



LUND UNIVERSITY

Décarbonation stratégique de l'industrie sidérurgique canadienne

Une démarche axée sur les travailleurs pour réduire les émissions, augmenter la valeur ajoutée et renforcer les chaînes d'approvisionnement mondiales

Algers, Jonas; Bataille, Chris

2025

Document Version:

Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Algers, J., & Bataille, C. (2025). *Décarbonation stratégique de l'industrie sidérurgique canadienne: Une démarche axée sur les travailleurs pour réduire les émissions, augmenter la valeur ajoutée et renforcer les chaînes d'approvisionnement mondiales*. (EESS/IMES report series; No. 141). Miljö- och energisystem, LTH, Lunds universitet.

Total number of authors:

2

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00



Décarbonation stratégique de l'industrie sidérurgique canadienne

Une démarche axée sur les travailleurs pour réduire les émissions, augmenter la valeur ajoutée et renforcer les chaînes d'approvisionnement mondiales

JONAS ALGERS, LUND UNIVERSITY

DR. CHRIS BATAILLE, COLUMBIA UNIVERSITY CENTER ON GLOBAL ENERGY POLICY



Décarbonation stratégique de l'industrie sidérurgique canadienne

Une démarche axée sur les travailleurs pour réduire les
émissions, augmenter la valeur ajoutée et renforcer les
chaînes d'approvisionnement mondiales

Jonas Algers, Université de Lund

D^r Chris Bataille, Centre sur la politique énergétique mondiale de l'Université Columbia



LUND
UNIVERSITY

Études des systèmes environnementaux et énergétiques

UNIVERSITÉ DE LUND

Département des études des systèmes environnementaux et énergétiques

C. P. 118

SE-221 00 Lund, Suède

Téléphone (international) : +46 46-222 86 38

Télécopieur (international) : +46 46-222 86 44

Type de document : Rapport

Date de publication : 14/5/2025

Auteurs

Jonas Algers est un candidat au doctorat du département des études des systèmes environnementaux et énergétiques de l'Université de Lund, où il étudie l'économie politique de la décarbonation de l'industrie de l'acier.

D^r Chris Bataille est chercheur, modélisateur de systèmes énergétiques et économiques, analyste, auteur, gestionnaire de projets, conseiller en gestion ainsi que partenaire fondateur et auxiliaire de recherche du Centre sur la politique énergétique mondiale de l'Université Columbia. Il est l'un des principaux auteurs du chapitre sur l'industrie, du résumé technique et du résumé à l'intention des décideurs dans le cadre de la contribution du Groupe de travail III au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Titre et sous-titre

Décarbonation stratégique de l'industrie sidérurgique canadienne : Une démarche axée sur les travailleurs pour réduire les émissions, augmenter la valeur ajoutée et renforcer les chaînes d'approvisionnement mondiales

Le présent rapport a été commandé par SteelWatch et financé par la Fondation familiale Trottier.



Mots-clés

Acier, fer, charbon métallurgique, transition, hydrogène, énergie renouvelable, émissions, travailleurs.

Nombre de pages : 69

Langue : Français

NRRI : LUTFD2/TFEM—25/3132--SE + (1- 69)

ISSN : 1102-3651

ISBN : 978-91-86961-67-1

Classification du département

IMES/EESS Rapport n° 141

Imprimé en Suède par Media-Tryck, Université de Lund

Lund 2025

Note : L'emploi du masculin dans le document vise à alléger le texte.

Table des matières

1.	Préambule	5
2.	Résumé.....	7
1	Introduction : La production d'acier, de fer et de charbon métallurgique au Canada..	11
2	Contexte technologique et mondial	14
2.1	Un nouveau potentiel de décarbonation.....	14
2.2	La décarbonation de l'industrie sidérurgique à l'heure des rivalités géopolitiques	15
2.3	Une transition axée sur les travailleurs	16
2.4	Technologies de production d'acier à faibles émissions	16
2.5	Hydrogène bleu et vert.....	19
2.6	La compétitivité de l'acier à faibles émissions de carbone.....	20
3	Exportations de fer à faibles émissions de carbone : un potentiel inexploité	22
3.1	État actuel de l'industrie de l'extraction du minerai de fer	22
3.2	Évolution des marchés d'exportation	24
3.3	Adapter l'offre à la demande	26
3.4	Le potentiel du Canada	27
3.5	L'énergie renouvelable, la clé d'une production à valeur ajoutée.....	29
3.6	Relations avec les Premières Nations.....	30
3.7	Les atouts et les défis de la production canadienne de HBI vert.....	32
4	La laborieuse transition de l'industrie de l'acier.....	35
4.1	État actuel de l'industrie de l'acier.....	35
4.2	Décarbonation : progrès et défis	37
4.2.1	Stelco	38
4.2.2	ArcelorMittal Dofasco et Contrecoeur	39
4.3	Comment atteindre la carboneutralité	40
5	Charbon métallurgique : le Canada leader d'un secteur en déclin	42
5.1	Marchés d'exportation et perspectives de la demande	44
6	La décarbonation comme processus de transition vers une nouvelle chaîne de valeur sidérurgique	46
6.1	Comparaison de la transition en Suède et au Canada.....	46
6.2	Répercussions de la transition de l'industrie sidérurgique sur le marché du travail ...	51
7	Conclusion	54
1.	Annexe I	55
2.	Annexe II.....	56
8	Bibliographie.....	61

1. Préambule

La lutte contre les changements climatiques est au cœur des priorités des Canadiens. Les conditions météorologiques extrêmes et les feux de forêt qu’a connus le Canada ces dernières années sont des preuves incontestables que le réchauffement planétaire s’aggrave de façon incontrôlée. Plus nous attendrons pour agir, plus ces phénomènes météorologiques se multiplieront et s’intensifieront. Il n’est donc pas surprenant qu’une majorité de Canadiens, particulièrement en Ontario, au Québec et en Colombie-Britannique, sont d’accord pour dire que le gouvernement manquera à ses obligations envers la population s’il n’agit pas sans plus tarder pour le climat (Simpson, 2023).

En tant que partie à l’Accord de Paris, le Canada est particulièrement ambitieux dans la lutte contre les changements climatiques. En 2021, la *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité* a été adoptée inscrite dans la législation, inscrivant dans la législation l’intention du gouvernement d’atteindre la carboneutralité d’ici 2050, fixant des cibles quinquennales de réduction des émissions, et publiant des plans pour y parvenir (Canada.ca, 2024a). La transition vers la carboneutralité représente un défi de taille : il faut étudier soigneusement les principales opportunités et les risques de façon à opérer un changement efficace, rapide et politiquement viable.

Le présent rapport est né de l’idée qu’il est possible de décarboner l’industrie sidérurgique canadienne d’une manière qui répond à de nombreux critères essentiels comme la réduction des émissions, la création d’emplois bien rémunérés et le renforcement des chaînes d’approvisionnement mondiales vertes. Dans le secteur sidérurgique, le Canada joue déjà un rôle international de premier plan grâce à ses ressources naturelles et aux avantages comparatifs qu’elles lui procurent. Cela lui donne aussi l’occasion de contribuer à la réduction substantielle de ses propres émissions et de celles de pays étrangers. Enfin, le secteur sidérurgique est une importante source d’emplois qui permet à des personnes de différents niveaux de scolarité de gagner un salaire leur donnant les moyens de faire vivre leur famille.

Ce rapport a pour but d’analyser la capacité du Canada à opérer une transition vers une industrie sidérurgique peu émettrice de gaz à effet de serre. Tout d’abord, il explique le processus de production d’acier et les récentes avancées technologiques qui ont rendu possible la transition vers l’acier vert. Il décrit l’évolution du contexte mondial, qui présente à la fois des risques et des avantages pour la transition, puis analyse la possibilité d’effectuer une transition dans le secteur amont de la production du fer. Comme le Canada est un grand exportateur de minerai de fer, ce secteur pourrait réduire considérablement les émissions et accroître les revenus d’exportation. Sur le plan de la faisabilité, le rapport évalue la possibilité d’une transition de l’industrie sidérurgique canadienne en faisant des comparaisons avec la Suède, où les processus de décarbonation sont plus avancés, et en étudiant les répercussions d’une telle transition chez les travailleurs. L’analyse porte également sur le secteur canadien du charbon métallurgique, fournisseur de l’industrie mondiale de l’acier, et sur les risques

associés à la diminution attendue de la demande. Enfin, le rapport se penche sur la décarbonation comme processus de transition vers une nouvelle chaîne de valeur sidérurgique.

En exploitant les possibilités qui s'offrent à lui, le Canada pourrait accélérer l'innovation et le développement industriel tout en réduisant ses émissions et en aidant ses partenaires commerciaux à faire de même. Le Canada pourrait également tirer profit des avantages concurrentiels que lui procurent ses abondantes réserves de minerai de fer à haute teneur en fer, ses importantes ressources énergétiques renouvelables et ses infrastructures modernes afin de présenter des technologies propres et d'en démontrer la viabilité commerciale à grande échelle, permettant ainsi à d'autres pays de lui emboîter le pas. Un tel plan de transition pourrait permettre de réduire considérablement les émissions, d'augmenter la valeur ajoutée au Canada et d'améliorer les perspectives d'emploi dans l'industrie.

2. Résumé

Contexte

Dans le monde, les industries de l'acier, du fer et du charbon métallurgique produisent beaucoup d'émissions de gaz à effet de serre. Même si l'industrie canadienne de l'acier est relativement moins émettrice que celles d'autres pays, elle génère néanmoins 2 % des émissions nationales. Si l'on tient compte des émissions au Canada et à l'étranger résultant de la production d'acier à partir du minerai de fer canadien, le total s'élève à environ 105 mégatonnes (Mt) de CO₂. Cela représente 16 % des émissions du Canada. Pour réaliser son objectif d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050, le gouvernement canadien devra réduire rapidement les émissions nationales. Le reste de la planète devra également renoncer à l'utilisation des énergies fossiles, ce qui offrira au Canada, grand exportateur de fer et de charbon métallurgique, une occasion unique de repenser sa contribution à l'économie mondiale.

Au Canada, l'industrie de l'acier occupe une place prépondérante et peut être décarbonée en même temps que l'industrie du fer. C'est toutefois dans ses activités amont de production de fer et d'extraction de charbon métallurgique que le Canada présente le plus grand potentiel de contribution à la réduction des émissions de l'industrie mondiale de l'acier. Le Canada produit quelque 13 millions de tonnes d'acier par an, dont environ la moitié est à forte intensité d'émissions et principalement fabriquée à partir de charbon. En revanche, il possède nettement plus de gisements de minerai de fer que ce qu'il faut pour répondre aux besoins de son industrie, de sorte que la majorité de ce minerai est exportée. En 2023, le Canada a exporté plus de 44 millions de tonnes de minerai de fer, ce qui en fait l'un des principaux exportateurs mondiaux. Ce minerai pourrait être exporté comme du fer « vert » sous forme de fer briqueté à chaud (HBI), ce qui contribuerait à la décarbonation à l'échelle mondiale. Le Canada exporte également d'importantes quantités de charbon métallurgique, lesquelles ont atteint 28 millions de tonnes en 2022. Ces exportations alimentent la production mondiale d'acier à base de charbon, qui produit beaucoup d'émissions.

Défis

Au moment de la rédaction du présent rapport, plusieurs aciéries à forte intensité d'émissions n'avaient pas encore de plan de transition. Citons notamment Stelco et ArcelorMittal Contrecoeur, qui n'ont annoncé aucune mesure visant à réduire leurs émissions par rapport aux niveaux actuels ou à atteindre les niveaux d'émissions quasi nulles qui sont nécessaires pour respecter l'Accord de Paris. Bien que le site de Contrecoeur présente un niveau d'émissions inférieur à celui d'autres aciéries, on ignore encore comment ce site et celui de Stelco atteindront la carboneutralité d'ici 2050, un objectif que poursuivent à la fois le gouvernement et l'Association canadienne des producteurs d'acier (ACPA).

Les plans de transition des aciéries Algoma et ArcelorMittal Dofasco accusent des retards importants ou manquent de clarté. ArcelorMittal Dofasco, la plus grande aciérie du Canada,

a reçu une subvention du gouvernement fédéral pour financer sa transition. Quelle que soit la technologie utilisée, la décarbonation du site d'ArcelorMittal Dofasco sera un test très révélateur pour l'industrie canadienne de l'acier et le gouvernement, puisque ce plan de transition est plus complexe que celui en place au site d'Algoma.

Il reste difficile de savoir si ces plans de transition permettront d'atteindre les niveaux d'émissions quasi nulles nécessaires pour respecter l'Accord de Paris. Ainsi, le plan de transition du site d'ArcelorMittal Dofasco prévoit notamment de passer du charbon au gaz fossile. Une telle transition réduirait effectivement les émissions par rapport aux niveaux actuels, mais ce ne serait pas suffisant pour atteindre des niveaux d'émissions quasi nulles tels que définis par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et nécessaires pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris.

Plusieurs plans de transition prévoient des suppressions d'emplois dans l'ensemble des sites, faisant porter aux travailleurs une grande partie du fardeau de la transition vers une industrie conforme à l'Accord de Paris. La viabilité politique de la transition pourrait en être compromise, à moins d'une reconversion massive de la main-d'œuvre ou de nouvelles perspectives d'emploi. Bien que toute transformation industrielle majeure puisse provoquer d'importants changements géographiques au chapitre de l'emploi, il faut tenir compte des travailleurs et ne pas les abandonner dans la transition. Par conséquent, il est essentiel que la transition de l'industrie de l'acier ne se limite pas à une simple réduction des émissions et qu'elle passe par un plan global visant à accroître les possibilités d'emploi dans de nouveaux secteurs.

Le Canada joue un rôle de premier plan dans l'industrie en déclin du charbon métallurgique. Acteur majeur sur le marché mondial du charbon métallurgique, il compte plusieurs mines importantes en Colombie-Britannique et en Alberta. Cependant, tous les scénarios présentés dans les Perspectives énergétiques mondiales de l'AIE prévoient une baisse des revenus d'exportation, des emplois et des bénéfices dans ce secteur; reste à savoir à quelle vitesse elle se produira. Il y a deux façons de faire face à cette réalité : accepter passivement le déclin ou se retirer du marché avant qu'il ne soit trop tard.

Opportunités à saisir

Cinq facteurs sont particulièrement déterminants pour une transition ambitieuse de l'industrie canadienne de l'acier : 1) des ressources riches en minerai de fer; 2) un fort potentiel d'expansion de la production d'énergie éolienne à proximité des ressources en minerai de fer; 3) de solides infrastructures d'énergie et de transport; 4) une main-d'œuvre hautement qualifiée; 5) un large appui politique en faveur de la carboneutralité d'ici 2050.

Dans un contexte de tensions géopolitiques croissantes, l'abandon des combustibles fossiles est l'occasion pour le Canada de diversifier ses exportations et de renforcer ses chaînes d'approvisionnement. En adoptant une stratégie globale de décarbonation de son industrie sidérurgique, le Canada pourrait réduire ses émissions, augmenter la valeur ajoutée et créer des emplois essentiels. Ce rapport estime que le Canada pourrait se doter d'une industrie compétitive de production de fer à partir d'hydrogène vert, ce qui augmenterait la valeur ajoutée annuelle de 25 milliards de dollars canadiens et créerait plus de 14 000 emplois (scénario poussé à son comble), sans compter les emplois supplémentaires dans les secteurs

de l'énergie renouvelable et de l'électricité. Une telle transition pourrait entraîner une augmentation nette des emplois et de la valeur ajoutée tout en réduisant les émissions tant au pays qu'à l'étranger.

Cette transition est possible grâce à l'adoption de la technologie de réduction directe du fer dans le processus de production d'acier. Cette technologie permet de réduire les émissions et de séparer les principaux maillons de la chaîne de production. Plutôt que de transporter le minerai de fer et le charbon à un site où les intrants sont transformés en fer puis en acier, on peut fabriquer du fer à proximité des ressources en fer et en énergie renouvelable et ensuite l'expédier aux aciéries. Fort de ses abondantes ressources en fer et en énergie renouvelable, le Canada pourrait devenir un important producteur et exportateur de HBI vert, ce qui permettrait de réduire les émissions, de créer des emplois et de renforcer les chaînes d'approvisionnement mondiales vertes.

Le Canada produit de grandes quantités de minerai de fer de haute qualité. Plusieurs entreprises canadiennes investissent déjà dans la transformation du minerai de fer extrait de leurs mines afin de l'utiliser pour la réduction directe, l'une des méthodes de production de fer moins émettrices de CO₂. Certains exploitants de mines ne font pas encore de tels investissements, mais leur minerai de fer est à haute teneur. Il faudra développer la production de minerai de fer de haute qualité pour délaisser le mode traditionnel de production de fer à l'aide de hauts fourneaux au profit de la réduction directe.

L'essentiel des ressources en minerai de fer du Canada se trouve dans l'est du pays, où la densité de population est faible et où les vents atteignent une bonne vitesse, ce qui en fait une région favorable à l'expansion de la production d'énergie éolienne. La région compte également d'importantes ressources hydroélectriques qui peuvent avantageusement compléter une source d'énergie renouvelable intermittente. À cet égard, le Canada ressemble à la Suède, où plusieurs grandes entreprises sidérurgiques ont mis en œuvre des stratégies ambitieuses pour décarboner l'ensemble de leur production à l'aide de ressources énergétiques renouvelables à faible coût.

Le Québec possède un réseau électrique solide, construit de manière à acheminer l'hydroélectricité du Nord aux centres de population du Sud. Ce réseau pourrait constituer un atout majeur si des usines de réduction du fer à forte consommation d'énergie s'établissaient dans la région. En outre, il y a déjà des voies ferrées, nécessaires au transport du minerai de fer jusqu'à la côte, et des ports qui pourraient servir à l'expédition de fer vert. Ces infrastructures permettraient d'effectuer rapidement la transition et d'établir le Québec et le Canada comme des fournisseurs fiables de minerai de fer vert.

La plupart des mines de fer du pays se situent au Québec et au Labrador, des régions qui possèdent une tradition industrielle bien ancrée et une main-d'œuvre qualifiée. Si les travailleurs ont souvent été désavantagés par les transitions industrielles, la transition vers l'exportation de fer vert mobiliserait de nombreux ouvriers qualifiés pour construire les installations énergétiques et industrielles nécessaires ainsi que pour faire fonctionner les électrolyseurs et les fours de réduction directe. Une attention spéciale devra être accordée à la façon dont le marché du travail pourra évoluer pour suivre ce nouveau développement industriel.

Perspectives

Bien que ce rapport n'ait pas pour objectif de formuler des recommandations en matière de politiques, il ne peut omettre deux enjeux prioritaires : l'orientation du marché mondial vers la production d'acier à faibles émissions de carbone, et la gestion des répercussions de la transition de l'industrie sidérurgique dans différentes régions du Canada.

Des efforts diplomatiques devront probablement être déployés pour garantir la demande en produits d'acier et de fer verts. Comme les autres grands exportateurs de minerai de fer qui prévoient de vendre du fer vert à l'étranger (p. ex. l'Australie, la Suède et l'Afrique du Sud), le Canada a la capacité de réduire les émissions de ses partenaires commerciaux, de renforcer les chaînes d'approvisionnement mondiales et de réduire les besoins en développement des sources d'énergie renouvelable. Ces pays pourraient former un important groupe de négociation dans le cadre des initiatives internationales lancées pour coordonner la décarbonation industrielle, comme le Club climat, le Leadership Group for Industry Transition (LeadIT), l'Industrial Deep Decarbonisation Initiative et les forums spécialisés tels que le Comité de l'acier de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). Cela dit, des efforts diplomatiques conjoints visant à proposer les ressources de ces pays à des acheteurs potentiels seraient encore plus efficaces.

La transition de l'industrie sidérurgique ne touchera pas toutes les régions du Canada de la même façon. Il est probable que la demande de main-d'œuvre diminue en Ontario, où les grandes aciéries délaisseront les sites intégrés pour des fours à arc électrique plus simples à opérer. Parallèlement, la demande en charbon métallurgique diminuera dans l'ouest du pays, alors que des débouchés à l'exportation de fer vert seront créés principalement dans l'est. Compte tenu de cette possible répartition inégale des risques et des avantages, la transition pourrait se révéler complexe sur le plan politique; la population des régions « perdantes » pourrait ne pas être en faveur du développement des régions « gagnantes ». Le gouvernement fédéral serait plus que jamais forcé à étudier les façons d'assurer la transition vers la carboneutralité dans l'ensemble du pays.

Le Canada est mieux placé que bien des pays pour transformer rapidement son industrie sidérurgique. Grâce à ses abondantes réserves de minerai de fer de haute qualité, à ses ressources renouvelables fiables, à ses infrastructures solides et à sa main-d'œuvre qualifiée, il est en bonne position pour transformer le minerai de fer utilisé dans la production d'acier au pays comme à l'étranger. Il est possible de réduire progressivement les émissions grâce à des investissements dans les meilleures technologies disponibles. Ainsi, l'industrie sidérurgique pourrait prouver que la décarbonation est possible et inspirer d'autres industries à forte intensité d'émissions à trouver des moyens comparables d'atteindre l'objectif canadien de carboneutralité d'ici 2050.

1 Introduction : La production d'acier, de fer et de charbon métallurgique au Canada

L'industrie mondiale de l'acier a un fort potentiel de réduction des émissions. Actuellement, elle génère 11 % des émissions mondiales de CO₂ dans la chaîne d'approvisionnement (AIE, 2019), ce qui la place au haut du classement des secteurs industriels polluants. Au Canada, 2 % de toutes les émissions proviennent de l'industrie de l'acier (Khan et coll., 2023), qui contribue au produit intérieur brut (PIB) à hauteur de quelque 4,2 milliards de dollars canadiens (ACPA, 2024a). En outre, l'industrie emploie directement 23 000 travailleurs et soutient indirectement plus de 100 000 emplois (ACPA, 2024b).

Le Canada compte huit grandes aciéries, dont la plupart se situent en Ontario et au Québec. Dans le présent rapport, nous nous concentrons sur les grandes aciéries produisant le plus d'émissions, à savoir ArcelorMittal Dofasco, Algoma et Stelco en Ontario, de même qu'ArcelorMittal Contrecoeur au Québec. Toutes les quatre figurent dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Aciéries produisant le plus d'émissions au Canada

Acierie	Emplacement	Capacité de production (TMPA)	Émissions (millions de tonnes)	Effectif
ArcelorMittal Dofasco	Hamilton, Ontario	4,05	4,7	+ de 5 000
Algoma	Sault Ste. Marie, Ontario	3,2	4	2 700
Stelco	Nanticoke, Ontario	2,5	3,5	1 370
ArcelorMittal Contrecoeur	Contrecoeur, Québec	2,4	1,1	1 900

Habituellement, la taille d'une aciérie est déterminée par sa capacité de production annuelle. La plus grande aciérie au Canada est ArcelorMittal Dofasco, à Hamilton, en Ontario. Sa capacité de production actuelle est de 4,05 millions de tonnes métriques par an (TMPA) (Global Energy Monitor, 2024). Elle produit plus de 4,7 millions de tonnes de CO₂ par an (Crawley, 2022) et prévoit de réduire ses émissions. La deuxième plus grande aciérie est celle d'Algoma, à Sault Ste. Marie, en Ontario. Sa capacité de production est de 3,2 TMPA et devrait passer à 3,7 TMPA dans le cadre d'une transition en cours (Global Energy Monitor,

2024). Le site émet plus de 4 millions de tonnes de CO₂ par an (Crawley, 2022). La troisième plus grande aciérie est Stelco, à Nanticoke (en Ontario), sur les rives du lac Érié, avec une capacité de production de 2,5 TMPA (Global Energy Monitor, 2024). Elle émet plus de 3,5 millions de tonnes de CO₂ par an (Crawley, 2022). Enfin, la quatrième plus grande aciérie au Canada est ArcelorMittal Contrecoeur, au Québec. Le site a une capacité de production de 2,4 TMPA (Global Energy Monitor, 2024) et a émis environ 1,1 million de tonnes de gaz à effet de serre en 2022 (ArcelorMittal, 2023; Arsenault, 2022). Même si sa capacité de production est comparable à celle de Stelco, ses émissions sont considérablement inférieures puisqu'elle utilise une technologie différente et du gaz fossile. Des explications détaillées figurent plus loin dans ce rapport. Ensemble, ces quatre aciéries emploient environ 11 000 travailleurs.

L'industrie moderne de l'acier dépend du fer et du charbon; elle n'est qu'un des maillons interdépendants d'une grande chaîne d'approvisionnement qui sera fortement touchée par toute transition du secteur de l'acier. Soulignons que le Canada est un important producteur et exportateur de minerai de fer et de charbon métallurgique, tous deux utilisés dans le processus traditionnel de production d'acier. Les exportations de minerai de fer et de charbon entraînent des émissions élevées à l'extérieur du pays. La demande pour ces ressources changera considérablement à mesure que le reste du monde délaisse la production d'acier à base de matériaux fossiles.

Le Canada est un grand producteur de minerai de fer avec ses 69 millions de tonnes extraites en 2022 (Ressources naturelles Canada, 2024b), contribuant au PIB à hauteur de 5 milliards de dollars canadiens (Ressources naturelles Canada, 2024d). La plupart des mines sont situées dans la fosse du Labrador, une formation géologique qui longe la frontière entre le Québec et le Labrador, dans l'est du pays. On y extrait 92 % du minerai de fer canadien. Plus au nord, l'île de Baffin compte également une mine de fer. L'exploitation minière est une importante source d'emplois dans les régions éloignées du Canada. Selon les entreprises elles-mêmes, le secteur emploie plus de 9 000 travailleurs (ArcelorMittal, 2024a; Champion Iron, 2024b; Rio Tinto, 2024; Tacora Resources, 2024; Wat, 2024). Les mines sont recensées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2 : Mines de fer au Canada

Mine	Capacité de production (TMPA)	Emplacement	Propriétaire
Lac Fire	4	Québec	ArcelorMittal
Mont-Wright	22	Québec	ArcelorMittal
Lac Bloom	15	Labrador	Champion Iron
Scully	4	Labrador	Tacora Resources
Lac Carol	17	Labrador	Rio Tinto
Région de Menihek	4	Labrador et Québec	Tata Steel Minerals Canada
Rivière Mary	6	Île de Baffin	Baffinland Iron Mines Corporation

L'industrie du charbon métallurgique est une importante industrie extractive fournissant le secteur sidérurgique. Plus de 27 millions de tonnes de charbon métallurgique ont été extraites au Canada en 2022 (Ressources naturelles Canada, 2024a) dans les mines de l'est de la Colombie-Britannique et de l'ouest de l'Alberta. L'exploitation du charbon, y compris du charbon thermique, contribue au PIB du Canada à hauteur d'environ 12,5 milliards de dollars canadiens, ce qui représente 17 % de la valeur des minéraux extraits (Ressources naturelles Canada, 2024c). On compte actuellement 5 400 travailleurs dans le secteur de l'exploitation du charbon métallurgique dans les régions reculées des Rocheuses. Les mines sont recensées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3 : Mines de charbon métallurgique au Canada

Mine	Emplacement	Propriétaire	Capacité de production (TMPA)
Willow Creek	Colombie-Britannique	Conuma Coal Resources Limited	5
Brule	Colombie-Britannique	Conuma Coal Resources Limited	
Wolverine	Colombie-Britannique	Conuma Coal Resources Limited	
Grande Cache	Alberta	CST Canada Coal Limited	1,3
Fording River	Colombie-Britannique	Glencore	26
Greenhills	Colombie-Britannique	Glencore	
Line Creek	Colombie-Britannique	Glencore	
Elkview	Colombie-Britannique	Glencore	

La transition mondiale de l'industrie sidérurgique aura de lourdes répercussions sur la valeur de ces mines, dans un contexte où la demande en charbon métallurgique diminue à mesure que l'industrie de l'acier délaisse la production à base de charbon. Une stratégie de sortie s'impose donc pour éviter que l'abandon du charbon n'entraîne des préjudices sociaux et économiques pour les communautés touchées. Par ailleurs, le secteur du fer a un potentiel de croissance considérable. Les grandes quantités de minerai de fer et d'énergie renouvelable produites au Canada lui procurent un avantage de taille alors que l'industrie mondiale de l'acier délaisse la production à base de charbon au profit d'une production à faibles émissions de carbone. Des explications détaillées figurent plus loin dans ce rapport. Cependant, pour bien mesurer ce potentiel, il importe d'abord de présenter les technologies pouvant servir à la production d'acier à faibles émissions de carbone ainsi que le contexte mondial dans lequel se déroule la transition de l'industrie sidérurgique canadienne.

2 Contexte technologique et mondial

2.1 Un nouveau potentiel de décarbonation

Grâce à de récents progrès, le secteur sidérurgique, auparavant considéré comme difficile à décarboner, présente aujourd'hui un réel potentiel de décarbonation. En effet, l'industrie de l'acier entre dans une nouvelle ère (AIE, 2019, 2023b; Kupzok et Nahm, 2024; Vogl et coll., 2018).

La technique des hauts fourneaux et du convertisseur basique à oxygène (HF/CBO) est le mode traditionnel de production d'acier et il est fortement émetteur de CO₂. D'abord, le minerai de fer et le charbon sont extraits et transformés respectivement en billes et en coke. Ensuite, ces deux ressources sont placées dans des hauts fourneaux pour réduire le minerai de fer en fer. Parmi les étapes du processus traditionnel de production d'acier, celle-ci est de loin celle qui consomme le plus d'énergie et génère le plus d'émissions. Par la suite, un convertisseur basique à oxygène transforme ce fer en acier, dont la teneur en carbone est fixée précisément (entre 0,01 % et 2 %). Environ 70 % de l'acier dans le monde est produit à l'aide de cette méthode (AIE, 2019), qui génère près de trois tonnes d'émissions de CO₂, y compris des émissions indirectes, par tonne d'acier¹ (AIE, 2022).

La production d'acier à base de ferraille (aussi appelée « production d'acier secondaire ») est une méthode utilisée depuis longtemps. Ce processus consiste à fondre de la ferraille, qui possède déjà (ou presque) les propriétés chimiques voulues, dans un four à arc électrique (FAE) pouvant être alimenté par une énergie propre et qui produit donc peu d'émissions. Toutefois, en raison de l'offre limitée de ferraille et de sa répartition géographique inégale, de même que de la qualité moindre (jusqu'à maintenant) de l'acier fabriqué à partir de ferraille, la production d'acier primaire restera indispensable. Par conséquent, le principal défi de l'industrie sidérurgique consiste à trouver une méthode qui permet de produire de l'acier primaire en générant peu d'émissions.

De nouvelles technologies de production d'acier à faibles émissions de carbone rendent maintenant possible la décarbonation rapide de l'industrie. L'utilisation d'hydrogène vert en remplacement du charbon permet de réduire considérablement les émissions générées pour les faire passer à 53 kg par tonne d'acier (Vogl et coll., 2018). Ce processus s'effectue dans un four de réduction directe qui transforme le minerai de fer en fer de réduction directe (FRD). Ce dernier est ensuite transformé en acier dans un FAE à très faibles émissions.

¹ Ce chiffre comprend les émissions provenant des combustibles fossiles utilisés pour l'agglomération du minerai de fer et la production de fer, de la production d'agents de réduction, de la chaux employée comme fondant, des électrodes, des dégagements gazeux, de l'électricité importée, de la chaleur et de l'hydrogène, de même que de l'approvisionnement en combustibles fossiles et en matières premières. Les émissions produites par l'approvisionnement en combustibles fossiles proviennent de l'extraction, du traitement et du transport du charbon, du pétrole et du gaz fossile, ainsi que du méthane et du brûlage à la torche.

Plusieurs projets d'acier vert dans le monde qui prévoient d'utiliser cette technologie à l'échelle commerciale devraient commencer à produire autour de 2026 (Vogl et coll., 2023), étant donné qu'il s'agit de la technologie la plus susceptible de réduire considérablement les émissions conformément aux échéanciers de l'Accord de Paris.

2.2 La décarbonation de l'industrie sidérurgique à l'heure des rivalités géopolitiques

La sidérurgie est un secteur en amont d'importance qui produit une matière d'usage courant dans l'ensemble des secteurs en aval et dont la valeur stratégique est largement reconnue. Pour les pays producteurs d'acier, délaissier le charbon importé au profit de sources d'énergie renouvelable locales devient de plus en plus attractif.

Toutefois, la transition de l'industrie sidérurgique se produit à un moment où les rivalités géopolitiques et la concurrence économique sont en hausse. La croissance de la production industrielle en Chine est devenue une préoccupation majeure pour les décideurs politiques, tant à Ottawa qu'à Washington ou à Bruxelles, et l'une des priorités consiste à s'assurer que l'industrie peut se décarboner tout en demeurant concurrentielle. À l'heure actuelle, la Chine domine la production mondiale d'acier avec environ 54 % de tout l'acier produit dans le monde, loin devant l'Inde (7 %). Le Canada, quant à lui, produit 0,6 % de l'acier mondial (worldsteel, 2023). La Chine domine également l'offre de matières premières critiques et la production des principales technologies à faibles émissions de carbone nécessaires à la transition écologique (AIE, 2023a).

Parallèlement, l'Union européenne (UE) a introduit son mécanisme d'ajustement carbone aux frontières, lequel impose une taxe sur les importations d'acier, de ciment, d'aluminium, d'hydrogène, d'électricité et, à terme, de toute marchandise à forte intensité d'émissions, ce qui aura une incidence notable sur les chaînes d'approvisionnement mondiales en acier. Les États-Unis ont mis en place de grands ensembles de mesures législatives, comme l'*Inflation Reduction Act* (loi sur la réduction de l'inflation), qui appuie les investissements dans la production à faibles émissions. Washington et Bruxelles ont tenté de négocier un accord mondial sur l'acier et l'aluminium durables qui prévoit la création d'un groupe d'États affinitaires pour promouvoir le développement d'industries plus propres et lutter contre la surcapacité mondiale de production à forte intensité d'émissions. Avant les élections aux États-Unis, la Maison-Blanche avait annoncé qu'elle avait mis sur pied une nouvelle équipe chargée d'étudier la double question du climat et du commerce (Podesta, 2024). L'administration Trump accorde une grande attention à l'enjeu du commerce et augmentera probablement les tarifs.

Globalement, la décarbonation de l'industrie en général, et du secteur de l'acier en particulier (en raison de l'intensité des échanges internationaux), sera largement influencée par les tensions géopolitiques actuelles.

2.3 Une transition axée sur les travailleurs

La transition de l'industrie sidérurgique aura une incidence directe sur la vie de dizaines de milliers de personnes. Le secteur fournit des emplois bien rémunérés à un grand nombre de travailleurs, avec ou sans diplôme collégial ou universitaire. Au Canada, il emploie directement 23 000 travailleurs et soutient indirectement 100 000 emplois (ACPA, 2024). Les secteurs des mines de fer et des mines de charbon métallurgique emploient plusieurs milliers de travailleurs supplémentaires à l'échelle du pays et jouent souvent un rôle essentiel dans les communautés locales des régions éloignées.

L'histoire récente montre que toute transition doit être axée sur les travailleurs et les communautés locales pour être politiquement viable. Si une population croit que la désindustrialisation lui a nui par le passé et que les politiques élaborées dans une capitale lointaine au nom d'un bien commun abstrait lui seront défavorables, il est peu probable qu'elle considérera la décarbonation comme lui étant avantageuse (voir p. ex. Breetz et coll., 2018; Meckling et Karplus, 2023; Meckling et coll., 2015; Voeten, 2024 pour une analyse des dynamiques politiques de la décarbonation). Dans ce contexte, la transition risque de favoriser le climat scepticisme.

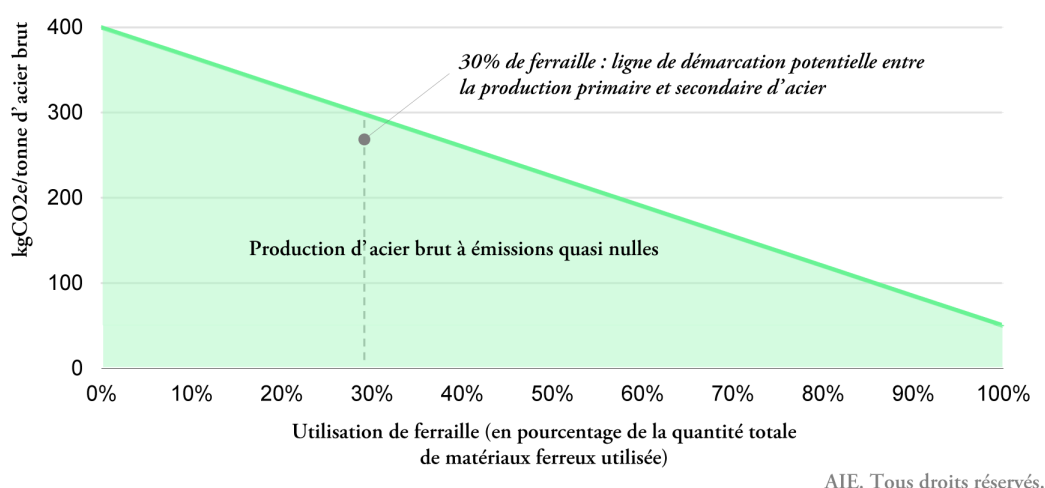
Cela dit, la transition vers la carboneutralité est une tâche titanesque qui ne peut s'accomplir que si les travailleurs sont en mesure de construire les infrastructures, les installations industrielles et les technologies nécessaires pour remplacer le système énergétique mondial actuel basé sur les combustibles fossiles. Le succès de la transition repose sur les travailleurs. En planifiant avec soin la transition vers une nouvelle industrie sidérurgique peu émettrice de CO₂ plutôt qu'en fermant des sites ou en délocalisant le travail et les émissions, il est possible d'offrir des débouchés aux travailleurs partout au Canada.

La transition de l'industrie sidérurgique pourrait créer des emplois au Canada grâce à une hausse de la production de fer vert. En tirant profit des avantages concurrentiels d'une main-d'œuvre canadienne déjà qualifiée et organisée, de l'expertise et du savoir-faire présents sur les sites industriels ainsi que des infrastructures bien établies partout au pays, les décideurs politiques et les entreprises peuvent rendre la décarbonation de l'industrie sidérurgique canadienne intéressante aux yeux des travailleurs et des communautés touchés. Il s'agit là d'une condition essentielle pour assurer une transition rapide et politiquement viable.

2.4 Technologies de production d'acier à faibles émissions

En 2022, l'AIE a publié le rapport *Achieving Net Zero Heavy Industry Sectors in G7 Members* (en anglais seulement), qui visait à conseiller et à orienter les pays membres du G7 dans leur démarche vers la carboneutralité. Ce rapport présente une comparaison des modes de production d'acier et de leurs niveaux moyens d'émissions à l'échelle mondiale, de même qu'une comparaison avec les niveaux d'émissions quasi nulles possibles. Les niveaux d'émissions quasi nulles tels que définis dans le rapport sont les niveaux atteignables avec les technologies connues, mais le rapport reconnaît qu'une production sans émissions est difficile sur le plan technique ou économiquement non viable.

Selon la définition de l'AIE, l'acier à émissions quasi nulles génère 400 kg d'équivalent CO₂ par tonne d'acier primaire produit entièrement à partir de minerai de fer, et ce seuil diminue progressivement pour atteindre 50 kg d'équivalent CO₂ par tonne d'acier à mesure que l'apport en ferraille augmente pour atteindre 100 %². En comparaison, la moyenne mondiale des émissions générées par le mode HF/CBO est de 2 945 kg d'équivalent CO₂ par tonne d'acier le long de la chaîne d'approvisionnement. Le Canada est avantageusement positionné pour atteindre une production à émissions presque nulles, étant donné que sa production d'électricité génère très peu d'émissions par rapport à celle d'autres pays.



AIE. Tous droits réservés.

Figure 1 : Courbe linéaire des niveaux d'émission maximum pour la définition de l'acier brut à émissions quasi nulles (AIE, 2022)

Plusieurs entreprises prévoient de réduire leurs émissions en équipant leurs HF/CBO de la technologie de captage et de stockage de carbone (CSC). Cette méthode présente l'avantage d'éviter le remplacement des HF/CBO existants, ce qui exige moins de capitaux et assure la continuité des opérations sans changements majeurs. Dans son rapport, l'AIE montre que les HF/CBO équipés de la technologie de CSC permettent d'atteindre un niveau inférieur au seuil de 400 kg d'équivalent CO₂ par tonne d'acier d'ici 2050 (AIE, 2022). Toutefois, cette estimation ne tient pas compte des projets de modernisation : l'AIE prévoit que d'ici 2050, on sera en mesure de construire de nouveaux HF/CBO de pointe équipés de la technologie de CSC dont les taux de captage seront suffisamment élevés pour atteindre un niveau inférieur au seuil d'émissions quasi nulles. D'ici là, la technologie de CSC dans les nouvelles installations ne sera pas suffisante pour atteindre la carboneutralité. Le taux de captage obtenu en modernisant les installations existantes est encore plus faible. Dans son plus récent rapport, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat est d'avis qu'il sera « difficile de moderniser suffisamment les HF/CBO de manière à avoir un taux de captage

² Plusieurs modes de production d'acier primaire permettent l'ajout de ferraille pour réduire les coûts et contrôler la température des métaux liquides. Plus particulièrement, l'entreprise américaine Nucor s'efforce d'utiliser le plus de ferraille possible et incorpore au besoin du nouveau FRD pour répondre aux exigences de coulée.

supérieur à 50 %, ce qui ne suffira pas pour atteindre les cibles de réduction des émissions à long terme » (Bashmakov et coll., 2022).

On prévoit que le mode de production reposant sur du fer de réduction directe et un four à arc électrique (FRD/FAE), avec l'utilisation d'hydrogène comme agent réducteur, obtenu par électrolyse de l'eau, est celui qui générera le moins d'émissions. Lorsque l'hydrogène utilisé est produit à partir d'électricité à faibles émissions de carbone, ce mode de production génère environ 53 kg d'émissions de CO₂ par tonne d'acier (Vogl et coll., 2018). Le Canada (particulièrement le Québec, où l'on extrait du minerai de fer) produit de l'électricité à très faibles émissions et est donc en voie de garantir rapidement un très faible taux d'émissions au cours de la réduction des oxydes de fer par l'hydrogène. Cette technologie présente également l'avantage de permettre la séparation des étapes de production de fer (réduction des oxydes de fer) et de production d'acier. Alors que les hauts fourneaux et les convertisseurs basiques à oxygène gagnent à être associés, en premier lieu en raison des économies d'énergie réalisées par la possibilité de transformer de la matière déjà chaude sans besoin de la réchauffer de nouveau, le fer produit à l'étape de la réduction peut être compressé en fer briqueté à chaud (HBI), un produit commercialisable sous forme de briquettes, après la réduction du fer dans un four de réduction directe. Par conséquent, l'étape énergivore de la production de fer peut être réalisée là où les sources d'énergie génèrent le moins d'émissions, et le fer peut être expédié vers des aciéries situées ailleurs.

Le mode FRD/FAE utilisant le gaz fossile et la technologie de CSC permet une production à faibles émissions (quoique dans une moindre mesure que le mode à base d'hydrogène). Cependant, il nécessite d'importants investissements dans de nouvelles infrastructures de combustibles fossiles et permet difficilement d'atteindre de hauts taux de captage de carbone. Le site à FRD/FAE d'Al Reyadah aux Émirats arabes unis est le seul au monde équipé de la technologie CSC à produire de l'acier à l'échelle commerciale, et environ 25 % seulement des émissions totales y sont captées (Nicholas et Basirat, 2024). Les autres technologies présentées dans le rapport de l'AIE sont à un stade très précoce de développement (électrolyse de l'oxyde de fer) ou ont un potentiel inférieur de réduction des émissions à long terme. Dans le présent rapport, nous examinerons de plus près le mode de production FRD/FAE utilisant l'hydrogène en raison, d'une part, de sa capacité de réduction des émissions à court terme, et d'autre part, de l'abondance de ressources énergétiques à faibles émissions de carbone et de minerai de fer au Canada.

Les aciéries et les infrastructures connexes représentent des investissements majeurs dont la période de récupération s'échelonne sur de nombreuses années. La construction ou la modernisation d'une aciérie exige souvent l'interruption des opérations, qui se traduit par une perte considérable de revenus (Vogl et coll., 2021). Le remplacement d'une aciérie entraîne d'importantes dépenses pour la démolition, la dépollution et les prestations de retraite des travailleurs dont les compétences liées à une technologie particulière ne sont plus requises. Ces coûts peuvent être élevés (Rimini et coll., 2020) et représenter un obstacle majeur, ce qui explique pourquoi l'industrie de l'acier est coûteuse et n'évolue que très lentement (Algers et Åhman, 2024; Deily, 1988; Grubb et coll., 1995). La carboneutralité doit donc influencer en amont le choix des technologies et des investissements dans de

nouvelles installations afin d'éviter des investissements coûteux dans des équipements qui devraient de nouveau être remplacés avant d'atteindre la carboneutralité en 2050.

En revanche, l'atteinte de la carboneutralité n'exige pas forcément l'adoption d'une technologie à un moment précis. Il est possible d'ouvrir la voie en préparant les installations à devenir carboneutres et en réalisant des investissements judicieux pendant que les acteurs de la chaîne d'approvisionnement en amont ou en aval s'adaptent. Par exemple, on peut construire une aciérie qui sera prête à utiliser l'hydrogène comme agent réducteur lorsque son coût et son approvisionnement le permettront, mais qui utilise du gaz fossile en attendant.

Cependant, pour que cette façon de procéder fonctionne, il faut éviter que les investissements dans les matières ou les combustibles de transition soient si importants qu'ils freinent la transition vers des solutions à faibles émissions de carbone le temps venu. Autrement dit, la période de récupération des investissements dans les matières ou les combustibles de transition doit être assez courte pour que le passage aux solutions à faibles émissions soit économique le plus rapidement possible.

2.5 Hydrogène bleu et vert

L'hydrogène peut être produit à l'aide de différentes méthodes. Il sera question ici des méthodes de production d'hydrogène bleu et d'hydrogène vert. L'hydrogène bleu est produit à partir de gaz fossile; le dioxyde de carbone est séparé, capté, puis retiré. De ce processus résulte de l'hydrogène destiné à un usage ultérieur. L'hydrogène vert est produit par électrolyse; l'eau est décomposée en hydrogène et en oxygène dans un électrolyseur alimenté par une énergie propre. Les deux méthodes peuvent servir à atteindre la carboneutralité, et le choix de l'une ou l'autre, tout comme le coût, dépendra des ressources (énergie propre, gaz fossile, eau) et des sites de captage de dioxyde de carbone disponibles à différents emplacements géographiques. La baisse du coût des électrolyseurs influencera également l'abordabilité de l'hydrogène vert.

L'hydrogène vert et l'hydrogène bleu ont tous deux leurs limites. La production d'hydrogène vert nécessite de grandes quantités d'énergie propre, soit 50 kWh d'énergie par kilogramme d'hydrogène (Vogl et coll., 2018). L'énergie propre est donc le principal élément de coût de cette méthode. La production d'hydrogène bleu est quant à elle plus énergivore et comporte un risque de fuite de dioxyde de carbone au moment du transport et du stockage ainsi qu'un risque d'émissions fugitives de méthane en amont, autant de facteurs qui peuvent entraîner une baisse des émissions inférieure à celle prévue et générer une importante pollution locale (Nicholas et Basirat, 2024).

L'hydrogène vert ou bleu utilisé pour la production d'acier doit être stocké d'une façon ou d'une autre. Le stockage à grande échelle s'est avéré efficace pour réduire le coût de l'hydrogène vert, une diminution pouvant atteindre 40 % grâce à la mise à profit des variations de prix sur les marchés de l'électricité (Vattenfall, 2023). L'hydrogène vert utilisé pour la production d'acier peut donc avantageusement compléter une source d'énergie renouvelable intermittente. En produisant de l'hydrogène seulement lorsque les tarifs d'électricité sont bas, il est possible d'abaisser le coût général de production.

2.6 La compétitivité de l'acier à faibles émissions de carbone

La viabilité commerciale de la production d'acier à faibles émissions de carbone dépendra de son avantage concurrentiel par rapport à la production d'acier à forte intensité carbonique et à d'autres sites à faibles émissions, avantage qui sera influencé par différents facteurs.

La majoration du prix de l'acier à faibles émissions de carbone doit être la plus basse possible pour que celui-ci soit concurrentiel. La différenciation du produit, c'est-à-dire la mise en valeur des différences entre l'acier vert et l'acier à forte intensité carbonique, est une stratégie qui permet d'expliquer l'écart de prix. Ainsi, l'écart peut être comblé en tarifant le carbone ou en reportant les coûts plus élevés sur les consommateurs. La tarification du carbone entraîne l'augmentation des coûts de la production à forte intensité d'émissions. Puisque cette augmentation se répercute sur les consommateurs, elle fait monter le prix des produits à forte intensité d'émissions et en freine l'achat. La tarification du carbone renforce la compétitivité de l'acier à faibles émissions, puisque les coûts de production plus élevés sont compensés par la hausse des coûts résultant de la tarification des émissions de carbone générées par les techniques traditionnelles. La tarification du carbone peut donc être une importante mesure pour encourager l'utilisation de l'acier à faibles émissions de carbone et influencer le marché. Cependant, comme l'industrie canadienne de l'acier est étroitement intégrée à l'industrie nord-américaine (environ la moitié de l'acier canadien est exporté, principalement aux États-Unis), les États-Unis devront également tarifier le carbone (ou imposer des mesures dissuasives entraînant des coûts, comme la stricte réglementation des émissions) pour que cette mesure soit viable. Ce scénario a peu de chances de se concrétiser à court terme en raison de la nouvelle administration en place aux États-Unis, mais davantage à moyen et à long terme.

Une autre façon de gérer l'augmentation des coûts de la production d'acier à faibles émissions de carbone est de vendre aux consommateurs un produit écologique à un prix plus élevé. Peu de consommateurs achètent de l'acier brut; la plupart achètent des produits comme des voitures, des appareils électroménagers et des ordinateurs, ou utilisent des maisons, des ponts et des chemins de fer construits avec de l'acier. De fait, l'acier est simplement un élément de coût d'un produit final, et l'augmentation du prix de l'acier n'entraîne qu'une faible hausse du prix du produit final. À l'heure actuelle, on estime que le coût d'une voiture, d'une maison ou d'un appareil électroménager fabriqué avec de l'acier à faibles émissions de carbone plutôt qu'avec de l'acier à forte intensité d'émissions augmenterait de 0,3 % à 2,1 % (Delasalle et coll., 2022). Les constructeurs automobiles et d'autres entreprises pourraient donc vendre plus cher un produit fabriqué avec de l'acier à faibles émissions de carbone et conquérir un segment de clientèle prêt à payer davantage pour un tel produit, comme c'est le cas pour les véhicules électriques par rapport aux véhicules traditionnels (Bataille et coll., 2024). Une tarification du carbone combinée à une majoration du prix de l'acier vert répercutée sur les consommateurs est probablement la meilleure stratégie que peuvent adopter les décideurs politiques et les entreprises pour stimuler la compétitivité de l'acier à faibles émissions de carbone par rapport à l'acier à forte intensité d'émissions.

Un défi encore plus grand consiste à rendre les premiers sites de production d'acier à faibles émissions de carbone les plus concurrentiels possibles. Bien que cette tâche semble facile en comparaison de la vaste transition vers une production d'acier à faibles émissions, elle est

essentielle pour déterminer l'étendue et l'état des premiers marchés prêts à payer un prix majoré. Si les premiers investissements dans l'acier vert sont trop coûteux et se soldent par un échec, l'ensemble de l'industrie risque d'en faire les frais.

La compétitivité de chaque site de production d'acier à faibles émissions de carbone dépendra du coût des intrants à l'échelle locale (énergie, ressources, main-d'œuvre, etc.) et des instruments de soutien mis en place par les pouvoirs publics. Pour les sites qui utilisent de l'hydrogène, le coût des principales ressources telles que le gaz fossile, la technologie de stockage de carbone, l'énergie propre et l'eau sera le principal déterminant de leur capacité concurrentielle. La décarbonation d'un site devrait dépendre de l'estimation des coûts à long terme de chacune de ces composantes clés.

3 Exportations de fer à faibles émissions de carbone : un potentiel inexploité

3.1 État actuel de l'industrie de l'extraction du minerai de fer

Le secteur du fer et celui de l'acier sont étroitement liés : la majorité de l'acier est produit principalement à partir de fer, et le fer sert presque exclusivement à fabriquer de l'acier. Cependant, au Canada, le secteur du fer est nettement plus important que celui de l'acier. En 2022, 55,1 Mt de minerai de fer ont été exportées, tandis que seulement 13,9 Mt étaient destinées aux marchés et aux stocks intérieurs, comme le montre la figure 2. C'est pourquoi nous entamons notre analyse sectorielle par la production de minerai de fer.

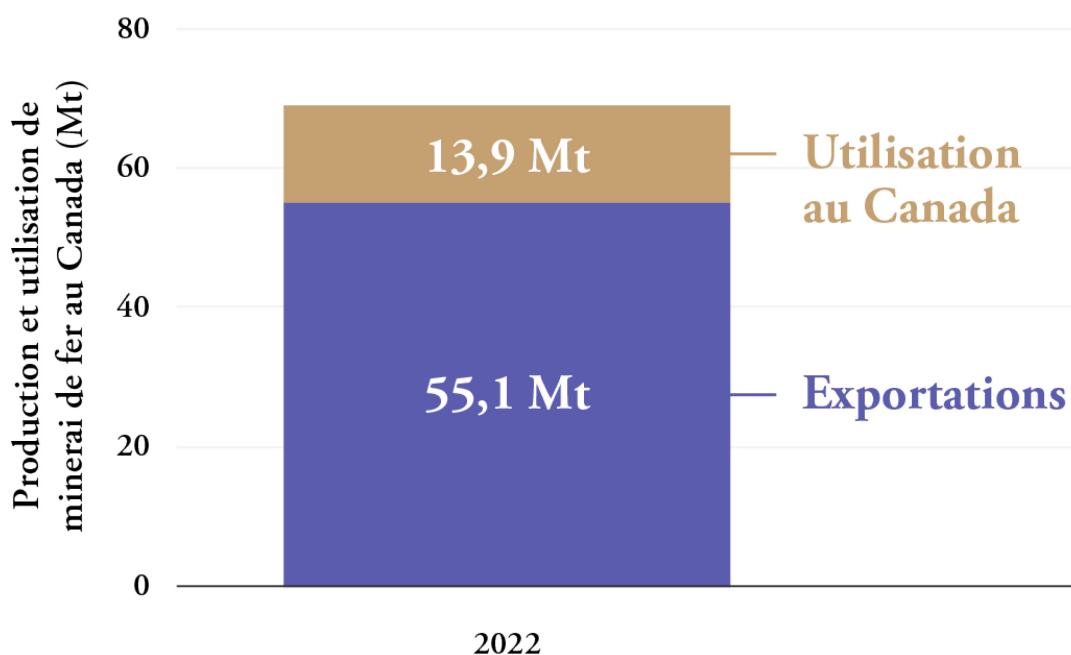


Figure 2 : Production et utilisation du minerai de fer canadien en 2022 (en Mt)
Part de la production de fer (69 Mt) exportée (55,1 Mt) et utilisée au pays (13,9 Mt) en 2022

Le fer est l'un des principaux minéraux extraits au Canada. En 2022, la valeur du fer extrait au pays s'élevait à 5 milliards de dollars canadiens. Le fer se situe donc au quatrième rang des minéraux ayant le plus de valeur au Canada, après la potasse, l'or et le charbon (Ressources naturelles Canada, 2024c). Le secteur des mines de fer, qui compte plus de 9 000 travailleurs, est l'un des principaux employeurs dans les régions éloignées du pays, comme l'île de Baffin et la Côte-Nord du Québec (ArcelorMittal, 2024a; Champion Iron, 2024b; Rio Tinto, 2024; Tacora Resources, 2024; Wat, 2024). L'annexe II présente les principaux acteurs de l'industrie.

La figure 3 présente une carte des mines de fer au Canada, toutes situées au Québec et au Labrador, excepté celle sur l'île de Baffin, au Nunavut. Le Québec et le Labrador produisent 92 % de tout le minerai de fer du Canada, et le Nunavut en produit 8 % (Ressources naturelles Canada, 2024d). Les mines du Québec et du Labrador sont situées dans la fosse du Labrador, une formation géologique le long de la frontière entre le Québec et le Labrador qui contient d'énormes gisements de minerai de fer.



Figure 3 : Carte des mines de minerai de fer au Canada
Source : Ressources naturelles Canada

Étant donné que l'industrie canadienne des mines de fer est concentrée dans l'est du pays, le reste du présent rapport sera axé sur les entreprises déjà existantes dans la région et sur leur potentiel de transition. Notre analyse ne tient pas compte des éventuelles mines dans d'autres régions, mais nous savons que de nouveaux projets peuvent être cruciaux pour l'avenir de l'industrie minière canadienne.

Le tableau ci-dessous répertorie les mines de fer actives au Canada. La capacité de production de ces mines ainsi que la qualité de leur minerai de fer ont été évaluées en fonction des communiqués de presse et des annonces publiques diffusés. Des différences notables existent entre les types de minerai de fer. La réduction directe nécessite des billes d'une certaine qualité dont la disponibilité n'est pas constante. Des investissements sont déjà en cours pour permettre la fabrication de billes à haute teneur en fer adaptées à la réduction directe. Il existe par ailleurs des mines qui pourraient produire de telles billes, mais sans que des investissements en ce sens n'aient été identifiés.

Tableau 4 : Mines de fer au Canada et teneurs du minerai

Mine	Capacité de production (TMPA)	Propriétaire	Teneur du minerai	Source
Lac Fire	4	ArcelorMittal	Adaptée à la réduction directe	ArcelorMittal, 2021
Mont-Wright	22	ArcelorMittal	Adaptée à la réduction directe	ArcelorMittal, 2021, 2024b
Lac Bloom	15	Champion Iron	Adaptée à la réduction directe	Champion Iron, 2024a
Scully	4	Tacora Resources	65,9 %	Tacora Resources, 2024
Lac Carol	17	Rio Tinto	65 %	Mooney, 2021
Région de Menihek	4	Tata Steel Minerals Canada	64,5 %	Tata Steel Minerals Canada Limitée, 2024
Rivière Mary	6	Baffinland Iron Mines Corporation	Adaptée à la réduction directe	thyssenkrupp, 2023

Trois mines actives n’ont pas investi dans l’amélioration de leur minerai, soit la mine Scully et la mine du lac Carol, propriétés respectives de Tacora Resources et de Rio Tinto, ainsi que la mine dans la région de Menihek, exploitée par Tata Steel Minerals Canada. Cependant, comme elles sont situées dans la même formation géologique, il y a lieu de penser que ces mines pourraient elles aussi améliorer le minerai de fer qu’elles produisent pour fabriquer des billes à réduction directe. Grâce à ces gisements de minerai de fer à haute teneur, le Canada pourrait jouer un rôle déterminant dans la transition de l’industrie sidérurgique au pays et dans le monde.

3.2 Évolution des marchés d’exportation

Non seulement le Canada est un important producteur de minerai de fer, mais il en est l’un des principaux exportateurs au monde. En 2023, le Canada figurait au troisième rang des pays exportateurs de minerai de fer, derrière l’Australie (891 millions de tonnes) et le Brésil (354 millions de tonnes) (World Integrated Trade Solution, 2024). La figure 4 présente les divers pays vers lesquels le Canada exporte du minerai de fer. Les destinations d’exportation sont représentées par des cases dont les dimensions reflètent le volume de ces exportations.

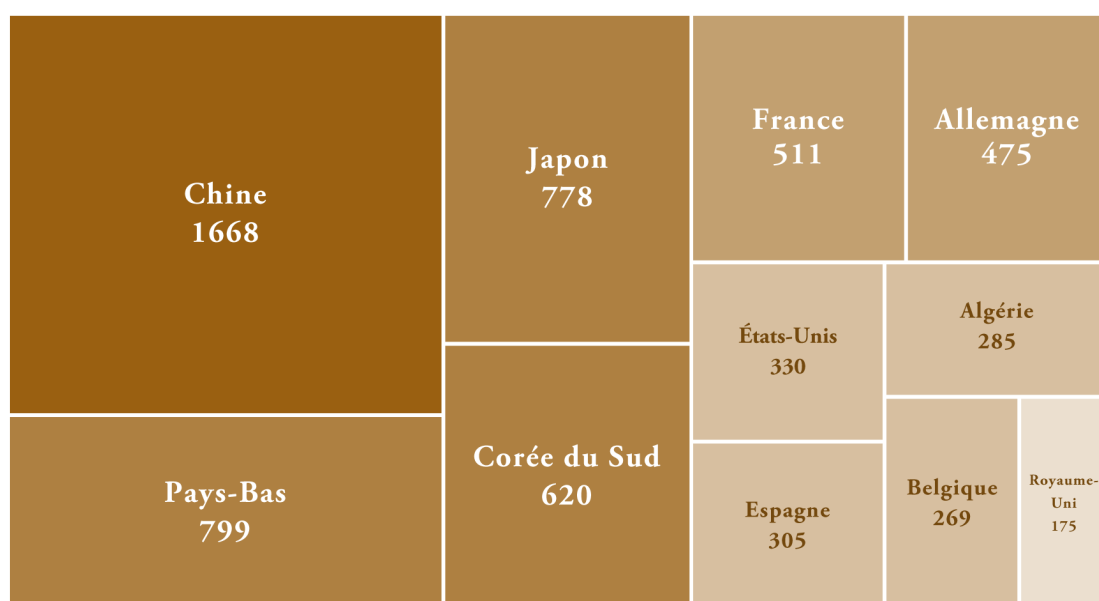


Figure 4 : Destinations majeures des exportations canadiennes de minerai de fer (en millions de dollars américains USD)

Source : Observatory of Economic Complexity

La Chine est la première destination d'exportation, suivie des Pays-Bas et du Japon³. Toutefois, l'UE dans son ensemble est le premier marché d'exportation (2,36 milliards de dollars américains). La Corée du Sud occupe aussi une grande place (620 millions de dollars américains), tout comme les États-Unis (330 millions de dollars américains).

Cette structure des marchés d'exportation est appelée à changer. Au moment de la rédaction de ce rapport, la Chine enregistrait une chute de la production d'acier causée par une importante surcapacité et une faible demande. Elle a donc décidé de mettre un frein à l'expansion de la production d'acier et de planifier le développement à grande échelle de la production d'acier à base de ferraille pour diminuer les émissions (Zhang, 2024). Cette transition devrait être facilitée par la croissance structurelle de l'approvisionnement et la stagnation de la demande en ferraille. En plus de l'utilisation accrue de ferraille, la Chine se tourne vers la réduction directe par l'hydrogène dans le cadre d'un nouveau projet de 700 millions de dollars américains dirigé par la société publique HBIS (LeadIT, 2024). Les sociétés publiques chinoises ont par le passé contribué au développement de l'industrie du pays (Li et coll., 2022), et l'initiative de HBIS pourrait indiquer que d'autres projets semblables verront le jour sous peu en Chine.

L'UE poursuit ses efforts de décarbonation de l'acier en concrétisant de multiples projets de réduction directe à faibles émissions de carbone, répertoriés par le Green Steel Tracker du LeadIT (Vogl et coll., 2023). La transition vers la réduction directe et les FAE devrait se poursuivre dans l'UE. En effet, la Commission européenne a désigné la production d'acier à base d'hydrogène comme la principale stratégie de décarbonation de l'industrie, et elle

³ Ce tableau présente les destinations d'exportation initiales; il est probable que, par exemple, le minerai de fer exporté aux Pays-Bas soit expédié ultérieurement vers d'autres pays d'Europe.

s'attend à ce que cette méthode occupe une place en rapide augmentation dans la production d'acier primaire (Centre commun de recherche, 2022). La Corée du Sud se tourne elle aussi vers la production d'acier à base d'hydrogène. Son principal producteur d'acier, POSCO, investit jusqu'en 2040 plus de 40 milliards de dollars américains pour développer en Australie la réduction directe par l'hydrogène (Min-hee, 2022) en tirant parti des grandes quantités d'énergie solaire et de minerai de fer de ce pays. La société minière australienne Fortescue a affirmé son intention de fournir à la Chine 100 TPA de fer de réduction directe (Burton, 2024). Le Royaume-Uni a pris la décision de démolir le reste de ses HF/CBO et de les remplacer par des FAE alimentés avec de la ferraille ou du HBI.

Les États-Unis produisent déjà une bonne partie de leur acier, soit environ 70 %, au moyen de FAE utilisant de la ferraille (Bureau of International Recycling, 2022) et ont aussi l'intention de développer des projets de réduction directe par l'hydrogène. Le département de l'Énergie des États-Unis envisage d'allouer 500 millions de dollars américains à un projet de réduction directe prêt pour l'hydrogène mené par Cleveland-Cliffs (Office of Clean Energy Demonstrations, 2024).

3.3 Adapter l'offre à la demande

La transformation prévue au sein des marchés d'exportation fera évoluer la demande en produits de minerai de fer, un aspect capital pour le Canada. À l'heure actuelle, le Canada exporte principalement du minerai de fer à utiliser dans des hauts fourneaux. Pour demeurer concurrentiel dans un secteur mondial de l'acier en évolution, le pays devra impérativement rendre ses produits compatibles avec le mode de production FRD/FAE.

Si les hauts fourneaux peuvent accommoder du minerai de fer de diverses qualités (contenant 58 % ou plus de fines), le mode FRD/FAE exige quant à lui des billes préparées dont la teneur en fer dépasse 66 % (Agora Industry et Wuppertal Institute, 2023). À l'heure actuelle, ces billes ne représentent que 3 % ou 4 % de la production mondiale de minerai de fer. Cette quantité insuffisante pourrait être un goulot d'étranglement dans la transition à venir, l'AIE estimant que la part de la production de fer reposant sur la réduction directe par l'hydrogène passera à 15 % d'ici 2035 et à 44 % d'ici 2050 – la plus grosse part parmi les modes de production à faibles émissions de carbone (AIE, 2023b). Le manque de minerai de fer de qualité adéquate, comparativement à la hausse attendue de la demande, a mené le gouvernement fédéral à ajouter le minerai de fer de réduction directe à sa liste de minéraux critiques (Ressources naturelles Canada, 2024b).

Dans ce contexte, un des défis des exportateurs de minerai de fer comme le Canada sera de produire du minerai de fer de la qualité voulue. Il y a plusieurs moyens d'y parvenir. Soit les mines ont le bon minerai de fer à haute teneur, et la production de billes peut évoluer plus facilement, soit de nouvelles mines avec la bonne teneur peuvent être ouvertes. La production insuffisante de minerai de fer de la bonne qualité peut aussi être gérée au moyen d'un processus dit de « valorisation », qui repose sur le raffinage des produits de minerai jusqu'à l'obtention de la qualité voulue. À titre d'exemple, bien que l'essentiel du minerai de fer extrait aujourd'hui soit de l'hématite non magnétique, il est possible d'obtenir une teneur en

magnétite (qui, comme son nom l'indique, est magnétique) de 66 % ou plus en la broyant et en la triant avec des électroaimants. La qualité du fer peut aussi être améliorée en scorifiant le métal avec de la chaux après la réduction directe. L'Australie travaille déjà à mettre en place ce genre de solution (Australian Trade and Investment Commission, 2024).

3.4 Le potentiel du Canada

Si la transition vers la réduction directe dans l'industrie mondiale de l'acier s'accompagne d'importants défis pour les producteurs de minerai de fer du Canada, elle leur ouvre aussi des portes, car les mines du pays regorgent de minerai à haute teneur en fer. L'évolution vers la réduction directe aura des répercussions majeures sur la chaîne d'approvisionnement sidérurgique mondiale. Comme nous l'avons vu, la teneur du minerai de fer devra être adaptée aux nouvelles technologies, et il faudra passer du charbon métallurgique à l'hydrogène comme agent de réduction. Il s'ensuivra une chute de la demande en charbon et une hausse marquée de la demande en hydrogène vert.

Plusieurs études récentes se sont intéressées aux effets d'une transition vers l'hydrogène dans l'industrie, et à l'avantage concurrentiel de certaines régions en fonction de la disponibilité de minerai de fer et de ressources énergétiques renouvelables (voir p. ex. Bataille et coll., 2024; Devlin et coll., 2023; Devlin et Yang, 2022; Gailani et coll., 2024; Lopez et coll., 2023; Samadi et coll., 2023; Verpoort et coll., 2023). Ces études concluent entre autres que le fait de disposer de sources d'énergie renouvelable à faible coût sera un atout concurrentiel indéniable qui attirera des investissements dans les industries grandes consommatrices d'énergie, dont l'industrie de l'acier. À la concurrence sur le plan économique s'ajoutent les rivalités géopolitiques. Dans le contexte mondial de plus en plus houleux d'aujourd'hui, la sécurité énergétique devient une priorité. C'est particulièrement d'actualité dans l'UE, dont les marchés de l'énergie ont subi un choc après l'invasion de l'Ukraine par la Russie en 2022. En Europe et ailleurs dans le monde, le recours à des sources d'énergie renouvelable locales est une option de plus en plus intéressante par rapport à une dépendance aux marchés mondiaux des combustibles fossiles (Draghi, 2024).

La transition vers la production d'acier à base d'hydrogène mènera à une réorganisation de la chaîne d'approvisionnement sidérurgique. Historiquement, la production de fer et la production d'acier ont été placées côte à côte pour partager les coûts associés à la chaleur et aux infrastructures, une façon de procéder particulièrement intéressante pour les HF/CBO. Par contre, avec la réduction directe et les FAE, ces avantages sont moindres. Les étapes de réduction du fer et de production de l'acier peuvent donc être séparées en vue d'intégrer la très énergivore étape de réduction du fer à la production d'énergie. La transition vers la production d'acier à base d'hydrogène peut ainsi aboutir à la commercialisation d'un produit intermédiaire, le HBI. Il s'agit d'un produit de fer réduit et comprimé qui peut être ajouté dans un FAE pour fabriquer de l'acier, éventuellement mélangé avec de la ferraille. Si le HBI est produit au moyen d'hydrogène vert, on parle alors de HBI vert.

Grâce à une restructuration stratégique de la chaîne d'approvisionnement, les producteurs de minerai de fer comme le Canada peuvent mettre à profit leurs ressources énergétiques pour

obtenir une part plus élevée de la chaîne de valeur, en transformant leur propre minerai en fer puis en l'expédiant à des producteurs d'acier à l'étranger. Cette réorganisation pourrait apporter son lot d'avantages tant aux producteurs de minerai de fer qu'aux producteurs d'acier. En effet, si les producteurs de minerai de fer peuvent obtenir localement une part de valeur plus élevée et exporter un produit bonifié, les pays producteurs d'acier ne disposant pas d'importantes sources d'énergie renouvelable peuvent éviter les coûts et les délais associés à la mise en place à grande échelle d'une production d'énergie propre et de fours de réduction directe. Les principaux pays producteurs d'acier de l'UE (à savoir les principaux partenaires commerciaux du Canada pour le minerai de fer) pourraient importer du HBI vert plutôt que de réduire le minerai eux-mêmes, l'UE devant augmenter sa production d'énergie renouvelable pour décarboner son réseau électrique, ce qui pose moins problème au Canada. Sous peu, l'UE instaurera son mécanisme d'ajustement carbone aux frontières, lequel imposera une taxe carbone sur les produits importés et pourrait favoriser le HBI vert.

L'avantage d'importer du HBI vert est encore plus marqué pour les pays disposant déjà d'une bonne quantité de FAE, comme les États-Unis, dont environ 70 % de l'acier est produit au moyen de ces fours, et le Royaume-Uni, qui produira bientôt 100 % de son acier au moyen de FAE. Une hausse de la production de HBI vert au Canada s'accompagnera de synergies particulièrement intéressantes avec les États-Unis, dont l'industrie sidérurgique est déjà étroitement intégrée à celle du Canada. Les États-Unis disposent de FAE qui peuvent être alimentés avec du HBI vert provenant du Canada. D'autre part, la production d'électricité aux États-Unis étant plus intense en CO₂ que celle du Canada, il sera difficile de développer suffisamment d'énergie renouvelable pour à la fois décarboner la production existante d'électricité et produire de l'hydrogène servant à la réduction du fer. Si la réduction du fer peut s'effectuer au Canada, les États-Unis pourront compter sur un approvisionnement stable auprès d'un partenaire fiable, et le Canada disposera d'un marché fiable pour un produit à plus forte valeur ajoutée.

L'UE, les États-Unis et le Royaume-Uni représentent près de la moitié des exportations de minerai de fer du Canada. La Corée du Sud et le Japon, deux pays aux ressources énergétiques renouvelables limitées, pourraient eux aussi profiter d'une restructuration stratégique de la chaîne d'approvisionnement qui sépare la réduction du fer de la production de l'acier. Jusqu'à présent, la Corée du Sud a beaucoup investi en Australie, tandis que le Japon est plus lent à passer à une production d'acier à base d'hydrogène. Ces marchés d'exportation sont des partenaires stratégiques et des alliés du Canada, ce qui le positionne avantageusement en vue d'une décarbonation à moindre coût de l'industrie sidérurgique dans ces pays. Notons toutefois que divers concurrents gagnent rapidement du terrain. Entre autres, la société minière suédoise LKAB, qui produit 80 % du minerai de fer de l'UE, a élaboré une stratégie visant à exporter exclusivement du HBI vert. Dans la même veine, l'Australie, premier exportateur mondial de minerai de fer, a lancé une stratégie visant à regrouper ses ressources en énergie et en fer en vue d'exporter du HBI et de l'acier verts (Australian Trade and Investment Commission, 2024).

3.5 L'énergie renouvelable, la clé d'une production à valeur ajoutée

Le Canada possède d'importantes ressources énergétiques renouvelables, ce qui pourrait lui procurer des avantages concurrentiels et stratégiques à l'heure où la production d'acier prend ses distances des combustibles fossiles. L'hydroélectricité représente 60 % de la production électrique totale au Canada, un pourcentage qui atteint même 94 % au Québec et 97 % à Terre-Neuve-et-Labrador (Régie de l'énergie du Canada, 2024). Dans le contexte géostratégique précédent, avant la transition massive de l'économie mondiale, les distributeurs publics du Canada s'efforçaient surtout d'augmenter leurs revenus en vendant de l'énergie propre à leurs clients au moyen de lignes de transport capables de répondre à la demande dans le sud du pays et aux États-Unis. Cependant, dans le contexte de cette transition massive et des rivalités géopolitiques qui l'accompagnent, la transition de l'industrie sidérurgique pourrait contribuer à une utilisation renouvelée, plus stratégique, des ressources métallurgiques et énergétiques et des infrastructures de transport reposant sur une valeur ajoutée accrue au Canada, et par le fait même aider les partenaires commerciaux à réduire leurs émissions rapidement.

Le minerai de fer canadien se trouve principalement au Labrador et au Québec, dans la fosse du Labrador. De part et d'autre de cette fosse se trouvent deux des plus importantes centrales hydroélectriques au monde, à savoir La Grande 2 et Churchill Falls (puissance de 5 616 MW et de 5 428 MW, respectivement), et plusieurs autres centrales plus petites. Des lignes de transport ont été construites pour acheminer l'électricité de ces centrales vers le sud du pays et les États-Unis, à partir du Labrador en passant par Sept-Îles, une ville côtière dotée d'un grand port pour les exportations de minerai de fer.

Ces infrastructures pourraient s'avérer un excellent atout si le Canada développe la réduction directe au pays en vue de l'exportation de HBI. L'hydroélectricité est abordable et pilotable. Elle est donc idéale pour compléter une source d'énergie renouvelable intermittente comme l'énergie éolienne terrestre. La réduction directe du fer par l'hydrogène étant énergivore, si le Canada l'implante à grande échelle, la production d'énergie devra être considérablement haussée en conséquence. La région autour de la fosse du Labrador pourrait servir à augmenter la production d'énergie éolienne terrestre grâce à ses vents forts et à sa faible densité de population. La carte à la figure 5, tirée de l'Atlas mondial des ressources éoliennes, montre le facteur de capacité et le rendement énergétique annuel des turbines éoliennes selon l'emplacement.

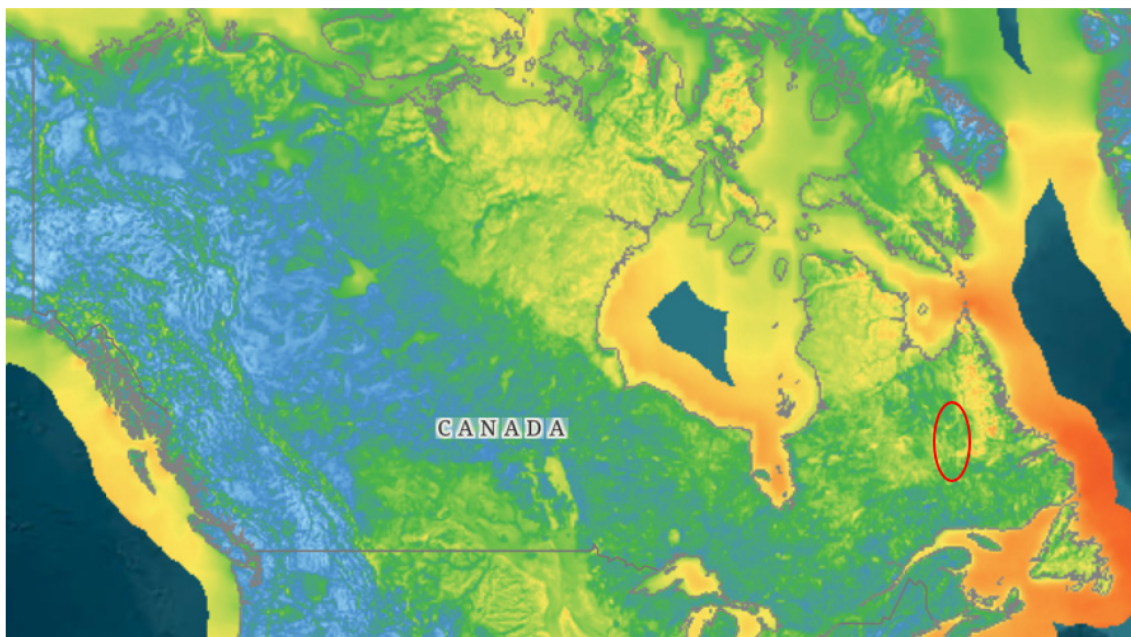


Figure 5 : Carte du rendement en énergie des éoliennes au Canada
La fosse du Labrador et les principales mines de fer sont désignées par un ovale rouge. Plus la zone est bleue, plus le rendement énergétique annuel estimé est bas. Plus la zone est jaune puis rouge, plus le rendement énergétique annuel estimé est élevé. Source : Atlas mondial des ressources éoliennes.

La figure 5 montre que la région autour de la fosse du Labrador possède un potentiel éolien très intéressant. Dans le grand nord du Québec et au Nunavut se trouvent les plus importantes sources d'énergie éolienne terrestre, mais ces régions sont difficiles d'accès. Le Labrador et le centre du Québec en particulier présentent un grand potentiel éolien, tout comme les plaines de la Saskatchewan et de l'Alberta.

Une augmentation de la production d'énergie éolienne terrestre autour de la fosse du Labrador pourrait accroître l'offre d'énergie propre pour la réduction directe du fer. En combinant cette énergie avec l'hydroélectricité abordable, la région couvrant l'est du Québec et le Labrador pourrait fournir l'énergie propre cruciale à la transition de l'industrie sidérurgique nationale et mondiale. Terre-Neuve-et-Labrador dispose par ailleurs d'une importante industrie pétrolière extracôtière, les principaux sites se trouvant au sud et à l'est de Terre-Neuve. À long terme, Terre-Neuve-et-Labrador pourrait tirer parti des leçons apprises au Royaume-Uni, en Norvège et au Danemark (des pays qui sont passés d'une énergie pétrolière extracôtière à une énergie éolienne extracôtière), étant donné que les vents sont particulièrement forts dans les eaux provinciales et que ces projets se traduisent par d'importants volumes d'électricité.

3.6 Relations avec les Premières Nations

La reconnaissance et le respect des communautés autochtones et des Premières Nations du Canada sont essentiels à la réalisation d'une transition politiquement viable de l'industrie sidérurgique, et s'inscrivent d'ailleurs dans les efforts de réconciliation du gouvernement

canadien. Une augmentation de la production d'énergie éolienne terrestre peut se faire de manière extractive (coûts locaux, avantages délocalisés) ou dans une optique de réconciliation (coûts et avantages équitablement répartis). Dans certains cas, l'expansion de cette production a été extrêmement perturbatrice pour les communautés autochtones, notamment en Norvège (gouvernement de la Norvège, 2023) et en Suède (Cambou, 2020). Les Samis, un peuple autochtone traditionnellement nomade qui élève des rennes dans le nord de la péninsule scandinave, ont assisté à la mise en place d'installations d'énergie éolienne sur des territoires sacrés et dans des aires de pâturage. La transition qui s'annonce dans le nord de la Suède, où la société minière LKAB planifie une production de HBI à large échelle, s'accompagnera d'une augmentation marquée de l'utilisation de l'énergie éolienne terrestre. Ces visées pourraient porter atteinte aux droits du peuple sami et nuire à l'élevage traditionnel des rennes (de Leeuw et Vogl, 2024).

Par le passé, l'industrie minière a été associée au déplacement forcé et à la discrimination de communautés autochtones, dont les membres étaient à la fois chassés de leurs terres traditionnelles et exclus des emplois créés. Au Canada, le développement énergétique a été lui aussi dévastateur pour les Premières Nations. En effet, le développement hydroélectrique dans le nord du Québec et au Labrador a violé les droits des Autochtones, y compris en déplaçant des établissements des Premières Nations (Martin et Hoffman, 2008), et il y a encore à ce jour des poursuites intentées contre Hydro-Québec (Amador, 2023; Forrest, 2024). Dans certains cas, plus rares, des communautés autochtones ont été mieux représentées lors du développement de sources d'énergie renouvelable, comme pour ce qui est de l'instauration des tarifs de rachat garantis en Ontario (Stokes, 2013). Selon certaines études, il y a eu des progrès dans les relations entre l'industrie minière et les communautés autochtones grâce à diverses stratégies politiques et juridiques garantissant des retombées, comme les ententes sur les répercussions et les avantages, lesquelles permettent aux communautés de tirer davantage de revenus de location des terres servant aux activités minières (Rodon et coll., 2022; Thériault et coll., 2022). Il y a néanmoins des limites à l'approche du Canada, qui pourrait et doit multiplier ses efforts pour inclure les communautés autochtones dans le développement de l'autonomie et de la fiabilité énergétiques, et pour partager les retombées économiques avec les gens qui habitent et comptent sur les terres situées près des centrales et des infrastructures éoliennes, par exemple dans le cadre de partenariats équitables (Hoicka et coll., 2021; Stefanelli et coll., 2019).

Tout accroissement de la production d'énergie éolienne terrestre au Québec doit se faire avec le consentement préalable et éclairé des communautés autochtones. Selon les autorités canadiennes, la Nation Naskapi de Kawawachikamach et les Innus de Matimekosh sont les peuples actuellement établis près de la fosse du Labrador; des endroits possibles pour le développement de l'énergie éolienne terrestre loin de ces communautés se trouvent plus au sud et à l'ouest (Canada.ca, 2024e). Cela dit, un plan de développement industriel et énergétique complet qui prévoit la participation des communautés autochtones dans le plein respect de la Déclaration des Nations Unies sur les droits des peuples autochtones, y compris du principe de consentement préalable donné librement et en connaissance de cause, sera fondamental pour que toute augmentation de la production d'énergie renouvelable concorde avec les ambitions de réconciliation et de transition politiquement viable de l'industrie sidérurgique.

3.7 Les atouts et les défis de la production canadienne de HBI vert

Les ressources naturelles et les infrastructures du Canada présentent des avantages indéniables pour la production de HBI vert; elles permettront des gains de valeur à l'échelle nationale tout en aidant les partenaires commerciaux du pays à décarboner leurs industries sidérurgiques. Ce potentiel doit être analysé pour comprendre la mesure dans laquelle une production canadienne de HBI vert pourrait réduire les émissions mondiales, augmenter la valeur ajoutée et créer des emplois. À la figure 6, nous avons calculé le potentiel associé aux exportations de HBI vert canadien par rapport au minerai de fer et à d'autres marchés d'exportation de HBI vert.

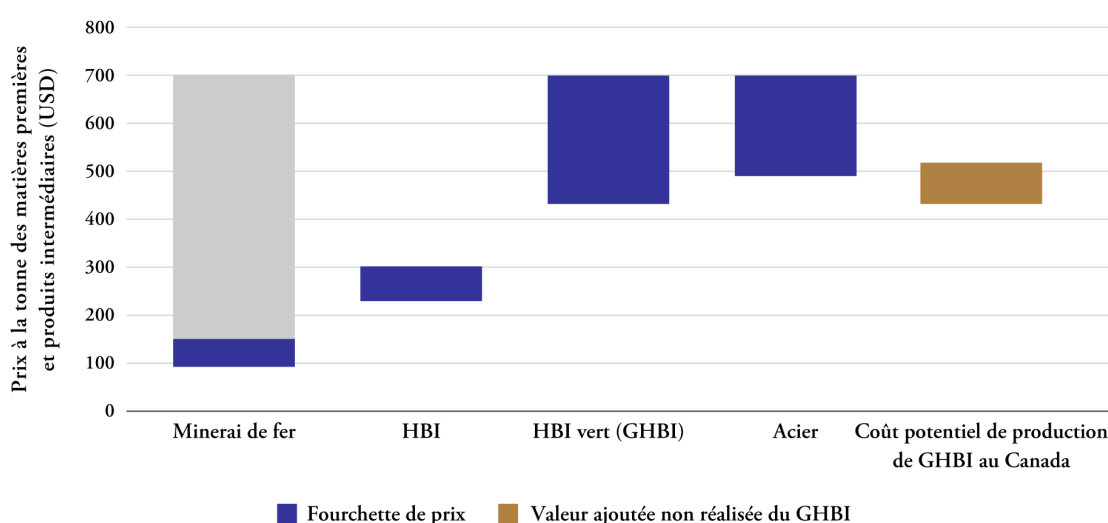


Figure 6 : Prix à la tonne des matières premières et produits intermédiaires - Comparaison de diverses marchandises, calculs des auteurs. Sources et hypothèses présentées en annexe.

La figure 6 montre le cours sur les marchés mondiaux au cours des cinq dernières années du minerai de fer et du HBI traditionnel fabriqué au moyen de gaz fossile, comparativement à ce qui suit : les estimations de l'AIE du coût de la réduction directe du fer par l'hydrogène en Chine, en Inde, aux États-Unis et dans l'UE d'ici 2035 (« HBI vert »); une fourchette de coûts pour l'acier brut produit par le mode traditionnel HF/CBO et le mode FRD/FAE utilisant le gaz fossile (« Acier ») (AIE, 2024); le coût d'une éventuelle production de HBI vert au Canada selon les calculs faits pour le présent rapport. La zone grisée au-dessus de la fourchette de coûts du minerai de fer est la valeur dont est présentement privé le Canada en raison de l'exportation de minerai plutôt que de billes à réduction directe. Nous faisons des hypothèses conservatrices pour les besoins en énergie et utilisons un taux d'actualisation de 12 %, ce qui correspond aux taux de rendement standards utilisés dans la prise de décisions d'investissement. Pour les dépenses en capital et les coûts de fonctionnement et d'entretien, nous utilisons des hypothèses standards tirées d'articles universitaires. Les données sur les salaires sont celles de Statistique Canada, et les prix de l'électricité ceux d'Hydro-Québec pour la nouvelle offre d'énergie éolienne terrestre.

Cette analyse nous mène à conclure que la production canadienne de HBI vert serait concurrentielle sur les marchés mondiaux, à un coût allant de 430 à 520 dollars américains, ce qui est dans la tranche inférieure des coûts estimés par l'AIE pour la production de HBI vert (de 430 à 700 dollars américains). Cet avantage est également présenté dans un rapport récent du Rocky Mountain Institute, qui conclut que le Canada est le deuxième pays le plus abordable au monde pour la production de HBI vert, après les États-Unis (Wilmoth et coll., 2024).

La transition vers une réduction directe par l'hydrogène du minerai de fer faite au pays pourrait augmenter de façon marquée la valeur ajoutée au Canada. Dans le cas d'un marché mondial du HBI vert où le cours est déterminé par le producteur le plus coûteux et où le producteur le plus coûteux fabrique du HBI vert au plus haut coût projeté par l'AIE, le Canada pourrait augmenter la valeur ajoutée au pays de plus de 500 dollars américains par tonne de produit de fer exporté. Soulignons tout de même qu'il faut 1,5 tonne de minerai de fer pour produire 1 tonne de HBI (Bhaskar et coll., 2022; Vogl et coll., 2018). Ceci est pris en compte dans les calculs du présent rapport; les exportations en tonnes seraient donc réduites selon le même facteur. Si la totalité du minerai de fer exporté en 2023 (57 millions de tonnes) était réduit localement puis vendu sous forme de HBI vert (38 millions de tonnes), en supposant que le cours du HBI vert sur les marchés mondiaux soit déterminé par la production la plus coûteuse (autrement dit, selon le coût marginal), cette transition augmenterait la valeur ajoutée annuelle au Canada de plus de 18 milliards de dollars américains, soit plus de 25 milliards canadiens. Si le cours sur le marché mondial était plus bas, disons 500 dollars américains, l'augmentation de la valeur ajoutée dépasserait tout de même 10 milliards de dollars américains, soit 14 millions canadiens. S'il est plus probable qu'une partie du minerai de fer soit utilisée pour la réduction et le reste, pour d'autres modes de production d'acier à faibles émissions de carbone, ces calculs montrent qu'il y a un potentiel majeur d'augmentation de la valeur assortie d'une baisse des émissions grâce à la réduction directe par l'hydrogène.

L'essentiel de la baisse des émissions dans ce scénario ne se produirait pas au Canada, mais plutôt dans les sites à HF/CBO à l'étranger lors de la réduction du fer, ce qui aiderait grandement les partenaires commerciaux du Canada à réduire leurs émissions. En supposant qu'il faille 1,6 tonne de minerai de fer pour produire 1 tonne d'acier, et que celle-ci génère des émissions de 2 945 kg d'équivalent CO₂ par tonne le long de la chaîne d'approvisionnement selon le mode traditionnel, le minerai de fer canadien est actuellement la source d'émissions d'environ 105 mégatonnes de CO₂ au pays et à l'étranger. Ces émissions disparaîtraient dans le scénario décrit : il y aurait une baisse des émissions annuelles correspondant à 16 % des émissions du Canada (Canada.ca, 2024d), principalement à l'étranger.

Selon ce scénario, la demande en électricité connaîtrait une hausse marquée et atteindrait environ 115 TWh pour une transition complète vers la production à base d'hydrogène de 38 Mt de HBI, comparativement aux 210 TWh actuellement produits au Québec. Cette hausse de la demande entraînerait probablement une hausse des tarifs d'électricité, puisque l'énergie éolienne terrestre est plus coûteuse que l'énergie hydroélectrique qui domine actuellement le réseau. Cela dit, même en utilisant le coût de l'énergie éolienne terrestre

(0,078 dollar canadien [Hydro-Québec, 2024]) aux fins des calculs, la réduction du fer au Canada demeure une approche concurrentielle. La construction d'installations de production d'énergie éolienne terrestre et de réduction directe du fer pourrait se faire par étapes au cours des décennies à venir, de manière à ce que la chaîne d'approvisionnement puisse s'ajuster au fur et à mesure, et à ce que les contrecoups sur l'environnement et les industries grandes consommatrices d'énergie soient moindres. Toutefois, plus la construction se fait rapidement, plus les émissions baissent rapidement, et meilleure est la probabilité de maintenir les hausses de température sous les seuils critiques.

Il y aurait également une hausse marquée de la demande de main-d'œuvre pour s'occuper des électrolyseurs et des fours de réduction directe et pour construire les infrastructures de production et de transport d'électricité. À eux seuls, les électrolyseurs et les fours de réduction directe devraient créer jusqu'à 14 000 emplois (ce qui correspond à environ 60 % de la main-d'œuvre actuelle dans le secteur de l'acier) dans un scénario poussé à son comble où la totalité du minerai de fer serait réduit sous forme de HBI vert au pays. Cela ferait plus que compenser les pertes d'emplois attribuables à la transition du secteur canadien de l'acier vers les FAE, mais les nouveaux emplois ne seraient sans doute pas dans les mêmes régions. Le déplacement de la production industrielle pourrait représenter un défi politique devant être surmonté grâce à la planification stratégique et à la restructuration des chaînes d'approvisionnement.

Pour augmenter considérablement la production de HBI, il faudra répondre à divers défis politiques, par exemple trouver des façons de financer le développement de la production d'énergie propre au Québec et à Terre-Neuve-et-Labrador. La hausse des tarifs énergétiques aura certainement des contrecoups politiques (voir Voeten, 2024 pour une analyse du lien entre la hausse des tarifs et la hausse des appuis aux partis climatosceptiques, de même que Stokes et Warshaw, 2017 pour une analyse de l'effet de la définition des politiques énergétiques sur l'appui aux politiques climatiques). La demande en énergie des ménages est généralement insensible aux tarifs : quels que soient les tarifs, les gens ont des besoins énergétiques de base à combler et consomment de l'énergie en conséquence. Ainsi, la hausse des coûts pour les contribuables prendrait probablement la forme d'une hausse de taxes pour financer la transition de sociétés privées vers une baisse d'émissions à l'étranger.

Il y a d'autres façons de financer la transition. Hydro-Québec ayant engrangé des bénéfices confortables dans les dernières années (Coulton, 2023), une utilisation plus stratégique de cette société publique pourrait être de lui faire privilégier la production d'énergie renouvelable plutôt que le versement de dividendes au gouvernement provincial. On pourrait aussi faire financer la transition par le gouvernement fédéral. Cela dit, même si des expériences récentes montrent que certaines options de financement posent de sérieux risques, ces décisions dépendront du paysage politique canadien, dont l'analyse dépasse la portée du présent rapport.

4 La laborieuse transition de l'industrie de l'acier

4.1 État actuel de l'industrie de l'acier

L'industrie canadienne de l'acier fait partie d'importantes chaînes d'approvisionnement et fournit un grand nombre d'emplois au pays, mais émet beaucoup de CO₂. En 2019, l'industrie a produit 15 millions de tonnes de CO₂, soit environ 2 % des émissions totales du pays (Khan et coll., 2023) et 20 % des émissions attribuables aux industries lourdes. La baisse des émissions de l'industrie de l'acier serait une contribution significative et nécessaire à la cible du gouvernement du Canada, qui est d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050. L'Association canadienne des producteurs d'acier (ACPA) souhaite concourir à cette cible. L'annexe II présente les principaux acteurs de l'industrie de l'acier.

L'industrie de l'acier est également un important secteur économique qui représente 4,2 milliards de dollars canadiens dans l'économie du pays, emploie directement 23 000 travailleurs et contribue à 100 000 autres emplois (ACPA, 2024). Les trois plus grandes aciéries du Canada – ArcelorMittal Dofasco, Algoma et Stelco, toutes situées en Ontario – affichent les émissions les plus élevées et comptent le plus grand nombre de travailleurs. Il y a deux aciéries dotées de technologies de production à base de combustibles fossiles au Québec : ArcelorMittal Contrecœur et Rio Tinto Fer et Titane. Enfin, il y a un site produisant de la ferraille à faibles émissions en Saskatchewan. Deux des aciéries générant le plus d'émissions (Algoma et ArcelorMittal Dofasco) ont un plan de transition⁴. Le site d'Algoma a fait de belles avancées, et les FAE à faibles émissions sont en construction. Le site d'ArcelorMittal Dofasco, cependant, semble avoir mis sa transition en pause.

Près de 60 % de l'acier produit au Canada est fabriqué au moyen du mode de production primaire à forte intensité d'émissions utilisant des HF/CBO, le reste étant issu de la production secondaire utilisant de la ferraille fondue dans des FAE (Bureau of International Recycling, 2022). Comme la production secondaire génère déjà peu d'émissions, la suite du présent rapport sera consacrée au mode de production primaire.

⁴ Dans le présent rapport, un plan de transition se définit comme les mesures annoncées pour modifier le mode de production d'une usine en intégrant de nouvelles technologies en vue de réduire les émissions.

La figure 7 présente les principales aciéries du Canada.

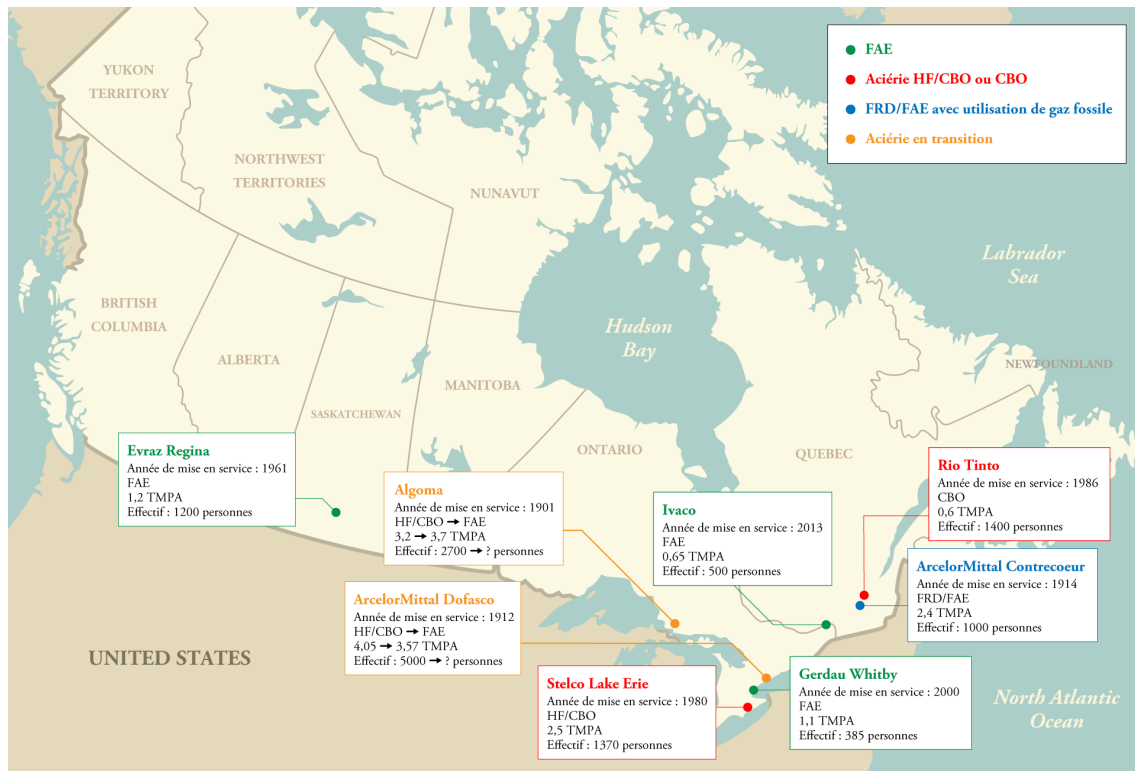


Figure 7 : Carte des aciéries du Canada

L'aciérie EVRAZ Regina se trouve en Saskatchewan, à l'ouest, mais l'essentiel de l'industrie canadienne de l'acier est situé en Ontario et au Québec, près des sources de minerai de fer et des industries en aval. À la carte de la figure 7, nous avons utilisé les couleurs suivantes pour classer les sites : le vert désigne un site à FAE, le rouge désigne un site à HF/CBO ou à CBO, le bleu désigne un site à FRD/FAE utilisant le gaz fossile, et le jaune désigne un site en cours de transition.

La plus grande aciérie est ArcelorMittal Dofasco, à Hamilton, avec une capacité de plus de 4 TMPA et une main-d'œuvre d'environ 5 000 personnes. La deuxième plus grande aciérie est Algoma, à Sault Ste. Marie, avec une capacité de 3,2 TMPA et une main-d'œuvre de 2 700 personnes. ArcelorMittal Dofasco planifie une transition vers le mode FRD/FAE qui remplacera le charbon métallurgique par du gaz fossile et réduira sa capacité, tandis qu'Algoma prévoit une transition vers des FAE alimentés avec de la ferraille et du fer d'autres producteurs, tout en augmentant sa capacité totale. Les autres sites ayant recours aux énergies fossiles qui n'ont pas de plan de transition sont ceux d'ArcelorMittal Contrecoeur et de Rio Tinto à l'extérieur de Montréal, et celui de Stelco au lac Érié. Les sites d'ArcelorMittal, d'Algoma et de Stelco sont de loin les plus importants émetteurs industriels en Ontario, leurs émissions de CO₂ s'étant respectivement chiffrées en 2019 à 5 millions, 4 millions et 3,5 millions de tonnes (Crawley, 2022).

L'industrie canadienne de l'acier est étroitement intégrée à l'industrie nord-américaine, ayant des liens avec des fournisseurs de minerai de fer en amont et avec des industries en aval,

comme l'industrie automobile. Sa capacité de production annuelle est d'environ 13 TMPA (Cheminfo Services Inc., 2019), dont quelque 7 millions de tonnes sont exportées (International Trade Administration, 2024). Environ 85 % de ces exportations se font vers les États-Unis (Observatory of Economic Complexity, 2024). Plus de 50 % des produits d'acier importés au Canada proviennent des États-Unis. Par ailleurs, près de la totalité du minéral de fer importé au Canada vient des États-Unis (Observatory of Economic Complexity, 2024).

4.2 Décarbonation : progrès et défis

Comme nous l'avons mentionné, le gouvernement canadien et l'industrie canadienne de l'acier ont des cibles climatiques ambitieuses. Le gouvernement s'est associé à l'industrie pour soutenir la transition de plusieurs sites. Dans le cadre du Fonds stratégique pour l'innovation, le gouvernement a investi 400 millions de dollars canadiens dans la transition du site d'ArcelorMittal Dofasco visant à le faire passer du mode de production HF/CBO à charbon au mode FRD/FAE à gaz fossile. Les travaux ont commencé en 2022 (Innovation, Sciences et Développement économique Canada, 2022). Le Fonds stratégique pour l'innovation a également octroyé à Algoma 200 millions de dollars canadiens pour financer sa transition des HF/CBO aux FAE (Canada.ca, 2024b). Les deux sites visent à réduire leurs émissions d'environ 3 millions de tonnes de CO₂ par an, leur niveau actuel étant respectivement de 4,7 et de 4 millions de tonnes (Crawley, 2022). Le gouvernement appuie également la décarbonation du site de Rio Tinto à l'extérieur de Montréal, même si le plan consiste à décarboner l'ensemble du site, y compris d'autres minéraux, et qu'on ignore à quel point les émissions générées par la production d'acier seront réduites (Canada.ca, 2024c). Les trois autres sites, qui n'ont pour l'instant aucun plan de transition ou pour lesquels la transition est au point mort, sont Stelco, ArcelorMittal Contrecoeur et ArcelorMittal Dofasco.

Tableau 5 : Aciéries du Canada

Nom du site	Entreprise	Emplacement	Technologie actuelle	Dernier remplacement des garnitures ou dernière installation	Changement technologique prévu	Capacité (TMPA)
Algoma	Algoma	Sault Ste. Marie, Ontario	FAE (T1 2025)	2025	FAE (transition à partir des HF/CBO)	3,2 → 3,7
ArcelorMittal Contrecoeur	ArcelorMittal	Contrecoeur, Québec	FRD/FAE	1914	-	2,4
ArcelorMittal Dofasco	ArcelorMittal	Hamilton, Ontario	HF/CBO	2010	FRD/FAE (retardé)	4,05 → 3, 75
EVRAZ Regina	EVRAZ North America	Regina, Saskatchewan	FAE	1981	-	1,2
Gerdau Whitby	Gerdau Long Steel North America	Whitby, Ontario	FAE	1965	-	1,1
Ivaco	Ivaco Rolling Mills	L'Orignal, Ontario	FAE	2013	-	0,65
Rio Tinto	Rio Tinto	Sorel-Tracy, Québec	CBO	1980	-	0,6
Stelco	Cleveland-Cliffs	Port Dover, Ontario	HF/CBO	2020	-	2,5

Source : Global Steel Plant Tracker (Global Energy Monitor)

4.2.1 Stelco

Au moment de la rédaction du présent rapport, le site de Stelco au lac Érié et celui d'ArcelorMittal Contrecoeur à l'extérieur de Montréal n'avaient pas de plan de transition. Le site de Stelco vient d'être acheté par l'entreprise américaine Cleveland-Cliffs, le premier producteur d'acier en Amérique du Nord, qui possède 6 des 10 hauts fourneaux aux États-Unis. Lourenco Goncalves, président et chef de la direction de Cleveland-Cliffs, était déterminé à acquérir Stelco en raison de la rentabilité de ses opérations existantes et des synergies avec les autres sites de production de Cleveland-Cliffs utilisant le même mode de production d'acier, soit les HF/CBO (Friedman, 2024). La philosophie stratégique de M. Goncalves est fondée sur l'expansion dynamique du segment de marché de Cleveland-Cliffs de façon à renforcer le pouvoir de fixation des prix, de même que sur la consolidation des synergies entre les usines utilisant les mêmes technologies, ce qui suggère qu'il est résolument en faveur du mode de production par hauts fourneaux (Binnie et Flowers, 2023). Stelco a mis à niveau son haut fourneau et en a remplacé les garnitures en 2020 (Stelco, 2020), un investissement important dans ses installations à forte intensité d'émissions sur le site. Les hauts fourneaux peuvent habituellement fonctionner pendant 20 ans après le remplacement des garnitures (Vogl et coll., 2021). Par conséquent, il est fort probable que toute décarbonation à court terme du site de Stelco se fasse par captage de carbone. Toutefois, cette technologie n'est pas assez au point pour être utilisée dans le cadre de la production d'acier à l'aide du mode HF/CBO. Si ce plan est mis à exécution, le taux de captage devra être suffisamment élevé et les fuites réduites au minimum pour que la réduction des émissions de carbone soit conforme à l'Accord de Paris (Bataille et coll., 2023). Dans le cas contraire,

la modernisation des installations en intégrant le captage de carbone pour réduire les émissions nécessiterait un investissement considérable dans l'accroissement de la production d'acier à base de charbon, ce qui pourrait ne pas être compatible avec l'objectif du Canada d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050.

4.2.2 ArcelorMittal Dofasco et Contrecoeur

Si le plan de transition du site d'ArcelorMittal Dofasco prévoit notamment de passer au gaz fossile, le site de Contrecoeur, qui utilise actuellement le gaz fossile, ne prévoit pas de passer à une technologie moins polluante. Le plan d'ArcelorMittal Dofasco de passer au gaz fossile réduira les émissions d'environ 60 % ou 3 millions de tonnes de CO₂ par année. Il nécessitera la construction d'un pipeline de près de 14 kilomètres pour le transport du gaz, un investissement majeur dans une mesure temporaire (Fehir, 2023). Le coût du pipeline n'était pas connu au moment de la rédaction du présent rapport, pas plus que la mesure dans laquelle le pipeline pourra plus tard servir à transporter de l'hydrogène. ArcelorMittal affirme que son plan de transition prévoit le passage à l'hydrogène à long terme et que l'investissement rendra donc le site prêt pour l'hydrogène (ArcelorMittal, 2023). Cependant, ses investissements majeurs dans les infrastructures de gaz fossile ainsi que le manque de financement de l'équipement adapté pour l'hydrogène, comme des électrolyseurs et un système de chauffage à faibles émissions permettant une réduction par l'hydrogène à 100 %, suggèrent que la transition vers l'hydrogène sera difficile à mettre en œuvre.

En outre, il reste à déterminer comment approvisionner en hydrogène le site d'ArcelorMittal Dofasco et si le pipeline construit pour le site sera lui-même prêt pour l'hydrogène. De récentes études ont mis en évidence des risques et des défis importants liés à l'utilisation d'infrastructures de gaz fossile pour l'hydrogène (Martin et coll., 2024). Si ArcelorMittal envisage d'utiliser de l'hydrogène bleu et de séparer le carbone de l'hydrogène sur place, il lui faudra repérer des sites de stockage de carbone au coût d'utilisation acceptable. En raison des coûts de transport élevés du dioxyde de carbone, ArcelorMittal devra probablement trouver un site de stockage de carbone vaste et abordable à proximité du site de Dofasco (p. ex. en Ontario ou aux États-Unis), plutôt que de transporter le carbone à un site de stockage éloigné.

Certains médias ont récemment rapporté que le projet au site de Dofasco était retardé et que la construction n'avait pas encore commencé, et ce, deux ans après la tenue de la cérémonie de début des travaux à laquelle avait participé le premier ministre Justin Trudeau (Beattie, 2024). Un tel retard laisse croire qu'il sera difficile pour ArcelorMittal de construire les installations prévues pour réduire les émissions d'ici 2028, sans parler de faire la transition vers une technologie carboneutre sur le site. Si tel est le cas, ArcelorMittal a la possibilité de faire une transition plus simple vers les FAE et de transporter la ferraille et le HBI provenant d'ailleurs (comme le prévoit le projet de l'aciérie Algoma). L'entreprise pourrait ainsi réduire les investissements dans le site et accélérer le processus de transition. Pour que ce plan permette la réduction des émissions, les émissions du HBI importé vers le site de Dofasco devront être très faibles et pouvoir à terme parvenir à un niveau quasi nul selon un plan défini. Une telle stratégie risque toutefois d'entraîner d'importantes pertes d'emplois (comme ce fut le cas à Algoma), compromettant ainsi la viabilité politique de la transition. Soulignons qu'ArcelorMittal Dofasco est la seule aciérie intégrée au Canada qui n'est pas syndiquée, ce

qui laisse les travailleurs sans représentation syndicale s'il y a des négociations sur la manière dont la transition et les emplois doivent être gérés (p. ex. en ce qui concerne les autres stratégies de développement industriel ou les prestations de retraite).

Le dernier site sans plan de transition est le site à FRD/FAE d'ArcelorMittal Contrecoeur, à l'extérieur de Montréal, qui utilise le gaz fossile comme agent réducteur. ArcelorMittal a testé avec succès l'utilisation de l'hydrogène sur le site (ArcelorMittal, 2022), mais n'a pas annoncé de plan visant à passer à l'hydrogène et à utiliser de l'électricité propre pour le reste de sa consommation énergétique. Le profil technologique (mode FRD/FAE utilisant le gaz fossile) et l'intensité correspondante des émissions du site d'ArcelorMittal Contrecoeur sont ceux vers quoi se dirige le site de Dofasco. L'intensité des émissions sur le site d'ArcelorMittal Contrecoeur est actuellement de 640 kg d'équivalent CO₂ par tonne (Normand, 2024), une valeur nettement plus faible que la moyenne mondiale pour le mode FRD/FAE, probablement en raison de la proportion apparemment élevée de ferraille dans les intrants métalliques – environ 44 %, en supposant que le site produise 1,8 TMPA d'acier (Global Energy Monitor, 2024a) avec un maximum de 1 TMPA d'intrants de FRD (Midrex, 2022). Il s'agit aussi du choix technologique prévu à ArcelorMittal Dofasco. Cependant, ce niveau d'émissions est encore loin du seuil de 400 kg d'équivalent CO₂ par tonne d'acier que l'AIE considère comme des émissions quasi nulles, à supposer qu'il n'y ait aucun intrant de ferraille, et encore plus loin du seuil de 250 kg d'équivalent CO₂ par tonne d'acier requis pour atteindre un niveau d'émissions quasi nulles, à supposer qu'on utilise 44 % de ferraille (AIE, 2022).

4.3 Comment atteindre la carboneutralité

Il reste deux défis importants que l'industrie canadienne de l'acier doit relever pour devenir carboneutre et contribuer aux engagements pris par le Canada en vertu de l'Accord de Paris : 1) réduire suffisamment les émissions pour que les aciéries atteignent des niveaux d'émissions quasi nulles, selon la définition donnée par l'AIE; 2) garantir de bonnes perspectives d'emploi aux travailleurs afin que la transition demeure politiquement viable. Le premier défi consiste à comprendre où se situe la ligne d'arrivée dans la course vers la carboneutralité, et le deuxième, à s'assurer qu'il y a une volonté politique d'atteindre la carboneutralité.

Premièrement, le gaz fossile sans mesure de réduction d'émissions n'est pas un agent réducteur carboneutre, et l'atteinte de la carboneutralité doit reposer sur une stratégie qui transformera l'acier canadien en un produit entièrement – et non partiellement – carboneutre. La définition de combustibles fossiles à émissions réduites est âprement débattue : il existe une grande différence entre réduire les émissions pour les faire passer des niveaux actuels à des niveaux inférieurs, et réduire suffisamment les émissions pour respecter l'Accord de Paris. Dans un article récent, plusieurs des principaux auteurs du dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat soutiennent que, pour respecter l'Accord de Paris, les émissions des sites industriels existants doivent être réduites de plus de 90 % par rapport aux niveaux actuels (Bataille et coll., 2023). Cette cible est difficile à atteindre, puisque l'implantation de la technologie de CSC dans les aciéries pour réduire les émissions de plus de 50 % présentera probablement un coût inacceptable

(Bashmakov et coll., 2022). Ainsi, les plans de transition actuels de l'industrie de l'acier sont peut-être trop axés sur la manière de réduire les émissions à un coût minimal et négligent le fait que ces choix technologiques pourraient mener à des impasses dans la réalisation de l'objectif à long terme des émissions quasi nulles. Les plans de décarbonation pour le reste des aciéries devraient clairement expliquer la façon d'atteindre des émissions quasi nulles.

Deuxièmement, en l'absence de plan de transition ambitieux et complet pour l'industrie sidérurgique canadienne et en présence d'une approche réactive et peu systématique pour réduire les émissions, la transition pourrait avoir une incidence négative sur l'emploi et le pouvoir d'achat des communautés à l'échelle locale (Blackwell, 2021). C'est particulièrement le cas à Sault Ste. Marie, dans le Nord de l'Ontario, où Algoma Steel délaissera le mode HF/CBO à charbon pour les FAE. Puisque les FAE sont plus faciles à utiliser et que le site ne réduira plus le fer et n'utilisera plus de four à coke, le nombre de tâches et d'emplois associés à la production d'acier diminuera. Sault Ste. Marie se situe dans le Nord de l'Ontario, où l'industrie de la première transformation des métaux constitue la part la plus élevée de l'emploi, soit 1,4 %, devant Hamilton et la péninsule du Niagara (1,2 %), London (0,4 %) et Windsor-Sarnia (0,4 %) (Guichet-Emplois, 2024). L'industrie constitue également un choix de carrière très populaire, offrant des salaires qui permettent de subvenir aux besoins des familles aux titulaires d'un diplôme d'études secondaires, lesquels représentent 42 % des employés de première transformation des métaux en Ontario – les titulaires d'un certificat d'études postsecondaires et les titulaires d'un diplôme universitaire représentant respectivement 38,8 % et 13,3 % de la main-d'œuvre. Sans stratégie globale pour développer d'autres segments de la chaîne d'approvisionnement en acier à faibles émissions de carbone (comme la production en amont de fer à faibles émissions de carbone mentionnée dans ce rapport ou des segments en aval tels que le développement de technologies propres) qui peuvent compenser les pertes d'emplois, ou même augmenter les possibilités d'emploi pour les Canadiens, la transition pourrait devenir politiquement non viable.

5 Charbon métallurgique : le Canada leader d'un secteur en déclin

En plus de produire du minerai de fer, le Canada est aussi un important producteur d'une ressource clé pour la production d'acier à fortes émissions : le charbon à coke (ou charbon métallurgique). Il s'agit d'un type de charbon dont les propriétés physiques et chimiques lui permettent d'être utilisé dans un haut fourneau.

Le charbon est la source d'énergie ayant l'intensité carbonique la plus élevée au monde en raison de son rôle non seulement dans la production d'électricité, mais également dans l'industrie sidérurgique, où les HF/CBO à charbon constituent généralement le mode de production d'acier à plus forte intensité carbonique. En utilisant un facteur de conversion de 2,668 tonnes de CO₂ par tonne de charbon à coke (Global Energy Monitor, 2024b), nous pouvons estimer que les 27 millions de tonnes de charbon métallurgique produites au Canada en 2022 ont généré environ 72 mégatonnes d'émissions mondiales de CO₂, soit environ 10 % des émissions territoriales du pays.

L'abandon de l'exploitation du charbon au profit d'autres activités à faibles émissions de carbone pour les communautés, telles que l'exploitation de minéraux essentiels, la mise au point de technologies propres ou le développement de sources d'énergie renouvelable, pourrait aider à réduire considérablement les émissions mondiales. En 2022, le Canada a contribué à 2,4 % de la production mondiale de charbon métallurgique, ce qui en fait le septième producteur de charbon métallurgique au monde et le troisième au sein de l'OCDE, après l'Australie et les États-Unis (Ressources naturelles Canada, 2024a).



Figure 8 : Carte de mines actives ou désaffectées de charbon au Canada
Source : Ressources naturelles Canada

La plupart des mines de charbon du Canada sont situées dans l'ouest du pays, dans les montagnes bordant la frontière entre la Colombie-Britannique et l'Alberta. Bien qu'il y ait deux mines dans le sud de la Saskatchewan et deux mines mises en réserve en Nouvelle-Écosse, toutes les mines de charbon métallurgique se trouvent dans l'ouest du pays.

La majeure partie de la valeur des minéraux exploités au Canada vient du charbon. Il est difficile de trouver des données propres au charbon métallurgique, mais nous savons que l'exploitation du charbon représente au total environ 12,5 milliards de dollars canadiens, soit 17 % de la valeur des minéraux exploités (Ressources naturelles Canada, 2024c). On compte actuellement 5 400 travailleurs dans le secteur de l'exploitation du charbon métallurgique dans les régions reculées des Rocheuses. La transition mondiale visant à délaissier la production d'acier à base de charbon risque d'entraîner des répercussions majeures dans les régions qui exploitent le charbon. C'est pourquoi il faut un plan proactif pour faciliter cette transition. Il existe des politiques qui encouragent l'abandon du charbon, comme le Fonds d'infrastructure de l'Initiative canadienne de transition pour l'industrie du charbon, lancé en 2020. Ce fonds de 150 millions de dollars canadiens vise à aider les communautés à diversifier leur économie et à renoncer au charbon en investissant dans les infrastructures (Agence de promotion économique du Canada atlantique, 2024).

5.1 Marchés d'exportation et perspectives de la demande

Puisque ses mines de charbon métallurgique se trouvent à l'ouest et que ses aciéries intégrées se trouvent à l'est, le Canada exporte la majeure partie de son charbon métallurgique. Pour cette raison, la production canadienne de charbon métallurgique sera gravement touchée par la transition de l'industrie sidérurgique qui s'opère à l'extérieur du pays. La figure 9 montre la taille des principaux marchés d'exportation de charbon métallurgique du Canada en pourcentage.

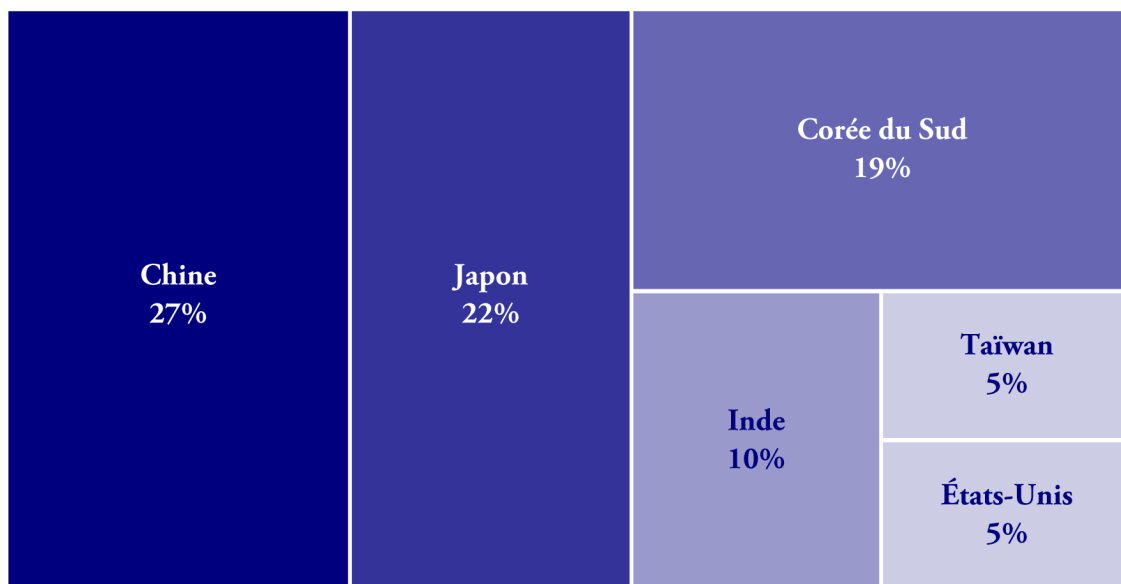


Figure 9 : Importateurs de charbon métallurgique canadien, en pourcentage du total
Source : Ressources naturelles Canada

Les principaux marchés d'exportation de charbon métallurgique du Canada sont, par ordre d'importance, la Chine, le Japon et la Corée du Sud. La China Iron and Steel Association a proposé une cible de 30 % pour la production d'acier à partir de ferraille d'ici 2035, ce qui entraînerait une réduction de la demande en charbon métallurgique en Chine d'environ 160 millions de tonnes⁵, si l'on suppose que la production totale d'acier reste la même. La Corée du Sud investit déjà dans la production de HBI en Australie afin de délaissier la production d'acier à base de charbon. Toutefois, l'Inde risque d'accroître sa production d'acier à base de charbon dans les décennies à venir, ce qui pourrait compenser en partie la diminution de la production d'acier à base de charbon dans d'autres régions du monde.

La transition mondiale de l'industrie de l'acier et l'augmentation de la production d'acier à base de ferraille en Chine risquent d'avoir une incidence majeure sur le marché mondial du charbon métallurgique. Ces dernières années, le cours du charbon métallurgique sur les marchés mondiaux a augmenté en raison de pénuries à la suite de l'invasion de l'Ukraine par la Russie. Cependant, compte tenu de la surcapacité de production d'acier à base de charbon

⁵ En 2022, la Chine a produit au total 1 018 Mt d'acier, dont 90,5 % en utilisant le mode HF/CBO. Si cette proportion chute à 70 % (de 921,3 à 712,6 Mt) et que chaque tonne d'acier nécessite 770 kg de charbon métallurgique, la demande en charbon diminuera de 160 TMPA.

en Chine, de la baisse des activités en construction et de l'augmentation de l'utilisation de ferraille, les prix du charbon métallurgique diminueront probablement de façon permanente. Selon tous les scénarios présentés dans les Perspectives énergétiques mondiales 2024 de l'AIE et illustrés à la figure 10, le marché du charbon métallurgique sera en baisse.

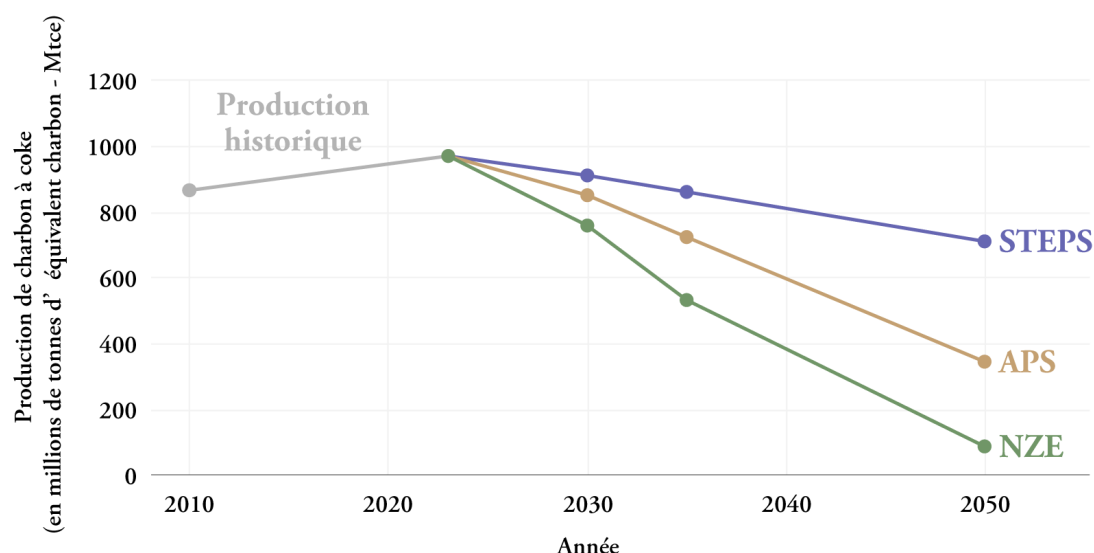


Figure 10 : Production de charbon à coke dans les scénarios de transition de l'AIE
 STEPS : Scénario des politiques annoncées montrant l'évolution attendue dans le paysage politique actuel. APS : Scénario des nouveaux engagements annoncés montrant l'évolution attendue selon les engagements annoncés en matière de décarbonation. NZE : Changement nécessaire pour limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C. Source : Perspectives énergétiques mondiales 2024 de l'AIE.

Tous les scénarios représentés à la figure 10 prévoient une chute du marché mondial du charbon métallurgique. Le paysage politique actuel verra une baisse du marché, lequel reviendra presque à son niveau de 2010, tandis que les engagements annoncés et la cible de 1,5 °C nécessiteront une baisse sous les niveaux de 2010.

La décroissance du marché du charbon métallurgique entraînera une baisse des prix, de sorte que les sites de production les plus coûteux seront les premiers à ne plus être rentables. Le Canada pourrait être à risque puisque sa production de charbon métallurgique se situe à l'extrémité supérieure de la fourchette de coûts selon plusieurs organisations, y compris Wood Mackenzie (Griffin, 2019) et l'AIE (Baruya, 2018). Il est donc possible que le pays connaisse une diminution de la demande plus rapide que celle représentée à la figure 10.

Voilà pourquoi la position du Canada sur le marché du charbon métallurgique peut se résumer à celle d'un chef de file d'un secteur en déclin. Tous les scénarios de l'AIE prévoient une baisse des revenus d'exportation, des emplois et des bénéfices dans ce secteur; reste à savoir à quelle vitesse elle se produira. Il y a deux façons de faire face à cette réalité : accepter passivement le déclin ou se retirer du marché avant qu'il ne soit trop tard.

6 La décarbonation comme processus de transition vers une nouvelle chaîne de valeur sidérurgique

Le maintien d'une industrie sidérurgique basée sur les combustibles fossiles présente des risques importants. Même si la transition vers une production sidérurgique à faibles émissions de carbone n'est certainement pas sans risques, la création d'une nouvelle chaîne de valeur en séparant la réduction du fer de la production de l'acier pourrait renforcer l'industrie sidérurgique canadienne. En exploitant ses avantages comparatifs, tels que ses importantes ressources énergétiques renouvelables, son minerai de fer de haute qualité, ses bonnes infrastructures et sa main-d'œuvre qualifiée, le Canada pourrait renforcer son développement industriel en produisant lui-même du HBI vert, ce qui entraînerait une augmentation des revenus d'exportation et une réduction des émissions tant au pays qu'à l'étranger.

Une telle transition exige de développer de nouvelles compétences et de créer des emplois tout en réduisant la demande de main-d'œuvre dans le domaine de la production d'acier traditionnelle. La Suède, dont le profil est semblable à celui du Canada, a entrepris de mettre certains de ces changements à l'essai, bien qu'à une échelle plus petite. Dans le présent chapitre, nous commencerons par analyser le potentiel de transition du Canada en le comparant avec la transition de l'industrie sidérurgique en cours en Suède. Ensuite, nous examinerons en quoi les variations de la demande de main-d'œuvre pourraient toucher les travailleurs des secteurs des mines, du fer et de l'acier.

6.1 Comparaison de la transition en Suède et au Canada

La figure 11 donne un aperçu des principales entreprises sidérurgiques suédoises et canadiennes, de leur capacité de production et de leurs engagements en matière de réduction des émissions.



- Entreprise d'extraction de minerai de fer
- Capacité de production de 26 TMPA
- 5200 salariés
- Objectif "proche de zéro émission" d'ici 2045
- Prévoit de réduire ses émissions de 40-50 millions de tonnes par an



- Entreprise de production d'acier
- Capacité de production de 3,8 TMPA (en Suède)
- 5400 salariés
- Objectif "proche de zéro émission" d'ici 2030
- Réduira ses émissions de 8 millions de tonnes par an



- Entreprise de production d'acier
- Capacité de production de 2,5-5 TMPA
- Recruttera 1500 salariés
- Start-up "proche de zéro émission"
- Émissions 95% plus basses que la méthode de production standard



- Entreprise de production d'acier
- Capacité de production de 4,8 TMPA
- 10000 salariés
- Objectif de neutralité carbone d'ici 2050
- Prévoit de réduire ses émissions de 3 millions de tonnes par an



- Entreprise de production d'acier
- Capacité de production de 3,2 TMPA
- 2900 salariés
- Objectif de neutralité carbone d'ici 2050
- Prévoit de réduire ses émissions de 3 millions de tonnes par an



- Entreprise de production d'acier
- Capacité de production de 2,5 TMP.
- 2200 salariés
- Objectif de neutralité carbone d'ici 2050
- Pas de plan de réduction significatif des émissions

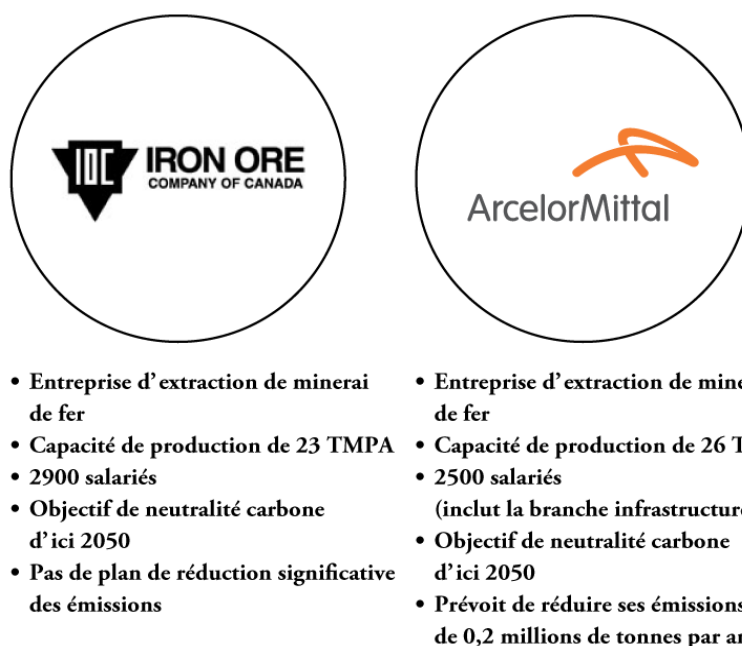


Figure 11 : Entreprises sidérurgiques suédoises et canadiennes
À noter que Stegra s'appelait autrefois H2 Green Steel.

La figure 11 montre clairement que les entreprises suédoises sont plus ambitieuses sur le plan climatique que les entreprises canadiennes. La réduction des émissions proposée par les trois entreprises suédoises totalise plus de 50 millions de tonnes de CO₂, comparativement à 6,2 millions de tonnes pour les entreprises canadiennes. De plus, l'entreprise suédoise en démarrage Stegra (anciennement H2 Green Steel) commencera ses activités et doublera la capacité de production d'acier à très faibles émissions de la Suède, supplantant ainsi les producteurs d'acier à forte intensité d'émissions ailleurs dans le monde (Bataille et coll., 2024).

Les conditions d'une transition de l'industrie sidérurgique ne sont pas plus sévères au Canada qu'en Suède. En fait, les ressources naturelles et infrastructurelles du Canada laissent à penser qu'une telle transformation pourrait être aussi ambitieuse que celle en cours en Suède. D'après les leçons tirées de la Suède, quatre facteurs témoignent du fort potentiel du Canada à effectuer ce genre de transition : des ressources riches en minerais de fer, un fort potentiel d'expansion de la production d'énergie éolienne terrestre, des infrastructures solides et un appui politique massif en faveur de la carboneutralité d'ici 2050.

Comme nous l'avons mentionné plus haut dans le présent rapport, les ressources en minerais de fer du Canada sont à haute teneur, et plusieurs mines profitent d'investissements pour améliorer la production de billes de minerais de fer à réduction directe. Le Canada pourrait donc être un moteur important de la transition mondiale de l'industrie sidérurgique si ces ressources étaient utilisées pour une production à faibles émissions de carbone, plutôt que pour une production traditionnelle à forte intensité d'émissions.

Outre le minerais de fer, de grandes quantités d'énergie propre sont nécessaires à la production de fer à faibles émissions de carbone. Cette étape de réduction devra être intégrée à la chaîne

de valeur, que ce soit à l'étape finale de la production d'acier, à une étape intermédiaire avant l'expédition ou à l'étape de l'exploitation du minerai de fer. Pour augmenter la valeur apportée à l'échelle nationale, le Canada pourrait d'une part remonter la chaîne de valeur en intégrant la réduction du minerai de fer aux premières étapes, et d'autre part expédier le HBI vert aux producteurs d'acier à l'étranger. Les ressources naturelles du Canada pourraient ainsi être exploitées de façon à réduire les émissions tant au pays qu'à l'étranger. Cette stratégie est poursuivie par la société minière suédoise LKAB et le producteur d'énergie Vattenfall, deux des trois sociétés de la coentreprise HYBRIT. Comme la Suède, le Canada devra augmenter considérablement sa production d'énergie propre. Le Canada est dans une position favorable à une telle expansion, mais il n'a pas encore exploité ce potentiel.

Le tableau 6 fournit une comparaison simple de la Suède ainsi que du Québec et du Labrador pour illustrer le potentiel de développement de l'énergie éolienne terrestre dans ces deux régions clés du Canada.

Tableau 6 : Comparaison de la Suède au Québec et au Labrador

Comparaison : Suède/Québec et Labrador	Suède	Québec et Labrador
Population (millions d'habitants)	10,5	8,5
Superficie	447 430 km ²	2 070 000 km ²
Distance Stockholm-Kiruna	956 km	
Distance Québec-Labrador City		748 km
Énergie éolienne terrestre (2023)	16,25 GW	4,1 GW
Production de minerai de fer (2023)	36 TMTA	59 TMTA

Malgré sa plus petite taille et sa plus grande population, la Suède a une capacité de production d'énergie éolienne terrestre environ quatre fois plus élevée que celle du Québec et du Labrador réunis.

Même si la Suède et le territoire englobant le Québec et le Labrador sont vastes et peu peuplés, la Suède dispose de quatre fois plus d'énergie éolienne terrestre. En développant l'énergie éolienne terrestre, la Suède ne visait pas à réduire la consommation de combustibles fossiles dans le secteur de l'électricité, puisqu'elle avait déjà de l'énergie propre (grâce à de grandes installations hydroélectriques et nucléaires), mais plutôt à fournir de l'électricité à faible coût. L'intégration de l'hydroélectricité flexible (aussi dans le nord de la Suède) présente des avantages considérables, puisque l'hydroélectricité peut être conservée pour être utilisée en l'absence de vent. L'énergie à faible coût constitue un avantage stratégique important pour l'industrie suédoise, car elle attire des projets à forte consommation d'énergie, tels que les centres de données, la production d'acier, l'exploitation minière et le raffinage de minéraux, la production de batteries et les électrocarburants. De tels investissements engendrent des retombées positives sur le développement économique qui ne peuvent être égalées par la simple exportation d'électricité au-delà des frontières.

Les mines de fer du Canada et celles de la Suède sont situées à une distance similaire de leurs centres urbains respectifs. La distance entre les villes de Québec et de Labrador City, un centre

minier névralgique, est plus courte que la distance entre Stockholm, la capitale de la Suède, et Kiruna, où se trouvent le siège social de LKAB et sa plus grande mine. La figure 12 montre la Suède superposée au Québec, les villes de Stockholm et de Québec étant placées au même endroit sur la carte à des fins de comparaison. Les mines canadiennes sont représentées en bleu, et les mines suédoises, en rouge.



Figure 12 : Comparaison géographique entre la Suède et la province du Québec
La carte illustre les distances entre les mines et les centres urbains des deux territoires.

LKAB prévoit d'ouvrir sa première usine de réduction directe du fer par l'hydrogène à Gällivare, dans la mine la plus au sud, en vue d'un transport sur les voies ferrées existantes vers les ports de Luleå et de Narvik, en Norvège (à l'ouest de la Suède), d'où le HBI pourra être expédié dans le reste du monde. Les sociétés canadiennes d'exploitation de fer pourraient installer leurs usines de réduction directe du fer par l'hydrogène à proximité des mines afin de réduire les coûts de transport : comme il faut 1 504 tonnes de fer pour produire 1 tonne de HBI, la réduction du minerai de fer près des mines pourrait diminuer le poids total transporté. Une autre option serait de réduire le minerai de fer près de la côte avant son transport final, par exemple à Sept-Îles, d'où est expédiée la majeure partie du fer canadien. Toutefois, la production à forte consommation d'énergie du site dépendra probablement de l'accès à un nombre suffisant de lignes de transport, comme LKAB et Stegra ont installé leurs sites à proximité des principales lignes de transport pour avoir accès à l'électricité nécessaire. Le système de transport bien établi du Québec, actuellement utilisé pour transporter l'électricité provenant des ressources hydroélectriques du nord vers les centres de consommation du sud, constitue un atout majeur pour la réduction directe par l'hydrogène au Canada, lorsqu'on voit que d'autres sites riches en ressources énergétiques renouvelables dans le monde ne disposent pas de système de transport.

L'implantation d'un site de réduction directe du fer par l'hydrogène prévue à Gällivare selon le plan de décarbonation de la Suède signifie que LKAB prendra en charge l'étape de la

production de fer actuellement réalisée par le producteur d'acier SSAB, qui prévoit de construire des FAE pour remplacer ses sites à HF/CBO dans les villes suédoises de Luleå et d'Oxelösund. Il s'ensuivra une diminution des tâches et donc des emplois, comme à Algoma, en Ontario.

Or, la décision finale d'investissement de fermer le haut fourneau de Luleå a été qualifiée de « fantastique » par le président du syndicat local Tomas Karlsson, qui a affirmé que c'était « génial de mener toutes les aciéries du monde sur la voie de la décarbonation » (Rocksén, 2024b). Cet optimisme vient du fait que SSAB conservera tous les emplois existants à l'usine de Luleå en déplaçant le processus de laminage en aval de Borlänge à Luleå. Cette délocalisation réduira également la consommation d'énergie, puisqu'il ne sera pas nécessaire de réchauffer les brames d'acier après le transport. Même Sven-Erik Rosén, président du syndicat à Borlänge, s'est dit « optimiste » à la vue des nouveaux investissements dans la production en aval du site, par exemple dans une filiale de SSAB fabriquant des panneaux d'acier pour le secteur de la construction (Rocksén, 2024a). Ce remaniement de la chaîne d'approvisionnement en acier contribuera à protéger les emplois dans les communautés dépendantes de la production d'acier et à créer des emplois là où la chaîne de valeur se développera. M. Rosén est aussi représentant adjoint des travailleurs au conseil d'administration de SSAB, ce qui pourrait renforcer l'engagement de l'entreprise à l'égard des intérêts des employés.

6.2 Répercussions de la transition de l'industrie sidérurgique sur le marché du travail

Au même titre que la Suède, le Canada a une forte tradition syndicale qui joue un rôle déterminant dans la transition de l'industrie sidérurgique. Une main-d'œuvre qualifiée est en effet essentielle à la réalisation dans les délais prévus de grands projets de construction, par exemple sur le plan de l'énergie renouvelable, du transport et des activités industrielles. Comme nous l'avons mentionné, le développement des activités de réduction du fer au Canada pourrait créer 14 000 emplois dans une nouvelle industrie du fer vert, de même que des emplois dans les secteurs de l'énergie renouvelable, des réseaux et des infrastructures. Cependant, sans stratégie de transition axée sur le rôle des travailleurs, ce changement risque d'avoir une incidence négative sur le marché du travail du Canada en général, notamment en Ontario et au Québec où se trouve la majeure partie de l'industrie sidérurgique du pays. La viabilité politique d'une transition risque d'être compromise s'il y a des conséquences négatives pour les personnes travaillant dans les secteurs concernés (Breetz et coll., 2018; Stokes et Warshaw, 2017).

Aujourd'hui, l'industrie sidérurgique constitue un choix de carrière intéressant puisqu'elle offre aux personnes sans diplôme collégial ou universitaire un salaire leur permettant de faire vivre leur famille. La figure 13 montre les salaires moyens au cours des cinq dernières années dans tous les secteurs ainsi que dans le secteur manufacturier, le secteur sidérurgique et le secteur des travaux de génie liés à l'énergie électrique, c'est-à-dire de la construction d'éoliennes et de panneaux solaires.

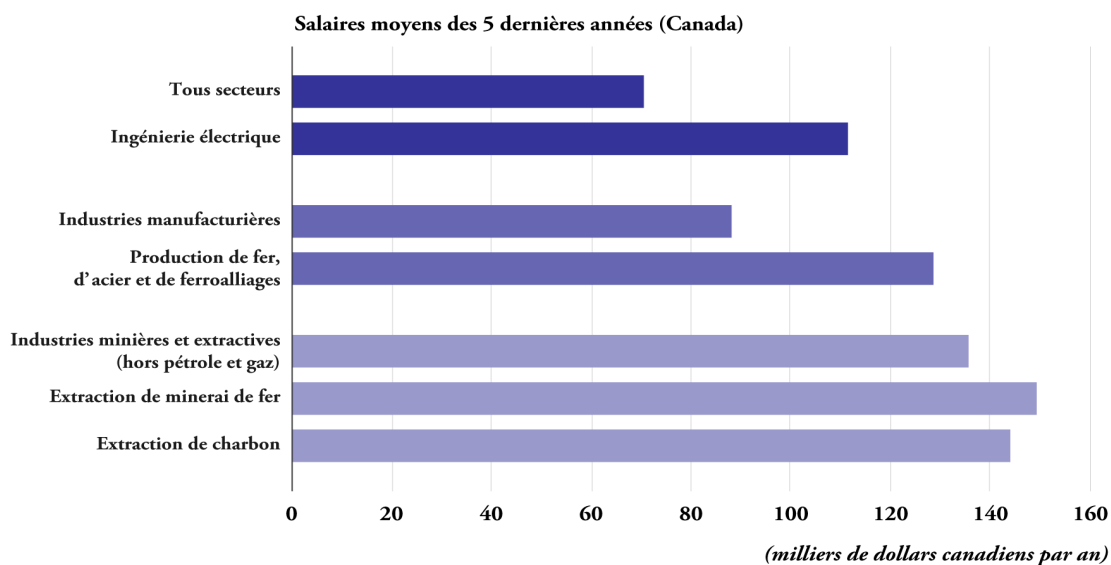


Figure 13 : Salaires moyens observés au cours des cinq dernières années dans une sélection de secteurs.
Source : Statistique Canada

Dans l'échantillon présenté à la figure 13, nous constatons que le secteur de l'exploitation du minerai de fer est celui qui offre les salaires les plus élevés, soit environ le double de la moyenne de tous les secteurs. Le secteur de l'exploitation du charbon suit de près le secteur de l'exploitation du minerai de fer, les deux offrant des salaires plus élevés que le secteur minier en général. Le secteur sidérurgique propose des salaires plus élevés que le secteur manufacturier en général. Enfin, les salaires dans le secteur des travaux de génie liés à l'énergie électrique sont également assez élevés, bien qu'inférieurs à ceux du secteur sidérurgique.

Cette situation fait obstacle à la viabilité politique d'une transition de l'industrie sidérurgique au Canada. Premièrement, si une transition des aciéries se traduit par une perte d'emplois bien rémunérés, le bien-être général des travailleurs de l'acier et le pouvoir d'achat des communautés qui vivent de l'acier risquent de diminuer. En conséquence, l'appui politique à une transition pourrait également diminuer, et la réduction des émissions pourrait être vue comme entraînant une perte d'emplois, ce qui compromettrait les plans de transition. Deuxièmement, si les autres secteurs d'emploi qui devraient connaître une croissance à la suite d'une transition (comme le secteur des travaux de génie liés à l'énergie électrique) offrent des salaires inférieurs à ceux des secteurs à forte intensité d'émissions, la transition risque de faire baisser les salaires des travailleurs, même si les emplois à forte intensité d'émissions sont remplacés par des emplois à faibles émissions. Malgré l'augmentation de la valeur ajoutée au Canada, la diminution des salaires risque de rendre les travailleurs hostiles aux transitions industrielles alors qu'ils constituent une part importante du corps électoral.

Pour ces raisons, les décideurs politiques doivent élaborer une stratégie globale de décarbonation de l'industrie sidérurgique qui cherche à régler en amont la question de l'intensité des émissions de ces secteurs, tout en garantissant des perspectives d'emploi et des salaires attrayants. Grâce à cette approche holistique, les entreprises privées, les travailleurs et leurs communautés peuvent tous profiter des avantages d'une valeur ajoutée accrue au

Canada. Parallèlement, les décideurs politiques et les syndicats doivent réfléchir à la manière de rendre les salaires dans les industries de l'énergie propre compétitifs par rapport à ceux des industries à forte intensité d'émissions. Si le fait de renoncer à l'exploitation du charbon pour construire des éoliennes apporte des avantages aux travailleurs qui vivent depuis toujours de la production de combustibles fossiles, le soutien politique en faveur de la transition sera renforcé et la transition accélérée. Même si la viabilité de la transition dépend de la capacité des producteurs canadiens de fer et d'acier verts à rester compétitifs, on devrait pouvoir observer des retombées positives sur le marché du travail, puisque les coûts de main-d'œuvre représentent une petite part des coûts totaux dans ces industries capitalistiques (Mayfield et coll., 2023).

7 Conclusion

L'abandon à l'échelle mondiale des combustibles fossiles risque sérieusement de lier pour longtemps les industries canadiennes aux combustibles fossiles. Si elle ne s'adapte pas rapidement, l'industrie sidérurgique canadienne pourrait avoir de la difficulté à rester concurrentielle. Bien que les stratégies de décarbonation dont il est question dans le présent rapport imposent des remaniements majeurs et complexes partout au Canada, elles créent aussi des opportunités notables. Grâce à ses ressources riches en minerai de fer, à ses sources d'énergie renouvelable, à ses infrastructures solides et à sa main-d'œuvre qualifiée, le Canada pourrait augmenter la valeur ajoutée à l'échelle nationale de 25 milliards de dollars canadiens, ce qui créerait 14 000 emplois tout en réduisant les émissions tant au pays qu'à l'étranger dans une proportion équivalant à environ 16 % des émissions totales du pays. Ce faisant, il renforcerait aussi les chaînes d'approvisionnement mondiales vertes et favoriserait le commerce avec des partenaires et des alliés mondiaux essentiels, ce qui pourrait compenser la baisse inévitable des revenus d'exportation de combustibles fossiles tels que le charbon métallurgique.

Il faut agir rapidement pour saisir l'occasion qui se présente. Les obstacles à la production d'acier à partir d'hydrogène dans l'UE créent une conjoncture favorable permettant au Canada de devenir un grand exportateur de HBI vert. L'Australie avance déjà rapidement dans cette direction, et le Brésil aura bientôt l'occasion de renforcer son rôle dans les chaînes d'approvisionnement mondiales vertes en accueillant la prochaine conférence des Nations Unies sur le climat (COP30). En partenariat avec ces pays et d'autres grands exportateurs de minerai de fer, le Canada pourrait contribuer aux efforts diplomatiques visant à mettre en valeur le rôle des exportateurs de fer dans la décarbonation de l'industrie sidérurgique mondiale et à renforcer la coopération internationale. Dans le contexte géopolitique de plus en plus houleux d'aujourd'hui, ce genre d'initiative diplomatique et commerciale conjointe est grandement nécessaire; les pays se doivent de collaborer pour mettre en œuvre ensemble l'Accord de Paris et maintenir les hausses de température sous les seuils critiques. L'industrie sidérurgique canadienne a la possibilité de jouer un rôle clé dans cette entreprise.

1. Annexe I

Hypothèses utilisées pour la modélisation des coûts du HBI vert canadien à la figure 6

Hypothèse	Valeur	Unité	Source
Dépenses en capital – Électrolyseur	0,585	€/kW de puissance installée	Devlin et coll., 2023
Dépenses en capital – Four à cuve de réduction directe	230	€/t de capacité	Devlin et coll., 2023
Dépenses de fonctionnement et d'entretien	3	% des dépenses en capital	Vogl et coll., 2018
Taux d'actualisation	12	%	
Durée de vie – Four à cuve de réduction directe et FAE	20	Années	Devlin et coll., 2023
Durée de vie – Électrolyseur	10	Années	Devlin et coll., 2023
Électrolyseur	2	h/kW – Électrolyseur installé	Devlin et coll., 2023
Four à cuve	0,18	h/t de FRD	Global Energy Monitor, 2023
Coûts de main-d'œuvre	14 906 \$ CA	Salaire annuel	Statistique Canada
Heures par année	1 920	h/année	Devlin et coll., 2023
Coûts de l'énergie	7,8 ¢/kWh	\$ CA	Hydro-Québec, 2024
KWh/kgH ₂	55		Parlement européen, 2020
KgH ₂ /tonne d'acier	58		Bhaskar et coll., 2022
Coûts du minerai de fer	90-148	\$ US	St. Louis Fed

2. Annexe II

Principaux acteurs de l'industrie canadienne des mines de fer

Champion Iron

Champion Iron est une société minière cotée qui possède et exploite le complexe minier du lac Bloom. Sa capacité de production est de 15 TMPA. Ses principaux actionnaires sont le chef de la direction Michael O'Keeffe (8 %), Investissement Québec (8 %), une société d'investissement ouverte fondée par l'Assemblée nationale du Québec en 1998, et la société américaine de financement par capitaux propres Wynnchurch Capital (8 %). Champion Iron emploie 1 160 personnes (Champion Iron, 2024b).

Tata Steel Minerals Canada

Fondée en 2010, Tata Steel Minerals Canada est un partenariat entre Tata Steel (78 %), le gouvernement du Québec (18 %) et New Millennium Iron Corp. (4 %). Elle produit en moyenne 4 TMPA de produits de minerai de fer et les expédie depuis la ville portuaire de Sept-Îles. Tata Steel est une société cotée dont le tiers appartient à la société privée d'investissement indienne Tata Sons.

ArcelorMittal

ArcelorMittal est un grand producteur d'acier. De plus, l'entreprise possède de grandes mines au Canada et expédie du fer depuis Port-Cartier, à l'ouest de la ville portuaire de Sept-Îles. Si l'on compte sa filiale d'infrastructures, ArcelorMittal emploie 2 500 personnes sur la Côte-Nord du Québec. La société détient des actifs partout dans le monde, principalement en Europe et en Inde. ArcelorMittal est une société ouverte dont le siège social se situe au Luxembourg, mais dont les principaux propriétaires sont la famille indienne Mittal (environ 35 %) et la banque d'investissement BlackRock (5 %) (ArcelorMittal, 2024).

Rio Tinto – Compagnie minière IOC

La Compagnie minière IOC est une coentreprise regroupant Rio Tinto (58,7 %), Mitsubishi (26,2 %) et la société d'investissement cotée Labrador Iron Ore Royalty Income Corporation (15,1 %). Elle a une capacité de production de 23 TMPA de minerai de fer et emploie 2 900 personnes. Elle expédie son minerai de fer depuis la ville portuaire de Sept-Îles.

Tacora Resources

Tacora Resources est une société privée qui possède et exploite la mine Scully au Labrador. Elle a une capacité de production de 6 TMPA et emploie 410 personnes. Elle expédie son minerai de fer depuis la ville portuaire de Sept-Îles. Tacora Resources est détenue par des investisseurs miniers tels que Proterra Investment Partners, Cargill et Aequor Holdings.

Association minière du Canada

L'Association minière du Canada est le principal organisme de l'industrie minière canadienne. Elle regroupe des sociétés qui exploitent diverses ressources, y compris le minerai de fer. Elle exerce son influence et ses activités dans des domaines comme la réglementation et les autorisations environnementales, les affaires autochtones et la fiscalité.

Syndicat des Métallos

Le Syndicat des Métallos représente les travailleurs de l'Amérique du Nord. Son siège social se situe à Pittsburgh, en Pennsylvanie, et il est présidé par David McCall. Marty Warren est le directeur national du Syndicat des Métallos au Canada. La section canadienne du syndicat est affiliée au Congrès du travail du Canada et agit comme principal syndicat des travailleurs de l'industrie canadienne des mines de fer. Le Syndicat des Métallos a contribué à fonder le Nouveau Parti démocratique, un parti politique social-démocrate.

Gouvernement du Québec

L'industrie canadienne des mines de fer se trouve principalement dans la province de Québec. Le gouvernement du Québec est le deuxième propriétaire en importance de Tata Steel Minerals Canada, détenant 18 % des parts (Tata Steel Minerals Canada Limitée, 2024). La Province est gouvernée par François Legault et son parti, la Coalition Avenir Québec, un parti conservateur et nationaliste-autonomiste. Le principal parti d'opposition est le Parti libéral. La prochaine élection aura lieu en 2026.

Gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador

Étant donné que plusieurs mines de fer et leurs infrastructures se situent au Labrador, le gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador joue un rôle important dans le développement de l'industrie du fer. La Province est gouvernée par le Parti libéral depuis 2015, avec Andrew Furey comme premier ministre depuis 2020. La prochaine élection aura lieu en 2025. M. Furey a positionné la Province en tant que potentiel exportateur d'hydrogène; le premier ministre Justin Trudeau et le chancelier allemand Olaf Scholz ont signé à Terre-Neuve-et-Labrador un accord pour établir le commerce de l'hydrogène (Depner, 2023).

Principaux acteurs de l'industrie canadienne de l'acier

Voici les acteurs de l'industrie canadienne de l'acier qui sont indispensables pour orienter le changement au sein du secteur.

Producteurs d'acier canadiens

Quatre grands producteurs d'acier possèdent et exploitent des aciéries traditionnelles intégrées au Canada :

ArcelorMittal

ArcelorMittal possède le site à HF/CBO de Dofasco et le site à FRD/FAE de Montréal. Sa capacité de production de 6,45 TPA en fait le premier producteur d'acier au Canada ainsi que le premier au monde à l'extérieur de la Chine, avec ses 68 millions de tonnes d'acier produites en 2023. Elle devance ainsi Nippon Steel, qui a produit 44 millions de tonnes d'acier, et POSCO, qui a en produit 39 millions de tonnes. La société détient des actifs partout dans le monde, principalement en Europe et en Inde. ArcelorMittal est une société ouverte dont le siège social se situe au Luxembourg, mais dont les principaux propriétaires sont la famille indienne Mittal (environ 35 %) et la banque d'investissement BlackRock (5 %) (ArcelorMittal, 2024).

Algoma

Algoma possède un site à Sault Ste. Marie et est le deuxième producteur d'acier au Canada, avec une capacité de production de 3,2 TMPA. Fondée au Canada en 1902, Algoma est cotée en bourse depuis 2021. Ses principaux actionnaires sont des fonds et des banques d'investissement aux États-Unis et au Canada.

Stelco

Stelco est la troisième aciérie intégrée en importance au Canada, avec une capacité de production annuelle de 2,5 TMPA. En 2024, le producteur d'acier américain Cleveland-Cliffs a annoncé l'acquisition de Stelco, approuvée par les actionnaires de Stelco quelques mois plus tard. Fondée en 1910, Stelco a déclaré faillite en 2007 avant d'être achetée par l'entreprise américaine U. S. Steel. La société a été inscrite à la Bourse de Toronto en 2017.

Rio Tinto

Rio Tinto possède et exploite un site à CBO au Canada ayant une capacité de production de 0,6 TMPA, ce qui en fait la plus petite aciérie traditionnelle au pays. Toutefois, son produit principal est le titane, avec la fonte brute comme produit secondaire, étant donné que le minerai est un mélange de dioxyde de titane et d'oxyde de fer. Rio Tinto est une société anglo-australienne cotée ayant BlackRock comme principal actionnaire (environ 6 %); les autres actionnaires détiennent 3 % ou moins des parts.

Association canadienne des producteurs d'acier

L'Association canadienne des producteurs d'acier, dont le siège social se situe à Ottawa, est le principal groupement d'entreprises de production d'acier au Canada qui représente à la fois les aciéries traditionnelles intégrées et les aciéries utilisant de la ferraille. L'ACPA est un groupe influent qui intervient dans différents dossiers, des accords commerciaux et des tarifs aux politiques énergétiques et industrielles. Elle représente aussi les producteurs d'acier canadiens lors des réunions semestrielles du Comité de l'acier de l'OCDE, où les pays membres discutent de l'évolution des politiques et des marchés.

Syndicat des Métallos

Le Syndicat des Métallos représente les travailleurs de l'Amérique du Nord. Son siège social se situe à Pittsburgh, en Pennsylvanie, et il est présidé par David McCall. Marty Warren est le directeur national du Syndicat des Métallos au Canada. La section canadienne du syndicat est affiliée au Congrès du travail du Canada. Elle agit comme principal syndicat des travailleurs de l'industrie canadienne de l'acier et, donc, comme principal représentant de la main-d'œuvre du secteur, sauf pour ArcelorMittal Dofasco, qui n'est pas syndiquée. Le Syndicat des Métallos a contribué à fonder le Nouveau Parti démocratique, un parti politique social-démocrate.

Gouvernement de l'Ontario

L'industrie canadienne de l'acier se trouvant principalement en Ontario, elle est fortement influencée par les politiques du gouvernement provincial. Depuis 2018, la Province est gouvernée par le Parti progressiste-conservateur et le premier ministre Doug Ford. Le premier

ministre appuie les plans de réduction des émissions des aciéries de l'Ontario. La prochaine élection aura lieu en 2029.

Gouvernement du Québec

Le Québec est la deuxième province en importance pour l'industrie canadienne de l'acier. La Province est gouvernée par François Legault et son parti, la Coalition Avenir Québec, un parti conservateur et nationaliste-autonomiste. M. Legault appuie les plans de transition du secteur québécois de l'acier. Le principal parti d'opposition qui détient le plus de sièges à l'Assemblée nationale est le Parti libéral. La prochaine élection aura lieu en 2026.

Principaux acteurs de l'industrie canadienne des mines de charbon métallurgique

Glencore (Elk Valley Resources)

En 2024, Glencore a fait l'acquisition de quatre mines de charbon métallurgique dans l'est de la Colombie-Britannique appartenant à Teck Resources, dont le siège social se situe à Vancouver. En 2022, la société a produit 21,5 Mt de charbon métallurgique (ACCR, 2023). Elle emploie environ 4 000 personnes dans les quatre mines (Pawson, 2023). Glencore est une société cotée. Le Sud-Africain Ivan Glasenberg en est le principal actionnaire avec 10 % des parts; le Qatar Investment Authority détient 8,5 % des parts.

Conuma Coal Resources Limited

Conuma Coal Resources Limited possède plusieurs mines de charbon métallurgique dans l'est de la Colombie-Britannique. La société a une capacité de production de 5 Tmpa et emploie 1 100 personnes. Elle est une filiale d'une société contrôlée par un fonds appelé Virginia Conservation Legacy Fund (Penner, 2016) et son propriétaire, Tom Clarke, un environnementaliste autoproclamé (Mider, 2022).

CST Canada Coal Limited

CST Canada Coal Limited possède la mine de charbon métallurgique Grande Cache dans l'ouest de l'Alberta. Elle est une filiale de CST Group, une société cotée située à Hong Kong, en Chine. La mine a une capacité de production de 1,3 Tmpa et compte environ 300 employés (Global Energy Monitor, 2024c).

Association minière du Canada

L'Association minière du Canada est le principal organisme de l'industrie minière canadienne. Elle regroupe des sociétés qui exploitent diverses ressources, y compris le charbon métallurgique. Elle exerce son influence et ses activités dans des domaines comme la réglementation et les autorisations environnementales, les affaires autochtones et la fiscalité.

Syndicat des Métallos

Le Syndicat des Métallos représente les travailleurs de l'Amérique du Nord. Son siège social se situe à Pittsburgh, en Pennsylvanie, et il est présidé par David McCall. Marty Warren est le directeur national du Syndicat des Métallos au Canada. La section canadienne du syndicat est affiliée au Congrès du travail du Canada et agit comme principal syndicat des travailleurs

de l'industrie canadienne des mines de charbon. Le Syndicat des Métallos a contribué à fonder le Nouveau Parti démocratique, un parti politique social-démocrate.

Gouvernement de la Colombie-Britannique

Étant donné que la plupart des mines de charbon métallurgique du Canada se situent en Colombie-Britannique, le secteur canadien du charbon métallurgique est fortement influencé par les politiques du gouvernement provincial. La Province est gouvernée par le Nouveau Parti démocratique depuis 2020, le premier ministre David Eby ayant été réélu en 2024 et le Parti conservateur de la Colombie-Britannique étant le principal parti d'opposition. Le premier ministre Eby a déclaré que les exportations de charbon métallurgique sont moins dommageables pour l'environnement que les exportations de charbon thermique (MacLeod, 2023). La prochaine élection aura lieu en 2028.

Gouvernement de l'Alberta

L'Alberta comptant une mine de charbon métallurgique, le secteur du charbon métallurgique est fortement influencé par les politiques du gouvernement provincial. La Province est gouvernée par le Parti conservateur uni depuis 2019, avec comme chef la première ministre Danielle Smith depuis 2022. Le Nouveau Parti démocratique est le principal parti d'opposition. La première ministre Smith appuie le développement des mines de charbon métallurgique en Alberta (Nikiforuk, 2024).

8 Bibliographie

- ACCR (2023). *Investor Bulletin: Glencore's Teck deal invites investor scrutiny*. Récupéré le 31 octobre. [https://www.accr.org.au/insights/investor-bulletin-glencore%E2%80%99s-teck-deal-invites-investor-scrutiny/].
- ACPA (2024a). *Fabrication*. [https://aciercanadien.ca/manufacturing].
- ACPA (2024b). *Emplois sidérurgiques*. Récupéré le 1^{er} novembre. [https://aciercanadien.ca/skills-jobs].
- AGENCE DE PROMOTION ÉCONOMIQUE DU CANADA ATLANTIQUE (2024). *L'Initiative canadienne de transition pour l'industrie du charbon*. Récupéré le 29 octobre. [https://www.canada.ca/fr/promotion-economique-canada-atlantique/services/initiative-canadienne-transition-charbon.html].
- AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE (2019). *Iron and Steel Technology Roadmap*.
- AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE (2022). *Achieving Net Zero Heavy Industry Sectors in G7 Members*.
- AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE (2023a). *Energy Technology Perspectives 2023*.
- AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE (2023b). *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach*.
- AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE (2024). *Energy Technology Perspectives 2024*.
- AGORA INDUSTRY et WUPPERTAL INSTITUTE (2023). « 15 Insights on the Global Steel Transformation ».
- ALGERS, Jonas, et Max ÅHMAN (2024). « Phase-in and phase-out policies in the global steel transition », *Climate Policy*, p. 1-14. [https://doi.org/10.1080/14693062.2024.2353127].
- AMADOR, Marisela (2023). « Quebec Innu community seeks \$2.2B from Hydro-Québec for Churchill Falls destruction », *CBC News*. [https://www.cbc.ca/news/canada/montreal/innu-community-lawsuit-hydro-quebec-1.6724779].
- ARCELORMITTAL (2021). « ArcelorMittal announces CAD\$205 million decarbonisation investment in its flagship Canadian mining operations with support from the Quebec government ». [https://corporate.arcelormittal.com/media/press-releases/arcelormittal-announces-cad-205-million-decarbonisation-investment-in-its-flagship-canadian-mining-operations-with-support-from-the-quebec-government].
- ARCELORMITTAL (2022). « ArcelorMittal successfully tests partial replacement of natural gas with green hydrogen to produce DRI ». [https://corporate.arcelormittal.com/media/news-articles/arcelormittal-successfully-tests-partial-replacement-of-natural-gas-with-green-hydrogen-to-produce-dri].
- ARCELORMITTAL (2023). « We're on our way to net zero ». [https://dofasco.arcelormittal.com/media/news-articles/we-re-on-our-way-to-net-zero].
- ARCELORMITTAL (2023). *Fact Book 2022*. [https://corporate.arcelormittal.com/media/pfwpkrrw/arcelor-mittal-fact-book-2022.pdf].

- ARCELORMITTAL (2024). *Shareholding structure*. Récupéré le 29 octobre. [https://corporate.arcelormittal.com/investors/corporate-governance/shareholding-structure].
- ARCELORMITTAL (2024a). *ArcelorMittal Mines and Infrastructure Canada*. Récupéré le 14 novembre. [https://northamerica.arcelormittal.com/our-operations/arcelormittal-mines-and-infrastructure-canada].
- ARCELORMITTAL (2024b). *Nos mines*. Récupéré le 14 novembre. [https://mines-infrastructure-arcelormittal.com/nos-mines].
- ARSENAULT, Julien (2002). « De l'acier moins polluant à Contrecoeur... si Québec accepte d'aider », *La Presse*. [https://www.lapresse.ca/affaires/entreprises/2022-05-02/arcelormittal/de-l-acier-moins-polluant-a-Contrecoeur-si-quebec-accepte-d-aider.php].
- AUSTRALIAN TRADE AND INVESTMENT COMMISSION (2024). « Australia forges a future made from green steel ». [https://international.austrade.gov.au/en/news-and-analysis/news/australia-forges-a-future-made-from-green-steel].
- BARUYA, Paul (2018). « Production and supply chain costs of coal ».
- BASHMAKOV, Igor A., et autres (2022). *Industry*, dans SHUKLA, Priyadarshi R., et autres (dir.). « Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change », Contribution du Groupe de travail III au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, *Cambridge University Press*. [https://doi.org/10.1017/9781009157926.013].
- BATAILLE, Chris, et autres (2023). « A Paris Agreement Compliant Definition for “Abated Fossil Fuels” ». [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4574502].
- BATAILLE, Chris, et autres (2024). *Facility level global net-zero pathways under varying trade and geopolitical scenarios*, Net Zero Steel.
- BATAILLE, Chris, et autres (2024). *Triggering Investment in First-of-a-Kind and Early Near-Zero Emissions Industrial Facilities*.
- BEATTIE, Samantha (2024). « ArcelorMittal Dofasco misses key milestones in \$1.8B ‘green’ steel project promised for 2028 », *CBC News*. [https://www.cbc.ca/news/canada/hamilton/arcelormittal-dofasco-decarbonization-update-1.7309360].
- BHASKAR, Abhinav, et autres (2022). « Decarbonizing primary steel production: Techno-economic assessment of a hydrogen based green steel production plant in Norway », *Journal of Cleaner Production*, vol. 350. [https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131339].
- BINNIE, Isla, et Bianca FLOWERS (2023). « Focus: Inside Cleveland-Cliffs’ bid to keep U.S. blast furnaces smelting », *Reuters*. [https://www.reuters.com/sustainability/inside-cleveland-cliffs-bid-keep-us-blast-furnaces-smelting-2023-09-05/].
- BLACKWELL, Tom (2021). « Union fears big job losses from going green, after Ottawa pledges \$420 million to Algoma’s electric retrofit », *National Post*. [https://nationalpost.com/news/canada/going-green-could-mean-big-job-losses-after-ottawa-pledges-420-million-to-aid-algomass-electric-retrofit].
- BREETZ, Hanna, Matto MILDENBERGER et Leah STOKES (2018). « The political logics of clean energy transitions », *Business and Politics*, vol. 20, n° 4, p. 492-522. [https://doi.org/10.1017/bap.2018.14].
- BUREAU OF INTERNATIONAL RECYCLING (2022). *World steel recycling in figures 2017-2021*.

- BURTON, Melanie (2024). « Fortescue sets out to meet strong Chinese demand for green iron », *Reuters*. [https://www.reuters.com/business/energy/fortescue-sets-out-meet-strong-chinese-demand-green-iron-2024-08-28/].
- CAMBOU, Dorothee (2020). « Uncovering Injustices in the Green Transition: Sámi Rights in the Development of Wind Energy in Sweden », *Arctic Review on Law and Politics*, vol. 11, p. 310-333. [https://doi.org/10.23865/arctic.v11.2293].
- CANADA.CA (2024a). *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité*. [https://www.canada.ca/fr/services/environnement/meteo/changementsclimatiques/plan-climatique/carboneutralite-2050/loi-canadienne-responsabilite-matiere-carboneutralite.html].
- CANADA.CA (2024b). *Subventions et contributions gouvernementales : Transformation du FAE d'Algoma Steel*. Récupéré le 20 octobre. [https://rechercher.ouvert.canada.ca/subventions/record/ic,033-2021-2022-Q2-816041,current].
- CANADA.CA (2024c). *Subventions et contributions gouvernementales : Voies de décarbonisation et de diversification des produits*. Récupéré le 29 octobre. [https://rechercher.ouvert.canada.ca/grants/record/ic,033-2023-2024-Q1-819662,current].
- CANADA.CA (2024d). *Émissions de gaz à effet de serre*. Récupéré le 29 octobre. [https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/emissions-gaz-effet-serre.html].
- CANADA.CA (2024e). *Les communautés autochtones au Québec*. Récupéré le 29 octobre. [https://www.sac-isc.gc.ca/fra/1634312499368/1634312554965].
- CENTRE COMMUN DE RECHERCHE (2022). « EU climate targets: how to decarbonise the steel industry ». [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/eu-climate-targets-how-decarbonise-steel-industry-2022-06-15_en].
- CHAMPION IRON (2024a). « Champion Iron accueille favorablement l'ajout du minerai de fer de haute pureté à la liste des minéraux critiques du Canada ». [https://nouvelles.championiron.com/2024-06-10-CHAMPION-IRON-ACCUEILLE-FAVORABLEMENT-LAJOUT-DU-MINERAI-DE-FER-DE-HAUTE-PURETE-A-LA-LISTE-DES-MINERAUX-CRITIQUES-DU-CANADA].
- CHAMPION IRON (2024b). *Notre équipe de direction*. Récupéré le 14 novembre. [https://www.championiron.com/profil-corporatif/equipe-de-direction].
- CHEMINFO SERVICES INC. (2019). *Economic Assessment of the Integrated Steel Industry*.
- COULTON, Marisa (2023). « Hydro-Québec pays record dividend after racking up the most revenue in its history », *Financial Post*. [https://financialpost.com/commodities/energy/hydro-quebec-pays-record-dividend].
- CRAWLEY, Mike (2022). « Ford government eyes 'green steel' as way to catch up on cutting carbon emissions », *CBC News*.
- DE LEEUW, G., et Valentin VOGL (2024). « Scrutinising commodity hype in imaginaries of the Swedish green steel transition », *Environment and Planning E: Nature and Space*. [https://doi.org/10.1177/25148486241238398].
- DEILY, Mary E. (1988). « Exit barriers in the steel industry », *Economic Review*.
- DELASALLE, Faustine, et autres (2022). *Making Net-Zero Steel Possible*.
- DEPNER, Wolf (2023). « B.C. eyes green hydrogen economy with cross-country partnership », *Castlegar News*. [https://www.castlegarnews.com/news/bc-eyes-green-hydrogen-economy-with-cross-country-partnership-6842739].

- DEVLIN, Alexandra, et Aidong YANG (2022). « Regional supply chains for decarbonising steel: Energy efficiency and green premium mitigation », *Energy Conversion and Management*, vol. 254. [https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115268].
- DEVLIN, Alexandra, et autres (2023). « Global green hydrogen-based steel opportunities surrounding high quality renewable energy and iron ore deposits », *Nat Commun*, vol. 14(1), n° 2578. [https://doi.org/10.1038/s41467-023-38123-2].
- DRAGHI, Mario (2024). *The future of European competitiveness - Part A: A competitiveness strategy for Europe*. [https://commission.europa.eu/document/download/97e481fd-2dc3-412d-be4c-f152a8232961_en?filename=The%20future%20of%20European%20competitiveness%20_%20A%20competitiveness%20strategy%20for%20Europe.pdf].
- FEHIR, Dena (2023). « Dofasco proposes 14-kilometre natural gas pipeline in support of ‘green steel’ project », *Daily Commercial News*. [https://canada.constructconnect.com/dcn/news/infrastructure/2023/02/dofasco-proposes-14-kilometre-natural-gas-pipeline-in-support-of-green-steel-project].
- FORREST, Maura (2024). « Quebec First Nation says provincial government, Hydro-Quebec left it out of wind projects », *The Globe and Mail*. [https://www.theglobeandmail.com/canada/article-quebec-first-nation-says-provincial-government-hydro-quebec-left-it/].
- FRIEDMAN, Gabriel (2024). « U.S. steelmaker emphasizes commitment to Canada in buying Stelco », *Financial Post*. [https://financialpost.com/commodities/mining/cleveland-cliffs-government-approval-canada-stelco].
- GAILANI, Ahmed, et autres (2024). « Assessing the potential of decarbonization options for industrial sectors », *Joule*, vol. 8, n° 3, p. 576-603. [https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.01.007].
- GLOBAL ENERGY MONITOR (2024). *Global Steel Plant Tracker*.
- GLOBAL ENERGY MONITOR (2024a). « ArcelorMittal Montreal steel plant ». [https://www.gem.wiki/ArcelorMittal_Montreal_steel_plant].
- GLOBAL ENERGY MONITOR (2024b). « Estimating carbon dioxide emissions from coal mines ». Récupéré le 29 octobre. [https://www.gem.wiki/Estimating_carbon_dioxide_emissions_from_coal_mines].
- GLOBAL ENERGY MONITOR (2024c). « Grande Cache Coal Mine ». Récupéré le 31 octobre. [https://www.gem.wiki/Grande_Cache_Coal_Mine].
- GOUVERNEMENT DE LA NORVÈGE (2023). « Norwegian Government apologises to Sámi reindeer herders on the Fosen peninsula ». [https://www.regjeringen.no/en/aktuelt/norwegian-government-apologises-to-sami-reindeer-herders-on-the-fosen-peninsula/id2965357/].
- GRIFFIN, Robin (2019). « What’s behind the metallurgical coal price plunge – and what lies ahead? », *WoodMackenzie*. [https://www.woodmac.com/news/opinion/whats-behind-the-metallurgical-coal-price-plunge--and-whats-ahead/].
- GRUBB, Michael, Thierry CHAPUIS et Minh Ha DUONG (1995). « The economics of changing course: Implications of adaptability and inertia for optimal climate policy », *Energy Policy*, vol. 23, n° 4-5, p. 417-431.
- GUICHET-EMPLOIS (2024). *Fabrication – Première transformation des métaux (SCIAN 331) : Ontario 2022-2026*. Récupéré le 29 octobre. [https://www.guichetemplois.gc.ca/analyse-tendances/rapports-marche-travail/ontario/transformation-de-metaux].

- HOICKA, Christina E., Katarina SAVIC et Alicia CAMPNEY (2021). « Reconciliation through renewable energy? A survey of Indigenous communities, involvement, and peoples in Canada », *Energy Research & Social Science*, vol. 74. [https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101897].
- HYDRO-QUÉBEC (2024). « Hydro-Québec retient huit soumissions totalisant 1 550 MW d'énergie éolienne ». [http://nouvelles.hydroquebec.com/fr/communiqués-de-presse/2036/hydro-quebec-retient-huit-soumissions-totalisant-1-550-mw-denergie-eolienne/].
- INNOVATION, SCIENCES ET DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE CANADA (2022). « Étape importante dans le projet d'ArcelorMittal Dofasco à Hamilton : une source d'emplois de qualité dans l'industrie de l'acier ». [https://www.canada.ca/fr/innovation-sciences-developpement-economique/nouvelles/2022/10/etape-importante-dans-le-projet-darcelormittal-dofasco-a-hamilton-une-source-demplois-de-qualite-dans-lindustrie-de-lacier.html].
- INTERNATIONAL TRADE ADMINISTRATION (2024). *Canada Steel Exports Report*.
- KHAN, Mohd Adnan, et autres (2023). *Hydrogen and the Decarbonization of Steel Production in Canada: Reaching Economies of Scale*, rapports de l'Accélérateur de transition.
- KUPZOK, Nils, et Jonas NAHM (2024). « The Decarbonization Bargain: How the Decarbonizable Sector Shapes Climate Politics », *Perspectives on Politics*, p. 1-21. [https://doi.org/10.1017/s1537592724000951].
- LEADIT (2024). « Global shift in green steel projects as major investments move beyond Europe into Asia ».
- LI, Zhenxi, et autres (2022). « Steel decarbonization in China – a top-down optimization model for exploring the first steps », *Journal of Cleaner Production*, n° 135550. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135550].
- LOPEZ, Gabriel, et autres (2023). « Towards defossilised steel: Supply chain options for a green European steel industry », *Energy*, vol. 273. [https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127236].
- MACLEOD, Andrew (2023). « Eby Defends BC's LNG and Coal Exports », *The Tyee*. [https://thetyee.ca/News/2023/12/18/Eby-Defends-BC-LNG-Coal-Exports/].
- MARTIN, Paul, et autres (2024). « A review of challenges with using the natural gas system for hydrogen », *Energy Science & Engineering*. [https://doi.org/10.1002/ese3.1861].
- MARTIN, Thibault, et Steven M. HOFFMAN (2008). *Power Struggles: Hydro Development and First Nations in Manitoba and Quebec*, University of Manitoba Press.
- MAYFIELD, Erin, et autres (2023). « Labor pathways to achieve net-zero emissions in the United States by mid-century », *Energy Policy*, vol. 177. [https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113516].
- MECKLING, Jonas, et autres (2015). « Winning coalitions for climate policy », *Science*, vol. 349, n° 6253, p. 1170-1171. [https://doi.org/doi:10.1126/science.aab1336].
- MECKLING, Jonas, et Valerie J. KARPLUS (2023). « Political strategies for climate and environmental solutions », *Nature Sustainability*, vol. 6, n° 7, p. 742-751. [https://doi.org/10.1038/s41893-023-01109-5].
- MIDER, Zachary R. (2022). « The Green Dreamer Who Became Big Coal's Fall Guy », *Bloomberg*. [https://www.bloomberg.com/features/2022-west-virginia-coal-mining-tom-clarke/].
- MIDREX (2022). *2021 World Direct Reduction Statistics*. [https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2021.pdf].

- MIN-HEE, Jung (2022). « POSCO Group to Invest US\$40bn in Australia by 2040 », *Business Korea*. [https://www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=105269].
- MOONEY, Kyle (2021). « Record iron ore prices spurring spending, and hiring, in Labrador, says union head », *CBC News*. [https://www.cbc.ca/news/canada/newfoundland-labrador/prices-have-surged-with-high-demand-from-china-coupled-with-supply-disruptions-says-analyst-1.6029901].
- NICHOLAS, Simons, et Soroush BASIRAT (2024). *Carbon capture for steel?* [https://ieefa.org/sites/default/files/2024-04/Carbon%20capture%20for%20steel-April24.pdf].
- NIKIFORUK, Andrew (2024). « Why Danielle Smith Sounds Just Like an Australian Billionaire », *The Tyee*. [https://thetyee.ca/Analysis/2024/03/15/Danielle-Smith-Sounds-Like-Australian-Billionaire/].
- NORMAND, François (2024). « ArcelorMittal pourra-t-elle atteindre la carboneutralité d'ici 2050? », *Les Affaires*. [https://www.lesaffaires.com/secteurs/energie-et-ressources-naturelles/arcelmittal-pourra-t-elle-atteindre-la-carboneutralite-dici-2050/].
- OBSERVATORY OF ECONOMIC COMPLEXITY (2024). *Iron & steel in Canada*. Récupéré le 29 octobre. [https://oec.world/en/profile/bilateral-product/iron-steel/reporter/can].
- OFFICE OF CLEAN ENERGY DEMONSTRATIONS (2024). « Industrial Demonstrations Program Selections for Award Negotiations: Iron and Steel », *Département de l'Énergie*. Récupéré le 30 avril. [https://www.energy.gov/oced/industrial-demonstrations-program-selections-award-negotiations-iron-and-steel].
- PARLEMENT EUROPÉEN (2020). *The potential of hydrogen for decarbonising steel production*. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/641552/EPRS_BRI(2020)641552_EN.pdf].
- PAWSON, Chad (2023). « What is metallurgical coal-making, the industry that ex-premier John Horgan is now a part of? », *CBC News*. [https://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/bc-metallurgical-coal-explainer-1.6804161].
- PENNER, Derrick (2016). « Walter Energy's B.C. coal mines bought by new U.S. entity », *Vancouver Sun*. [https://vancouversun.com/business/local-business/walter-energys-b-c-coal-mines-bought-by-new-u-s-entity].
- PODESTA, John (2024). « Remarks as Prepared for John Podesta Columbia Global Energy Summit ». Récupéré le 1^{er} novembre. [https://bidenwhitehouse.archives.gov/briefing-room/speeches-remarks/2024/04/16/remarks-as-prepared-for-john-podesta-columbia-global-energy-summit/].
- RÉGIE DE L'ÉNERGIE DU CANADA (2024). *Profils énergétiques des provinces et territoires – Comparer*. Récupéré le 29 octobre. [https://www.cer-rec.gc.ca/fr/donnees-analyse/marches-energetiques/profils-energetiques-provinces-territoires/profils-energetiques-provinces-territoires-comparer.html].
- RESSOURCES NATURELLES CANADA (2024a). *Faits sur le charbon*. Récupéré le 29 octobre. [https://ressources-naturelles.canada.ca/mineraux-exploitation-miniére/donnees-statistiques-analyses-exploitation-miniére/faits-mineraux-metaux/faits-charbon].
- RESSOURCES NATURELLES CANADA (2024b). « Le gouvernement du Canada publie une mise à jour de la liste des minéraux critiques ». [https://www.canada.ca/fr/ressources-naturelles-canada/nouvelles/2024/06/le-gouvernement-du-canada-publie-une-mise-a-jour-de-la-liste-des-mineraux-critiques.html].

- RESSOURCES NATURELLES CANADA (2024c). *Les minéraux et l'économie*. [https://ressources-naturelles.canada.ca/mineraux-exploitation-miniére/donnees-statistiques-analyses-exploitation-miniére/mineraux-economie].
- RESSOURCES NATURELLES CANADA (2024d). *Faits sur le minerai de fer*. Récupéré le 29 octobre. [https://ressources-naturelles.canada.ca/mineraux-exploitation-miniére/donnees-statistiques-analyses-exploitation-miniére/faits-mineraux-metaux/faits-minerai-fer].
- RIMINI, Michele, et autres (2020). « Barriers to exit in the steel sector », *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers*.
- RIO TINTO (2024). *IOC*. Récupéré le 14 novembre. [https://www.riotinto.com/fr-ca/can/canada-operations/iron-ore-company-of-canada].
- ROCKSÉN, Andreas (2024a). « Hundratals anställda berörs när Borlänges valsverk går i graven – efter 140 år », *Dagens Arbete*. [https://da.se/2024/04/valsverket-forsviner-fran-borlange-efter-140-ar-hundratals-anstallda-berors/].
- ROCKSÉN, Andreas (2024b). « Klubbordförande om SSAB:s miljardsatsning: "Fantastiskt" », *Dagens Arbete*. [https://da.se/2024/04/klubbordforande-om-ssabs-miljardsatsning-fantastiskt/].
- RODON, Thierry, Arn KEELING et Jean Sébastien BOUTET (2022). « Schefferville revisited: The rise and fall (and rise again) of iron mining in Québec-Labrador », *The Extractive Industries and Society*, vol. 12. [https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.101008].
- SAMADI, Sascha, Andreas FISCHER et Stefan LECHTENBÖHMER (2023). « The renewables pull effect: How regional differences in renewable energy costs could influence where industrial production is located in the future », *Energy Research & Social Science*, vol. 104. [https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103257].
- SIMPSON, Sean (2023). « Six in Ten (59%, +3 pts) Canadians Agree That if Canada's Government Does Not Act Now to Combat Climate Change, It Will Be Failing the People of Canada ». [https://www.ipsos.com/en-ca/six-in-ten-canadians-agree-if-canadas-government-does-not-act-now-combat-climate-change-failing].
- STEFANELLI, Robert D., et autres (2019). « Renewable energy and energy autonomy: how Indigenous peoples in Canada are shaping an energy future », *Environmental Reviews*, vol. 27, n° 1, p. 95-105. [https://doi.org/10.1139/er-2018-0024].
- STELCO (2020). « Stelco Announces Successful Completion of Blast Furnace Upgrade Project ». [https://investors.stelco.com/news/news-details/2020/Stelco-Announces-Successful-Completion-of-Blast-Furnace-Upgrade-Project-10-20-2020/default.aspx].
- STOKES, Leah C. (2013). « The politics of renewable energy policies: The case of feed-in tariffs in Ontario, Canada », *Energy Policy*, vol. 56. p. 490-500. [https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.009].
- STOKES, Leah C., et Christopher WARSHAW (2017). « Renewable energy policy design and framing influence public support in the United States », *Nature Energy*, vol. 2, n° 8. [https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.107].
- TACORA RESOURCES (2024). *Our Operations*. [https://tacoraresources.com/our-operations/].
- TATA STEEL MINERALS CANADA LIMITÉE (2024). *Tata Steel Minerals Canada Limitée*. [https://sfppn.com/a-propos/tata-steel/].
- THÉRIAULT, Sophie, Sabrina BOURGEOIS et Zoé BOIRIN-FARGUES (2022). « Indigenous peoples' agency within and beyond rights in the mining context: The case of the Schefferville region », *The Extractive Industries and Society*, vol. 12. [https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.100979].

- THYSSENKRUPP (2023). « Baffinland and thyssenkrupp to Cooperate in Producing Low Carbon Green Steel ». [<https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/newsroom/press-releases/baffinland-and-thyssenkrupp-to-cooperate-in-producing-low-carbon-green-steel.html>].
- VATTENFALL (2023). « HYBRIT: Hydrogen storage reduces costs by up to 40 per cent ». [<https://group.vattenfall.com/press-and-media/pressreleases/2023/hybrit-hydrogen-storage-reduces-costs-by-up-to-40-per-cent>].
- VERPOORT, Philipp C., et autres (2023). « Estimating the renewables pull in future global green value chains », *Nature Energy* (en cours d'examen). [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2743794/v1>].
- VOETEN, Erik (2024). « The Energy Transition and Support for the Radical Right: Evidence from the Netherlands », *Comparative Political Studies*. [<https://doi.org/10.1177/00104140241237468>].
- VOGL, Valentin, Max ÅHMAN et Lars J. NILSSON (2018). « Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking », *Journal of Cleaner Production*, vol. 203, p. 736-745. [<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>].
- VOGL, Valentin, et autres (2023). *Green Steel Tracker*.
- VOGL, Valentin, Olle OLSSON et Björn NYKVIST (2021). « Phasing out the blast furnace to meet global climate targets », *Joule*, vol. 5, n° 10, p. 2646-2662. [<https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.09.007>].
- WAT, Samuel (2024). « Baffinland cuts 10% of workforce to focus on Steensby rail », *CBC News*. [<https://www.cbc.ca/news/canada/north/baffinland-jobs-cuts-focus-steensby-1.7356846>].
- WILMOTH, Rachel, et autres (2024). *Green Iron Corridors: Transforming the Steel Supply Chains for a Sustainable Future*, RMI.
- WORLD INTEGRATED TRADE SOLUTION (2024). *Non-agglomerated iron ores and concentrates exports by country in 2023*. Récupéré le 29 octobre. [<https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2023/tradeflow/Exports/partner/WLD/product/260111>].
- WORLDSTEEL (2023). *World Steel in Figures 2023*. [<https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2023/>].
- ZHANG, Jing (2024). « China's latest steel capacity swap move not enough to curb industry expansion », *S&P Global*. [<https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/metals/082924-chinas-latest-steel-capacity-swap-move-not-enough-to-curb-industry-expansion>].



LUND
UNIVERSITY