaudière. Ce scénario réduit de 58 % la consommation de combustibles fossiles, et augmente la consommation d'électricité de 80 % avec un changement du coût d'énergie de -53 M\$. Cette quantité est négative (l'électrification conduit à une réduction des coûts d'énergie) étant donné le coût élevé du diesel et le gain important d'efficacité par l'électrification du transport hors route. Ce scénario diminue les GES de 47 %.

Tableau 11 : Récapitulatif de l'électrification techno-optimiste du secteur du minerai de fer

Procédé / équipement ciblé	Projet / procédé d'électrification proposé	Combustible fossile remplacé (PJ)	Électricité supplémentaire (TWh)	Réduction des GES (Mt CO ₂ éq)	Coût de l'énergie additionnel (M\$)
Four de bouletage	Chauffage au plasma	8,7	1,7	0,64	-53
Camion	Camion hybride				
Train	Train hybride				
Équipement d'extraction minière	Foreuse électrique				
Chaudière	Chaudière électrique				

Pour l'électrification NMT élevé, cinq électrotechnologies sont envisagées pour le four de bouletage, les camions, le train, l'équipement d'extraction minière et la chaudière. Ce scénario réduit de 42 % la consommation de combustibles fossiles, et augmente la consommation d'électricité de 41 % avec un changement du coût d'énergie de -64 M\$. Ce scénario diminue les GES de 33 %.

Selon une étude de cas interne réalisée en partenariat avec un partenaire industriel, le potentiel de changement de combustible est supposé être de 30 % pour remplacement des fours de bouletage par le chauffage par résistance. Par conséquent, dans le tableau ci-dessous, la quantité de combustible remplacé et la quantité d'électricité supplémentaire sont inférieures au tableau précédent.

Tableau 12 : Récapitulatif de l'électrification NMT élevé du secteur du minerai de fer

Procédé / équipement ciblé	Projet / procédé d'électrification proposé	Combustible fossile remplacé (PJ)	Électricité supplémentaire (TWh)	Réduction des GES (Mt CO ₂ éq)	Coût de l'énergie additionnel (M\$)
Four de bouletage	Chauffage par résistance	6,3	0,9	0,46	-64
Camion	Camion hybride				
Train	Train hybride				
Équipement d'extraction minière	Foreuse électrique				
Chaudière	Chaudière électrique				

Production de ciment

Le principal consommateur de combustibles fossiles dans ce secteur est le four de calcination, qui consomme environ 14,3 PJ de combustibles fossiles.

Pour l'électrification techno-optimiste et NMT élevé, seule la technologie du chauffage par résistance est considérée. Chacun des scénarios réduit de 96 % la consommation de combustibles fossiles, et augmente la consommation d'électricité de 515 %, entraînant un surcoût annuel de 97 M\$ pour l'énergie. Chacun des scénarios diminue les GES de 32 %.

Aucun projet de remplacement de combustible ne permet d'éviter les émissions de procédé dues à la calcination du calcaire, CaCO_3 , (environ 66 % des émissions). Il est à noter que les études Net Zéro tendent à considérer le captage du CO_2 comme essentiel à la décarbonation de ce secteur, une technologie qui se combine avantageusement avec l'électrification lorsqu'il est possible d'opérer le four sans infiltration d'air pouvant diluer le CO_2 .

Tableau 13 : Récapitulatif de l'électrification techno-optimiste et NMT élevé du secteur du ciment

Procédé / équipement ciblé	Projet / procédé d'électrification proposé	Combustible fossile remplacé (PJ)	Électricité supplémentaire (TWh)	Réduction des GES (Mt CO_2 éq)	Coût de l'énergie additionnel (M\$)
Four de calcination	Chauffage par résistance	14,3	3,4	1,09	97

Production d'alumine

Les principaux consommateurs de combustibles fossiles dans ce secteur sont le four de calcination (4,4 PJ) et les chaudières (3,0 PJ), principalement du gaz naturel.

Pour l'électrification techno-optimiste et NMT élevé, deux technologies (chaudière électrique et chauffage par résistance) sont considérées. Chacun des scénarios réduit de 100 % la consommation de combustibles fossiles, et augmente la consommation d'électricité de 161 %, entraînant un surcoût annuel de 33 M\$ pour l'énergie. Chacun des scénarios diminue les GES de 100 %.

Tableau 14 : Récapitulatif de l'électrification techno-optimiste et NMT élevé du secteur de l'alumine

Procédé / équipement ciblé	Projet / procédé d'électrification proposé	Combustible fossile remplacé (PJ)	Électricité supplémentaire (TWh)	Réduction des GES (Mt CO ₂ éq)	Coût de l'énergie additionnel (M\$)
Chaudière	Chaudière électrique	7,4	1,8	0,37	33
Four de calcination	Chauffage par résistance				

Extraction du minerai d'or et d'argent

Les principaux consommateurs de combustibles fossiles dans ce secteur sont les camions, l'équipement d'extraction minière et le chauffage direct de l'air, qui consomment respectivement 2,5 PJ, 1,6 PJ et 1,0 PJ de combustibles fossiles.

Pour l'électrification techno-optimiste et NMT élevé, trois électrotechnologies sont envisagées pour les camions, l'équipement d'extraction minière et le chauffage direct. Chacun des scénarios réduit de 93 % la consommation de combustibles fossiles, et augmente la consommation d'électricité de 39 % avec un changement du coût d'énergie de -49 M\$. Cette quantité est négative (l'électrification conduit à une réduction des coûts d'énergie) étant donné le coût élevé du diesel et le gain important d'efficacité par l'électrification du transport hors route. Chacun des scénarios diminue les GES de 94 %.

Tableau 15: Récapitulatif de l'électrification techno-optimiste et NMT élevé du secteur du minerai d'or et d'argent

Procédé / équipement ciblé	Projet / procédé d'électrification proposé	Combustible fossile remplacé (PJ)	Électricité supplémentaire (TWh)	Réduction des GES (Mt CO ₂ éq)	Coût de l'énergie additionnel (M\$)
Camions	Camion hybride	4,7	0,6	0,33	-49
Équipement d'extraction minière	Foreuse électrique				
Chauffage direct	Chauffage par résistance				

Production de chaux

Le principal consommateur de combustibles fossiles dans ce secteur est le four de calcination, qui consomme environ 2,8 PJ de combustibles fossiles.

Pour l'électrification techno-optimiste et NMT élevé, le chauffage par résistance est considéré. Chacun des scénarios réduit de 99 % la consommation de combustibles fossiles, et augmente la consommation d'électricité de 1 716 %, entraînant un surcoût annuel de 15 M\$ pour l'énergie. Chacun des scénarios diminue les GES de 29 %.

Dans ce secteur, tout comme celui du ciment, aucun projet de remplacement de combustible ne permet d'éviter les émissions de procédé dues à la calcination du calcaire, CaCO_3 (environ 70 % des émissions).

Tableau 16: Récapitulatif de l'électrification techno-optimiste et NMT élevé du secteur de la chaux

Procédé / équipement ciblé	Projet / procédé d'électrification proposé	Combustible fossile remplacé (PJ)	Électricité supplémentaire (TWh)	Réduction des GES (Mt CO ₂ éq)	Coût de l'énergie additionnel (M\$)
Four de calcination	Chauffage par résistance	2,8	0,7	0,18	15

Liste des usines de pâtes et papiers

Voici la liste des 35 plus grandes usines, qui consomment plus de 97 % de l'énergie totale consommée par le secteur des pâtes et papiers :

1. Cascades Emballage Carton - Caisse Cabano
2. Cascades Emballage Carton - Caisse Kingsey Falls
3. Cascades Groupe Tissu - Candiatic - Une Division de Cascades Canada ULC
4. Cascades Groupe Tissu - Kingsey Falls - Une Division de Cascades Canada ULC
5. Cascades Groupe Tissu - Lachute, Une Division de Cascades Canada ULC
6. Cascades Papier Kingsey Falls
7. Compagnie Westrock du Canada
8. Fibrek S.E.N.C. - Usine de St-Félicien
9. Kruger Brampton L.P.
10. Kruger Bromptonville L.P. Papiers de Publication
11. Kruger Packaging L.P. - Usine d'emballage de la Place Turcot
12. Kruger Products L.P. - Usine de papier de Sherbrooke
13. Kruger Products L.P. - Usine de papier de Gatineau
14. Kruger Products L.P. - Usine de papier de Crabtree
15. Kruger Trois-Rivières L.P.
16. Kruger Wayagamack L.P.
17. L'usine Graphic Packaging d'East Angus
18. Matériaux Innovants Rayonier - Site de Témiscaming
19. MPI Moulin à Papier de Portneuf
20. Pâte à papier à haut rendement de RYAM – Site de Témiscaming
21. PF Résolu Canada Inc. - Alma
22. PF Résolu Canada Inc. - Amos
23. PF Résolu Canada Inc. - Baie-Comeau
24. PF Résolu Canada Inc. - Clermont
25. PF Résolu Canada Inc. - Dolbeau Mistassini
26. PF Résolu Canada Inc. - Gatineau
27. PF Résolu Canada Inc. - Kénogami
28. Rolland Enterprises
29. Société en commandite F.F. Soucy White Birch
30. Société en commandite Stadacona White Birch
31. Société en commandite Papier Masson White Birch
32. Technocell Inc.
33. Tembec Matane
34. Usine Domtar de Windsor
35. Usine de Thurso

Graphiques supplémentaires

Les figures 9 et 10 montrent la consommation supplémentaire d'électricité par secteur et par technologie pour les deux scénarios techno-optimiste et NMT élevé respectivement :

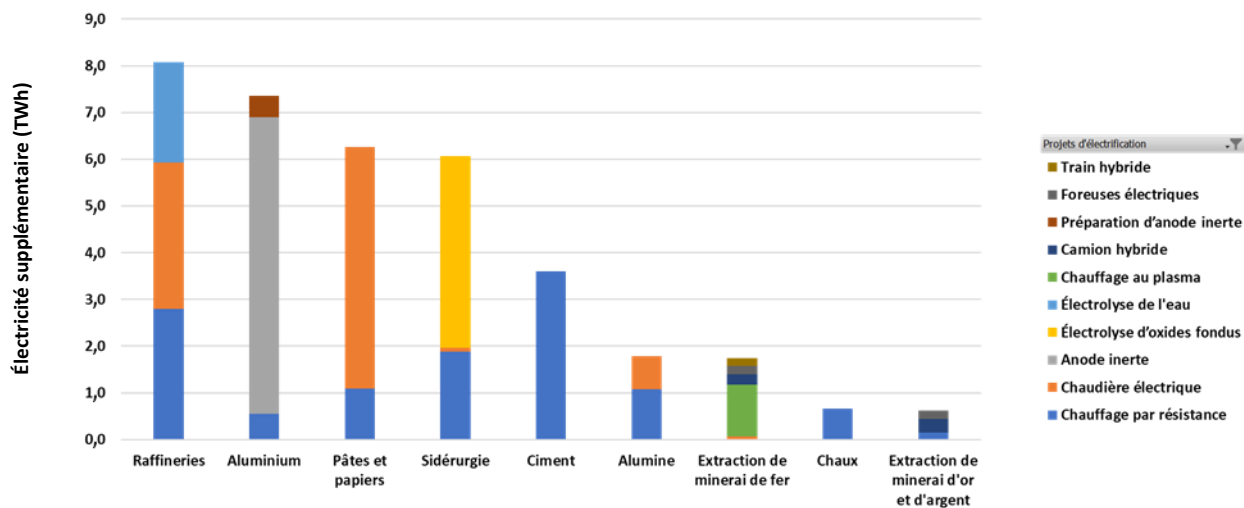


Figure 9 : Électricité supplémentaire en TWh par secteur et par électrotechnologie pour le scénario techno-optimiste

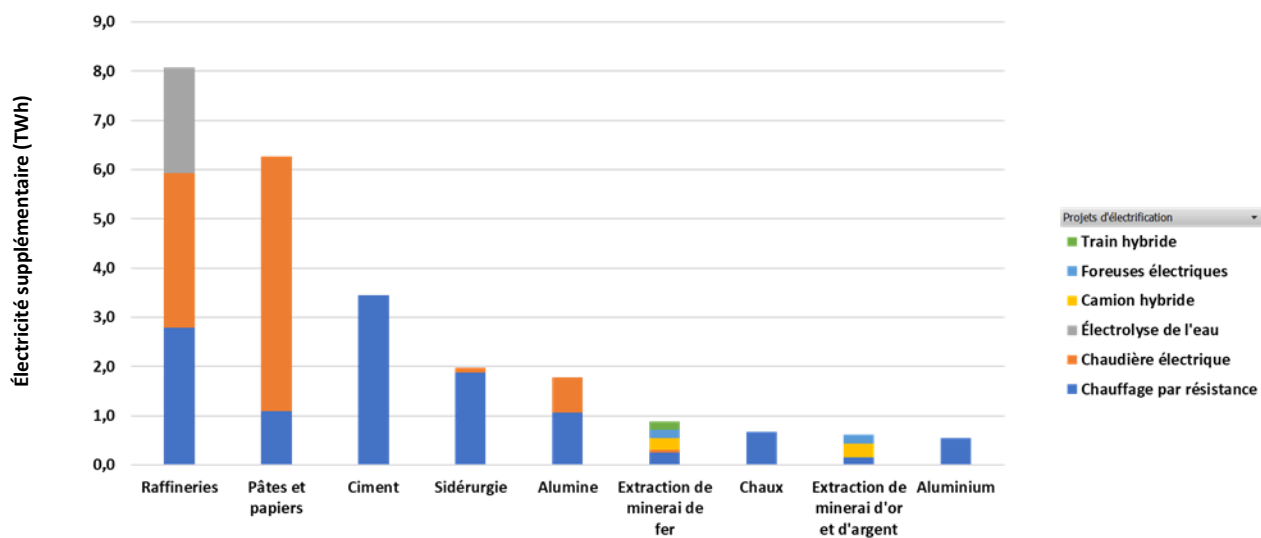


Figure 10 : Électricité supplémentaire en TWh par secteur et par électrotechnologie pour scénario NMT élevé

Bibliographie

Gouvernement du Canada. Rapport d'inventaire national: sources et puits de gaz à effet de serre, 1990–2022.

<https://publications.gc.ca/site/fra/>

Gouvernement du Canada. (2025). Distribution de combustibles fossiles pour les sous-procédés de l'industrie lourde [Jeu de données]

<https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/>

Gouvernement du Québec (2019). La filière éolienne – de la force du vent à l'énergie électrique, Dépôt légal Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2019, ISBN : 978-2-550-84377-1

<https://impacts-éoliennes-valleyfield.org/>

Gouvernement du Québec (2021). Facteurs d'émission directe de gaz à effet de serre des sources énergétiques sur les marchés d'importation et d'exportation

<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/facteurs-emission-directe-ges>

Hydro-Québec (2019). Rapport annuel 2019 – Voir grand avec notre énergie propre.

<https://www.hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/rapport-annuel.pdf>

Régie de l'énergie du Canada. Avenir énergétique du Canada en 2019. Annexes [Jeu de données].

<https://apps.rec-cer.gc.ca/ftppndc>

Régie de l'énergie du Canada. Profil énergétique du Québec, Information sur l'énergie des provinces et territoires recueillie et produite par la Régie de l'énergie du Canada.

<https://www.cer-rec.gc.ca/fr/donnees-analyse/marches-energetiques/profils-energetiques>

Ressources naturelles Canada. (2019). Secteur industriel – Industries désagrégées (Canada) [Jeu de données]

<https://oee.nrcan.gc.ca/>

Ressources naturelles Canada. (2025). Opportunités en matière de remplacement des carburants dans les secteurs industriels canadiens

<https://ressources-naturelles.canada.ca/efficacite-energetique/>



En collaboration avec

