

Mars 2024

GUIDE SUR LA DÉCARBONATION INDUSTRIELLE COMPÉTITIVE

UNE CERTITUDE, PAS UNE OPTION !

Document rédigé par :

JHARVEY
Énergie & décarbonation industrielle
www.jharvey.ca

À la demande de :


CRITM
vecteur de transformation métallique

PRIMA 
Les matériaux pour avancer



LE SECTEUR INDUSTRIEL

En 2022, le secteur industriel québécois émettait 24,2 MtCO₂e de GES dont 21,0 MtCO₂e provenant de 192 sites industriels de plus de 10 000 tCO₂e. Les industries du ciment et de la chaux, de l'aluminium, de l'acier, des pâtes et papiers, des mines, de la chimie et de la pétrochimie sont parmi les plus grandes émettrices de GES^A.

Québec s'est doté pour 2030 d'une cible de réduction des émissions de GES de 37,5% sous le niveau des émissions de 1990. Les émissions de l'industrie représentent 32% des émissions totales du Québec et leur réduction est déterminante pour l'atteinte de la cible de 2030.

^A Gouvernement du Québec. Registre des émissions de gaz à effet de serre 2022. [Registre des émissions de gaz à effet de serre \(gouv.qc.ca\)](https://registre-des-emissions.gouv.qc.ca/).



DÉCARBONATION EFFICACE DU SECTEUR INDUSTRIEL



La grande industrie québécoise a bénéficié jusqu'à maintenant d'un tarif d'électricité particulièrement avantageux et d'un prix concurrentiel des énergies fossiles. Or, l'énergie éolienne et solaire, les bioénergies et même la nouvelle énergie hydraulique seront plus coûteuses et sans avantages notables par rapport à ces mêmes énergies produites dans d'autres États pour alimenter leur secteur industriel. La croissance des coûts des énergies renouvelables affectera significativement les coûts d'exploitation et la compétitivité des entreprises à haute intensité énergétique. Selon une étude suédoise, l'augmentation des coûts d'exploitation provenant de la surcharge des coûts des énergies renouvelables dépasserait largement l'amortissement des investissements dans les technologies de décarbonation de l'industrie lourde^B.

En 2018, les membres du G20 partageaient une vision commune selon laquelle la transition énergétique était techniquement réalisable. Toutefois, selon le G20, les activités économiques devaient être remodelées, dont les procédés industriels ainsi que d'autres activités, pour permettre une électrification rentable à zéro émission, ou un approvisionnement en énergie à zéro émission. Dans les deux cas, **des améliorations substantielles de la productivité énergétique seraient nécessaires pour maintenir la compétitivité de l'industrie**^C.

Ce guide présente les voies et les technologies de décarbonation compétitives de Scope 1, celles applicables directement sur le site industriel, visant des secteurs industriels à haute intensité énergétique dans la perspective d'améliorer leur productivité énergétique et leur compétitivité.

^B Björn Nykvist & Al. (2020). Financing the decarbonization of heavy industry sectors in Sweden. [ssfc-hard-to-abate-v6-final-published.pdf](#) [sei.org]

^C G20, Argentina. (2018). Energy transition towards cleaner, more flexible and transparent systems, p. 84. [Energy Transitions - Annex I](#) [utoronto.ca]

CONTENU DU GUIDE

Le guide est divisé en 7 sections :

- 1 Une stratégie de transition énergétique compétitive.** La productivité énergétique comme stratégie de décarbonation efficace.
- 2 Les voies de décarbonation industrielle.** Les voies possibles de décarbonation, de la sobriété énergétique à celle du captage du carbone.
- 3 La décarbonation des procédés industriels.** Les méthodes et les technologies de décarbonation de secteurs industriels
- 4 Décarboner efficacement.** Développer les solutions et faire le choix de technologies efficaces.
- 5 Électrifier directement.** Implanter des électrotechnologies de chauffe directement au point d'usage dans les procédés.
- 6 Cas de décarbonation.** Trois cas de décarbonation démontrant les gains d'une amélioration de la productivité énergétique.
- 7 Services du PRIMA Québec et du CRITM.**

Les acronymes et références bibliographiques sont présentées à la fin du document

MISE EN GARDE

Le guide présente les technologies qui permettent une certaine amélioration de la productivité énergétique et qui suscitent l'intérêt de l'industrie à travers le monde. Les technologies sélectionnées sont récentes, la plupart en développement rapide, techniquement complexes et certaines en concurrence. Le contexte énergétique et les spécificités d'une usine peuvent faire en sorte que certaines technologies présentées ne pourraient pas s'appliquer. Les caractéristiques des technologies ne pouvant pas être présentées en détail dans un court document, elles font l'objet d'une référence bibliographique exhaustive à la fin du document.

REMERCIEMENTS

PRIMA Québec et le CRITM remercient :

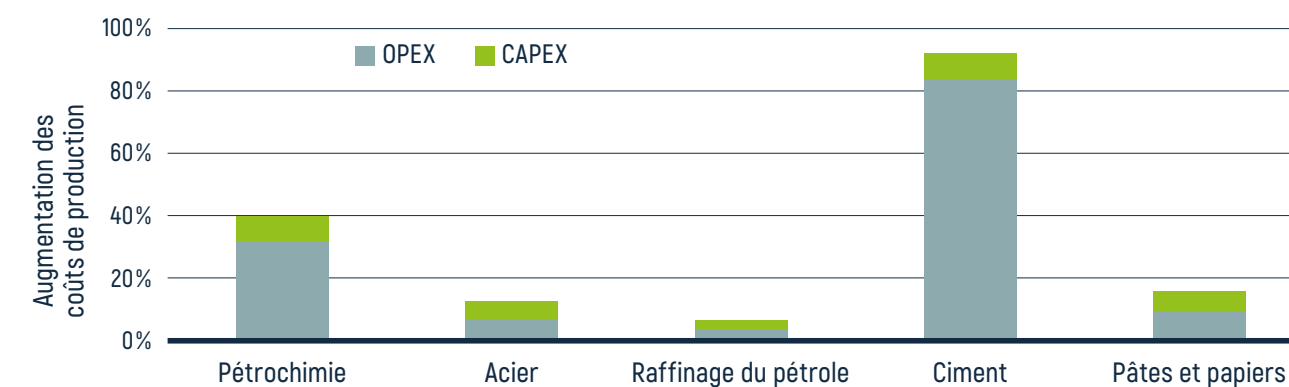
Jacques Harvey de la firme J. Harvey Consultant & Associés Inc. qui a réalisé cette étude avec les précieux conseils de Normand Mousseau de l'institut d'énergie Trottier et de Johanne Whitmore de la Chaire de gestion du secteur de l'énergie des HEC., Sébastien Garbarino, Directeur - Infrastructures et innovation chez PRIMA Québec et Geneviève Brière de Arôme Graphique pour la conception.

1. UNE STRATÉGIE DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE COMPÉTITIVE

La substitution des énergies fossiles par des bioénergies et l'électricité, des énergies renouvelables inévitablement plus coûteuses, se traduira directement en une augmentation des coûts d'exploitation et de production.

L'industrie lourde pourrait être confrontée à des augmentations de coûts de production de 10 à 90 % propulsées par des coûts d'exploitation qui dépassent de loin les coûts d'amortissement des investissements en capital comme montré à la figure suivante^D.

Augmentation des coûts de production provenant des investissements en capital et des coûts d'exploitation résultant de la décarbonation (Source : Björn Nykvist & Al.)



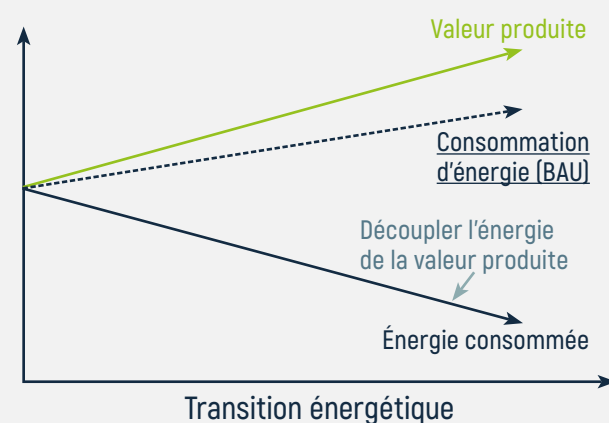
^D Björn Nykvist & Al. (2020). Financing the decarbonization of heavy industry sectors in Sweden. [ssfc-hard-to-abate-v6-final-published.pdf](#) [sei.org]

Améliorer la productivité énergétique

L'amélioration de la productivité énergétique est la stratégie adoptée par de nombreux pays pour faire face aux enjeux d'augmentation des coûts de production qui affecteraient la compétitivité de leur industrie. La productivité énergétique est une mesure de l'efficacité avec laquelle une économie, une industrie ou une société utilise l'énergie pour générer de la valeur économique. En d'autres termes, **améliorer la productivité énergétique de l'industrie signifie produire une plus grande valeur économique en réduisant drastiquement l'énergie consommée par des technologies très efficaces à zéro émission.**

Dans le cas de l'industrie, la productivité énergétique peut être exprimée par :

$$\text{Productivité énergétique} = \frac{\text{Valeur économique produite}}{\text{Énergie consommée}}$$



Plusieurs États ont adopté une stratégie d'amélioration de la productivité énergétique pour conserver leur avantage compétitif dans la transition énergétique. Parmi ces États, les États-Unis et l'Allemagne se sont fixé des objectifs annuels respectifs d'amélioration de leur productivité énergétique de 3,7% et 2,1%.

Le secteur industriel doit se décarboner en adoptant des technologies émergentes et transformatrices telles que les électrotechnologies, les bioénergies et la capture du carbone et en se concentrant sur l'efficacité énergétique. La plupart des réductions d'émissions jusqu'en 2030 proviendraient de technologies d'efficacité énergétique déjà disponibles et dont l'efficacité a été prouvée.

Une amélioration de la productivité énergétique est possible par le développement de :

- Produits à plus haute valeur ajoutée, sobres en matériaux, à haut rendement énergétique, recyclables et réutilisables
- Technologies de transformation zéro émission plus efficaces aux plans de l'énergie et de la productivité.

Les piliers de la décarbonation^F

DÉCARBONATION		PRODUCTIVITÉ ÉNERGÉTIQUE
EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE	<p>Option la plus rentable pour réduire les émissions de GES à court terme</p> <ul style="list-style-type: none">• Gestion stratégique de l'énergie• Optimisation de la production et de l'usage de l'énergie thermique• Fabrication intelligente et analyse avancée des données pour augmenter la productivité énergétique	<p>Amélioration de l'efficacité des matériaux et de leur circularité</p> <p>Création de matériaux à bas carbone</p>
ÉLECTRIFICATION	<p>Électrification de la chaleur industrielle (Power to Heat)</p> <ul style="list-style-type: none">• Pompes à chaleur à haute température, compression mécanique de la vapeur (CMV), électrotechnologies (induction, micro-ondes, infrarouge...)• Électrification des procédés à haute température• Remplacement des procédés thermiques par des procédés électrochimiques	<p>Développement des technologies électriques efficaces de transformation des matériaux et des métaux</p>
ÉNERGIES, MATIÈRES ALTERNATIVES	<p>Substitution de combustibles, de carburants et de matières premières par d'autres à faible teneur en carbone ou sans carbone</p> <ul style="list-style-type: none">• Procédés flexibles en matière d'utilisation de combustibles et de carburants. Utilisation sans regret de combustibles à base d'hydrogène pour les hautes températures• Substitution de matières premières par d'autres moins émissives• Utilisation de bioénergies	<p>Création de combustibles et carburants alternatifs efficaces et peu coûteux</p> <p>Identification de matières premières moins émissives en transformation</p>
CAPTAGE DU CARBONE	<p>Captage, utilisation et stockage du carbone :</p> <ul style="list-style-type: none">• Absorption chimique du CO₂ après combustion• Utilisation du CO₂ capturé pour fabriquer de nouveaux produits• Séquestration du CO₂ dans des produits.	<p>Développer des technologies et des matériaux avancés et peu coûteux de capture et d'utilisation du CO₂</p>

^F Adapté de Advanced Manufacturing Office, 2022. Industrial Decarbonization. [Pillar_Specific_Industrial_Decarbonization_FINAL.pdf](#) (energy.gov)



2. LES VOIES DE LA DÉCARBONATION INDUSTRIELLE



LES VOIES DE LA DÉCARBONATION INDUSTRIELLE

Description	Technologies, applications, gains et limites
1. EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE	
a. Sobriété : Meilleur rendement des matériaux et des produits pour diminuer la demande et ainsi réduire les émissions de GES provenant de leur production.	Réduction de l'utilisation des matériaux à service équivalent, par de meilleurs matériaux, un meilleur design ou une meilleure fabrication. On estime une réduction de 22% d'utilisation du béton et autant d'émissions de GES dans la production du ciment ¹ . Une norme de construction serait requise.
b. Économie circulaire : Récupération de chaleur, matières premières recyclées, valorisation des résidus de production.	Réintroduction en première transformation des rebuts de métaux de la transformation et de l'usinage. La refonte des rebuts métalliques génère 90-97% moins d'émissions de GES pour l'aluminium, 84-88% de moins pour le cuivre, 60-75% de moins pour l'acier ² .
c. Optimisation énergétique : La mise en œuvre d'un système de gestion de l'énergie.	Système de gestion d'énergie ISO 50 001 pour l'optimisation énergétique des procédés et des systèmes auxiliaires. Libération de charges pour l'électrification. Investissements évités ou réduits pour l'ajout de capacité de l'entrée électrique et du réseau. Économies d'énergie potentielles de 5 à 10% sur une période de 2 ans ³ .
d. Méthodes et technologies avancées : Implantation de technologies de l'industrie 4.0 et des technologies de fabrication avancée.	Gestion numérique de l'énergie, la maintenance prédictive, l'optimisation par des jumeaux numériques, la fabrication additive, l'électrochimie et l'intensification des procédés chimiques ⁴ . Économies d'énergie potentielles de 5 à 30% dépendant des secteurs industriels d'ici 2045. Fort impact sur l'amélioration de la productivité énergétique ⁵ . Technologies progressivement commercialisées d'ici 2030 - 2035.
2. ÉLECTRIFICATION (POWER TO HEAT)	
a. Électrification de la production de vapeur . Amélioration de la génération de vapeur et du réseau de distribution ou remplacement par des technologies de chauffe, directement aux points d'usage dans le procédé.	Chaudières électriques, pompes à chaleur (PAC) à vapeur, compression mécanique de la vapeur CMV.. Économies d'énergie de 20% pour les chaudières. Coefficient de performance (COP) de 1,5 à 4 pour les PAC et de 5 à 30 pour la CMV pour des températures atteignant 200°C d'ici 2030 ^{6,7} . Technologies très performantes, complexes et coûteuses.
b. Électrotechnologies : Chauffe directe des matériaux par des technologies électriques efficaces et productives.	Induction, infrarouge électrique, conductivité, ondes radio et micro-ondes ⁸ . Technologies plus efficaces et plus productives que les technologies habituelles de chauffe. La mise en œuvre s'avère plus complexe, car elle dépend des caractéristiques des matériaux à traiter.

LES VOIES DE LA DÉCARBONATION INDUSTRIELLE

Description	Technologies, applications, gains et limites
3. COMBUSTIBLES ALTERNATIFS ET MATIÈRES PREMIÈRES MOINS ÉMISSIVES	
a. Bioénergies et combustibles de synthèse : Substitution des énergies fossiles par des combustibles moins émetteurs de GES.	Biomasses forestières, agricoles, municipales et industrielles. Gaz de sources renouvelables (GSR) et e-combustibles^f. Une adaptation mineure est requise pour les appareils de chauffe. L'utilisation de la biomasse forestière est affectée par une dette de carbone. La seule substitution des combustibles fossiles ne générera pas d'amélioration de la productivité énergétique. Utilisation sans regret de ces énergies lorsque l'électrification n'est pas possible. La biomasse présente un volume limité.
b. Matières premières : Substitution des matières premières par d'autres produisant moins d'émissions de GES.	Matières premières produisant moins d'émissions de GES ou nécessitant une température de traitement plus basse générant ainsi des économies d'énergie. Une réduction de 50 % du clinker dans le ciment et l'ajout d'un mélange d'argile kaolinite de qualité inférieure, de calcaire et de gypse permettent une réduction de 40 % des émissions ⁹ . L'accessibilité aux matières premières et ajouts en quantité suffisante pourrait être problématique.
c. Hydrogène vert : Substitution des énergies fossiles par l'hydrogène produit par des sources renouvelables.	L'hydrogène présente une solution pour des requis de température au-delà de 1 200°C. La calcination du clinker, de l'alumine et la réduction du fer en aciérie sont des domaines d'utilisation potentielle. L'H ₂ produit par des sources d'électricité intermittentes pourrait être stocké et servir de combustible à la demande. Les coûts de production et les risques liés à son exploitation en font une énergie à recourir en l'absence d'autres choix.
4. CAPTURE DU CARBONE	
a. Capture du carbone. Réduction des émissions de GES par captage puis séquestration ou utilisation du carbone.	Capter, séquestrer et utiliser le carbone (CSUC). Malgré l'utilisation d'énergies renouvelables, les émissions de GES des procédés des cimenteries, des aciéries, des alumineries et autres industries ne peuvent être réduites que par la captation du CO ₂ . Jusqu'à maintenant les technologies de CSUC connaissent des résultats mitigés, leurs consommations d'énergie et leurs coûts sont élevés.

^f e-combustibles, c'est-à-dire produits avec de l'électricité verte.

3. LA DÉCARBONATION DES PROCÉDÉS INDUSTRIELS



LA DÉCARBONATION DES PROCÉDÉS INDUSTRIELS - Quelques technologies actuelles et en développement

Plusieurs des technologies présentées sont pour la plupart en cours de développement et leur rentabilité économique et leur efficacité en exploitation industrielle restent à démontrer. Les économies d'énergie et les réductions d'émissions de GES des mesures et des technologies sont indépendantes et non cumulables.

Sources d'émissions de GES [Température, émissions]	2030	2035	2035 +
MINES			
Mines souterraines Chauffage des mines au gaz naturel (GN) ou Liquide de propane (LP) CO ₂ : 60 à 70 % des émissions totales Transport par véhicules miniers au diesel CO ₂ : 30 à 40 % des émissions totales	Ventilation à la demande pour réduire la consommation électrique et les combustibles fossiles du chauffage ¹⁰ . Réduction des émissions du chauffage de 20 %. Chauffage par des PAC 100°C alimentées par l'eau de la mine, la chaleur produite par la cogénération ou celle perdue par le site d'affinage ¹¹ . Réduction des émissions de chauffage de 60 % et de 100 % si les véhicules sont électrifiés.	Apprentissage et contrôle avancé de la ventilation à la demande par l'intelligence artificielle (IA) ¹² . Réduction des émissions de 30 %. Utilisation d'une flotte de véhicules électriques à batteries (VÉB) de production, transport et services ¹³ . Réduction des émissions de la mine de 70 %.	Utilisation d'une flotte de camions de transport et de véhicules de services à pile à combustible à l'H ₂ vert ¹⁴ . Gains en autonomie.
Mines à ciel ouvert Gros camions de transport minier CO ₂ : 50 % des émissions totales Machinerie et véhicules de services CO ₂ : 30 % ¹⁵	Utilisation du biodiesel 100 % (B100) par les camions de transport et des véhicules hybrides électriques de service (VH ou PHEV) ¹⁶ . Système de concassage et de transport mobile en fosse ¹⁷ .	Camions de transport au diesel ou camions VÉB avec alimentation électrique par caténaires en montée. La productivité est améliorée par une vitesse de montée 2 fois plus rapide ¹⁸ . Voir l'étude de cas, section 6.	

Sources d'émissions de GES [Température, émissions]	2030	2035	2035 +
SIDÉRURGIE			
Raffinage du minerai de fer (bouletage) Induration >1 250°C 0,9 tCO ₂ e/t: ~ 42% de la combustion, ~ 57% du procédé (charbon, chaux)	Utiliser la réduction directe (H ₂ +CO) à plus basse température (800 - 1 150°C) utilisant l'huile pyrolytique et du biochar pour produire de l'acier spongieux ¹⁹ . <i>Projet en cours, Arcelor Mittal Port-Cartier. Réduction des émissions d'environ 25%.</i>	Accroissement de l'utilisation de l'huile pyrolytique et du biochar. <i>HYBRIT, LKAB a produit des boulettes avec 100% de biohuile à son usine de Luleå en Suède²⁰.</i>	CSC à l'aide de monoéthanolamine permettrait une réduction des émissions de 65% ²¹ .
Production acier Réduction directe de l'oxyde de fer (DRI), 1 150°C, 0,6 tCO ₂ e/t fer spongieux Fabrication de l'acier par four à arc électrique (Electric Arc Furnace - EAF), coulées et mise en forme, 1 050°C, 0,04 tCO ₂ e/t fer liquide ⁶ .	Substitution du GN par 30 à 50% d'H ₂ vert comme réducteur dans les fours-cuves de réduction. Réalisable sans modifications majeures. Réduction des émissions de GES de 18 à 30% par tonne d'acier liquide ²² . <i>Arcelor Mittal Contrecoeur a testé le remplacement de 6,8% de GN par de l'H₂ dans ses cuves de réduction²⁵.</i> Accroissement de l'utilisation d'acier recyclé.	Utilisation de 100% d'H ₂ vert comme réducteur dans les fours-cuves de réduction. Exige une nouvelle génération de fours-cuves. Réduction des émissions de 61% par tonne d'acier liquide ²³ . <i>En cours de développement, projet HIBRIT en Suède²⁴.</i> Capture et utilisation du carbone (CUC) et production d'ammoniac et bioéthanol. <i>Projet Steelanol Arcelor Mittal et al., aciérie de Ghent, Belgique²⁶. Réduction de 37% des émissions de l'aciérie DRI-EAF.</i>	Production de plaques de fer par électrochimie directe du minerai de fer. <i>Projet Siderwin (Arcelor Mittal et al.), technologie qui remplace le bouletage et la réduction directe de l'oxyde de fer. 2,7 MWh/t acier, zéro émission. Haute flexibilité de gestion de demande de puissance²⁷.</i>

⁶ Incluant 40% de ferraille recyclée.

Sources d'émissions de GES [Température, émissions]	2030	2035	2035 +
PRODUCTION D'ALUMINIUM ET D'ALUMINE^{28,29}			
Production d'alumine Procédé Bayer 150-250°C, 0,6-0,7 tCO ₂ e/t Alumine Calcination >1 000°C 0,3-0,4 tCO ₂ e/t Alumine	Procédé Bayer, à double digestion, alimenté par des chaudières électriques abaisse l'intensité énergétique (GJ/t alumine) variant d'une installation à l'autre ³⁰ . Remplacement du four rotatif de calcination à 1 000°C par une calcination sur lit fluidisé plus efficace ³¹ . Réduction du GN et des émissions du four de 30 à 35%.	Compression mécanique de la vapeur CMV récupérée au four d'alumine pour le procédé Bayer ³² . <i>Application en évaluation, Alcoa Australie³³. Réduction des émissions de GES de 70% et la consommation en eau de 30%.</i> Lit fluidisé électrique de calcination d'alumine avec banque thermique. Récupération de vapeur perdue pour le procédé Bayer. Zéro émission.. <i>En test, Alcoa Australie³⁴.</i>	Four de calcination de la bauxite alimenté à l'H ₂ vert et/ou biomasse (si électrification non concluante). Capture et séquestration du carbone (CSC). Réduction des émissions de 2,6 tCO ₂ e/t Al.
Production des anodes précuites 1 150°C, 0,9 tCO ₂ e/t Al	Nouvelle génération de four de cuisson des anodes ³⁵ . Réduction des émissions de 30% et amélioration de la productivité de 15%. <i>Implanté à Rio Tinto Bell Bay, Australie.</i>	Remplacement partiel du coke de pétrole par du biocoke dans la production du coke calciné ³⁶ . Four électrique de cuisson des anodes. Zéro émission.	Four de cuisson des anodes alimenté à l'H ₂ vert. CSC. Réduction des émissions de 0,7 tCO ₂ e/t Al.
Électrolyse et coulée de l'aluminium Combustion des anodes et émissions de perfluorocarbures par effet anodique, 1,6 tCO ₂ e/t Al Coulée de l'aluminium, 665°C, CO ₂ : 0,1 tCO ₂ e/t Al	Recyclage accru des rebuts internes, industriels et post-consommation d'aluminium ³⁷ , CO ₂ Al recyclé: 0,3 à 0,6 tCO ₂ e/t Al comparé à 1,6 t _{éq.} CO ₂ /t Al 1 ^{re} fusion. Utilisation de brûleurs génératifs ou oxycombustibles dans les fours de dosage et de coulée ³⁸ , réduction des émissions de 20%. Utilisation de fours à induction pour le recyclage de l'aluminium éliminant les émissions de CO ₂ du procédé de recyclage ³⁹ . <i>Utilisé à l'aluminerie Alcoa Mosjøen, Norvège.</i>	Anodes inertes (ELYSIS) ^{40,41} . Zéro émission. L'utilisation d'anodes inertes pourrait augmenter la consommation d'électricité. Toutefois, considérant une augmentation possible de la productivité, des économies électriques par tonne produite pourraient être générées. <i>En test précommercial à l'aluminerie RTA, Alma.</i>	Capture du CO ₂ dans les effluents gazeux par adsorption électrostatique ⁴² . Technologie d'électrolyse zéro émission HalZero d'Hydro Norvège basée sur la conversion de l'alumine en chlorure d'aluminium avant l'électrolyse. Le chlore et le carbone sont maintenus dans un circuit fermé, éliminant ainsi les émissions de CO ₂ et émettant de l'oxygène à la place ⁴³ .

Sources d'émissions de GES [Température, émissions]	2030	2035	2035 +
FABRICATION DES PRODUITS NON MÉTALLIQUES			
Ciment 1,15 tCO ₂ e/t clinker, 27 % de la combustion, 73 % du procédé Préchauffage et pré-calcination du cru (Opt.) 900 – 1 000°C Calcination du clinker >1 450°C	Matériaux cimentaires supplémentaires pour réduire l'utilisation de clinker tels que les cendres volantes et le calcaire ⁴⁴ . Accroissement du remplacement des combustibles fossiles par des rebuts valorisés dans un four-réacteur. <i>Ciment Québec réalise le projet Synergia utilisant des combustibles alternatifs pour réduire les émissions de la calcination de 30 %</i> ⁴⁵ .	Les matières premières décarbonées ou moins carbonées, telles que l'argile brute, le silicate de magnésium et le carbonate de silicate de calcium permettent de réduire les émissions de procédé ⁴⁶ . La réduction des émissions de procédé pourrait atteindre entre 10 et 30 % lors de la calcination du clinker. Technologie LEILAC, calcination et captage du CO ₂ intégré. Options de chauffe à haute température du four de calcination par électricité ou l'H ₂ et la biomasse ⁴⁷ . <i>Test industriel par Heidelberg Hanovre</i> .	Fours de calcination utilisant des torches au plasma, chauffage par micro-ondes, chauffage électrique résistif, chauffage par induction en étude ⁴⁸ . Réduction totale des émissions de combustion. Capture des émissions de procédé par cycle génératif du calcium, procédé inverse de la calcination de la chaux, qui capture environ 80 % du CO ₂ en produisant du calcaire réutilisé pour fabriquer le ciment ⁴⁹ .
Chaux Calcination >1 100°C ~1,26 tCO ₂ e/t chaux, 30 % de la combustion, 70 % du procédé	Substitution de 40 à 50 % du GN par la biomasse forestière pour réduire les émissions de combustion ⁵⁰ .	Technologie LEILAC ou son dérivé CALIX ⁵¹ (voir ciment). Réduction de 85 % des émissions totales. Substitution du GN par l'H ₂ et la biomasse. Réduction des émissions de combustion ⁵² .	Capture des émissions de procédé par cycle génératif du calcium (voir ciment).

Sources d'émissions de GES [Température, émissions]	2030	2035	2035 +
FABRICATION DES PÂTES ET PAPIERS ET CARTONS			
Production de la pâte chimique Digestion et évaporation, 300°C, ~0,5 tCO ₂ e/t de pâte Chaudière de récupération de liqueur noire 1 200°C, 1,5 à 2 tCO ₂ e/t liqueur, 97% combustion Fabrication de la chaux, >1100°C, 30% de la combustion, 70% du procédé	Accroissement d'utilisation des fibres récupérées. Récupération de chaleur et efficacité énergétique. Économies d'énergie de 10 à 15%. Gazéification de la liqueur noire. Économies d'énergie de 3 GJ/t de papier.	Remplacement des combustibles fossiles par des résidus forestiers pour alimenter les fours à chaux. Réduction moyenne de 40 ktCO ₂ e/four ⁵³ . Remplacement des chaudières à énergie fossile par des chaudières électriques, des pompes à chaleur et la compression mécanique de la vapeur CMV récupérée.	Le prétraitement de la fibre par micro-ondes. Réduis la vapeur requise au raffineur et la quantité d'énergie consommée par le four à chaux ⁵⁴ .
Production du papier et du carton Désencrage, 50 à 70°C Séchage du papier, 100 à 150°C Séchage du carton, 150 à 200°C	Production du papier hygiénique sans eau. Économies d'énergie en séchage et réduction des émissions de GES de 50%. <i>350 000 tonnes de papier sont fabriquées sans eau dans le monde à l'aide de la technologie Airlaid de disposition des fibres sur lit d'air en mouvement avec liant adhésif^{55,56}.</i>	Le tri des matières premières recyclées par capteurs et l'IA permet un désencrage plus efficace. Économies d'électricité et de vapeur de 16 et 30% respectivement, ainsi qu'une réduction de 20% de perte de matière ⁵⁷ . Remplacement des chaudières au GN pour le séchage du papier par des pompes à chaleur à vapeur à 160°C avec récupération du condensat. COP de 3 à 4 dépendant des températures d'entrée et de sortie ⁵⁸ .	Séchage de la pâte, du papier et du carton par des pompes à chaleur à 200°C.
AFFINAGE DES MÉTAUX			
Cuivre 1,15 tCO ₂ e/t cuivre Smeltage continu 1 200°C. Refonte des anodes 1 300°C	Amélioration de la combustion par brûleurs avancés et des carburants alternatifs. Accroissement de la refonte de cuivre post-utilisation.	Remplacement des combustibles fossiles du four à anode par l'hydrogène et électrification du four de nettoyage des scories ⁵⁹ . CSC.	
Transformation des métaux Procédés de fusion, mise en forme et de traitement	Remplacement des fours au GN et à l'électricité par des fours de fusion à induction, de coulée d'homogénéisation, de réchauffe ou de maintien.	Remplacement des fours et bains de traitement thermique aux combustibles fossiles par des fours électriques et bains à résistance électrique immergée.	

Sources d'émissions de GES [Température, émissions]	2030	2035	2035 +
CHIMIE			
Pétrochimie (chaîne xylène) Paraxylène (Px), 0,63 tCO ₂ e/t Px Acide téréphtalique purifié (ATP) 0,33 tCO ₂ e/t ATP Polyéthylène téréphtalate (PET) 0,13 tCO ₂ e/t PET	Récupération de la chaleur perdue.	Remplacement de la production d'H ₂ par reformage du méthane par l'hydrolyse.	CSUC Électrification des réacteurs.
	Remplacement des chaudières à énergies fossile et au gaz de raffinerie pour la production de vapeur et d'huile chaude par chaudières électriques ou au GN avec appoint de PAC et de CMV.		Utilisation d'H ₂ pour les très hautes températures.
MÉTHODES ET TECHNOLOGIES TRANSVERSALES			
Tous les secteurs industriels	Gestion d'énergie: 1 à 3% d'économies d'énergie par année sur une période de 3 à 5 ans. Industrie 4.0^H: Gestion numérique de l'énergie, utilisant le sous-mesurage en continu par des capteurs internet sur les équipements et des fonctionnalités de l'IA. Facilité de la gestion et économies d'énergie de 2 à 5%.	Industrie 4.0⁶⁰: Optimisation du design, de la production et de la gestion d'énergie par jumeaux numériques. 3 à 30% d'économies dépendant des applications. Contrôle avancé de procédé et optimisation globale des points de consigne. 2 à 5% d'économies. L'intégration de l'ensemble des technologies peut générer des économies d'énergie de 5 à 30% dépendant des secteurs industriels. Fabrication avancée: Fabrication additive, intensification des procédés chimiques.	
	Électrotechnologies PAC à vapeur < 160°C: 50-60% de l'énergie thermique consommée dans l'industrie pourrait être produite par ces PAC. CMV de la vapeur générée ou récupérée. Infrarouge électrique: chauffage externe de tout matériau compatible dans tous les secteurs. Induction: chauffage et fusion des métaux en 1 ^e et 2 ^e transformation. Micro-ondes: séchage ou chauffe de tout matériau compatible et non conducteur d'électricité. Arc électrique: fusion des métaux, 1 ^e et 2 ^e transformation.	Électrotechnologies Chaudières électriques et PAC <200°C: 15-20% additionnel d'énergie thermique consommée dans l'industrie pourrait être produite par ces PAC. CMV en cascade pour augmenter la température de la vapeur. Ultrasons: stérilisation et séchage avancé en chimie. Champ électrique pulsé: stérilisation et fusion dans l'industrie chimique. Lumière pulsée: stérilisation en chimie. Faisceau d'électrons et laser: traitement thermique des métaux.	

^H National Manufacturing Institute Scotland (NMIS) [Digital factory](#) | National Manufacturing Institute Scotland (NMIS), [Made Smarter What Are Industrial Digital Technologies? \(IDT\) - Made Smarter](#)

4. DÉCARBONER EFFICACEMENT

La simple substitution d'énergies fossiles par des énergies renouvelables n'améliorera pas significativement le rendement énergétique qui permettrait de contrebalancer les coûts plus élevés de ces énergies. Une **profonde transformation des méthodes d'exploitation et des procédés industriels sera nécessaire pour conserver ou même améliorer la compétitivité de l'industrie**. Pour y parvenir, plusieurs pistes ont été identifiées :

- Mettre en œuvre une nouvelle culture et de nouvelles méthodes ;
- Améliorer l'efficacité énergétique ;
- Implanter des technologies de chauffe plus efficaces directement dans les procédés ;
- Innover dans les domaines des technologies numériques, des matériaux et des technologies de fabrication avancés.

Nouvelle culture et nouvelles méthodes

Les entreprises doivent relever le défi d'assurer une décarbonation qui améliore l'efficacité des processus de fabrication et qui protège l'environnement de manière durable. Pour y arriver, les entreprises devront développer une culture qui valorise la durabilité, la participation active de la main-d'œuvre et l'innovation dans leur projet de transition énergétique.

Cela nécessite une formation adéquate du personnel ainsi que leur implication dans l'atteinte des objectifs de l'entreprise. Cette approche identifiée comme l'industrie 5.0 vise à renforcer le concept de l'industrie 4.0 concentrée sur l'aspect technologique en mettant l'humain et l'environnement au centre de la transition énergétique¹.

L'efficacité énergétique

L'efficacité énergétique est la solution immédiate et peu coûteuse pour réduire substantiellement la demande en électricité et celle des combustibles fossiles de même que leurs émissions de GES. Sur le plan électrique, une réduction de la demande électrique dégage des charges pour l'électrification permettant ainsi de minimiser les investissements requis pour augmenter la capacité de l'entrée électrique et du réseau.

La mise en œuvre d'un système de gestion d'énergie tel qu'ISO 50 001 crée l'environnement organisationnel pour identifier les pistes d'amélioration et mettre en œuvre les projets d'efficacité énergétique. L'expertise organisationnelle et technique développée dans le cadre de la gestion d'énergie devient un atout incontestable pour le développement de solutions de décarbonation et éventuellement leur implantation.

De 15 à 20 % d'économies d'énergie peuvent être réalisées dans l'industrie par un effort constant en efficacité énergétique sur une période de 7 à 10 ans.

Technologies plus efficaces

Les chaudières électriques d'une efficacité de 98 %, pour un rendement combiné d'environ 80 % incluant le réseau de vapeur, peuvent atteindre les 400°C. Pour des températures inférieures à 200°C, la PAC à vapeur s'avérerait un meilleur choix.

Les PAC à vapeur à 120°C sont commercialement disponibles et celles atteignant 200°C le seront d'ici 2030⁶¹. Dépendant de l'élévation requise de température, leur COP varie de 1,5 à 4,5 en application industrielle. Elles peuvent être utilisées avec la CMV qui permet de relever la pression et la température de la vapeur à 200°C, avec un COP de 5 à 30.

Chauffe directe des matériaux

La chauffe directe, très efficace et productive, génère directement la chaleur à la surface ou à l'intérieur du matériau sans perte thermique par convection, conduction et radiation. Quelques-unes de ces technologies sont présentées dans le tableau de la page suivante.

¹ Industrie 5.0. L'humain comme pilier de la transformation numérique. [Industrie5.0-FR.pdf](#) ([proactioninternational.com](#))

Électrotechnologies de chauffe directe^{62,63,64,65}

CHAUFFE	APPLICATIONS	MATÉRIAUX	EFFICACITÉ
Induction	Industries métalliques : chauffage, fusion, coulée, formage à chaud, recuit, durcissement et revêtement.	Matériaux ayant une conductivité électrique. Chauffe des matériaux non conductifs dans un creuset à induction.	Efficacité énergétique de 50 à >90 %. Très haute productivité en traitement par lot. 46 % d'économies d'énergie comparées au four à gaz. T(Max) : > 3 000°C
Diélectrique incluant les micro-ondes	Industries non métalliques : chauffe rapide interne de matériau à grand volume	Matériaux non conducteurs d'électricité.	Efficacité énergétique ~80 %. Chauffe très rapide de l'intérieur d'un matériau. T (Max) : 2 000°C
Infrarouge (IR) électrique	Industries du papier, du textile, caoutchouc, céramique et transport : chauffage, séchage, durcissement, frittage, thermoformage.	Objets ayant une conductivité thermique élevée, peu réfléchissants de forme simple et de surface plane	Efficacité de 65 à 90 %. 2 à 40 fois plus rapide que les fours à gaz dépendant des applications. T (Max) : 2 500°C.
Chauffage par conduction	Industrie du métal : réchauffage et fusion, soudage par résistance.	Matériaux à conductivité électrique. Pièces uniformes, longues et minces.	Efficacité énergétique de 75 à 95 %. Chauffe très rapide. T (Max) : 2 500°C

D'autres électrotechnologies sont utilisées dans différents processus : fours à arc de fusion des métaux, fours à résistance pour divers usages de chauffe, faisceau d'électrons et ultraviolets pour le durcissement et la mise en forme des métaux, des plastiques et du caoutchouc, laser pour le traitement thermique circonscrit des métaux, plasmas pour le chauffage et fusion à haute température des métaux et radiofréquences pour le séchage du papier et des textiles.

Innovation : technologies numériques, matériaux et fabrication avancés

La décarbonation de l'industrie, particulièrement celle des grandes industries de transformation utilisant des procédés à haute température, sera difficile à réaliser sans trop affecter leurs coûts d'exploitation et leur compétitivité. La stratégie déployée par plusieurs États est d'investir dans l'innovation de solutions faisant appel aux technologies avancées telles que les technologies numériques, le développement de matériaux avancés et de moyens de transformation plus efficaces.

Des solutions innovantes pour une meilleure fabrication et une réduction de l'utilisation des matériaux à service équivalent, par de meilleurs matériaux ou par un meilleur design améliorent la productivité énergétique.

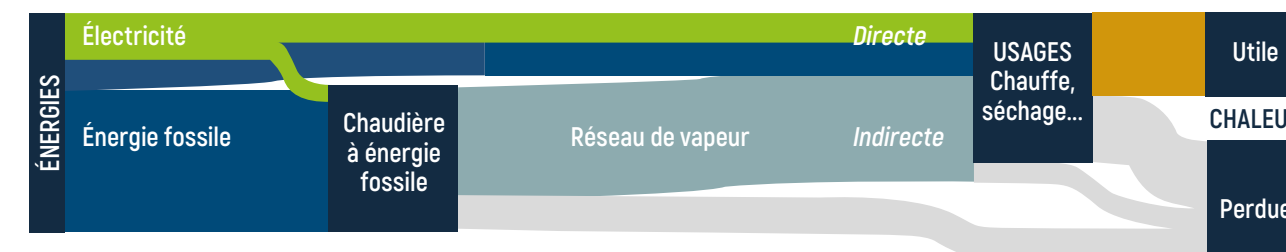
PRIMA Québec et le CRITM soutiennent le développement de solutions telles que celles liées à la décarbonation.

¹ Industrie 5.0. L'humain comme pilier de la transformation numérique. [Industrie5.0-FR.pdf](#) ([proactioninternational.com](#))

5. ÉLECTRIFICATION DIRECTE

Le rendement moyen de la chauffe dans le secteur industriel est d'environ 40%. Ce rendement est la combinaison des efficacités moyennes des chaudières (76%), des réseaux de vapeur (80%) et de la chauffe au niveau de l'usage (67%)¹. Pour les 4 industries montrées au tableau suivant, le rendement de la chauffe au point d'usage varie de 24 à 54%. Le rendement est en fonction inverse du taux de consommation d'énergie de la production de vapeur par rapport à l'énergie totale consommée par l'usine. **D'importantes économies d'énergie sont donc réalisables par une chauffe directe au point de l'usage évitant ainsi les pertes d'énergie de la chaudière et du réseau de vapeur.**

Rendement de la chaîne de chauffe de procédés industriels



Industries	Efficacité		Rendement de la chauffe	Vapeur vs énergie totale
	Chaudières / réseaux	Usages		
Pâtes & papiers	74% x 80% = 59%	40%	24%	78%
Chimie	78% X 80% = 62%	76%	47%	43%
Moyenne de l'industrie	76% X 80% = 61%	67%	40%	30%
Fer et acier	79% X 80% = 63%	55%	35%	6%
Ciment	N.A	54%	54%	0%

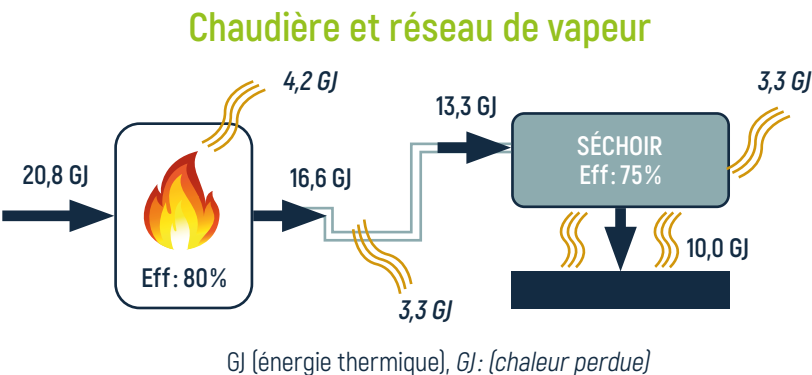
¹ Adapté de DOE. 2018 Manufacturing Static Energy Sankey Diagrams. 2018 Manufacturing Static Energy Sankey Diagrams | Department of Energy

L'électrification

Deux stratégies d'électrification pouvant être utilisées conjointement permettent d'améliorer la productivité énergétique:

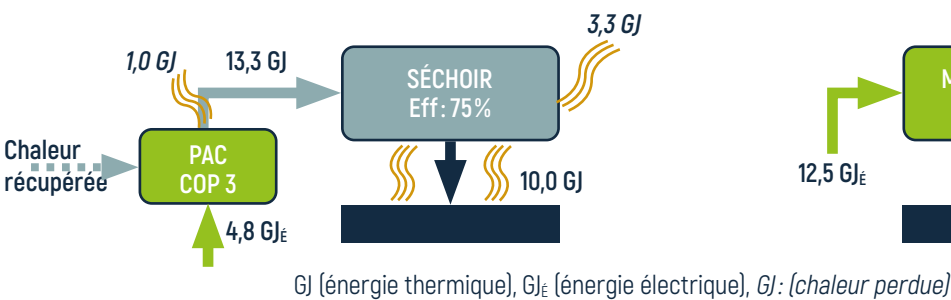
- 1. Utilisation de technologies de génération de vapeur à haute efficacité directement au point d'usage du procédé, si possible, pour réduire les pertes du réseau de vapeur.
- 2. Intégration dans le procédé d'électrotechnologies de chauffe directe à haute efficacité et à haute productivité.

Comparaison des technologies de production de chaleur pour le séchage d'un matériau ayant un requis de chauffe de 10 GJ/unité de temps^K.



Le rendement global de la chaudière, du réseau de vapeur et du séchoir est de 48%.
Remplacer la chaudière à énergie fossile par une chaudière électrique d'une efficacité de 98% et améliorer le réseau de vapeur de 10% augmente le rendement à 67%.

Pompe à chaleur à vapeur directe



Micro-ondes



Le rendement global du séchoir alimenté par une PAC est de 208%. Celui du séchage par micro-ondes est de 80%, mais le temps de séchage pourrait être réduit.

Les micro-ondes pourraient sécher plus rapidement l'intérieur d'un matériau dépendant de ses caractéristiques. Dans le cas présenté, pour un temps de séchage 3 fois plus rapide, les micro-ondes consommeraient moins d'énergie que le séchage par PAC.

Décarboner dans la perspective de maintenir et même d'améliorer la compétitivité de l'industrie nécessitera une optimisation énergétique globale des procédés et l'introduction de technologies de chauffe très efficaces aux plans de l'énergie et de la productivité. L'industrie devra développer des solutions innovantes pour abaisser les requis de température, réutiliser l'énergie perdue des procédés, développer et intégrer des technologies beaucoup plus efficaces et compatibles avec les matériaux à traiter.

^K Les rendements des cas présentés varient en fonction des efficacités des équipements, des températures, des caractéristiques des matériaux à traiter.

6. CAS DE DÉCARBONATION



Électrification de camions de transport de minerai¹

La mine Copper Mountain, en Colombie-Britannique, a réduit considérablement ses émissions de gaz à effet de serre et sa consommation de diesel en électrifiant partiellement ses camions Komatsu 830-5 de 400 tonnes équipés d'un moteur diesel de 2 600 HP. Les moteurs électriques des roues sont alimentés en électricité contournant le moteur diesel et la génératrice.

Un camion de transport traditionnel brûle environ 35 litres de carburant diesel sur la montée d'un kilomètre hors de la fosse minière. L'assistance électrique par caténaire à 25 kV fournit 12 MW pour alimenter en électricité 4 camions simultanément. La consommation de diesel est réduite de 35 à moins d'un litre pour le même trajet.

Les camions utilisant l'assistance électrique gravissent la rampe de transport la plus difficile de la mine à une vitesse plus de deux fois supérieure à celle des camions sans assistance pour une fraction du coût de la consommation de diesel et d'électricité. Environ 70 % des émissions de GES de cette mine à ciel ouvert provient du transport par camions miniers. La mine envisage d'allonger le trajet assisté pour réduire davantage les émissions de GES.

¹ B.C. mine's electrified trucks a Canadian first, with goal of net-zero GHG emissions. [B.C. mine's electrified trucks a Canadian first, with goal of net-zero GHG emissions | Globalnews.ca](#). A net-zero mine? Copper Mountain takes electrifying first step. [A net-zero mine? Copper Mountain takes electrifying first step | bchydro.com](#)

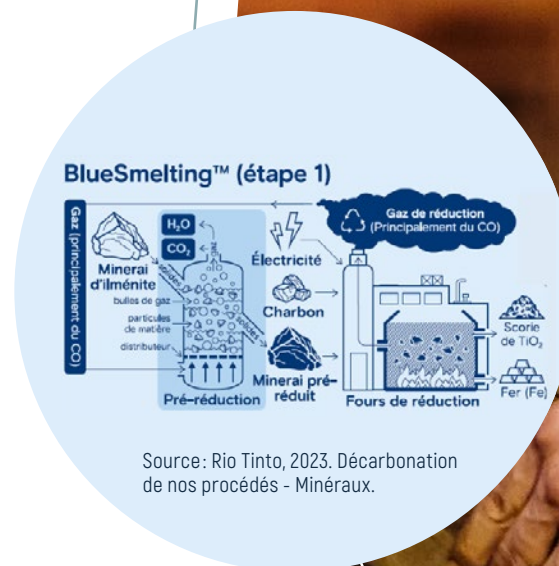


Pré-réduction du minerai d'ilménite^M

Rio Tinto, vise à réduire ses émissions de GES de 50 % d'ici 2030 et à atteindre l'objectif de zéro émission nette d'ici 2050. Dans la poursuite de cet objectif, le Centre de recherche de Rio Tinto Fer et Titane (RTFT) à Sorel-Tracy a développé le procédé BlueSmelting^{MC} de pré-réduction de l'ilménite permettant de réduire la quantité de chaleur requise par l'actuel procédé de réduction. Une usine de démonstration de 40 000 tonnes a démarré en 2023.

Actuellement, le minerai d'ilménite ($\text{TiO}_2 + \text{FeO}$) est chauffé à environ 1 700°C dans des fours de réduction chauffés à l'électricité. Pendant la réduction, du charbon est ajouté pour capter l'oxygène du fer. Le fer plus lourd se sépare et coule au fond du four, tandis que le dioxyde de titane plus léger flotte. Ce procédé de réduction nécessite une grande quantité d'énergie électrique et produit des gaz de réduction, principalement du monoxyde de carbone, et d'importantes émissions de GES.

La pré-réduction du procédé BlueSmelting^{MC} utilise les gaz de réduction ou de l'hydrogène pour enlever de l'oxygène du minerai avant qu'il soit envoyé aux fours de réduction. Ce nouveau procédé produit une ilménite pré-réduite de structure cristalline et de porosité modifiées réduisant ainsi la consommation de charbon requise pour sa réduction.



Source: Rio Tinto, 2023. Décarbonation de nos procédés - Minéraux.

^M Rio Tinto, 2023. Décarbonation de nos procédés - Minéraux.

Procédé novateur de traitement de l'écume d'aluminium^{N,0}

Lefebvre Industri-AL a développé un procédé novateur et non polluant pour récupérer à 100 % de l'écume d'aluminium, tout en éliminant la production de GES et l'emploi de sels polluants.

L'écume est un sous-produit issu de la fabrication d'aluminium, actuellement récupéré par un procédé complexe et polluant qui nécessite l'utilisation d'un four de refonte à énergie fossile et l'ajout de sel pour prévenir l'oxydation de l'aluminium. En outre, cette méthode ne recycle qu'environ 50 % de l'écume traitée ; les résidus polluants étant enfouis.

Le procédé RAME® (Recyclage de l'aluminium en mode écoresponsable) développé par Lefebvre Industri-AL se traduit par la récupération supplémentaire de 1500 tonnes d'aluminium de qualité primaire, pouvant être réintroduit dans la première cuve à l'aluminerie, et l'élimination de 750 tonnes de sels utilisés dans le procédé traditionnel. La refonte par induction permet l'élimination de plus de 11 600 tCO₂e et des NO_x provenant de la combustion du mazout des installations de l'entreprise et de 2 615 tCO₂e évitées à l'aluminerie par la réintroduction de l'aluminium récupérée. Depuis mars 2020, ce procédé est utilisé à Baie-Comeau pour traiter les résidus de l'aluminerie d'Alcoa.

Les alumineries québécoises génèrent des émissions de GES moyennes de 1,9 tCO₂e/t d'aluminium. L'introduction de l'aluminium recyclé directement à la première coulée ne contribuerait qu'à des émissions de 0,1 tCO₂e/t d'aluminium. L'électrolyse consomme en moyenne 1 450 kWh/t d'aluminium, une consommation évitée par l'aluminium recyclé. La re circularité complète du procédé RAME et les économies d'énergie générées se traduisent en une importante amélioration de la productivité énergétique.

^N Lefebvre Industri-AL | Baie-Comeau | Innovation et développement durable (lefebvre-al.com)

⁰ Cas témoignage Lefebvre Industri-AL (hydroquebec.com)



7.

SERVICES DE PRIMA QUÉBEC ET DU CRITM

PRIMA Québec, le pôle de recherche et d'innovation en matériaux avancés, anime et soutient l'écosystème des matériaux avancés en privilégiant l'innovation collaborative pour le développement économique du Québec.

Le CRITM couvre l'ensemble du secteur de la transformation métallique. Il a pour mission d'accroître la compétitivité des entreprises en transformation métallique par le soutien à l'innovation et est la ressource incontournable pour l'innovation en transformation métallique.

En tant que regroupements sectoriels de recherche industrielle (RSRI), PRIMA Québec et le CRITM comptent sur le soutien financier du gouvernement du Québec et du secteur privé pour favoriser les relations recherche-industrie.

Ils peuvent vous accompagner et soutenir vos projets d'innovation collaborative en lien avec la décarbonation de vos activités.



POUR EN SAVOIR PLUS

Nouvelle approche en matière d'efficacité énergétique, autour d'objectifs de productivité énergétique, qui vise à maximiser la création de valeur économique liée à la consommation d'énergie et aux émissions de GES.

[PE2019.pdf \[hec.ca\]](#)

Portrait et pistes de réduction des émissions industrielles de gaz à effet de serre au Québec: Volet 1 - Projet de recherche sur le potentiel de l'économie circulaire sur la réduction de gaz à effet de serre des émetteurs industriels québécois.

[20210413132838-gesindqc2019-volet1web.pdf \[quebeccirculaire.org\]](#)

Potentiel de l'économie circulaire sur la réduction de gaz à effet de serre des émetteurs industriels québécois Volet 2 – Stratégies de circularité par la réduction des émissions de gaz à effet de serre par les émetteurs industriels québécois

[GESindustriels-volet2_Web.pdf \[hec.ca\]](#)

La décarbonation et l'atteinte de la carboneutralité en entreprise. Les bonnes pratiques permettant aux entreprises de décarboner leurs activités afin de pouvoir tendre à l'atteinte de la carboneutralité.

[La décarbonation et l'atteinte de la carboneutralité en entreprise \[yapla.com\]](#)

Plan pour la carboneutralité au Québec – Trajectoires 2050 et propositions d'actions à court terme

<https://iet.polymtl.ca/publications/plan-carboneutralite-quebec-trajectoires-2050-propositions-actions-court-terme/>

ACRONYMES

- B100** Biodiesel 100 %
- BAU** Business as usual (Les affaires comme toujours)
- CMV** Compression mécanique de la vapeur
- COP** Coefficient de performance
- CSC** Capture et séquestration du carbone
- CSUC** Capture, séquestration et utilisation du carbone
- CUC** Capture et utilisation du carbone
- DRI** Direct reduction of iron (Réduction directe du fer)
- EAF** Electric Arc Furnace (Four à arc électrique)
- GES** Gaz à effet de serre
- GN** Gaz naturel
- GSR** Gaz de source renouvelable
- IA** Intelligence artificielle
- LP** Liquide de propane
- PAC** Pompe à chaleur
- PHEV** Véhicule électrique rechargeable
- VÉB** Véhicule électrique à batterie
- VH** Véhicule hybrides

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete, 2021. [GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW-2022.pdf \[gccassociation.org\]](#) (Consulté le 30 janvier 2024)
- 2 Drezet Éric, 2014. Le recyclage des métaux. [Le recyclage des métaux – EcoInfo \[cnrs.fr\]](#) (Consulté le 30 janvier 2024)
- 3 Gouvernement du Canada, RNC. Norme ISO 50001 pour les systèmes de gestion de l'énergie [Norme ISO 50001 pour les systèmes de gestion de l'énergie \[canada.ca\]](#) (Consulté le 30 janvier 2024)
- 4 Future Bridge, 2022. Digitalization in Decarbonization – What's Next? [Digitalization in Decarbonization – What's Next? – FutureBridge](#) (Consulté le 23 février 2024)
- 5 CESMII, 2020. 6° of Smart Manufacturing – Energy Savings through Smart Manufacturing. <https://www.youtube.com/watch?v=PtEF2dHQCYY> (Consulté le 30 janvier 2024)
- 6 Yaroslav Chudnovsky, 2023. Challenges, Priorities and Opportunities for Industrial Heat Pumping Technologies. 2023 ACEEE Industry Summer Study - Industrial Heat Pumps Workshop. [PowerPoint Presentation \[aceee.org\]](#)
- 7 Ed Rightor et al. 2022. Industrial Heat Pumps: Electrifying Industry's Process Heat Supply. [ACEEE Report \[ashb.com\]](#) (Consulté le 23 février 2024)
- 8 Hydro One, 2007. Guide d'amélioration du rendement énergétique des électrotechnologies. [économies d'énergie de système de gestion iso 50001 - Recherche \[bing.com\]](#) (Consulté le 30 janvier 2024)
- 9 LC3. Une solution durable pour l'industrie du ciment. [Vorgaben für Intranet, Vorlage Fachpublikation, Programme geografisch & thematisch 210212 \[zoinet.org\]](#)
- 10 En bref: Newmont Goldcorp-Éléonore (installation d'un système complet de ventilation plus écoresponsable) [En bref: Newmont Goldcorp-Éléonore \(installation d'un système complet de ventilation plus écoresponsable\) - Fonds Écoleader: Fonds Écoleader \[fondsecoleader.ca\]](#) (Consulté le 15 janvier 2024)
- 11 Dariusz Obracaj, Sebastian Sas, 2018. [Possibilities of using energy recovery in underground mines. Possibilities of using energy recovery in underground mines \[e3s-conferences.org\]](#) (Consulté le 15 janvier 2024)
- 12 Minière 03, 14 oct. 2021. L'intelligence artificielle dans l'industrie minière. [L'intelligence artificielle dans l'industrie minière - 03 Mining \[miniereo3.com\]](#) (Consulté le 12 janvier 2024)
- 13 This 240t electric mining haul truck can charge in 30 minutes. [This 240t electric mining haul truck can charge in 30 minutes \[electrek.co\]](#). (Consulté le 15 janvier 2024)
- 14 Diane L.M. Cook, Canadian Mining Journal, 2021. Harnessing hydrogen: Miners explore the use of hydrogen-powered haul trucks. [Harnessing hydrogen: Miners explore the use of hydrogen-powered haul trucks - Canadian Mining Journal](#). (Consulté le 16 janvier 2024)
- 15 Hatch (non datée). On the path to zero emissions: how the mining industry is working towards GHG-free surface mining. [On the path to zero emissions: how the mining industry is working towards GHG-free surface mining \[hatch.com\]](#) (Consulté le 12 janvier 2024)
- 16 Idem
- 17 Haiming Bao, Peter Knights, Mehmet Kizil, Micah Nehring, 2023. Electrification Alternatives for Open Pit Mine Haulage. <https://www.mdpi.com/2673-6489/3/1/1> (Consulté le 15 janvier 2024)
- 18 Idem
- 19 CargoHandbook. Direct Reduced Iron (DRI). [Direct Reduced Iron \(DRI\) - Cargo Handbook - the world's largest cargo transport guidelines website](#) (Consulté le 18 janvier 2024)
- 20 HYBRIT, LKAB. [LKAB produit les premières boulettes de minerai de fer au monde avec des combustibles non fossiles - LKAB](#). (Consulté le 24 janvier 2024)
- 21 Mohammed S. Ba-Shammakh, 2019. Cost Minimization with Optimal CO₂ Mitigation Options for the Steelmaking Industry [Cost Minimization with Optimal CO₂ Mitigation Options for the Steelmaking Industry | Energy & Fuels \[acs.org\]](#) (Consulté le 24 janvier 2024)
- 22 Robert Millner, Johannes Rothberger, Barbara Rammer, Christian Boehm, Wolfgang Sterrer, Hanspeter Ofner, Vincent Chevrier, 2021. MIDREX H2 – The Road to CO₂-free Direct Reduction. Fig. 6. [MIDREX H2 – The Road to CO₂-free Direct Reduction \[primetals.com\]](#) (Consulté le 12 janvier 2024)
- 23 Idem
- 24 Hybrit. Fossil-free pellet production. <https://www.hybritdevelopment.se/en/a-fossil-free-development/fossilfree-pelletproduction/> (Consulté le 24 janvier 2024)

- 25 Remplacement de gaz naturel par de l'hydrogène : ArcelorMittal en voie de réussir son pari dans la production d'acier vert. [Remplacement de gaz naturel par de l'hydrogène : ArcelorMittal en voie de réussir son pari dans la production d'acier vert - ArcelorMittal Produits longs Canada](#) [Consulté le 19 février 2024]
- 26 Steelanol recycles carbon into sustainable, advanced bio-ethanol. [Home | Steelanol](#) [Consulté le 21 janvier 2024]
- 27 Siderwin. <https://www.siderwin-spire.eu/content/results> [Consulté le 21 janvier 2024]
- 28 Decarbonizing the Primary Aluminum Industry. Opportunities and Challenges. [Decarbonizing the Primary Aluminum Industry - Light Metal Age Magazine](#) [Consulté le 24 janvier 2024]
- 29 European Aluminium 2023. Net-Zero by 2050 : Science-Based Decarbonisation Pathways for the European Aluminium Industry. [23-11-14-Net-Zero-by-2050-Science-based-Decarbonisation-Pathways-for-the-European-Aluminium-Industry_FULL-REPORT.pdf](#) [Consulté le 24 janvier 2024]
- 30 Guo-tao Zhou et al. 2023. A clean two-stage Bayer process for achieving near-zero waste discharge from high-iron gibbsitic bauxite. [A clean two-stage Bayer process for achieving near-zero waste discharge from high-iron gibbsitic bauxite - ScienceDirect](#)
- 31 Mission Possible Partnership, 2021. Closing the Gap for Aluminium Emissions - Technologies to Accelerate Deep Decarbonization of Direct Emissions. <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2021/12/Closing-the-Gap-for-Aluminium-Emissions.pdf> [Consulté le 16 janvier 2024]
- 32 James Fernyhough, 2021. Alcoa to trial new alumina process that uses renewables instead of fossil fuels. <https://reneweconomy.com.au/alcoa-to-trial-new-alumina-process-that-uses-renewables-instead-of-fossil-fuels/> [Consulté le 16 janvier 2024]
- 33 Alcoa conçoit une raffinerie d'alumine de l'avenir. [Alcoa conçoit une raffinerie d'alumine de l'avenir](#) [Consulté le 21 janvier 2024]
- 34 Australian Renewable Energy Agency, 2022. Alcoa Renewable Powered Electric Calcination Pilot. <https://arena.gov.au/projects/alcoa-renewable-powered-electric-calcination-pilot/> [Consulté le 17 janvier 2024]
- 35 Sandra Benson et al. 2022. New Generation Anode Baking Furnace : a Breakthrough Technology. Increasing Productivity and Sustainability. [40th Conference and Exhibition ICSOBA 2022 - ICSOBA](#) [Consulté le 17 janvier 2024]
- 36 Belkacem Amara, Duygu Kocaefe, Yasar Kocaefe, Jules Côté & André Gilbert, 2023. Partial Replacement of Coke with Biocoke : Effect of Biocoke Production Temperature on Anode Quality. [Partial Replacement of Coke with Biocoke : Effect of Biocoke Production Temperature on Anode Quality | SpringerLink](#). [Consulté le 17 janvier 2024]
- 37 Agathe Tshipama, Vincent Goutière, Marie-Eve Pomerleau, 2023. Opportunities for Adding Recycled Content to Primary Aluminum Products. <https://www.mdpi.com/2673-4591/43/1/3> [Consulté le 17 janvier 2024]
- 38 Idem
- 39 Alcoa, 2022. Alcoa advances sustainably with recycled aluminum, produced using renewable energy. [Alcoa : Company : Company Story](#) [Consulté le 17 janvier 2024]
- 40 Alton Debereaux, 2019. Top New Technologies Revolutionizing Aluminum Smelting. https://www.researchgate.net/profile/Alton-Tabereaux/publication/331994306_Innovations_that_are_transforming_aluminum_smelting_today/links/62707d8eb1ad9f66c89c2ded/Innovations-that-are-transforming-aluminum-smelting-today.pdf [Consulté le 17 janvier 2024]
- 41 Ramil Hazanov, 2023. Towards a Sustainable Future in Aluminum Production : Environmental and Economic Benefits of Revolutionary Inert Anode Technology. <https://ppsms.umd.edu.my/wp-content/uploads/sites/51/2023/10/JSSM-VOLUME-18-NUMBER-10-OCTOBER-2023-Article-12-RESIZED.pdf> [Consulté le 17 janvier 2024]
- 42 Hydro invests in carbon capture company Verdax to eliminate emissions from aluminium production. [Hydro invests in carbon capture company Verdax to eliminate emissions from aluminium production](#) [Consulté le 1^{er} février 2024]
- 43 Hydro's HalZero technology reaches a new milestone. [Hydro's HalZero technology reaches a new milestone](#) [Consulté le 1^{er} février 2024]
- 44 Mission Possible Partnership, 2023. [Making Net Zero Concrete and Cement Possible. Making-Net-Zero-Concrete-and-Cement-Possible-Report.pdf](#) [missionpossiblepartnership.org] [Consulté le 18 janvier 2024]
- 45 Ciment Québec. [Projet Synergia. Synergia - Ciment Quebec](#) [Consulté le 24 janvier 2024]
- 46 Ibid 44 Mission Possible Partnership, 2023.

- 47 Leilac-2 Roadmap 2050, 2021. <https://www.leilac.com/wp-content/uploads/2022/09/LEILAC-Roadmap.pdf> (Consulté le 24 janvier 2024)
- 48 European Commission. JRC Technical Report. Decarbonisation Options for the Cement Industry. A. Marmier 2023. [JRC131246_01 \[2\].pdf](#) (Consulté le 24 janvier 2024)
- 49 Rui Han et al., 2022. Progress in reducing calcination reaction temperature of Calcium-Looping CO₂ capture technology: A critical review. [Progress in reducing calcination reaction temperature of Calcium-Looping CO₂ capture technology: A critical review - ScienceDirect](#). (Consulté le 31 janvier 2024)
- 50 Peter W. Hart. TAPPI Journal, 2020. Alternative "green" lime kiln fuels: Part II—Woody biomass, bio-oils, gasification, and hydrogen. [PDF] [Alternative "Green" Lime Kiln Fuels: Part II. Woody Biomass, Bio-Oils, Gasification, and Hydrogen \[researchgate.net\]](#) (Consulté le 31 janvier 2024)
- 51 CALIX. CO₂ Mitigation. Focus on Lime. [Special-Feature_lime_design4_v25.pdf \[calix.global\]](#) (Consulté le 31 janvier 2024)
- 52 L'Union des Producteurs de Chaux Calcique, 2023. Feuille de route de décarbonation 2030 - 2050. [feuille-de-route-chaux.pdf \[entreprises.gouv.fr\]](#) (Consulté le 31 janvier 2024)
- 53 FP Innovations, 2023. Le secteur forestier aide le Canada à atteindre son objectif de carboneutralité grâce à la décarbonisation des fours à chaux. <https://web.fpinnovations.ca/forest-sector-helps-canada-reach-net-zero-target-through-decarbonization-of-lime-kilns/> (Consulté le 18 janvier 2024)
- 54 A. Leshchinskaya, Microwave Wood Chip Treatment Use in Chemical Pulp Manufacturing <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/130715/Leshchinskaya%20-%20A.%20Leshchinskaya.%20MICROWAVE%20WOOD%20CHIP%20TREATMENT%20USE%20IN%20CHEMICAL%20PULP%20MANUFACTURIN....pdf?sequence=1> (Consulté le 18 janvier 2024)
- 55 Airlaid Technology from CAMPEN: Flexible, Efficient and Sustainable Production Solutions. [Airlaid - Machines & technology for airlaid production | CAMPEN \[campenmachinery.com\]](#) (Consulté le 31 janvier 2024)
- 56 Idem
- 57 Dylan D. Furszyfer Del Rio, 2022. Decarbonizing the pulp and paper industry: A critical and systematic review of sociotechnical developments and policy options. [Decarbonizing the pulp and paper industry: A critical and systematic review of sociotechnical developments and policy options \[sciencedirectassets.com\]](#) (Consulté le 31 janvier 2024)
- 58 European Heat Pump Association (EHPA) and the Confederation of the European Paper Industries (Cepi), 2023. Through Pumps to Pulp: Greening the Paper Industry's Heat. [Through pumps to pulp: greening the paper industry's heat - European Heat Pump Association \[ehpa.org\]](#) (Consulté le 1^{er} février 2024)
- 59 Fritz T.C. Röben et la. 2021. Decarbonizing copper production by power-to-hydrogen: A techno-economic analysis. [Decarbonizing copper production by power-to-hydrogen: A techno-economic analysis \[sciencedirectassets.com\]](#) (Consulté le 14 février 2024)
- 60 McKensy & Co. 2021. Tapping digital's full potential in pulp and paper process optimization. [Pulp and paper operations and digital technology | McKinsey](#) (Consulté le 1^{er} février 2024)
- 61 Flexible High-Temperature Heat Pump up to 200 °C and 1-8 MWth. [Product - Heaten - Heat pumps to decarbonise Industrial Heat](#) (Consulté le 9 février 2024)
- 62 Hydro-One, 2007. Guide d'amélioration du rendement énergétique des électrotechnologies. [CEATI Electrotechnology Guidebook \[hydroone.com\]](#) (Consulté le 11 février 2024)
- 63 Beyond Zero Emissions, 2021. Zero Carbon Industry Plan Electrifying Industry. <https://apo.org.au/node/270186> (Consulté le 11 février 2024)
- 64 ARENA, 2019. Renewable Energy Options for Industrial Process Heat, Appendices. [ARENA Process Heat](#) (Consulté le 11 février 2024)
- 65 Friedman et al., 2019. Low-Carbon Heat Solutions for Heavy Industry: Sources, Options, and Costs Today. <https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/low-carbon-heat-solutions-heavy-industry-sources-options-and-costs-today>. (Consulté le 10 février 2024)



CRITM

vecteur de transformation métallique

2900, ch. Quatre-Bourgeois, local 207
Québec (Québec) G1V 1Y4

info@critm.ca
critm.ca

PRIMA



Les matériaux pour avancer

505 boulevard de Maisonneuve Ouest, bureau 1050
Montréal (Québec) H3A 3C2

info@prima.ca
prima.ca