

ANALYSE COMPARATIVE DE L'INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS L'INDUSTRIE SIDÉRURGIQUE CANADIENNE



PRÉPARÉE POUR L'ASSOCIATION CANADIENNE DES PRODUCTEURS D'ACIER
ET RESSOURCES NATURELLES CANADA



Ressources naturelles Natural Resources
Canada Canada

Canada

Pour obtenir d'autres renseignements ou des exemplaires supplémentaires de cette publication, veuillez vous adresser à :

Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne

Office de l'efficacité énergétique

a/s Ressources naturelles Canada

580, rue Booth, 18^e étage

Ottawa (Ontario) K1A 0E4

Tél. : 613-995-6839

Télec. : 613-992-3161

Courriel : cipec-peeic@rncan.gc.ca

Site web : oee.rncan.gc.ca/cipec/peel

ou

L'Association canadienne des producteurs d'acier

350, rue Sparks, pièce 407

Ottawa (Ontario) K1R 7S8

Tél. : 613-238-6049

Télec. : 613-238-1832

Site web : www.canadiansteel.ca



Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives Canada

Analyse comparative de l'intensité énergétique dans l'industrie sidérurgique canadienne.

Also available in English under the title: Benchmarking energy intensity in the Canadian Steel Industry.

Comprend des réf. bibliogr.: p.

ISBN 978-0-662-71903-8

N^o de cat. : M144-125/2006F

1. Sidérurgie et commerce--Consommation d'énergie--Canada. 2. Industrie du fer et commerce--Consommation d'énergie--Canada. I. Canada. Ressources naturelles Canada

TJ163.5.S83B4614 2006

333.79'65

C2006-980214-9

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2007



Papier recyclé

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	iii
1. INTRODUCTION	1
1.1 Centre d'intérêt	2
1.2 Objectifs	3
1.3 Plan du Rapport	3
2. CONSOMMATION DE L'ÉNERGIE DANS L'INDUSTRIE SIDÉRURGIQUE CANADIENNE	5
2.1 Contexte de l'industrie	6
2.2 Consommation de l'énergie	6
3. MÉTHODOLOGIE	9
3.1 Indicateurs d'intensité énergétique	10
3.2 Technologies d'économie d'énergie	11
3.3 Applicabilité des indicateurs d'intensité énergétique au secteur sidérurgique canadien	14
3.4 Collecte de données	15
3.5 Indicateurs d'intensité énergétique des procédés	15
3.6 Indicateurs d'intensité énergétique des usines	16
3.6.1 Indicateurs d'intensité énergétique de l'aciérie électrique	17
3.6.2 Indicateurs d'intensité énergétique des usines intégrées	18
3.7 Indicateurs d'intensité énergétique des fours de réchauffage	19
3.8 Indicateurs d'intensité des émissions de CO ₂	19
4. RÉSULTATS	23
4.1 Interprétation des résultats	24
4.2 Présentation des résultats	24
4.3 Secteurs d'élaboration	25
4.3.1 Fabrication du coke – Figures 4-1 et 4-2	25
4.3.2 Élaboration du fer – Figures 4-3 à 4-7	27
4.3.3 Élaboration de l'acier par convertisseur à oxygène – Figures 4-8 et 4-9	31

4.3.4	<i>Élaboration de l'acier par four électrique à arc (FEA) et coulée continue – Figures 4-10 et 4-11</i>	33
4.3.5	<i>Coulée continue – Figures 4-12 et 4-13</i>	34
4.3.6	<i>Laminoirs à bandes à chaud et à tôles fortes – Figures 4-14 et 4-15</i>	34
4.3.7	<i>Laminoirs à profilés – Figures 4-16 et 4-17</i>	35
4.4	<i>Usines</i>	36
4.4.1	<i>Aciéries électriques</i>	36
4.4.2	<i>Usines intégrées</i>	37
4.4.3	<i>Aciérie électrique et usine de réduction directe</i>	38
4.5	<i>Gestion de l'énergie des usines</i>	42
4.5.1	<i>Surveillance et production de rapports en matière d'énergie – Figures 4-44 et 4-45</i>	42
4.5.2	<i>Gestion de l'énergie dans les aciéries intégrées</i>	43
4.6	<i>Fours de réchauffage</i>	45
4.6.1	<i>Fours de réchauffage des brames – Figure 4-49</i>	45
4.6.2	<i>Fours de réchauffage des billettes et des blooms – Figure 4-50</i>	48
4.6.3	<i>Température de préchauffage de l'air de combustion – Figure 4-51</i>	49
4.6.4	<i>Longueur de la zone de préchauffage de chargement non soumise à la flamme – Figure 4-52</i>	51
4.6.5	<i>Température de chargement moyenne du four – Figure 4-53</i>	51
5.	SECTEURS POSSIBLES D'ACCROISSEMENT DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE	53
5.1	<i>Relever les secteurs possibles de réduction de l'intensité énergétique</i>	54
5.2	<i>Facteurs de réduction de l'intensité énergétique non établis par la présente étude</i>	54
5.3	<i>Repérer les secteurs au potentiel le plus élevé</i>	55
5.3.1	<i>Secteurs où la mise en œuvre de la technologie et des pratiques est improbable</i>	56
5.3.2	<i>Secteurs où la mise en œuvre de la technologie et des pratiques est probable, mais où le potentiel de mise en application est limité</i>	57
5.3.3	<i>Secteurs où la mise en œuvre de la technologie et des pratiques est probable, et où le potentiel de réduction de l'intensité énergétique est élevé</i>	58
6.	SOURCES DE RÉFÉRENCE	61
7.	FIGURES, DIAGRAMMES ET TABLEAUX	63
	ANNEXE A – TECHNOLOGIES ECOTECH ET INDICATEURS D'INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE ET D'INTENSITÉ DES ÉMISSIONS DE CO₂	90
	ANNEXE B – COEFFICIENTS D'ÉMISSION DE CO₂	98

LISTE DES FIGURES

FIGURE	LISTE DES FIGURES	PAGE
2-1	Usines d'élaboration du fer et de l'acier, et fabrication de ferro-alliages, consommation d'énergie en 2002	64
2-2	Organigramme de production de l'aciérie électrique	64
2-3	Indicateur d'intensité énergétique – Aciéries électriques, 2002	65
2-4	Organigramme de production de l'usine intégrée	66
2-5	Indicateur d'intensité énergétique – Usines intégrées, 2002	67
2-6	Consommation d'énergie spécifique	67
3-1	Aciérie électrique à barres d'EcoTech	67
3-2	Usine intégrée à bandes à chaud en bobines d'EcoTech et utilités de l'usine	68
4-1	Fabrication du coke – Énergie et technologie	69
4-2	Fabrication du coke – CO ₂	69
4-3	Soufflage – Énergie et technologie	70
4-4	Cowpers – Énergie et technologie	70
4-5	Haut fourneau – Énergie et technologie	71
4-6	Élaboration du fer – Énergie	71
4-7	Élaboration du fer – CO ₂	72
4-8	Élaboration de l'acier par convertisseur à oxygène – Énergie et technologie	72
4-9	Élaboration de l'acier par convertisseur à oxygène – CO ₂	73
4-10	Élaboration de l'acier par four électrique à arc et coulée continue – Énergie et technologie	73
4-11	Élaboration de l'acier par four électrique à arc et coulée continue – CO ₂ . . .	74
4-12	Coulée continue – Énergie	74
4-13	Coulée continue – CO ₂	74
4-14	Laminoirs à bandes à chaud et à tôles fortes – Énergie et technologie	75
4-15	Laminoirs à bandes à chaud et à tôles fortes – CO ₂	76
4-16	Laminoir à profilés – Énergie	76
4-17	Laminoir à profilés – CO ₂	77
4-18	Aciérie électrique à fil machine – Énergie	77
4-19	Aciérie électrique à fil machine – CO ₂	77
4-20	Aciérie électrique à barres – Énergie	78
4-21	Aciérie électrique à barres – CO ₂	78
4-22	Aciérie électrique à bandes à chaud – Énergie	79
4-23	Aciérie électrique à bandes à chaud – CO ₂	79

FIGURE	LISTE DES FIGURES	PAGE
4-24	Usine intégrée d'élaboration du fer – Énergie	79
4-25	Usine intégrée d'élaboration du fer – CO ₂	79
4-26	Aciérie intégrée – Énergie	80
4-27	Aciérie intégrée – CO ₂	80
4-28	Aciérie intégrée à demi-produits – Énergie.	80
4-29	Aciérie intégrée à demi-produits – CO ₂	80
4-30	Usine intégrée à bandes à chaud – Énergie	81
4-31	Usine intégrée à bandes à chaud – CO ₂	81
4-32	Usine intégrée à bandes à chaud – Énergie (y compris les torchères)	81
4-33	Usine intégrée à bandes à chaud – CO ₂ (y compris les torchères).	81
4-34	Usine intégrée à bandes à chaud – Énergie (y compris les torchères et les utilités de l'usine)	82
4-35	Usine intégrée à bandes à chaud – CO ₂ (y compris les torchères et les utilités de l'usine)	82
4-36	Usine intégrée à tôles fortes – Énergie.	82
4-37	Usine intégrée à tôles fortes – CO ₂	82
4-38	Usine intégrée à tôles fortes – Énergie (y compris les torchères)	83
4-39	Usine intégrée à tôles fortes – CO ₂ (y compris les torchères).	83
4-40	Usine intégrée à tôles fortes – Énergie (y compris les torchères et les utilités de l'usine)	83
4-41	Usine intégrée à tôles fortes – CO ₂ (y compris les torchères et les utilités de l'usine)	83
4-42	Usine de réduction directe et usine intégrée à bandes à chaud – Énergie	84
4-43	Usine de réduction directe et usine intégrée à bandes à chaud – CO ₂	84
4-44	Surveillance de l'énergie	85
4-45	Production de rapports en matière d'énergie	85
4-46	Torchères – Énergie et technologie	85
4-47	Torchères – CO ₂	85
4-48	Centrale électrique – Rendement et technologie	86
4-49	Fours de réchauffage des brames – Énergie et technologie.	86
4-50	Fours de réchauffage des billettes et des blooms – Énergie et technologie.	87
4-51	Température de préchauffage de l'air de combustion	88
4-52	Longueur de la zone de préchauffage de chargement non soumise à la flamme	88
4-53	Température de chargement moyenne du four.	88

I

INTRODUCTION



1. INTRODUCTION

L'Association canadienne des producteurs d'acier (ACPA) représente les principaux producteurs d'acier du Canada. Étant l'une des plus grandes industries du pays, le secteur sidérurgique engendre des ventes annuelles de plus de 11 milliards de dollars, dont 3 milliards de dollars en exportations, et emploie directement environ 35 000 travailleurs. L'efficacité énergétique est une priorité pour l'ACPA, et les producteurs d'acier canadiens ont réduit la consommation d'énergie spécifique (mégajoules [MJ] par tonne d'acier expédiée) de 23 p. 100 depuis 1990¹. En 2002, l'ACPA consentait à entreprendre une étude comparative de la consommation d'énergie après avoir obtenu l'aide financière de la Division des programmes industriels de l'Office de l'efficacité énergétique de Ressources naturelles Canada (RNCAN) pour trouver d'autres possibilités de réduction de la consommation d'énergie.

Outre la préservation des ressources naturelles, il existe des motifs incontournables d'ordre économique et environnemental à la base de l'examen complet, par les aciéries du pays, de leur consommation d'énergie. L'énergie consommée par le secteur sidérurgique du Canada représente un élément appréciable du coût total des opérations d'élaboration du fer et de l'acier. De plus, de façon directe et indirecte, l'énergie utilisée dans le secteur sidérurgique contribue aux émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et à d'autres émissions atmosphériques.

Depuis un certain nombre d'années, RNCAN fait la promotion de la consommation plus efficace de l'énergie dans l'économie canadienne. Le secteur sidérurgique canadien, par son engagement au sein du Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne (PEEIC), a participé activement à ces initiatives dans le domaine énergétique.

1.1 Centre d'intérêt

L'étude est centrée sur les opérations qui élaborent l'acier et le transforment en des produits laminés à chaud. Douze aciéries (les usines participantes) ont participé à l'étude – soit quatre usines intégrées et huit des neuf aciéries électriques. Les usines participantes ont produit 14,9 millions de tonnes d'acier en 2002, ce qui représente 97 p. 100 de l'acier fabriqué au Canada cette année-là.

L'étude présente une comparaison détaillée, entre installations, de l'énergie consommée dans l'élaboration de l'acier en 2002. L'étude a donné lieu à l'examen de 15 procédés, chacun constituant une étape de production dans deux usines et plus.

Il a été convenu avec des membres de l'ACPA qu'il importait de situer l'analyse canadienne détaillée dans un contexte international. Plus particulièrement, il a été jugé important de comparer l'intensité énergétique (MJ par tonne de produit) des exploitations canadiennes

¹ *Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne, Rapport annuel 2002-2003 : Des idées d'énergie à l'œuvre*, pages 78-79 (oee.rncan.gc.ca/Publications/infosource/Pub/peeic/RapportAnnuel02-03).

avec celle de l'usine EcoTech de l'International Iron and Steel Institute (IISI). Cette dernière est une usine virtuelle qui a recours à des technologies d'économie d'énergie à la fois disponibles sur le marché et attrayantes sur le plan économique. Le concept de l'usine EcoTech est décrit plus en détail à la section 3.2, « Technologies d'économie d'énergie ».

1.2 Objectifs

Dans le cadre de la présente étude, l'ACPA a établi les objectifs suivants :

1. Mettre à la disposition des aciéristes canadiens une méthodologie pour établir des valeurs de référence d'efficacité quant à la consommation d'énergie à l'échelle de l'usine et à chaque étape de production.
2. Proposer une liste des technologies permettant une utilisation plus efficace de l'énergie et l'amélioration de la position concurrentielle du secteur sidérurgique canadien.
3. Constituer une compilation des valeurs de référence d'intensité énergétique et analyser le taux de pénétration des technologies éconergétiques à l'intention des usines membres de l'ACPA.
4. Présenter une comparaison des valeurs de référence et du taux de pénétration des technologies entre usines et par rapport à des valeurs de référence internationales relatives à ces technologies, ce qui permet de cibler les secteurs d'amélioration possible.

1.3 Plan du Rapport

Le chapitre 2 comprend des données historiques sur la consommation d'énergie du secteur sidérurgique canadien.

Le chapitre 3 décrit la méthodologie employée pour élaborer et mettre en application des valeurs de référence d'intensité énergétique et déterminer le taux de pénétration des technologies.

Le chapitre 4 renferme les principales constatations.

Le chapitre 5 relève les secteurs où il y a possibilité d'économie d'énergie en comparant le rendement du secteur avec les valeurs de référence internationales relatives à ces technologies.

Le chapitre 6 énumère les sources de référence utilisées dans le texte.

Le chapitre 7 contient l'ensemble des figures, diagrammes et tableaux.

L'annexe A comporte une liste des technologies EcoTech et des indicateurs d'intensité énergétique et d'intensité des émissions de CO₂.

L'annexe B comprend une liste des coefficients d'émission de CO₂.

2

CONSOMMATION DE L'ÉNERGIE DANS L'INDUSTRIE SIDÉRURGIQUE CANADIENNE



2. CONSOMMATION DE L'ÉNERGIE DANS L'INDUSTRIE SIDÉRURGIQUE CANADIENNE

2.1 Contexte de l'industrie

On produit de l'acier dans 13 aciéries réparties dans cinq provinces (l'Alberta, la Saskatchewan, le Manitoba, l'Ontario et le Québec). L'industrie est concentrée en Ontario, cette province comptant six aciéries.

Les aciéries se répartissent en deux catégories générales, selon leur source principale de métal. Les usines qui produisent de l'acier à partir du minerai de fer à l'aide d'un haut fourneau et d'un convertisseur à oxygène sont ce que l'on appelle des usines intégrées. Quant à celles qui produisent de l'acier en faisant fondre de la ferraille d'acier à l'aide d'un four électrique à arc (FEA), on les appelle des aciéries électriques. Parmi les usines intégrées canadiennes, il y en a une qui a également recours au procédé du four électrique à arc pour produire une partie de son acier. Une des aciéries électriques, quant à elle, exploite une usine de réduction directe qui produit du préréduit (DRI) à partir du minerai de fer, pour le transformer en acier grâce au procédé du FEA. Les quatre aciéries intégrées sont situées en Ontario.

2.2 Consommation de l'énergie

L'industrie sidérurgique est une grande consommatrice d'énergie au Canada, car elle représente environ 2,0 p. 100 de la consommation d'énergie primaire du pays, soit 7,5 p. 100 de la demande énergétique industrielle du Canada^{2,3}. La consommation d'énergie du secteur sidérurgique canadien en 2002 apparaît à la figure 2-1.

Par ailleurs, l'acier est énormément recyclé, car il affiche un taux de recyclage (défini comme étant la quantité d'acier produite à partir de produits ferreux désuets récupérés) de 40 p. 100 au Canada. Le recyclage de l'acier a une forte incidence sur le rendement énergétique du secteur dans son ensemble, puisque l'acier produit à partir de la ferraille nécessite beaucoup moins d'énergie que celui qui provient du minerai de fer. Toutefois, l'approvisionnement en ferraille d'acier est limité, de sorte que la demande d'acier doit être comblée par un produit composé à la fois de ferraille recyclée et de minerai de fer. De plus, la qualité de l'acier produit avec de la ferraille récupérée ne convient pas à certaines applications sidérurgiques, à cause des impuretés contenues dans les ferrailles d'acier.

² Selon des données contenues dans *NAICS Energy Consumption Report*, Statistique Canada, n° de catalogue 57-003-XPB.

³ Les valeurs énergétiques se fondent sur le pouvoir calorifique supérieur des combustibles, qui inclut la chaleur latente de l'évaporation de l'eau formée dans le procédé de combustion. L'ensemble de la consommation d'énergie électrique a été converti en une unité de chaleur à partir d'un facteur de 3 600 mégajoules par mégawattheure (MJ/MWh), soit l'équivalent calorifique de l'énergie électrique consommée.

L'organigramme de production d'une aciérie électrique apparaît à la figure 2-2, et l'intensité énergétique des aciéries électriques participantes, pour l'année 2002, est indiquée à la figure 2-3. L'organigramme de production d'une usine intégrée est indiqué à la figure 2-4, et l'intensité énergétique des usines intégrées participantes, toujours pour l'année 2002, apparaît à la figure 2-5⁴. Ces diagrammes montrent que l'intensité énergétique des aciéries électriques est inférieure à la moitié de celle des usines intégrées. Cette comparaison suppose que toute l'électricité consommée a été produite par des centrales électriques à combustible fossile. En réalité, une partie de l'électricité consommée par les aciéries canadiennes est produite par des centrales nucléaires ou hydroélectriques, de sorte que la quantité de combustible fossile utilisée pour produire de l'électricité, à l'intention des aciéries, serait moindre. Le recours à des taux de combustible fossile *réels* pour la production d'électricité rend implicitement les aciéries électriques plus efficaces du point de vue de la consommation d'énergie, pour l'ensemble de l'efficacité énergétique et de l'intensité de CO₂.

Les dépenses consacrées à l'énergie dans le secteur sidérurgique canadien représentent le deuxième poste en importance (après la main-d'œuvre) dans le coût total de l'exploitation. Il n'est alors pas surprenant, par son engagement envers le PEEIC et d'autres initiatives, que le secteur sidérurgique ait continuellement amélioré son efficacité énergétique comme moyen d'améliorer sa position concurrentielle. Depuis 1990, le secteur a réduit sa consommation d'énergie spécifique (en gigajoules par tonne de produit expédiée) de 23 p. 100 (voir la figure 2-6) et a réduit ses émissions de CO₂ de 20 p. 100⁵. Cette réalisation a été rendue possible surtout par des investissements dans de nouveaux procédés et des technologies de réduction de la consommation d'énergie.

⁴ Toutes les valeurs d'intensité énergétique dans le présent rapport sont basées sur le pouvoir calorifique inférieur des combustibles, qui n'inclut pas la chaleur latente de l'évaporation de l'eau formée dans le procédé de combustion. Quant aux valeurs d'intensité énergétique électrique dans le présent rapport, elles ont été converties en un intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production d'électricité totalement à base de combustible fossile. Le facteur de 9 200 MJ/MWh a été jugé représentatif de la production d'électricité moderne à partir de combustibles fossiles en Europe, par l'International Iron and Steel Institute et par le Comité européen de l'énergie des aciéries (voir le chapitre 6, sources de référence 1 et 2).

⁵ Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne, *Rapport annuel 2002-2003 : Des idées d'énergie à l'œuvre*, pages 78-79 (oee.nrcan.gc.ca/Publications/infosource/Pub/peeic/RapportAnnuel02-03).

3

MÉTHODOLOGIE



3. MÉTHODOLOGIE

3.1 Indicateurs d'intensité énergétique

À l'échelle mondiale, l'industrie sidérurgique s'est employée rapidement à communiquer les connaissances aux aciéries et à les doter d'outils leur permettant de mettre en application le concept d'indicateur d'intensité énergétique dans leurs procédés et leurs installations. La méthodologie employée est décrite en détail dans les rapports produits par l'IISI et le Comité européen de l'énergie des aciéries (CEEAA)⁶, de concert avec l'Association Technique de la Sidérurgie (ATS). Il n'est pas nécessaire de connaître la méthodologie pour comprendre les résultats de la présente étude, mais le fait de saisir les aspects suivants du concept d'indicateur d'intensité énergétique contribue à faire en sorte que les résultats ne soient pas mal interprétés ou mal appliqués.

L'analyse comparative de l'intensité énergétique exige un certain type d'indicateur déterminé uniquement par l'efficacité avec laquelle l'énergie est consommée par le procédé ou l'usine sous évaluation. L'indicateur doit être uniquement fonction des changements de technologie et de pratique dans la limite du procédé particulier sous examen.

Les différences externes, comme le mode de production de l'énergie électrique achetée ou le mode de production de l'oxygène acheté, font varier l'énergie réelle consommée par unité de produit sidérurgique, mais elles ne changent pas l'efficacité avec laquelle l'énergie est consommée dans un procédé donné. Par conséquent, la méthodologie de l'indicateur d'intensité énergétique attribue une valeur fixe à chaque flux énergétique (l'électricité, la vapeur, l'oxygène) consommé ou produit par le procédé sous évaluation, et elle applique les valeurs fixes au procédé à chaque usine à l'étude.

Ainsi, par exemple, l'énergie tirée d'un combustible fossile consommé pour produire de l'électricité peut s'échelonner de 0 mégajoule par mégawattheure (MJ/MWh) d'électricité produite par une centrale hydroélectrique, à 9 200 MJ/MWh dans le cas de l'électricité provenant d'une centrale thermique au charbon. Les valeurs des services publics d'électricité canadiens tombent naturellement dans cette fourchette générale. Comme valeur de référence de l'indicateur d'intensité énergétique dans la présente étude, la valeur énergétique du combustible fossile pour la production d'électricité est fixée selon la quantité produite par une centrale thermique au charbon, soit 9 200 MJ/MWh. Cette valeur s'applique à toutes les usines, peu importe la valeur réelle de l'électricité produite par leur fournisseur de services publics.

L'achat et la vente de produits intermédiaires, comme le coke, le fer ou des brames d'acier, modifient également la consommation d'énergie propre à une usine. L'indicateur d'intensité énergétique doit alors isoler les ventes et les achats ainsi que tous les produits à fabriquer et à transformer selon la même intensité énergétique que celle de l'usine ou du procédé que l'on évalue.

⁶ *Ibid.*, voir le chapitre 6, sources de référence 1 et 2.

L'indicateur d'intensité énergétique s'exprime en unités d'énergie par unité de production (habituellement MJ par tonne). Il s'agit des mêmes unités que celles utilisées pour les données de consommation d'énergie spécifique. Toutefois, les valeurs de l'indicateur d'intensité énergétique ne sauraient être interprétées comme étant des consommations d'énergie spécifiques. Elles différeront sensiblement des données sur la consommation d'énergie spécifique transmises par les aciéries aux divers programmes gouvernementaux, comme Mesures volontaires et Registre inc. du Défi-climat canadien (MVR inc.) [désormais Changement Climatique CSA, Registres de GES] et le PEEIC. L'indicateur d'intensité énergétique diffère pour les raisons suivantes :

- il est basé sur le pouvoir calorifique inférieur (ou net) des combustibles consommés. Le pouvoir calorifique inférieur exclut la chaleur latente de l'évaporation de l'eau formée dans le procédé de combustion. On utilise le pouvoir calorifique inférieur pour se conformer à la pratique utilisée par l'IISI et le CEEA. Au Canada, toutes les données énergétiques déclarées sont basées sur le pouvoir calorifique supérieur (ou brut) des combustibles consommés. Le pouvoir calorifique supérieur inclut la chaleur latente de l'évaporation de l'eau formée dans le procédé de combustion;
- les limites des procédés et des usines ne sont pas nécessairement les mêmes;
- des valeurs fixes sont utilisées dans le cas des intrants énergétiques qui franchissent les limites dans les procédés et les usines;
- on doit isoler l'énergie liée à la vente et à l'achat d'un produit intermédiaire pour établir l'indicateur d'intensité énergétique d'une usine.

Il ne faut jamais utiliser l'indicateur d'intensité énergétique dans le cadre de la consommation d'énergie réelle d'une usine. La seule utilisation légitime de l'indicateur d'intensité énergétique consiste à comparer le rendement relatif de procédés ou d'usines identiques, voire très semblables.

3.2 Technologies d'économie d'énergie

Comme un grand nombre de technologies d'économie d'énergie sont accessibles à l'industrie sidérurgique, on peut se servir de l'indicateur d'intensité énergétique pour établir le potentiel d'efficacité si l'on intègre une ou plusieurs de ces technologies dans les usines ou procédés existants. Cette évaluation s'effectue en établissant l'indicateur énergétique d'un procédé ou d'une usine de référence où l'on a intégré les technologies voulues, puis en l'utilisant comme indice de comparaison avec les usines ou procédés existants. De telles valeurs de référence ont été élaborées par l'IISI et peuvent être utilisées à titre de lignes directrices internationales pour mesurer la pénétration des technologies d'économie d'énergie et le potentiel d'une plus grande application.

L'usine EcoTech de l'IISI⁷, une usine virtuelle qui emploie des technologies d'économie d'énergie à la fois disponibles sur le marché et attrayantes sur le plan économique (technologies EcoTech), a été retenue comme valeur de référence dans le cadre de la présente étude. Que les technologies soient attrayantes sur le plan économique dépend de bien des facteurs, comme le prix de l'énergie dans un territoire en particulier, la difficulté d'intégrer les technologies dans des équipements de production existants et les avantages différentiels si les technologies ne sont que partiellement mises en application. L'attrait économique que présente une technologie ne peut être déterminé que par l'usine qui envisage de l'adopter.

Il n'existe pas, ou presque, d'usine et de procédé qui ont adopté l'ensemble des technologies préconisées par l'usine EcoTech de l'IISI. Par conséquent, les valeurs d'intensité énergétique d'EcoTech ont été établies en extrapolant les indicateurs d'intensité énergétique des procédés d'exploitation et des usines par les gains d'efficacité attribués aux technologies d'économie d'énergie supplémentaires requises pour effectuer l'implantation complète des technologies EcoTech. Certes, les valeurs d'intensité énergétique d'EcoTech sont quelque peu théoriques, et il nous manque des données réelles d'exploitation des procédés et des usines pour vérifier si elles peuvent être atteintes dans la réalité.

L'usine AllTech de l'IISI⁸ est une variante de l'usine EcoTech dans laquelle toutes les technologies d'économie d'énergie éprouvées ont été intégrées, indépendamment de la viabilité financière. Des périodes de récupération économique de plus de 20 ans ne sont pas exceptionnelles pour certaines technologies AllTech. L'usine AllTech représente une norme rigoureuse d'efficacité énergétique et, comme telle, n'est pas une valeur de référence appropriée dans le cadre de notre étude. Cependant, certaines technologies AllTech sont implantées dans l'industrie sidérurgique canadienne, ce qui indique leur viabilité. Les technologies AllTech utilisées dans l'industrie sidérurgique canadienne sont comprises dans la présente étude.

Évidemment, la technologie n'est qu'un des facteurs qui ont un effet sur l'efficacité énergétique des procédés et des usines. Voici quelques-uns des autres facteurs :

- Utilisation de l'équipement – L'efficacité énergétique augmente si l'équipement fonctionne à sa capacité de production prévue, ou près de celle-ci. Même si toutes les usines s'efforcent d'exploiter leur équipement au taux d'utilisation le plus élevé possible, il se peut que les conditions du marché et la concurrence fassent en sorte que l'équipement ne fonctionne pas ou soit arrêté pendant certaines périodes.
- Entretien de l'équipement et technologie – Le rendement à 100 p. 100 de la technologie exige des matières et de la main-d'œuvre pour assurer l'entretien approprié qui, dans une certaine mesure, est dicté par la conjoncture de l'industrie.
- Gamme de produits – L'intensité énergétique est plus élevée pour les laminoirs qui produisent une vaste gamme de produits, à cause des pertes de matières et de la consommation d'énergie qui surviennent durant la période nécessaire pour passer au produit suivant. De plus, certaines nuances d'acier demandent plus d'énergie à élaborer.

⁷ Voir le chapitre 6, source de référence 1.

⁸ Voir le chapitre 6, source de référence 1.

- Climat – L'intensité énergétique des usines canadiennes est supérieure à cause de l'énergie requise pour protéger l'équipement et le personnel du climat hivernal rigoureux, et pour compenser les pertes de chaleur industrielle plus grandes en raison des basses températures ambiantes.

Il convient de noter que les effets de ces autres facteurs ne sont pas inclus dans les valeurs d'intensité énergétique d'EcoTech.

Pour la présente étude, les technologies éconergétiques ont été retenues pour chaque procédé examiné. Ces technologies comprennent l'ensemble des technologies EcoTech et d'autres technologies d'économie d'énergie qui sont en place dans des aciéries canadiennes ou qui ont été recommandées dans des études précédentes en raison de leur potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique dans le secteur sidérurgique canadien⁹. Les technologies retenues pour chaque procédé et la pénétration des diverses technologies dans chaque usine figurent au chapitre 4, « Résultats ».

Des difficultés sont survenues en recourant à l'usine EcoTech à titre de valeur de référence pour la pénétration de la technologie et l'intensité énergétique. Les difficultés, qui ont trait à l'interprétation des données et de l'information dans le rapport de l'IISI¹⁰, incluent ce qui suit :

- Le carbone dans l'intrant et l'extrait métalliques des procédés n'était pas toujours inclus dans le bilan énergétique. (Il l'est dans la présente étude.)
- L'usine EcoTech n'était pas toujours définie à la fois sur les plans de la technologie et de l'intensité énergétique. Dans certains secteurs, comme les fours de réchauffage, on aborde la question des technologies d'économie sans préciser clairement si elles sont incluses dans l'usine EcoTech. Les technologies sont cependant implicites quant au rendement de l'usine EcoTech.
- Certaines technologies EcoTech sont définies dans des termes qui sont difficiles ou impossibles à mettre en rapport avec le rendement réel de l'usine, ou qui n'ont aucune signification universelle. (Par exemple, définir le rendement du récupérateur en termes d'efficacité plutôt que de température de préchauffage de l'air.)
- Dans certains cas, les indicateurs d'intensité énergétique de l'usine EcoTech diffèrent de ceux utilisés par le CEEA¹¹.

Donc, l'interprétation de l'usine EcoTech utilisée dans la présente étude peut différer d'autres interprétations.

L'annexe A définit l'interprétation de l'usine EcoTech utilisée dans la présente étude. Elle fournit les éléments suivants pour chacun des procédés :

- la liste des technologies EcoTech;

⁹ Voir le chapitre 6, source de référence 3.

¹⁰ Voir le chapitre 6, source de référence 1.

¹¹ Voir le chapitre 6, source de référence 2.

- les indicateurs d'intensité énergétique et d'intensité des émissions de CO₂ d'EcoTech, par type d'énergie;
- des renvois au rapport de l'IISI concernant toutes les données et l'information d'EcoTech.

Un tableau des coefficients d'émission de CO₂, utilisés pour établir l'intensité de CO₂, figure à l'annexe B.

3.3 Applicabilité des indicateurs d'intensité énergétique au secteur sidérurgique canadien

Il faut insister sur le fait que le recours aux indicateurs d'intensité énergétique n'est valable que pour comparer des procédés identiques ou très semblables. En appliquant correctement l'indicateur, les pratiques d'exploitation et les technologies de l'équipement qui permettent d'atteindre la plus grande efficacité devraient apparaître. Cela ne sert pas à grand-chose de comparer divers procédés qui servent à fabriquer le même produit. Par exemple, l'acier liquide est élaboré à la fois par le procédé du FEA et le procédé du haut fourneau/convertisseur à oxygène. Une comparaison des différences intrinsèques entre les deux filières révèle que le procédé du FEA consomme environ la moitié de l'énergie consommée par le procédé du convertisseur à oxygène. Toutefois, comme l'équipement utilisé dans les deux cas est très différent, le fait de changer les pratiques et les technologies d'exploitation dans un cas ne produira pas les mêmes résultats que dans l'autre.

Les usines et les procédés analysés dans la présente étude ont été retenus d'après les critères suivants :

- Ils sont applicables à deux usines ou plus.
- Ils renferment des équipements de production comparables.
- Ils disposent essentiellement des mêmes flux d'intrants et d'extrants de matières.
- Ils affichent une consommation d'énergie spécifique suffisante pour offrir la possibilité de réduire de façon appréciable la consommation d'énergie.

Deux autres procédés qui ne répondent pas aux critères ci-dessus ont également été analysés :

1. L'un porte sur une usine de réduction directe jumelée à une aciérie électrique. Cette installation est le seul exemple au Canada parmi un certain nombre d'autres technologies d'élaboration du fer en usage aujourd'hui. L'usine fait appel au procédé de réduction directe MIDREX® de la société Midrex Technologies Inc., la technologie la plus largement répandue pour la production de préréduit (DRI); elle est alimentée au gaz naturel et nécessite du minerai de fer bouleté.

2. L'autre procédé consiste en une usine intégrée comportant une machine de coulée et de laminage en continu de bandes à chaud. L'acier liquide est transformé par coulée continue en brames minces (ou feuillards épais), lesquelles sont ensuite laminées à chaud pour devenir des bandes à chaud en bobines. Le procédé est une solution de rechange à la filière coulée continue et laminoir à bandes à chaud en éliminant deux étapes énergivores – le four de réchauffage des brames et la cage dégrossisseuse.

3.4 Collecte de données

Le calcul des indicateurs d'intensité énergétique des procédés et des usines exige l'utilisation de données réelles de la consommation d'énergie et de la production pour une période précise. La présente étude est basée sur des données de l'année civile 2002, obtenues en vertu d'une entente de non-divulgaration. Les données sur chacun des procédés ont été consignées à l'aide de formulaires de déclaration comportant un tableur basé sur des chiffriers développés par le CEEA¹². Les formulaires de déclaration servent à calculer les indicateurs d'intensité énergétique de chaque procédé au fur et à mesure que les données sont saisies. Cette méthode a permis aux usines participantes de voir instantanément leurs résultats et de contester des résultats ou des données qui ne semblaient pas concorder avec la fourchette prévue. Un questionnaire a été élaboré pour consigner tout complément d'information sur les technologies et les pratiques d'économie d'énergie en place pour chaque procédé à chaque usine. Les formulaires de déclaration ont été remplis par des employés à chaque usine participante.

Des données manquantes ou contestables ont été relevées lors de la compilation des données pour chaque procédé. On a pris contact avec les usines et des données supplémentaires ou révisées ont été soumises. Le dialogue s'est poursuivi avec des employés d'usine pour faire en sorte que l'information utilisée soit aussi complète et précise que possible, même si la précision et la certitude sont difficiles à évaluer à cause des différences au niveau du comptage aux diverses usines. Il a fallu en arriver à une estimation concernant certaines des données relevées dans des usines où l'on ne disposait pas d'appareil de mesure. Lorsque des estimations de l'intrant énergétique affecté à des procédés étaient nécessaires, elles ont été basées sur les besoins énergétiques relatifs de l'équipement, ainsi que sur le niveau et la durée de fonctionnement de l'équipement.

3.5 Indicateurs d'intensité énergétique des procédés

Les indicateurs d'intensité énergétique de chaque procédé, à chaque usine participante, ont été calculés à l'aide du chiffrier « Formulaire de déclaration – Secteurs d'élaboration ».

¹² Voir le chapitre 6, source de référence 2.

3.6 Indicateurs d'intensité énergétique des usines

En matière d'analyse comparative énergétique, les usines sont définies par leurs procédés associés nécessaires pour élaborer un produit *spécifique*. Vu que le produit pourrait être un produit intermédiaire ou le produit laminé à chaud final, il faut définir, aux fins de l'analyse comparative énergétique, un nombre d'usines « modèles » plus élevé que celui des usines concrètes participant à la présente étude. Par exemple, trois usines « modèles » seraient nécessaires pour une aciérie électrique réelle qui produit à la fois des barres et du fil machine :

- une usine comportant la filière four électrique à arc et coulée continue pour la production de billettes, le produit intermédiaire;
- une usine comportant la filière four électrique à arc, coulée continue et laminoir à barres pour la production de barres;
- une usine comportant la filière four électrique à arc, coulée continue et laminoir à fil machine pour la production de fil machine.

L'indicateur d'intensité énergétique d'une usine s'exprime en unités d'énergie (MJ) par tonne de produit de l'usine.

L'indicateur d'intensité énergétique d'une usine est basé sur l'indicateur d'intensité énergétique et le facteur d'intrant de matières de chaque procédé dans le flux opérationnel.

Les indicateurs d'intensité énergétique des procédés ont déjà été expliqués (voir la section 3.5, « Indicateurs d'intensité énergétique des procédés »).

Le facteur d'intrant de matières se définit comme la quantité (en tonnes) d'intrant de matières à intégrer dans un procédé pour produire une tonne d'extrait. Vu que la plupart des procédés perdent de la matière à cause de l'oxydation du métal et de la mise au rebut des produits hors normes, le facteur d'intrant est souvent supérieur à un. Les facteurs d'intrant de chaque procédé sont calculés à partir de l'intrant de matières et des données d'extrait déclarés par les usines participantes.

Les procédés requis dans une usine sont liés aux facteurs d'intrant de matières afin d'établir le volume de production nécessaire de chaque procédé pour que l'usine fabrique une tonne de produit. Ce chiffre est alors multiplié par l'indicateur d'intensité énergétique du procédé pour établir l'apport du procédé à l'indicateur global d'intensité énergétique de l'usine. L'indicateur d'intensité énergétique de l'usine est alors la somme des apports de chaque procédé.

La figure 3-1 illustre le flux opérationnel de l'aciérie électrique à barres d'EcoTech ainsi que les facteurs d'intrant d'EcoTech qui relient les procédés du four électrique à arc, de la coulée continue et du laminoir à barres.

D'abord, la quantité de produit que chaque procédé doit fabriquer pour produire une tonne de barres est calculée en reliant les facteurs d'intrant suivants :

- tonnes d'acier coulé/tonne de barres = facteur d'intrant du laminoir à barres = 1,031

- tonnes d'acier liquide/tonne de barres = facteur d'intrant du laminoir à barres × facteur d'intrant de la coulée continue = $1,031 \times 1,020 = 1,05$

On peut alors calculer l'indicateur d'intensité énergétique de l'usine en additionnant les produits de la quantité de produit requise et l'indicateur d'intensité énergétique de chaque procédé :

- Indicateur d'intensité énergétique de l'aciérie électrique à barres d'EcoTech = indicateur d'intensité énergétique du laminoir à barres + (tonnes d'acier coulé/tonne de barres × indicateur d'intensité énergétique de la coulée continue) + (tonnes d'acier liquide/tonne de barres × indicateur d'intensité énergétique du FEA)

$$\text{soit } 2\,236 + (1,031 \times 101) + (1,05 \times 5\,154) = 7\,760 \text{ MJ/tonne de barres}$$

On peut établir les indicateurs d'intensité énergétique pour la fabrication de produits intermédiaires de façon semblable. Ainsi, en se reportant de nouveau à la figure 3-1, l'indicateur d'intensité énergétique de l'aciérie électrique à billettes d'EcoTech serait :

- Indicateur d'intensité énergétique de l'aciérie électrique à billettes d'EcoTech = indicateur d'intensité énergétique de la coulée continue + tonnes d'acier liquide/tonne de billettes × indicateur d'intensité énergétique du FEA

$$\text{soit } 101 + (1,02 \times 5\,154) = 5\,358 \text{ MJ/tonne de billettes}$$

La figure 3-2 illustre la façon dont les procédés d'une usine intégrée peuvent être reliés de façon semblable pour obtenir l'indicateur d'intensité énergétique d'une usine intégrée à bandes à chaud en bobines « modèle » d'EcoTech. Le cas de l'usine intégrée se complique en outre par la nécessité d'incorporer les utilités de l'usine dans le calcul. L'indicateur d'intensité énergétique de l'usine relatif aux installations de production (cases pêche) est établi en premier. On peut alors déterminer l'indicateur d'intensité énergétique global de l'usine en ajoutant les consommations d'énergie des utilités (les gaz combustibles pour les chaudières et les torchères) et les crédits (vapeur et électricité).

3.6.1 Indicateurs d'intensité énergétique de l'aciérie électrique

Les secteurs d'élaboration étudiés aux aciéries électriques sont indiqués dans les cases pêche de la figure 2-2. Les procédés du four électrique à arc et de la coulée continue constituent des étapes de production distinctes, mais dans la majorité des usines, ils sont traités comme une seule unité en matière de mesure et de comptabilisation de l'énergie. Par conséquent, dans la présente étude, l'élaboration de l'acier par four à arc et la coulée sont combinées.

L'aciérie électrique comporte des opérations d'élaboration de l'acier par four électrique à arc, de coulée continue et de laminage à chaud. Cette dernière opération peut englober un ou plusieurs des quatre procédés de laminage à chaud – le fil machine, les barres, les profilés lourds ou les bandes à chaud. Ces procédés de laminage à chaud diffèrent selon la taille et la forme du produit fabriqué. Donc, la valeur de l'intensité énergétique d'EcoTech

est différente pour chaque procédé. Pour établir une comparaison significative et juste des usines, un indicateur d'intensité énergétique de l'usine « modèle » distinct a été déterminé pour chacun des quatre procédés de laminage à chaud.

3.6.2 Indicateurs d'intensité énergétique des usines intégrées

Les secteurs d'élaboration analysés aux usines intégrées apparaissent à la figure 2-4. Ils sont répartis en deux catégories : les procédés d'élaboration, dans les cases pêche, et les utilités de l'usine, dans les cases bleues. Il faut procéder à cette répartition afin d'en arriver à des comparaisons significatives du rendement des usines. (Il convient de noter que les utilités des aciéries électriques contribuent pour très peu au bilan énergétique global des usines en raison du type d'équipement utilisé, par exemple, l'absence de fours à coke, de hauts fourneaux.)

Dans la conception et l'exploitation des procédés d'élaboration des usines intégrées, on tient compte des priorités telles que la productivité, le coût, la qualité des produits et les matières premières disponibles. Les procédés des utilités de l'usine sont conçus et exploités de façon à réduire au minimum le coût énergétique. Cette distinction est importante.

Les utilités de l'usine offrent les possibilités suivantes de réduire le coût et la consommation d'énergie :

- la répartition des sous-produits des combustibles de l'usine (gaz de cokerie [GC], gaz de haut fourneau [GHF], gaz de convertisseur à oxygène) utilisés dans des applications de production de chaleur industrielle, ce qui réduit ou élimine la nécessité d'acheter d'autres combustibles (gaz naturel, pétrole);
- la transformation des sous-produits des combustibles de l'usine en d'autres formes d'énergie (vapeur, électricité, air comprimé) pour combler la demande des procédés d'élaboration et réduire l'achat de combustible et d'électricité;
- la vente de l'énergie excédentaire ou inutilisable (comme l'eau chaude pour le chauffage collectif).

Comme les utilités de l'usine ont une très forte incidence sur l'efficacité énergétique totale de l'usine intégrée, leur effet doit être isolé afin de faire ressortir les gains d'efficacité énergétique dans le flux de production. De plus, il n'est pas possible de répartir le niveau d'utilisation des utilités de l'usine selon les différents procédés d'élaboration. Ainsi, le torchage des sous-produits de combustibles inutilisés dépend de la demande de ces combustibles dans d'autres procédés de l'usine. La demande, en revanche, est liée à des aspects tels que le niveau de fonctionnement de l'usine et la capacité de la centrale électrique de convertir des combustibles en vapeur ou en électricité. Par conséquent, le torchage d'un sous-produit de combustible donné ne saurait être attribué au procédé qui produit ce combustible.

Nous avons effectué, dans la présente étude, un certain nombre de comparaisons quant au rendement des usines. L'efficacité énergétique du flux des procédés d'élaboration a d'abord été évaluée pour chaque produit intermédiaire, puis pour le produit laminé à chaud final *sans* tenir compte de l'effet des utilités de l'usine. L'efficacité énergétique du produit laminé à chaud final a ensuite été établie en tenant compte de l'effet des utilités de l'usine.

Dans le cas des usines qui exploitent deux procédés de laminage à chaud ou plus (par exemple, le laminoir à bandes à chaud, la coulée et le laminage en continu de bandes à chaud, le laminoir à tôles fortes), les utilités (torchères, alimentation et traitement de l'eau, et centrale électrique) ont été attribuées à chaque procédé proportionnellement à la quantité de produits laminés à chaud qui étaient fabriqués par chaque procédé.

3.7 Indicateurs d'intensité énergétique des fours de réchauffage

Les procédés de laminage à chaud sont communs à la fois aux aciéries électriques et aux usines intégrées, de sorte qu'il est possible de les comparer au niveau des procédés. Le réchauffage est le premier stade opérationnel dans la fabrication des produits laminés à chaud, chaque installation de laminage à chaud étant équipée d'un ou de plusieurs fours de réchauffage pour chauffer les demi-produits à une température de laminage uniforme (1 000 °C à 1 250 °C). Même si le four de réchauffage ne constitue pas un procédé distinct, il est étudié séparément dans la présente étude pour les motifs suivants :

- Les fours de réchauffage consomment 60 p. 100 et plus du total de l'énergie requise pour le laminage à chaud.
- Les possibilités de mettre en application des technologies d'économie d'énergie dans le laminage à chaud se situent généralement au niveau des fours de réchauffage.
- On ne saurait évaluer la pénétration des technologies d'économie d'énergie des fours de réchauffage pour l'ensemble du processus de laminage à chaud, car certaines usines sont dotées de deux fours ou plus à des degrés divers de perfectionnement technique.

Les indicateurs d'intensité énergétique de chaque four de réchauffage, dans chaque usine participante, ont été calculés à l'aide du chiffrier « Formulaire de déclaration – Fours de réchauffage ».

3.8 Indicateurs d'intensité des émissions de CO₂

On calcule les indicateurs d'intensité des émissions de CO₂ en attribuant des coefficients d'émission aux composants énergétiques des indicateurs d'intensité énergétique. Donc, l'indicateur d'intensité des émissions de CO₂ dépend non seulement de l'efficacité énergétique du procédé, mais également de la ressource énergétique consommée.

Les coefficients d'émission des combustibles (charbon, carbone, coke, gaz naturel, pétrole, gaz de cokerie, gaz de haut fourneau, gaz de convertisseur à oxygène) se calculent en fonction de la teneur en carbone du combustible. On a demandé aux usines participantes de fournir les coefficients d'émission de CO₂ des combustibles qu'elles consommaient. Une analyse chimique des combustibles a également été demandée, pour vérifier les coefficients d'émission.

Une quantité importante de gaz naturel était consommée par l'ensemble des usines participantes. Cinq usines situées dans trois provinces ont soumis des analyses du gaz naturel dont les coefficients d'émission s'échelonnaient de 55,77 à 56,06 g CO₂/MJ. En fonction de ces données, un coefficient d'émission de 56 g CO₂/MJ a été utilisé pour l'ensemble de la consommation de gaz naturel déclarée.

Le coefficient d'émission du carbone est de 3 664 kg CO₂ par tonne de carbone.

En ce qui a trait aux autres combustibles, on a noté un écart considérable dans les analyses chimiques et les coefficients d'émission de CO₂, en particulier pour les sous-produits de combustibles générés dans les usines intégrées. On s'est donc servi des coefficients d'émission propres à chaque usine. Des bilans du carbone ont été effectués au niveau des procédés du four à coke, du haut fourneau et du convertisseur à oxygène de chaque usine intégrée afin de vérifier si la teneur en carbone (et donc les coefficients d'émission de CO₂) de leurs sous-produits de combustibles était raisonnable.

L'annexe B présente le tableau complet des coefficients d'émission de CO₂.

Les fondants sont nécessaires dans les procédés d'élaboration du fer et de l'acier pour séparer les impuretés du fer et de l'acier. Il est reconnu que certaines matières, lorsqu'elles sont utilisées comme fondants, produisent des émissions de CO₂. Citons deux exemples : le calcaire, qui est surtout du carbonate de calcium (CaCO₃), et la dolomite, qui est composée d'environ 60 p. 100 de carbonate de calcium et 40 p. 100 de carbonate de magnésium (MgCO₃). Chauffé, le carbonate de calcium se décompose pour former du CO₂ et de l'oxyde de calcium (CaO), qui est un fondant. Le carbonate de magnésium subit une réaction similaire quand on le chauffe et il forme du CO₂ et de l'oxyde de magnésium (MgO), qui est également un fondant. La chaux vive, un autre terme courant pour désigner l'oxyde de calcium, est produite par la calcination du calcaire dans des fours rotatifs. Aucune émission de CO₂, dans les procédés d'élaboration du fer et de l'acier, n'est liée à l'utilisation de la chaux vive comme fondant. Les indicateurs d'intensité des émissions de CO₂, dans la présente étude, **n'incluent pas** d'émissions de CO₂ découlant de l'utilisation du calcaire et de la dolomite.

L'indicateur d'intensité des émissions de CO₂ comprend trois éléments : les émissions directes, les émissions des utilités et les émissions externes. L'intensité des émissions directes tient compte des émissions provenant de sources au sein même du procédé. L'élément intensité des émissions des utilités de l'usine prend en compte les émissions provenant des installations qui fournissent les utilités (la vapeur, l'eau, etc.) et qui sont situées à l'extérieur du procédé comme tel, mais qui font partie de l'usine. Lorsqu'on effectue l'analyse comparative des procédés dans diverses usines, on se sert de coefficients d'émission standard pour les utilités. Cela fait en sorte que les indicateurs d'intensité des émissions de CO₂ des procédés sont uniquement fonction des technologies et des pratiques faisant partie du procédé lui-même. Si l'on compare des usines, on doit utiliser les coefficients d'émission réels pour la production des utilités de l'usine à l'étude, car les installations qui exploitent les utilités font partie de l'usine en question.

Le seul élément externe de l'intensité des émissions dans la présente étude est la consommation d'électricité utilisée directement par le procédé et par l'usine d'oxygène servant à produire l'oxygène consommé par le procédé. Les émissions liées à la production et à la fourniture d'autres formes d'énergie (gaz naturel, pétrole) et de matières premières (chaux vive, charbon, minerai de fer, ferraille, etc.) n'ont pas été prises en compte.

Comme il est expliqué à la section 3.1, « Indicateurs d'intensité énergétique », la consommation spécifique de chaleur (pouvoir calorifique) de l'électricité correspond à celle d'une usine alimentée au charbon – 9 200 MJ/MWh. Cette valeur est appliquée à toutes les usines, peu importe le coefficient d'émission réel de l'électricité produite par leur fournisseur de services publics. Pour être uniforme, le coefficient d'émission de CO₂ utilisé pour calculer les indicateurs d'intensité des émissions de CO₂ externes est de 856 kg/MWh. En utilisant ces coefficients, les résultats sont comparables à ceux obtenus par les méthodes d'analyse comparative de l'IISI et du CEEA. Ces coefficients sont également pris en compte pour représenter la valeur marginale d'émission. (La valeur marginale d'émission est l'écart dans les émissions qui surviendrait si la demande d'électricité était augmentée ou diminuée.) Cette hypothèse serait valide dans des territoires qui possèdent des centrales thermiques au charbon modernes en exploitation ou qui sont reliés par réseau à des territoires qui utilisent des centrales thermiques au charbon.

Il faut insister sur le fait que dans le cas de l'analyse comparative, on doit utiliser les mêmes coefficients pour l'énergie électrique et les émissions de CO₂ pour toutes les usines, peu importe le coefficient réel de l'électricité produite par leur fournisseur de services publics. Toutes les provinces canadiennes produisent de l'énergie électrique avec des installations autres que les centrales thermiques au charbon. Par conséquent, la consommation spécifique de chaleur moyenne et le coefficient d'émission de CO₂ provenant des diverses installations de production d'électricité, dans n'importe quelle province ou territoire canadien, seront bien inférieurs aux chiffres utilisés dans la présente étude. Ainsi, au Québec, où les centrales électriques produisent la plus grande partie de l'électricité, la consommation spécifique de chaleur moyenne et le coefficient d'émission de CO₂ des installations de production se rapprocheraient de zéro.

4

RÉSULTATS



4. RÉSULTATS

4.1 Interprétation des résultats

Les données figurant dans la présente section sont des indicateurs d'intensité énergétique et d'intensité des émissions de CO₂. Ces indicateurs ont été conçus dans le seul but de permettre d'évaluer l'efficacité avec laquelle l'énergie est consommée par le procédé ou l'usine à l'étude. Les indicateurs illustrent de quelle façon les changements dans la technologie et la pratique au sein même d'un procédé à l'étude pourraient améliorer l'efficacité énergétique et réduire l'intensité des émissions de CO₂.

Les indicateurs d'intensité énergétique et d'intensité des émissions de CO₂, même s'ils sont exprimés en unités identiques, *ne sont pas* des consommations d'énergie spécifiques et des émissions de CO₂ spécifiques, ni pour ce qui est des usines ou des procédés évalués, ni en ce qui concerne l'industrie dans son ensemble. Ils peuvent différer sensiblement des données réelles sur la consommation d'énergie spécifique et des données sur les émissions spécifiques de CO₂ des aciéries participantes. (Les raisons de ces écarts sont données à la section 3.1, « Indicateurs d'intensité énergétique ».) Par conséquent, il ne faut pas les utiliser pour décrire la consommation d'énergie et les émissions.

Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustibles sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (ou net) des combustibles consommés. Ils diffèrent des indicateurs calculés à partir des données canadiennes relatives à la consommation d'énergie des combustibles, qui sont basées sur le pouvoir calorifique supérieur (ou brut) des combustibles consommés.

Les indicateurs d'intensité énergétique et d'intensité des émissions de CO₂ donnent une idée des possibilités d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire l'intensité des émissions de CO₂ en mettant en œuvre la technologie disponible. Cependant, la quantification de ces possibilités n'est pas un objectif visé par la présente étude, et les méthodes utilisées dans l'analyse comparative de l'énergie ne servent pas à cette fin.

Les résultats précisent des possibilités de mettre en œuvre des technologies réalisables sur le plan technique. Toutefois, la mise en œuvre d'une technologie particulière peut ne pas être nécessairement attrayante sur le plan économique. Cette décision peut être prise uniquement par les usines qui envisagent d'adopter la technologie.

4.2 Présentation des résultats

Les résultats de chaque secteur d'élaboration sont présentés et numérotés de telle sorte que l'indicateur d'intensité énergétique, la pénétration de la technologie et l'indicateur d'intensité des émissions de CO₂ d'une usine participante donnée sont reliés.

Chaque barre dans les diagrammes des indicateurs d'intensité énergétique d'un secteur d'élaboration donné (ou type de four de réchauffage ou usine) représente le rendement de ce procédé à une usine participante. La première barre correspond toujours à l'usine EcoTech. Les barres contiguës sont disposées et numérotées par ordre de classement de l'indicateur d'intensité énergétique du procédé. Ainsi, l'usine 1 est celle qui affiche le meilleur indicateur d'intensité énergétique; l'usine 2 arrive au deuxième rang, et ainsi de suite. Les numéros d'usine sont indiqués pour relier l'indicateur d'intensité énergétique, la pénétration de la technologie et l'indicateur d'intensité des émissions de CO₂ d'une usine.

La disposition et la numérotation des colonnes dans les tableaux de la pénétration de la technologie sont les mêmes que celles qui figurent dans les diagrammes des indicateurs d'intensité énergétique correspondants. Si une usine est désignée comme l'usine 2 dans le diagramme « Indicateurs d'intensité énergétique » d'un procédé donné, il s'agit également de l'usine 2 dans le tableau « Pénétration de la technologie » de ce procédé. Par conséquent, la barre de l'indicateur d'intensité énergétique et la pénétration de la technologie d'une usine donnée correspondent exactement dans les diagrammes.

La disposition et la numérotation des usines dans les diagrammes des indicateurs d'intensité des émissions de CO₂ sont également les mêmes dans les diagrammes des indicateurs d'intensité énergétique correspondants. Si un procédé d'une usine est illustré comme étant l'usine 2, dans le diagramme « Indicateurs d'intensité énergétique », il est également désigné comme l'usine 2 dans le diagramme « Indicateurs d'intensité des émissions de CO₂ ».

Il n'existe aucun lien précis entre la numérotation des usines dans les diagrammes et tableaux, et l'identité des usines. De plus, il n'y a pas de corrélation entre la numérotation des usines dans les diagrammes et tableaux d'un secteur d'élaboration à un autre.

4.3 Secteurs d'élaboration

4.3.1 Fabrication du coke – Figures 4-1 et 4-2

Indicateurs d'intensité énergétique

- Les activités de fabrication du coke au Canada sont beaucoup moins efficaces que celles de l'usine EcoTech. D'après les indicateurs d'intensité énergétique, elles nécessitent de 60 à 110 p. 100 plus d'énergie que l'usine EcoTech. Puisque l'application des technologies EcoTech aux usines d'exploitation ne hausserait pas leur efficacité au niveau de celle de l'usine EcoTech, c'est donc que d'autres facteurs ont un effet négatif sur l'efficacité énergétique.
- Toutes les usines consomment plus de combustible (de 15 à 60 p. 100) pour la sous-combustion du four à coke que l'usine EcoTech.
- Toutes les usines consomment plus de vapeur (de quatre à sept fois plus) que l'usine EcoTech.
- Toutes les usines consomment beaucoup plus d'électricité (de 60 à 115 p. 100) que l'usine EcoTech.

Pénétration de la technologie

- On pourrait utiliser l'aspiration à haute pression des jets d'ammoniaque pour remplacer l'aspiration des vapeurs aux trois usines qui ne possèdent pas cette technologie.
- On pourrait installer des entraînements à vitesse variable à toutes les usines pour réduire la consommation d'électricité et de vapeur. Les possibilités seraient moindres dans le cas des usines 1 et 4, qui utilisent déjà des entraînements à vitesse variable pour la vapeur.
- On pourrait envisager l'amélioration du contrôle de la combustion comme moyen de réduire la consommation de combustible à toutes les usines. Même si l'usine 3 utilise cette technologie, la consommation de combustible pourrait être améliorée.
- Les autres technologies offrent des possibilités d'améliorer les économies d'énergie, mais il se peut qu'elles ne soient pas économiquement réalisables. L'applicabilité de ces technologies pourrait être étudiée une fois les autres améliorations mises en œuvre.

Indicateurs d'intensité des émissions de CO₂

- L'indicateur d'intensité élevé des émissions directes de CO₂ de l'usine 2 résulte du recours à un gaz de haut fourneau pour alimenter les fours à coke.

Autres aspects

- L'amélioration du contrôle de la combustion hausse le rendement de celle-ci en réduisant la quantité d'air de combustion excédentaire. Toutefois, il peut y avoir des motifs pour lesquels on ne peut améliorer l'efficacité de la combustion. L'âge et l'état des fours à coke ont un effet sur le combustible requis pour la sous-combustion (« underfiring »). Au fur et à mesure que les fours se détériorent, les niveaux d'air de combustion excédentaire, qui entraînent une perte de la chaleur des fours, doivent être augmentés pour empêcher la formation de fumée, laquelle est inacceptable sur le plan environnemental. Dans ces conditions, on ne saurait avoir recours à un contrôle amélioré de la combustion. Il faut pousser l'analyse davantage pour déterminer si le potentiel apparent de l'amélioration du contrôle de la combustion est faisable dans cette application.
- La pénétration partielle de la technologie de l'aspiration à haute pression des jets d'ammoniaque n'explique pas, en soi, la consommation élevée de vapeur. Il doit y avoir d'autres raisons qui expliquent les écarts de consommation de vapeur. Aucun renseignement au sujet des technologies employées à l'usine de récupération des sous-produits et du résultat de la production n'a été divulgué dans le cas de l'usine EcoTech, et aucune donnée n'a été recueillie auprès des usines participant à la présente étude. Il se pourrait bien que les usines de récupération des sous-produits exploitées au Canada soient de plus grande envergure, ou qu'elles diffèrent beaucoup – sur les plans du fonctionnement et de l'équipement –, de celles utilisées pour définir l'usine EcoTech. Le cas échéant, cette dernière n'est peut-être pas un élément de comparaison équitable dans le cas des usines canadiennes. Toutefois, si l'on tient compte de la quantité de vapeur consommée dans les cokeries, il existe une possibilité d'augmenter l'efficacité énergétique par l'amélioration des pratiques relatives aux systèmes de vapeur (isolation des conduites et de l'équipement, entretien du purgeur de vapeur, réparation des fuites de vapeur, récupération du condensat, etc.). L'amélioration de l'efficacité de l'équipement (turbines à vapeur, échangeurs de chaleur, équipement de transfert de masse et de distillation) est également possible.

- On ne saurait expliquer en outre le grand potentiel de réduction de la consommation d'électricité que présente la pénétration de la technologie. Une telle intensité élevée par rapport aux valeurs de référence de l'usine EcoTech indique que les pratiques faciles à implanter et lucratives de réduction de l'énergie électrique n'ont pas été mises en place. Vu que l'électricité est une source et un coût énergétiques externes, il est recommandé de procéder à une vérification de la consommation d'électricité.

Avant de procéder à des mesures pour réduire la consommation du combustible et de la vapeur du four à coke, voir la section 4.5.2, « Gestion de l'énergie dans les aciéries intégrées ».

4.3.2 Élaboration du fer – Figures 4-3 à 4-7

Afin de mieux saisir les différences de rendement et de mieux repérer les possibilités d'amélioration de l'intensité énergétique, le secteur d'élaboration du fer est réparti en quatre sous-secteurs : le soufflage, les cowpers, le haut fourneau et la préparation du charbon pulvérisé. Ces quatre sous-secteurs fonctionnent comme un système et il est nécessaire de rajuster le mode d'exploitation, de sorte que l'on puisse maximiser les résultats dans leur ensemble. Donc, il est parfois nécessaire d'exploiter l'un des sous-secteurs de manière moins efficace afin d'obtenir un gain supérieur d'efficacité pour l'ensemble du processus d'élaboration du fer.

4.3.2.1 Soufflage – Figure 4-3

Indicateurs d'intensité énergétique

- L'efficacité du soufflage pourrait être améliorée dans les usines 2, 3 et 4.

Pénétration de la technologie

- L'usine 1 possède des soufflantes à débit axial. Vu que l'efficacité de ces soufflantes peut atteindre 90 p. 100, comparativement à 70 p. 100 pour les soufflantes à débit radial, cette technologie peut réduire la consommation d'énergie du soufflage de 20 p. 100. La mise en place de soufflantes à débit axial dans les usines 2, 3 et 4 mènerait la consommation d'énergie du soufflage au niveau de celle de l'usine 1.
- Trois usines utilisent des taux d'enrichissement de l'oxygène de 50 mètres cubes normaux par tonne de production de fonte liquide ($\text{m}^3\text{n}/\text{tfl}$) ou plus. Cette pratique dépasse à la fois celle de l'usine EcoTech et celle de l'usine AllTech. Le taux d'enrichissement de l'oxygène à l'autre usine est inférieur au taux de $35 \text{ m}^3\text{n}/\text{tfl}$ de l'usine EcoTech. En moyenne, cette technologie est bien établie au Canada.

Autres aspects

Les usines intégrées analysées sont équipées de soufflantes alimentées par des turbines à vapeur. L'usine EcoTech est basée sur l'utilisation de soufflantes dont la moitié fonctionnent à l'aide d'entraînements électriques et l'autre moitié, à l'aide d'entraînements à vapeur. Le système d'alimentation en vapeur et celui en électricité sont tous deux situés à l'extérieur du secteur du soufflage. Donc, l'efficacité avec laquelle la vapeur et l'électricité sont produites ne devrait pas se refléter dans l'indicateur énergétique du soufflage. Dans

une situation où le soufflage est tributaire d'un entraînement totalement à la vapeur, l'indicateur d'EcoTech passerait de 740 MJ/tfl à 804 MJ/tfl. La consommation de vapeur de l'usine 1, à 823 MJ/tfl, se compare avantageusement à cette valeur.

La plupart des usines canadiennes fonctionnent à l'aide d'une seule soufflante. Il serait donc impossible de fonctionner à 50 p. 100 à l'aide d'entraînements électriques et à 50 p. 100 à l'aide d'entraînements à vapeur, comme le suggère l'usine EcoTech.

Les soufflantes sont très coûteuses, et l'augmentation de l'efficacité énergétique à elle seule ne saurait justifier leur remplacement.

Si l'on ne tient pas compte de la technologie de l'équipement (soufflantes à débit axial par rapport à des soufflantes centrifuges), l'énergie nécessaire au soufflage est proportionnelle à la masse d'air fournie. Puisque le but du soufflage consiste à procurer de l'oxygène au haut fourneau pour la combustion du combustible, l'enrichissement de l'oxygène réduit le volume d'air requis, chaque mètre cube d'enrichissement de l'oxygène réduisant l'air nécessaire de cinq mètres cubes.

Les besoins énergétiques du soufflage augmentent également en proportion de la pression à laquelle l'air est alimenté. Une pression plus élevée améliore le rendement du haut fourneau et permet de réduire la quantité de coke utilisée dans le fourneau. Ces facteurs viennent compenser la consommation plus élevée d'énergie des soufflantes.

L'énergie du soufflage dépend également de la vapeur disponible pour alimenter les turbines qui entraînent les soufflantes. De la vapeur à pression et à température plus élevées peut être convertie plus efficacement en électricité par les turbines. Toutefois, l'effet de la pression de vapeur ne se reflète pas dans les résultats.

Avant d'adopter des mesures pour réduire la consommation de la vapeur de soufflage, voir la section 4.5.2, « Gestion de l'énergie dans les aciéries intégrées ».

4.3.2.2 Cowpers – Figure 4-4

Indicateurs d'intensité énergétique

- Toutes les usines consomment davantage de combustible (de 14 à 42 p. 100) pour chauffer les cowpers que ne le fait l'usine EcoTech.
- Les usines 2 et 3 consomment beaucoup plus d'électricité (de quatre à sept fois plus) que l'usine EcoTech.
- L'usine 4 fonctionnait à un taux d'air de combustion excédentaire anormalement élevé à cause des brûleurs endommagés des cowpers. Ce mode d'exploitation diminue l'efficacité de combustion et contribue à expliquer l'intensité énergétique élevée.

Pénétration de la technologie

- La technologie de la récupération de la chaleur perdue pourrait être mise en œuvre à trois usines pour réduire la consommation de combustible.
- La pratique d'exploitation des cowpers disposés en quinconce/en parallèle n'est pas

utilisée ni réalisable dans les usines canadiennes. Celle qui est employée par l'usine EcoTech exige quatre cowpers, tandis que les hauts fourneaux canadiens fonctionnent avec trois cowpers. (Les cowpers sont très coûteux et il est plus économique de construire trois grands cowpers plutôt que quatre plus petits.) Cette pratique d'exploitation est attrayante sur le plan économique uniquement pour les usines qui possèdent déjà quatre cowpers.

- L'enrichissement de l'oxygène du haut fourneau est utilisé dans toutes les usines (voir la figure 4-3 pour le détail). Il existe peu de possibilités d'augmenter l'utilisation de cette technologie.
- Aucune des usines ne possède de contrôle de la combustion des cowpers qui corresponde à la pratique de l'usine EcoTech, laquelle consiste à limiter l'air de combustion excédentaire à 5 p. 100. Certaines opérations exigent des niveaux d'air excédentaire plus élevés durant la dernière partie du cycle de chauffage pour refroidir la flamme, de sorte que la température de cette dernière n'excède pas la température de fusion du réfractaire de la coupole du cowper. De telles opérations nécessiteraient d'abord de mettre en œuvre une technologie de mélange individuel des combustibles du cowper afin de ne permettre que l'utilisation de gaz de haut fourneau à faible température de combustion au dernier stade du cycle de chauffage.
- L'efficacité des cowpers de toutes les usines est inférieure à celle de l'usine EcoTech, établie à 85 p. 100. L'efficacité des cowpers est une donnée qui reflète le rendement global des cowpers et n'est pas liée à une technologie ou à une pratique particulière. Elle est plus significative que l'indicateur d'intensité énergétique. L'énergie plus élevée du cowper par tonne de production de fonte liquide peut être plus un indicateur de la quantité d'énergie fournie au haut fourneau par l'intermédiaire de l'air soufflé qu'un indicateur de l'efficacité énergétique des cowpers. Le combustible requis dans le haut fourneau peut être réduit en alimentant davantage d'énergie par l'intermédiaire de l'air soufflé provenant des cowpers.

Autres aspects

La technologie de la récupération de la chaleur perdue est employée à l'usine EcoTech pour réduire la consommation de combustible des cowpers. (On augmente l'efficacité des cowpers en utilisant la chaleur du gaz de combustion pour préchauffer l'air de combustion.) La technologie de la récupération de la chaleur perdue existe uniquement à l'usine 2. Toutefois, il s'agit d'une technologie différente de celle mentionnée dans l'usine EcoTech. La chaleur est récupérée et utilisée à l'extérieur par un autre procédé qui, à son tour, en bénéficie.

Le grand potentiel indiqué pour la réduction de la consommation d'électricité aux usines 2 et 3 ne saurait s'expliquer par la pénétration de la technologie. Une efficacité si médiocre par rapport à la valeur de référence indique que les pratiques faciles à implanter et lucratives de réduction de l'énergie électrique n'ont pas été mises en place. Vu que l'électricité est une source et un coût énergétiques externes, il faudrait procéder à une vérification de la consommation d'électricité. Le premier aspect à examiner serait l'efficacité et le mode d'exploitation des soufflantes d'air de combustion des cowpers, lesquelles consomment le plus d'électricité.

Avant d'adopter des mesures pour réduire la consommation de combustible de cower, voir la section 4.5.2, « Gestion de l'énergie dans les aciéries intégrées ».

4.3.2.3 Haut fourneau – Figure 4-5

Indicateurs d'intensité énergétique

- Le haut fourneau 1 fonctionne de façon aussi efficace que celui de l'usine EcoTech.
- Les hauts fourneaux 2 et 4 ont atteint le taux de coke de l'usine EcoTech.
- Le haut fourneau 4 consomme beaucoup plus de combustible que les autres. Il y a une possibilité de réduire la consommation de combustible du haut fourneau.

Pénétration de la technologie

Les produits injectés dans les hauts fourneaux (les combustibles injectés pour réduire la quantité de coke requise) sont très répandus dans toutes les usines. Le recours à l'injection de combustible dans le haut fourneau ne vise pas à réduire l'intensité énergétique du procédé du haut fourneau. En fait, cette technologie peut faire en sorte que le haut fourneau fonctionne à une intensité énergétique plus élevée. La technologie d'injection de combustible dans le haut fourneau vise à réduire la dépendance au coke, ce qui fait baisser la consommation d'énergie globale de l'usine par tonne de produit, car la fabrication du coke est énergivore.

- Une autre barre a été ajoutée au diagramme pour illustrer le rendement combiné des quatre hauts fourneaux. Dans l'ensemble, le taux d'injection de combustible dans les hauts fourneaux a dépassé le niveau d'EcoTech, établi à 3 870 MJ/tfl, et le taux de coke se rapproche de celui de l'usine EcoTech.
- Les usines 2 et 4 ont réduit la consommation de coke spécifique, qui se rapproche de celle de l'usine EcoTech. Toutefois, les hauts fourneaux des deux usines affichent des taux d'injection de combustible et, donc, des taux de combustible totaux, qui sont considérablement plus élevés que ceux de l'usine EcoTech.
- L'usine 3 a la possibilité d'augmenter de 50 p. 100 l'injection de combustible dans le haut fourneau. Cela équivaldrait au taux d'injection de l'usine EcoTech, qui s'accompagnerait d'une réduction de 15 p. 100 de la consommation de coke spécifique.

Les autres usines présentent certaines possibilités d'augmenter le recours aux injections et de réduire le taux de coke.

La technologie de la turbine de récupération du gaz de gueulard du haut fourneau n'a pas été mise en œuvre au Canada. La quantité d'énergie potentielle à récupérer à l'aide de cette technologie augmente en fonction de la pression du gaz de gueulard du haut fourneau. Les hauts fourneaux canadiens sont conçus pour fonctionner à une pression relativement basse du gaz de gueulard du haut fourneau. Donc, la possibilité de récupération d'énergie serait inférieure à celle de l'usine EcoTech, et la technologie pourrait ne pas être attrayante sur le plan économique. De plus, le prix de l'électricité en Ontario, la province où tous les hauts fourneaux canadiens sont exploités, a toujours été bas par rapport aux prix en cours dans d'autres pays. Toutefois, au fur et à mesure que les prix monteront, il pourrait être justifié de réexaminer la question.

Autres aspects

Le fait de tenir compte du taux d'injection de charbon de l'usine EcoTech pourrait ne pas être approprié dans le cas des hauts fourneaux canadiens. Le gaz naturel est très accessible et relativement bon marché en Ontario. D'après le rendement des hauts fourneaux 1 et 2, il semble qu'il s'agisse du produit injecté le plus efficace et le plus recommandé. Le charbon et le pétrole sont préférés dans d'autres territoires en raison du coût inférieur. Les combustibles qui contiennent du soufre (charbon, pétrole) peuvent servir dans les hauts fourneaux, car le soufre est extrait du laitier.

4.3.2.4 Préparation de l'injection de charbon pulvérisé – Aucune figure

Aspects

- L'indicateur d'intensité énergétique de l'usine EcoTech inclut l'énergie liée à la préparation de l'injection de charbon pulvérisé (ICP). Vu qu'une seule usine possède une installation de préparation de l'ICP, on ne peut présenter les données et aucune comparaison ne peut être effectuée quant aux opérations canadiennes.
- Le fait d'inclure la préparation de l'ICP pourrait être considéré comme injuste, car l'énergie de la préparation pour d'autres produits injectés (nettoyage et pressurisation du gaz naturel, raffinage du pétrole) est exclue. Toutefois, l'énergie de la préparation de l'ICP est un petit élément de toute l'énergie consacrée à l'élaboration du fer et n'est incluse que par souci d'uniformité avec l'usine de référence EcoTech.

4.3.2.5 Élaboration du fer – Figures 4-6 et 4-7

Indicateurs d'intensité énergétique

- L'ensemble de l'efficacité énergétique de l'élaboration du fer est dominé par le rendement du haut fourneau.
- L'effet cumulatif de la consommation d'énergie dans les secteurs du soufflage, des cowpers et de la préparation de l'ICP est manifeste, et les inefficacités dans ces secteurs contribuent aux écarts de rendement entre les usines 1 à 4, et celui de l'usine EcoTech.

Pénétration de la technologie

- La pénétration de la technologie est évaluée et abordée aux sections 4.3.2.1, 4.3.2.2 et 4.3.2.3.

4.3.3 Élaboration de l'acier par convertisseur à oxygène – Figures 4-8 et 4-9

Indicateurs d'intensité énergétique

- Le crédit énergétique des usines équipées de hottes de combustion partielle pour capter le gaz du convertisseur à oxygène comme combustible équivaut à plus de deux fois celui des usines dotées de hottes de combustion complète, qui brûlent le gaz au fur et à mesure qu'il arrive du récipient pour produire de la vapeur.

- Les usines consomment toutes deux fois plus d'électricité que l'usine EcoTech. Les intrants énergétiques de carbone et d'oxygène dans toutes les usines correspondent à ceux de l'usine EcoTech. Toutefois, le recours à d'autres intrants énergétiques (gaz naturel, vapeur, électricité) est supérieur à celui de l'usine EcoTech.

Pénétration de la technologie

- Deux usines sont équipées de systèmes de récupération du gaz du convertisseur à oxygène. Ces systèmes font appel à des épurateurs de gaz humide pour nettoyer et refroidir le gaz. L'usine EcoTech est munie d'un système d'épuration du gaz sec, et le gaz est refroidi à l'aide de générateurs de vapeur qui récupèrent la chaleur. La technologie de la récupération du gaz, qui emploie l'épuration du gaz sec et la récupération de la vapeur, est nécessaire pour atteindre l'efficacité énergétique de l'usine EcoTech.
- Toutes les usines gèrent efficacement les poches de coulée et utilisent des couvercles pour conserver la chaleur dans les poches. Les réchauffeurs de poche de coulée ne sont pas munis d'un système de récupération de la chaleur perdue (récupérateurs).

Indicateurs d'intensité des émissions de CO₂

- L'intensité des émissions de CO₂ des usines équipées de systèmes de récupération du gaz est faible, car le gaz est acheminé à d'autres secteurs d'élaboration, qui incluent des torchères.

Autres aspects

- La récupération énergétique est ce qui offre le plus de possibilités pour améliorer l'efficacité du convertisseur à oxygène. La technologie du captage du gaz est attrayante sur le plan économique quand il s'agit de construire de nouvelles installations, mais il est peu probable que ce soit économiquement réalisable d'abandonner les systèmes de récupération de la vapeur existants et de les remplacer par des systèmes de récupération du gaz.
- Les usines canadiennes qui récupèrent la chaleur perdue sous forme de vapeur sont équipées de la technologie de la chaudière demi-fixe, dans laquelle le gaz est partiellement refroidi dans une hotte de chaudière à rayonnement. La technologie de la récupération de la vapeur dans une chaudière intégrale comprend la hotte de chaudière à rayonnement attendant à un groupe de tubes de chaudière à convection¹³. La quantité d'énergie récupérée sous forme de vapeur par la technologie de la chaudière intégrale se rapproche de celle qui peut être récupérée par le système de captage du gaz. Il vaudrait mieux pour les usines équipées de systèmes de récupération de la vapeur d'envisager la mise à niveau de la technologie de la chaudière intégrale plutôt que d'opter pour un système de captage du gaz.
- L'avantage relatif des systèmes de récupération du gaz dépend de l'utilisation du gaz récupéré. Les deux usines qui récupèrent le gaz du convertisseur à oxygène n'ont pas investi dans le gazomètre et le réseau de distribution requis pour acheminer le gaz à des utilisateurs potentiels. D'où le torchage du gaz, lequel entraîne une perte de l'intensité énergétique comparativement aux usines dotées de systèmes de récupération de la vapeur.

¹³ Voir le chapitre 6, source de référence 3, page 119.

- L'utilisation excessive de l'électricité peut être liée à un recours élevé au procédé de métallurgie en poche (qui fait appel au four-poche) dans les usines. Le four-poche est un four électrique à arc qui ajuste la température et la composition chimique de l'acier avant la coulée. La quantité d'acier traité dans le four-poche dépend des nuances d'acier produites. Les usines qui produisent des aciers haut de gamme ont davantage recours au four-poche et consomment ainsi plus d'électricité.
- Le four-poche peut également être utilisé pour accroître la production d'acier. On ajoute davantage de ferraille au convertisseur à oxygène, ce qui fait chuter la température de l'acier liquide, mais la température est restaurée par l'intrant d'énergie électrique au four-poche. Cette pratique devrait être aussi concurrentielle et éconergétique que l'élaboration de l'acier par four électrique à arc.

4.3.4 Élaboration de l'acier par four électrique à arc (FEA) et coulée continue – Figures 4-10 et 4-11

Nota : Pour être conforme aux indicateurs d'intensité énergétique de l'usine EcoTech, l'élaboration de l'acier par FEA et la coulée continue figurent comme procédés distincts dans la figure 3-1. Toutefois, il a été impossible de les séparer aux fins de l'analyse comparative énergétique, car la plupart des aciéries électriques mesurent et comptabilisent les flux énergétiques de l'élaboration de l'acier par FEA et de la coulée continue comme s'il s'agissait d'un procédé unique. De plus, les quatre usines intégrées ont participé à l'étude, tandis que huit des neuf aciéries électriques y ont participé.

Indicateurs d'intensité énergétique

- Toutes les usines consomment de 35 à 700 p. 100 plus de gaz naturel que l'usine EcoTech.
- Toutes les usines consomment de 2 à 40 p. 100 plus d'électricité que l'usine EcoTech.

Pénétration de la technologie

- Les neuf usines ont adopté au moins cinq des huit technologies EcoTech. Cinq usines en comptent six; une usine en compte sept. Le taux moyen de pénétration des technologies EcoTech est de 76 p. 100 (six usines sur huit), ce qui indique qu'il reste peu de possibilités.

Indicateurs d'intensité des émissions de CO₂

- Les brûleurs oxy-gaz et le combustible d'appoint sont deux technologies EcoTech qui réduisent l'intensité énergétique du procédé du FEA. L'utilisation de combustible, bien sûr, augmente les émissions directes. Toutefois, la consommation d'électricité est réduite, et la réduction des émissions indirectes qui en découle peut se traduire par une réduction des émissions nettes si la production d'électricité à partir de combustibles fossiles est marginale. (Une installation de production d'électricité est considérée comme marginale si elle est démarrée/arrêtée pour répondre à des hausses et des baisses de la demande.)

Autres aspects

- Il n'existe aucune corrélation entre la pénétration de la technologie et le rendement de l'intensité énergétique des usines. L'utilisation de la technologie par les usines ne permet pas non plus d'expliquer l'écart d'efficacité entre usines. Il semble que d'autres pratiques d'exploitation et de gestion générale de l'énergie aient un effet sur l'efficacité énergétique de la filière four électrique à arc et coulée continue de l'acier.

4.3.5 Coulée continue – Figures 4-12 et 4-13

Nota : Les résultats figurant dans la présente section portent sur les usines intégrées où l'on mesure et comptabilise séparément les flux énergétiques de l'opération de coulée continue.

Indicateurs d'intensité énergétique

- Toutes les usines consomment de 80 à 450 p. 100 plus d'énergie que l'usine EcoTech.

Pénétration de la technologie

- Il n'existe aucune technologie d'économie d'énergie propre au procédé de la coulée continue.

Autres aspects

- Les pratiques et technologies générales d'économie d'énergie doivent être étudiées dans le but de rendre l'efficacité énergétique de la machine de coulée continue comparable aux valeurs de référence de l'usine EcoTech.

4.3.6 Laminoirs à bandes à chaud et à tôles fortes – Figures 4-14 et 4-15*Indicateurs d'intensité énergétique*

- Les laminoirs à bandes à chaud consomment de 20 à 270 p. 100 plus de combustible que l'usine EcoTech de même nature.
- Les laminoirs à tôles fortes consomment de 220 à 570 p. 100 plus d'énergie que l'usine EcoTech de même nature.
- Excepté pour l'usine 7, le classement de chaque usine en matière d'intensité énergétique est établi selon la consommation de combustible.

Pénétration de la technologie

- Quatre des six laminoirs à bandes à chaud sont équipés de la technologie du « coilbox »; un seul laminoir est équipé de la technologie du couvercle thermique. Ces deux technologies réduisent la perte de chaleur provenant de l'acier durant le laminage. En réduisant la perte de chaleur, le four de réchauffage doit fournir moins de chaleur à l'acier, ce qui réduit la consommation de combustible du four. De plus, l'acier demeure à une température plus élevée durant le laminage, ce qui réduit le courant nécessaire pour le transformer durant le laminage.

- Le laminage sans ordonnancement, le réchauffage des rives de barres de transfert et la capacité de laminage élevée des rives sont des technologies qui facilitent le chargement des brames à chaud¹⁴. Le faible taux de pénétration de la pratique de chargement des brames à chaud, illustré à la section 4.6.1, « Fours de réchauffage des brames », est attribuable à l'adoption peu répandue de ces technologies dans les laminoirs.
- Un des laminoirs est doté d'un moteur de cage dégrossisseuse à courant alternatif. Ces moteurs sont plus efficaces que les entraînements traditionnels à courant continu.
- Le classement des laminoirs en matière d'intensité énergétique correspond presque toujours au classement des fours de réchauffage des brames dont sont dotés ces laminoirs. La pénétration de la technologie du four à haut rendement énergétique en ce qui a trait aux fours exploités à ces laminoirs figure à la section 4.6, « Fours de réchauffage ».

Autres aspects

- Il existe beaucoup de possibilités d'augmenter l'efficacité énergétique des laminoirs à bandes à chaud et des laminoirs à tôles fortes au niveau du procédé du réchauffage des brames. Ce potentiel et la pénétration des technologies des fours à haut rendement énergétique sont décrits également à la section 4.6, « Fours de réchauffage ».

4.3.7 Laminoirs à profilés – Figures 4-16 et 4-17

Indicateurs d'intensité énergétique

- Les laminoirs à profilés se divisent en trois catégories basées surtout sur la dimension (aire de la coupe transversale ou poids par mètre) du produit. L'efficacité énergétique de l'usine EcoTech est différente pour chaque catégorie. Le laminoir à profilés moyens (barres) demande le moins d'énergie. Le laminoir à profilés légers (fil machine) exige plus d'énergie pour le laminage, car l'acier doit être converti en profilés plus petits. Les laminoirs à profilés lourds (blooms et acier de construction) demandent, quant à eux, plus d'énergie, car il est plus difficile de réchauffer les gros blooms qui alimentent ces laminoirs et de laminier des profilés de construction complexes.
- Les laminoirs à profilés consomment de 10 p. 100 de moins à 90 p. 100 de plus de combustible que les laminoirs de l'usine EcoTech.
- La consommation de combustible aux usines 1, 2, 4, 5, 6 et 7 est conforme à celle de l'usine EcoTech, ce qui indique une exploitation efficace des fours.
- La consommation d'électricité aux usines 4, 5, 7, 11, et 12 est inférieure à celle de l'usine EcoTech.

Pénétration de la technologie

- La pénétration des technologies des fours à haut rendement énergétique des laminoirs à profilés figure à la section 4.6.2, « Fours de réchauffage des billettes et des blooms ».
- Il n'existe aucune technologie EcoTech pour l'équipement de laminage des laminoirs à profilés.

¹⁴ Voir le chapitre 6, source de référence 1, section 3.6.4.6, page 104.

4.4 Usines

La présente section renferme des indicateurs d'intensité énergétique et d'intensité des émissions de CO₂ des usines.

La pénétration de la technologie et des pratiques a été évaluée au niveau des procédés et n'est donc pas reprise au niveau des usines.

Les résultats de chaque usine, en plus de refléter l'intensité énergétique et l'intensité des émissions de CO₂ des procédés qui les caractérisent, indiquent l'effet des facteurs d'intrant des produits. L'énergie utilisée pour fabriquer un produit intermédiaire – qui sera écarté à cause de l'oxydation ou mis au rebut ou recyclé s'il est impropre à un traitement ultérieur ou à la vente – sera répartie sur le produit fini.

L'interprétation et les observations sur les résultats des usines se limitent à une nouvelle analyse qui ne transparaissait pas dans les résultats des procédés.

4.4.1 Aciéries électriques

Les résultats des usines donnent l'indicateur d'intensité énergétique et l'indicateur d'intensité des émissions de CO₂ pour chaque produit laminé à chaud fabriqué par les aciéries électriques. Les aciéries électriques ont été configurées en jumelant la filière four électrique à arc et coulée continue de chaque aciérie électrique au procédé de laminage à chaud en place à l'usine désignée.

4.4.1.1 Aciérie électrique à fil machine – FEA, coulée continue et laminoir à fil machine – Figures 4-18 et 4-19

Cette usine produit du fil machine à partir de l'acier élaboré par le procédé du FEA. Elle est configurée en jumelant la filière four électrique à arc et coulée continue (figure 4-10) aux laminoirs à fil machine (figure 4-16). Les fours de réchauffage des billettes et des blooms (figure 4-50) donnent également une idée du rendement relatif des aciéries électriques à fil machine.

L'intensité énergétique des aciéries électriques à fil machine est de 12 à 21 p. 100 supérieure à celle de l'usine EcoTech. L'usine 2 consomme 33 p. 100 plus d'énergie électrique que l'usine EcoTech.

4.4.1.2 Aciérie électrique à barres – FEA, coulée continue et laminoir à barres – Figures 4-20 et 4-21

Cette usine produit des barres à partir de l'acier élaboré par le procédé du FEA. Elle est configurée en jumelant la filière four électrique à arc et coulée continue (figure 4-10) aux laminoirs à barres (figure 4-16). Les fours de réchauffage des billettes et des blooms (figure 4-50) donnent également une idée du rendement relatif des aciéries électriques à barres.

L'intensité énergétique des aciéries électriques à barres est de 14 à 60 p. 100 plus élevée que celle de l'usine EcoTech.

4.4.1.3 Aciérie électrique à bandes à chaud – FEA, coulée continue et laminoir à bandes à chaud – Figures 4-22 et 4-23

Cette usine produit des bandes à chaud en bobines à partir de l'acier élaboré par le procédé du FEA. Elle est configurée en jumelant la filière four électrique à arc et coulée continue (figure 4-10) aux laminoirs à bandes à chaud (figure 4-14). Les fours de réchauffage des brames (figure 4-49) donnent également une idée du rendement relatif des aciéries électriques à bandes à chaud.

L'intensité énergétique des aciéries électriques à bandes à chaud est de 14 à 40 p. 100 plus élevée que celle de l'usine EcoTech.

4.4.2 Usines intégrées

Les résultats des usines donnent des indicateurs d'intensité énergétique et d'intensité des émissions de CO₂ pour chaque produit intermédiaire (fonte liquide, acier liquide et acier coulé) de même que pour les produits finis sous forme de bandes à chaud et de tôles fortes. D'autres usines sont considérées pour la fabrication des produits finis sous forme de bandes à chaud et de tôles fortes par l'ajout de torchères et d'installations de production d'utilités d'usine (torchères, alimentation et traitement de l'eau, et centrale électrique).

4.4.2.1 Usine intégrée d'élaboration du fer – Fabrication du coke et élaboration du fer – Figures 4-24 et 4-25

Le premier produit intermédiaire de l'usine intégrée est la fonte liquide (également appelée métal fondu). L'usine intégrée d'élaboration du fer est configurée en jumelant le procédé de fabrication du coke (figure 4-1) au procédé d'élaboration du fer (figures 4-3 à 4-6).

4.4.2.2 Aciérie intégrée – Fours à coke, haut fourneau et convertisseur à oxygène – Figures 4-26 et 4-27

Le deuxième produit intermédiaire de l'usine intégrée est l'acier liquide. L'aciérie intégrée est configurée en jumelant la filière convertisseur à oxygène (figure 4-8) et torchères de convertisseur à oxygène à l'usine intégrée d'élaboration du fer.

4.4.2.3 Aciérie intégrée à demi-produits – Fours à coke, haut fourneau, convertisseur à oxygène et coulée continue – Figures 4-28 et 4-29

Le dernier produit intermédiaire de l'usine intégrée est le demi-produit (coulé). L'aciérie intégrée à demi-produits est configurée en jumelant le procédé de la coulée continue (figure 4-12) à l'aciérie intégrée.

4.4.2.4 Usine intégrée à bandes à chaud – Aciérie intégrée à demi-produits et laminoir à bandes à chaud – Figures 4-30 et 4-31

L'usine intégrée à bandes à chaud est configurée en jumelant le procédé du laminoir à bandes à chaud (figure 4-14) à l'aciérie intégrée à demi-produits.

Pour dresser un portrait complet de la présente analyse de la production de bandes à chaud, il y a lieu de mentionner, à ce stade-ci, le procédé de coulée et de laminage en continu des bandes à chaud. Une des usines intégrées au Canada utilise ce procédé ainsi que le procédé classique du laminoir à bandes à chaud. Aux fins de l'analyse, le nombre d'usines à l'étude passe donc de quatre à cinq. Dans ce contexte, le procédé de coulée et de laminage en continu est jumelé à l'aciérie intégrée.

4.4.2.5 Usine intégrée à bandes à chaud et torchères – Aciérie intégrée à demi-produits, laminoir à bandes à chaud et torchères – Figures 4-32 et 4-33

L'usine intégrée à bandes à chaud et torchères est configurée en jumelant le procédé du laminoir à bandes à chaud (figure 4-14) et les torchères (figure 4-46) à l'aciérie intégrée à demi-produits.

4.4.2.6 Usine intégrée à bandes à chaud et utilités – Aciérie intégrée à demi-produits et laminoir à bandes à chaud et utilités – Figures 4-34 et 4-35

L'usine intégrée à bandes à chaud et utilités est configurée en jumelant le procédé du laminoir à bandes à chaud (figure 4-14) et les utilités à l'aciérie intégrée à demi-produits.

4.4.2.7 Usine intégrée à tôles fortes – Aciérie intégrée à demi-produits et laminoir à tôles fortes – Figures 4-36 et 4-37

L'usine intégrée à tôles fortes est configurée en jumelant le procédé du laminoir à tôles fortes (figure 4-14) à l'aciérie intégrée à demi-produits.

4.4.2.8 Usine intégrée à tôles fortes et torchères – Aciérie intégrée à demi-produits, laminoir à tôles fortes et torchères – Figures 4-38 et 4-39

L'usine intégrée à tôles fortes et torchères est configurée en jumelant le procédé du laminoir à tôles fortes (figure 4-14) et les torchères (figure 4-46) à l'aciérie intégrée à demi-produits.

4.4.2.9 Usine intégrée à tôles fortes et utilités – Aciérie intégrée à demi-produits, laminoir à tôles fortes et utilités – Figures 4-40 et 4-41

L'usine intégrée à tôles fortes et utilités est configurée en jumelant le procédé du laminoir à tôles fortes (figure 4-14) et les utilités à l'aciérie intégrée à demi-produits.

4.4.3 Aciérie électrique et usine de réduction directe

4.4.3.1 Usine de réduction directe et usine intégrée à bandes à chaud – Usine de réduction directe, four électrique à arc, coulée continue, laminoir à bandes à chaud et usine intégrée à bandes à chaud et utilités – Figures 4-42 et 4-43

Le procédé MIDREX, qui produit du préréduit (DRI), n'est employé que dans une seule usine canadienne. Il ne figure donc pas dans la section intitulée « Secteurs d'élaboration ». Le fer élaboré dans le four à cuve MIDREX® est habituellement fondu et transformé en acier à l'aide du procédé du FEA. Il est donc considéré comme un substitut à la ferraille. La filière réduction directe, four électrique à arc et laminoir à bandes à chaud est considérée comme une variante de l'aciérie électrique à bandes à chaud, qui a déjà été définie à la section 4.4.1.3. La seule différence réside dans la matière utilisée pour l'alimentation des fours : une partie de la ferraille est remplacée par du préréduit.

La filière réduction directe, four électrique à arc et laminoir à bandes à chaud est incluse dans la présente étude pour permettre d'évaluer comment une usine employant une autre technologie d'élaboration du fer peut se comparer à une usine intégrée. Toutefois, l'équipement de production ainsi que les intrants et extrants de matières du procédé de réduction directe diffèrent sensiblement de ceux du procédé du haut fourneau. Donc, toute comparaison entre les deux n'est pas conforme à la méthode de l'analyse comparative énergétique, et ne saurait décrire des façons de réduire l'intensité énergétique et l'intensité des émissions de CO₂ de l'un ou l'autre type d'usine.

La filière réduction directe, four électrique à arc et laminoir à bandes à chaud d'EcoTech inclut les données d'intensité énergétique d'EcoTech relatives au procédé MIDREX¹⁵.

L'intensité énergétique du procédé du FEA s'accroît quelque peu si on augmente les quantités de DRI en remplacement de la ferraille. L'indicateur d'intensité énergétique du FEA de l'usine EcoTech, pour une charge composée à 100 p. 100 de ferraille, est de 5 079 MJ par tonne d'acier liquide. L'indicateur d'intensité énergétique du FEA de l'usine EcoTech, pour une charge composée à 60 p. 100 de préréduit et 40 p. 100 de ferraille – qui est la pratique courante –, est de 5 805 MJ par tonne d'acier liquide¹⁶. (La filière réduction directe, four électrique à arc et laminoir à bandes à chaud d'EcoTech, inclut, en fait, l'indicateur d'intensité énergétique pour la charge typique, composée à 60 p. 100 de préréduit et 40 p. 100 de ferraille.) En conséquence, le procédé du FEA jumelé à l'usine de réduction directe 1 illustrée aux figures 4-42 et 4-43, qui fonctionne à peu près à ce ratio de préréduit et de ferraille, peut très bien se comparer à celui de l'usine de réduction directe d'EcoTech.

Indicateurs d'intensité énergétique

- L'intensité énergétique de la filière réduction directe, four électrique à arc et laminoir à bandes à chaud d'EcoTech équivaut presque à celle de l'usine intégrée à bandes à chaud en bobines d'EcoTech.
- L'intensité énergétique de la filière réduction directe, four électrique à arc et laminoir à bandes à chaud de l'usine 1 se situe au bas de l'échelle des valeurs d'intensité énergétique relatives aux usines intégrées.

¹⁵ Voir le chapitre 6, source de référence 1, page 179.

¹⁶ Voir le chapitre 6, source de référence 1, page 91.

- La filière réduction directe, four électrique à arc et laminoir à bandes à chaud consomme beaucoup moins de combustible et plus d'électricité que les usines intégrées.
- La plus grande partie de l'électricité consommée par cette filière se situe au niveau du procédé du FEA. (Normalement, la fusion et l'affinage dans un four à arc comptent pour près de 90 p. 100 de toute l'électricité consommée dans une aciérie électrique.)

Indicateurs d'intensité des émissions de CO₂

- L'intensité des émissions directes de CO₂ de l'usine de réduction directe est de beaucoup inférieure à celle des usines intégrées. Cette différence est attribuable au fait que l'usine de réduction consomme moins de combustible. En effet, le gaz naturel constitue le principal intrant de combustible de l'usine de réduction directe, alors que le charbon (coke et gaz de cokerie) est le principal intrant de combustible des usines intégrées.
- L'intensité des émissions indirectes de CO₂ de l'usine de réduction directe est de beaucoup supérieure à celle des usines intégrées. Cette différence est attribuable à la consommation d'électricité plus élevée du procédé du FEA et à l'hypothèse, émise dans la présente étude, que toute l'électricité est produite par les centrales thermiques au charbon.
- L'intensité totale des émissions de CO₂ de l'usine de réduction directe est inférieure à celle des usines intégrées. Cette différence est attribuable à la consommation de gaz naturel, qui est inférieure en intensité de carbone par rapport au charbon utilisé dans les usines intégrées, et au niveau plus élevé de l'intrant de ferraille lié au procédé de réduction directe.

Autres aspects

- La quantité de l'intrant de ferraille de la filière réduction directe et four électrique à arc est nettement différente de celle utilisée dans l'usine intégrée. La matière première chargée dans les fours électriques est normalement composée de 60 p. 100 de préréduit et de 40 p. 100 de ferraille, mais ces proportions peuvent être tout autres. Dans le cas des usines intégrées, la ferraille chargée dans les convertisseurs à oxygène doit être fondue par l'énergie présente dans la fonte liquide, laquelle découle du procédé du haut fourneau. Cela limite la quantité de ferraille que l'on peut charger dans les usines intégrées, de sorte que la pratique habituelle est une charge composée de 10 à 20 p. 100 de ferraille. L'intensité énergétique liée à l'élaboration de l'acier comportant la fonte de la ferraille dans un four électrique à arc est de moins de 50 p. 100 de celle requise pour élaborer de l'acier à partir du minerai de fer (voir la section 2.2, « Consommation de l'énergie », pour le détail), car aucune énergie n'est requise pour transformer l'oxyde de fer (minerai) en fer. Donc, si l'on compare l'intensité énergétique des filières réduction directe et four électrique à arc à celle des usines intégrées, l'efficacité relative du procédé de réduction directe du minerai de fer est amplifiée par l'effet favorable de la plus grande proportion de ferraille utilisée dans la filière réduction directe et four électrique à arc.
- Le procédé de réduction directe MIDREX, basé sur l'utilisation du gaz naturel, offre la possibilité de produire du fer et de l'acier de qualité à partir de sources d'énergie autres que le charbon et, par conséquent, de réduire de beaucoup l'intensité des émissions de CO₂ produites par l'élaboration de l'acier. Le procédé de réduction directe est suivi du

procédé du FEA, à forte intensité d'électricité. Toutefois, si une aciérie électrique est située dans un territoire où l'électricité est produite par des centrales hydrauliques ou nucléaires, et non par des centrales électriques alimentées aux combustibles fossiles, il ne se produit, en fait, aucune émission indirecte de CO₂¹⁷.

- La filière réduction directe, four électrique à arc et laminoir à bandes à chaud citée dans la présente étude est située au Québec, où presque toute l'électricité est produite par des centrales hydrauliques. Quant aux usines intégrées, elles sont toutes situées en Ontario, où une bonne partie de l'électricité est produite par des centrales hydrauliques ou nucléaires. Dans le cas des centrales hydrauliques ou nucléaires, le facteur d'intensité énergétique pour produire de l'électricité est de 3 600 MJ/MWh, et le coefficient d'intensité des émissions de CO₂ est de zéro. Donc, en réalité, l'intensité des émissions *indirectes* de CO₂ des usines est de beaucoup inférieure à ce qui est illustré à la figure 4-43. Le vrai problème, c'est l'intensité des émissions *directes* de CO₂.
- L'intensité des émissions directes de CO₂ dans le cas de la filière réduction directe, four électrique à arc et laminoir à bandes à chaud d'EcoTech n'est que de 479 kg CO₂/t, ce qui est beaucoup moins que les 1 547 kg CO₂/t d'intensité des émissions directes de CO₂ de l'usine intégrée à bandes à chaud d'EcoTech.
- Il en va de même pour l'intensité des émissions de CO₂ relatives à l'acier élaboré exclusivement à partir de la ferraille par le procédé du FEA. L'intensité des émissions directes de CO₂ dans le cas de l'aciérie électrique à bandes à chaud d'EcoTech (section 4.4.1.3, « Aciérie électrique à bandes à chaud », et figure 4-23) est de seulement 130 kg CO₂/t. Toutefois, la qualité de l'acier produit à partir de la ferraille récupérée est généralement inadéquate pour certaines applications, à cause des impuretés contenues dans la ferraille d'acier. Donc, l'acier produit à partir de la ferraille ne peut pas remplacer complètement l'acier élaboré à partir de fer « vierge » dans les usines intégrées. La substitution du pré-réduit par de la ferraille dans une aciérie électrique peut donner de l'acier de qualité suffisante pour concurrencer les usines intégrées dans la production de la plupart des nuances d'acier.
- En conclusion, la filière réduction directe Midrex, four électrique à arc et laminoir à bandes à chaud, alimentée par de l'électricité générée dans des centrales hydrauliques ou nucléaires, peut produire un acier de qualité à une intensité d'émission de CO₂ beaucoup moins importante que celle des usines intégrées.
- L'avenir des usines de réduction directe dépend de la disponibilité et du prix de la ferraille d'acier, du gaz naturel et de l'électricité. Les procédés de réduction directe sont sur le marché depuis les années 1950 et, lorsqu'ils ont été implantés, ils étaient considérés comme une véritable solution de rechange au haut fourneau. Toutefois, la forte croissance

¹⁷ Comme il a été expliqué à la section 3, tout au cours de la présente étude, l'ensemble des valeurs d'intensité de l'énergie électrique ont été converties en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile. Pour être uniforme, le coefficient d'émission de CO₂ utilisé pour calculer les indicateurs d'intensité des émissions externes de CO₂ doit être de 856 kg/MWh. Ces facteurs sont réputés être représentatifs de la production d'électricité à partir de combustibles fossiles en Europe, par l'International Iron and Steel Institute et par le Comité européen de l'énergie des aciéries (voir le chapitre 6, sources de référence 1 et 2). En utilisant ces facteurs, les résultats de la présente étude sont comparables à la pratique d'analyse comparative de l'IISI et du CEEA.

prévue pour ce type d'installation ne s'est jamais matérialisée en raison des contraintes économiques liées au procédé. Les usines de réduction directe ont été construites uniquement à des endroits favorisés par le faible coût du gaz naturel et la disponibilité du minerai de fer, ou encore dans des lieux où l'approvisionnement en ferraille dans le procédé du FEA s'avérait difficile (pour des raisons de disponibilité, de coûts ou d'exigences de qualité des produits)¹⁸. La décision d'opter pour la technologie de réduction directe Midrex au Canada a été surtout fondée sur l'accessibilité du minerai de fer et le désir de fabriquer un produit de qualité supérieure.

4.5 Gestion de l'énergie des usines

La présente section évalue les pratiques de gestion de l'énergie des usines participantes.

4.5.1 Surveillance et production de rapports en matière d'énergie – Figures 4-44 et 4-45

Pour évaluer dans quelle mesure la consommation d'énergie a été suivie, on a demandé aux usines d'estimer le pourcentage des données énergétiques surveillées dans le cadre du présent rapport d'analyse comparative de l'énergie. Les intrants énergétiques qui sont continuellement mesurés, et calculés, enregistrés ou intégrés, sont considérés comme ayant fait l'objet d'une surveillance.

Le degré de surveillance des données énergétiques figure sur l'histogramme « Surveillance de l'énergie » (figure 4-44). Les barres de l'histogramme, qui sont présentées par tranches de 10 p. 100 sur l'axe des abscisses, indiquent le pourcentage maximal pour le groupe; ainsi, la barre au-dessus de 70 démontre que quatre usines ont déclaré que leur niveau de données énergétiques surveillées se situait entre 60 et 70 p. 100.

Quatre usines ont déclaré qu'elles consignaient 100 p. 100 des données énergétiques, six usines ont signalé qu'elles les enregistreraient dans une proportion de 60 à 80 p. 100, et les autres ont mentionné avoir effectué un certain suivi. En moyenne, 72 p. 100 des données énergétiques des usines font l'objet d'un suivi.

La surveillance énergétique n'est pas considérée comme une technologie EcoTech car, sous une forme ou une autre, elle est en place dans les aciéries depuis de nombreuses années. La surveillance énergétique permet d'améliorer l'efficacité énergétique en sensibilisant davantage les gens à la consommation et aux coûts de l'énergie, et en déterminant et quantifiant les possibilités d'économie d'énergie. Dans bien des cas, elle se traduit par des économies immédiates en prônant l'économie d'énergie et en décelant les cas de surfacturation.

¹⁸ Voir le chapitre 6, source de référence 1, page 170.

Les entreprises ne sauraient tirer pleinement avantage des technologies EcoTech si elles n'effectuaient pas un suivi complet du volet énergétique de leurs installations.

La production de rapports en matière d'énergie peut être un indice de la priorité et de l'importance qu'accorde une entreprise à l'efficacité énergétique. Afin de mesurer l'étendue de la production de rapports, on a demandé aux usines à quelle fréquence les données énergétiques étaient soumises à leur gestionnaire.

L'évaluation de la production de rapports en matière d'énergie est indiquée dans l'histogramme « Production de rapports en matière d'énergie » (figure 4-45). Chaque barre de l'histogramme indique la fréquence de production de rapports en matière d'énergie. Toutes les usines sauf une signalent leur consommation d'énergie une fois par mois ou plus fréquemment. Le rapport mensuel soumis au gestionnaire de l'usine est vraisemblablement opportun en raison des problèmes quotidiens qui sont réglés à un échelon inférieur. Le rapport mensuel permet au gestionnaire de l'usine d'être informé des problèmes importants, de les résoudre et d'exploiter les possibilités d'améliorer l'efficacité.

4.5.2 Gestion de l'énergie dans les aciéries intégrées

Dans les aciéries intégrées, une grande partie de la gestion de l'énergie est axée sur les utilités de l'usine, qui figurent dans des cases bleues à la figure 2-4. L'utilisation efficace de ces utilités réduit la nécessité d'acheter de l'énergie à l'externe, habituellement du gaz naturel et de l'électricité, en maximisant la consommation des gaz combustibles de l'aciérie (gaz de cokerie, gaz de haut fourneau et gaz de convertisseur à oxygène) et la chaleur (vapeur et eau chaude) provenant des procédés d'élaboration. Voici la stratégie EcoTech d'utilisation des utilités de l'usine pour optimiser l'efficacité :

- Équiper les fours de réchauffage, les fours à coke et les cowpers de haut fourneau de sorte qu'ils puissent brûler les gaz combustibles de l'aciérie, afin de minimiser l'achat d'autres combustibles.
- Brûler le reste des gaz combustibles de l'aciérie au moyen d'une centrale de cogénération afin de produire de l'électricité et de la vapeur destinées à la consommation interne et à la vente.
- Optimiser l'énergie disponible pour la production d'électricité en mettant en œuvre des pratiques et des technologies d'économie d'énergie dans toute l'aciérie.

L'usine EcoTech démontre qu'il est essentiel pour une usine intégrée d'être dotée d'une centrale de cogénération adéquate et efficace, étant donné les contraintes pratiques et thermodynamiques qui limitent les possibilités d'exploiter pleinement les combustibles achetés grâce à des améliorations en matière d'énergie. Un grand nombre de technologies et de pratiques disponibles pour améliorer l'efficacité énergétique incluent l'exploitation des sources énergétiques à faible teneur (chaleur à basse température) qui ne convient pas aux procédés d'élaboration de l'acier à haute température. Ces sources énergétiques à faible teneur doivent être converties en électricité pour atteindre le niveau recherché d'efficacité énergétique et de rendement économique.

4.5.2.1 Torchères – Figures 4-46 et 4-47

- Les usines intégrées brûlent à la torche beaucoup plus de gaz combustible d'aciérie (de 4 à 40 fois plus) que l'usine EcoTech.
- Le torchage des gaz du haut fourneau et du convertisseur à oxygène compte pour 85 p. 100 du gaz brûlé. À l'usine EcoTech, les gaz du haut fourneau et du convertisseur à oxygène excédentaires sont utilisés pour produire de l'électricité à la centrale électrique. Donc, le torchage de ces gaz dans les usines intégrées indique que les centrales électriques ne sont pas en mesure de convertir les gaz de l'usine en électricité.

4.5.2.2 Centrale électrique – Figure 4-48

La centrale EcoTech est définie comme une centrale de cogénération à vapeur dotée de l'équipement et des caractéristiques de fonctionnement suivants :

- Des chaudières à vapeur produisant de la vapeur surchauffée à une pression de 180 bars et à une température de 530 °C, et munies d'un réchauffeur de vapeur.
- Une turbogénératrice à vapeur équipée pour fonctionner comme suit : un stade de réchauffage de la vapeur et six stades d'extraction de la vapeur. Ce processus permet de régénérer ou d'alimenter de la vapeur générée par le procédé.
- Une capacité globale de production d'électricité de 32 p. 100 lorsque la centrale fonctionne comme centrale électrique (aucune vapeur extraite pour la production de chaleur industrielle). La consommation spécifique de chaleur correspondante est de 11,25 MJ/kWh.
- La chaudière et la turbogénératrice ont la capacité suffisante pour consommer tous les gaz combustibles et la chaleur récupérée de l'aciérie.

La figure 4-48 compare la technologie de la centrale électrique des usines intégrées participantes avec celle de l'usine EcoTech :

- Les chaudières des usines produisent de la vapeur à des pressions et à des températures de beaucoup inférieures à celles de l'usine EcoTech.
- Les turbines à vapeur des usines ne sont pas équipées pour le réchauffage de la vapeur et ne comportent qu'un seul stade de régénération.
- La technologie des centrales électriques affiche un rendement global de production d'électricité de l'ordre de 22 à 24 p. 100 lorsqu'elle fonctionne en tant que centrale électrique (aucune vapeur extraite pour la production de chaleur industrielle). Les consommations spécifiques de chaleur correspondantes s'échelonnent de 15 à 16 MJ/kWh. Une comparaison de cette fourchette de valeurs avec la consommation spécifique de chaleur de l'usine EcoTech indique que, pour un intrant énergétique donné, la centrale électrique d'EcoTech est en mesure de produire 38 p. 100 plus d'énergie électrique.
- Les usines 1 et 2 affichent une certaine capacité de production d'électricité, mais il s'agit d'un faible pourcentage (3 et 18 p. 100, respectivement) par rapport à la capacité de l'usine EcoTech. Les deux autres usines ne démontrent aucune capacité de production d'électricité.

Il semble que les centrales électriques des quatre usines intégrées sont inadéquates en ce qui a trait aux exigences actuelles de la gestion de l'énergie, et qu'elles le deviendront

davantage au fur et à mesure que les technologies EcoTech seront mises en œuvre dans les usines. Parmi les principales lacunes, citons le manque de capacité de production d'électricité et l'incapacité de convertir efficacement l'énergie excédentaire en énergie électrique.

4.5.2.3 Conservation de la vapeur et des gaz combustibles des usines

En se reportant aux figures des usines intégrées (figures 4-24 à 4-41), on peut constater que la consommation d'utilités dans toutes ces usines est très élevée comparativement à celle de l'usine EcoTech. Ainsi, la consommation moyenne d'utilités par tonne de bandes à chaud en bobines dans les usines intégrées est de six fois plus élevée que celle de l'usine EcoTech. La consommation de vapeur représente la majeure partie des utilités consommées aux usines intégrées. La consommation excessive de vapeur aux usines intégrées est un autre indice qui démontre que les centrales électriques sont inadéquates. Comme ces centrales n'ont pas l'équipement nécessaire pour produire de l'électricité, il y a peu d'incitatif à conserver la vapeur. Une réduction de la demande de vapeur limiterait la demande de combustible dans les chaudières à vapeur de la centrale électrique et se traduirait alors par une hausse proportionnelle du torchage des gaz combustibles des aciéries. On ne réaliserait ainsi aucune économie sur les plans de l'énergie, des émissions ou du coût.

Des centrales de cogénération de taille adéquate et ayant la capacité de convertir de manière efficace la vapeur et les gaz combustibles en énergie électrique sont nécessaires afin d'inciter les usines à investir dans les mises à niveau et technologies suivantes :

1. Entretenir et améliorer l'isolation des conduites et des purgeurs de vapeur.
2. Produire de la vapeur à partir de la chaleur récupérée des flux de gaz de combustion.
3. Récupérer le gaz du convertisseur à oxygène et l'acheminer vers les chaudières de la centrale électrique.
4. Améliorer le rendement des chaudières.
5. Améliorer le rendement des cowpers de haut fourneau.
6. Améliorer le rendement des fours à coke et des fours de réchauffage qui brûlent du gaz de cokerie.

4.6 Fours de réchauffage

4.6.1 Fours de réchauffage des brames – Figure 4-49

Nota : Les fours de réchauffage des brames sont isolés du laminoir à bandes à chaud et du laminoir à tôles fortes pour permettre de mieux montrer le taux de pénétration des technologies de fours à haut rendement énergétique, de même que le rôle que peuvent jouer ces fours en vue de réduire la consommation globale d'énergie des laminoirs.

Indicateurs d'intensité énergétique

- Les fours consomment de 15 à 250 p. 100 plus de combustible que le four de l'usine EcoTech.

- La valeur de référence d'EcoTech indiquée (1 232 MJ/tonne) concerne les fours de réchauffage des brames aux laminoirs à bandes à chaud. La valeur de référence d'EcoTech relative aux fours de réchauffage des brames des laminoirs à tôles fortes est inférieure (1 010 MJ/tonne), car elle suppose une plus grande pénétration de la technologie du chargement des brames à chaud.

Pénétration de la technologie

- La pratique du chargement des brames à chaud est employée par les fours 3, 4, 5 et 6. Toutefois, les températures moyennes de chargement des fours 3, 4 et 5 sont inférieures aux critères de chargement à chaud de l'usine EcoTech. La pénétration limitée de cette technologie est un des facteurs qui expliquent le degré élevé de consommation de combustible signalé.
- Les fours 1, 2, 3 et 6 sont dotés de récupérateurs pour produire une température de préchauffage de l'air de combustion qui respecte le critère de l'usine EcoTech, alors que la récupération aux fours 4 et 5 permet d'obtenir des températures qui se rapprochent de ce niveau. La récupération est une technologie très efficace de réduction de la consommation d'énergie et, comme prévu, les fours qui permettent une récupération raisonnable constituent, sans exception, les moteurs de l'efficacité énergétique. La pénétration limitée de cette technologie au niveau des autres fours explique entre autres facteurs leur consommation élevée de combustible.
- La plupart des fours (15 sur 17) comportent une zone de préchauffage de chargement non soumise à la flamme. Seuls deux fours possèdent une zone plus longue que celle de l'usine EcoTech, qui mesure 10,0 mètres. La longueur moyenne de cette zone pour tous les fours est de 7,5 mètres, ce qui dénote une pénétration notable de cette technologie. Toutefois, elle semble avoir beaucoup moins d'effet sur la consommation d'énergie que la récupération.
- Quatre fours sont munis de systèmes de refroidissement des patins par évaporation. Le refroidissement des patins par évaporation utilise la chaleur perdue au profit du système de refroidissement des patins pour produire de la vapeur, laquelle constitue alors un crédit d'extrait énergétique. Les fours dotés de cette technologie figurent parmi les cinq fours les plus éconergétiques.
- Un des fours est muni d'une double isolation des patins (fibre de céramique et béton réfractaire). La technologie de la double isolation réduit de beaucoup la perte de chaleur dans le système de refroidissement des patins du four. Le four doté de cette technologie figure parmi les cinq fours les plus éconergétiques.
- Douze fours sont munis de systèmes de contrôle de niveau II, et neuf d'entre eux sont également dotés d'un système de contrôle de niveau III. Le premier système suit chaque pièce d'acier à mesure qu'elle se déplace dans le four, calcule la quantité de chaleur et la durée nécessaire pour amener chaque pièce à la température de laminage, et règle la température du four et le taux d'allumage pour atteindre l'état thermique voulu avec la consommation de combustible la plus faible possible. Le contrôle de niveau III relie le système de contrôle de niveau II à l'ordinateur d'ordonnancement du laminoir, permettant ainsi aux commandes du four de s'ajuster à l'avance aux modifications opérationnelles

comme les changements de taille et de nuance de l'acier à chauffer, et les interruptions de production pour réinitialiser le laminoir en fonction des changements de produit. Les systèmes de contrôle de niveau II et de niveau III des fours permettent d'exploiter au maximum les possibilités d'efficacité énergétique des fours. Toutefois, il est clair que les mesures de contrôle ne sauraient à elles seules compenser l'absence de caractéristiques éconergétiques ou la conception et l'entretien inadéquats des fours.

- Deux fours sont munis de chaudières à vapeur utilisant la chaleur récupérée. On pourrait s'attendre à un crédit pour la vapeur produite plutôt qu'à la grande consommation de vapeur observée pour ces fours.
- Six fours à brames sont dotés de la plupart des technologies EcoTech et leur efficacité se rapproche de celle d'EcoTech. Les 11 fours qui restent s'ils sont munis des technologies EcoTech, ils ne le sont que partiellement et, par conséquent, sont très inefficaces.

Autres aspects

- Le four de l'usine EcoTech fonctionne à 30 p. 100 de l'acier chargé à 600 °C, ce qui réduit la consommation de combustible de 260 MJ/tonne. Cette donnée démontre que le chargement à chaud est nécessaire pour atteindre l'efficacité indiquée du four. Le four 1, doté des autres technologies du four EcoTech, a un rendement presque équivalent à celui du four de l'usine EcoTech.
- Le four de l'usine EcoTech est équipé de récupérateurs qui préchauffent l'air de combustion à 450 °C, ce qui augmente la température de la flamme, facteur principal de la formation de l'oxyde d'azote (NO_x). Comme le NO_x est un polluant, il existe des limites réglementaires concernant ce produit dans les territoires où les pluies acides et le smog sévissent. Les émissions de NO_x peuvent être maintenues en deçà des limites de contrôle de la pollution atmosphérique grâce à la technologie des brûleurs, car l'air de combustion peut être préchauffé jusqu'à environ 400 °C. Au-delà de cette température, la formation de NO_x augmente rapidement, et il pourrait être nécessaire de se procurer un dispositif de réduction au point de rejet. Par conséquent, la faisabilité des changements à apporter à la technique de récupération et l'investissement accru à ce chapitre pour élever la température de l'air de combustion au-dessus de 400 °C pourraient exiger des compromis entre l'efficacité énergétique, les émissions de NO_x et le coût. Si la récupération se limite à 400 °C à cause des limites de contrôle de la pollution atmosphérique par le NO_x et des considérations économiques, d'autres formes de récupération de la chaleur perdue sont possibles et consistent à utiliser la grande quantité de chaleur qui subsiste dans les gaz de combustion. Les chaudières de récupération de la vapeur peuvent être envisagées, mais il faut absolument avoir besoin de la vapeur pour justifier l'emploi des chaudières – cette décision relève de la gestion de l'énergie des usines (voir la section 4.5, « Gestion de l'énergie des usines »).
- La longueur de la zone de préchauffage de chargement non soumise à la flamme d'un four est difficile à modifier une fois le four installé. Il faut procéder au déplacement du système d'alimentation à l'entrée du four, ce qui pourrait être impossible à réaliser à cause de l'aménagement du laminoir et ne serait certainement pas justifiable sur le plan économique au regard des économies de coûts énergétiques.

- La technologie du refroidissement des patins par évaporation est une solution qui peut être envisagée lorsqu'il s'agit de récupérer la chaleur perdue au niveau des patins du four. Elle permet également d'éliminer l'énergie consommée par le pompage de l'eau et les ventilateurs des tours de refroidissement dans les systèmes classiques de refroidissement des patins à l'eau. Toutefois, cette technologie ne saurait remplacer une bonne isolation des patins. La production de vapeur à l'aide du procédé de refroidissement des patins par évaporation est beaucoup moins efficace que la production de vapeur à l'aide de chaudières. Les indicateurs d'intensité énergétique montrent que les fours 3 et 5 produisent beaucoup trop de vapeur et, par conséquent, ne sont pas aussi efficaces que les fours 1 et 2.
- Les patins de four à double isolation sont efficaces pour réduire la perte de chaleur dans le système de refroidissement des patins. Dans les usines qui ne disposent pas d'un système à vapeur, cette technologie serait préférable au refroidissement des patins par évaporation. Toutefois, l'isolation des patins perd de son efficacité avec le temps et nécessite des réparations ou un remplacement à intervalles réguliers pour demeurer efficace.
- Il est nécessaire de réduire la perte de chaleur du système de refroidissement des patins du four si l'on veut atteindre l'efficacité du four de l'usine EcoTech. Il faudrait envisager la combinaison du refroidissement des patins par évaporation et de la double isolation des patins. Quatre fours sont dotés de systèmes de récupération de la chaleur issue du refroidissement des patins. Toutefois, ces fours perdent beaucoup plus d'énergie dans le refroidissement des patins (surtout les fours 3 et 5) que ne le fait le four de l'usine EcoTech, un phénomène que l'on peut constater dans la quantité d'énergie récupérée. Cette situation est attribuable à la perte excessive de chaleur dans le refroidissement des patins, lequel rend ces fours plus énergivores que le four de l'usine EcoTech. Le four 4, équipé de patins à double isolation, est aussi efficace que les fours 3 et 5, lesquels sont dotés de systèmes de récupération de la chaleur issue du refroidissement des patins.

4.6.2 Fours de réchauffage des billettes et des blooms – Figure 4-50

Nota : Les fours de réchauffage des billettes et des blooms sont isolés du laminoir à fil machine, du laminoir à barres et du laminoir à profilés lourds afin de mieux montrer le taux de pénétration des technologies des fours à haut rendement énergétique, de même que le rôle que peuvent jouer ces fours en vue de réduire la consommation d'énergie globale des laminoirs.

Indicateurs d'intensité énergétique

- Quatre fours affichent une efficacité énergétique supérieure à celle du four de l'usine EcoTech, et un cinquième four s'en rapproche. Les sept autres fours consomment plus (de 10 à 70 p. 100) d'énergie que le four de l'usine EcoTech.

Pénétration de la technologie

- Les fours 3, 4 et 8 sont équipés de récupérateurs pour produire une température de préchauffage de l'air de combustion qui respecte le critère de l'usine EcoTech. Le degré de récupération dans les fours 6 et 11 se rapproche de la norme d'EcoTech. Trois fours fonctionnent sans récupérateur.

- La plupart des fours (8 sur 12) comportent une zone de préchauffage de chargement non soumise à la flamme. La longueur moyenne de cette zone pour tous les fours est de trois mètres, ce qui indique une faible pénétration de cette technologie.

Autres aspects

- Le four poussant à faible technicité est reconnu pour sa grande efficacité à chauffer les petites billettes (de moins de 150 mm). Comme celles-ci sont suffisamment petites pour être chauffées d'un côté, aucun longeron mobile n'est nécessaire pour les espacer dans le four; nul besoin non plus d'un système de patins pour les soutenir afin d'en permettre le chauffage par le bas. Le four poussant est donc peu coûteux à construire et les longues zones de préchauffage de chargement non soumises à la flamme présentent des avantages économiques. Même avec un faible taux de récupération, ces caractéristiques rendent le four éconergétique, comme on le constate dans l'efficacité des fours 1 et 2.
- Les observations formulées au sujet de la récupération à la section 4.6.1, « Fours de réchauffage des brames », s'appliquent ici également.
- Les fours de réchauffage des billettes exigent des systèmes de patins moins importants. Par conséquent, le refroidissement des patins par évaporation n'est pas une solution économique. Les fours à blooms qui servent à réchauffer des blooms lourds possèdent des systèmes de patins comparables à ceux des fours à brames. Les systèmes de refroidissement des patins par évaporation devraient donc être attrayants sur le plan économique.
- La technologie des patins à double isolation est une solution économique, indépendamment de la dimension du système de patins.
- Les observations formulées au sujet des systèmes de contrôle de niveaux II et III des fours à la section 4.6.1, « Fours de réchauffage des brames », s'appliquent ici également.

Les figures qui suivent illustrent le taux de pénétration des technologies du four qui réduisent l'intrant énergétique des fours (par opposition aux technologies qui récupèrent la chaleur dégagée par le four). L'efficacité de ces technologies dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des fours n'est pas nécessairement cumulative. Il faut procéder à un bilan thermique du four pour établir l'effet combiné de ces technologies.

4.6.3 Température de préchauffage de l'air de combustion – Figure 4-51

- Cet histogramme montre le niveau d'implantation de la technologie de la récupération. Les barres de l'histogramme sont présentées par tranches de 100 °C, et ces chiffres, sur l'axe des abscisses, indiquent la température maximale de l'air de combustion pour le groupe; par exemple, la barre au-dessus de 400 °C démontre que neuf fours ont enregistré des températures de préchauffage de l'air de combustion de 300 °C à 400 °C. Il est permis de croire que les neuf fours ayant affiché des températures de préchauffage de l'air de combustion inférieures à 100 °C ne sont pas dotés d'un dispositif de récupération.

- La récupération transfère la chaleur du gaz de combustion du four à l'air de combustion. La chaleur transmise aux brûleurs du four dans l'air de combustion réduit la quantité de combustible requis pour répondre à la demande énergétique du four. Le préchauffage de l'air de combustion augmente la température de la flamme, ce qui accroît le taux de transfert de chaleur dans le four. Ce transfert thermique permet d'augmenter l'efficacité du procédé et peut également hausser la productivité du four.
- Le préchauffage de l'air de combustion augmente la température de la flamme, facteur principal de la formation de NO_x . Puisque cet élément est un polluant qui contribue aux pluies acides et à la formation de smog, il existe à ce chapitre des limites de contrôle de la pollution atmosphérique. On peut maintenir les émissions de NO_x en deçà des limites réglementaires, grâce à la technologie des brûleurs, car l'air de combustion peut être préchauffé jusqu'à environ 400 °C. Au-delà de cette température, la formation de NO_x augmente rapidement, et il pourrait être nécessaire de se procurer un dispositif de réduction au point de rejet. Par conséquent, la faisabilité des changements à apporter à la technique de la récupération et l'investissement accru à cet égard pour élever la température de l'air de combustion au-dessus de 400 °C pourraient exiger des compromis entre l'efficacité énergétique, les émissions de NO_x et le coût.
- En général, la récupération devrait présenter des avantages sur le plan économique pour tous les fours de réchauffage, car :
 - les fours qui chargent de l'acier froid dans des zones de préchauffage non soumises à la flamme affichent une faible température de gaz de combustion. Ainsi, les récupérateurs sont moins coûteux à installer, car ils n'ont pas à être construits avec des matériaux pouvant supporter des températures élevées et qui sont très coûteux. De plus, comme une partie de la chaleur du gaz de combustion a été retirée des zones de préchauffage non soumises à la flamme, on peut obtenir une efficacité optimale des fours avec une température de préchauffage de l'air de combustion inférieure au point de rupture de 400 °C;
 - les fours qui chargent à chaud ont une température de gaz de combustion élevée; il faut donc des matériaux coûteux et pouvant supporter des températures élevées pour construire un récupérateur. Le gaz de combustion à haute température produit des taux de transfert de chaleur élevés, ce qui permet d'installer des récupérateurs plus petits servant aux mêmes fins. En outre, on peut recourir à des dispositifs simples de transfert de chaleur rayonnante. Ces facteurs font en sorte que pour des applications à haute température, les récupérateurs constituent une solution économique attrayante.

En raison des écarts de construction et de fonctionnement des récupérateurs, les usines doivent, avant d'envisager la récupération, établir dans quelle mesure elles comptent mettre en œuvre la pratique de chargement à chaud.

4.6.4 Longueur de la zone de préchauffage de chargement non soumise à la flamme – Figure 4-52

- Cet histogramme fournit des données sur l'aménagement des zones de préchauffage de chargement non soumises à la flamme dans les fours. Les barres de l'histogramme sont présentées par tranches de deux mètres, et ces chiffres, sur l'axe des abscisses, indiquent la longueur maximale pour le groupe; ainsi, la barre au-dessus de deux mètres indique que huit fours ont une longueur de zone de préchauffage de chargement entre zéro et deux mètres.
- La zone de préchauffage non soumise à la flamme réduit la consommation d'énergie en réduisant la chaleur perdue du four dans le gaz de combustion. Dans la zone de préchauffage non soumise à la flamme, le gaz de combustion du four, qui est chaud, s'achemine à contre-courant en direction de l'acier froid; il est donc refroidi au fur et à mesure que la chaleur est transmise à l'acier. L'efficacité de cette technologie dépend de l'écart de température entre le gaz de combustion du four et l'acier chargé dans le four. Cette technologie est donc moins efficace avec le chargement à chaud.

4.6.5 Température de chargement moyenne du four – Figure 4-53

- Cet histogramme fournit des données sur la pratique du chargement à chaud. Les barres de l'histogramme sont présentées par tranches de 100 °C, et ces chiffres, sur l'axe des abscisses, indiquent une température de chargement moyenne maximale pour le groupe. Ainsi, la barre au-dessus de 100 °C indique que 27 fours affichent une température de chargement moyenne de 0 °C à 100 °C. Ces fours n'ont vraisemblablement pas recours à la pratique du chargement à chaud.
- Le chargement à chaud réduit la consommation d'énergie en diminuant la quantité de chaleur requise pour élever la température de l'acier à la température de laminage. Toutefois, du fait que la température moyenne de l'acier dans le four est plus élevée, le taux de transfert de chaleur entre les gaz du four et l'acier est plus bas, ce qui augmente la température du gaz de combustion provenant du four. Ce facteur peut réduire l'efficacité du four et rendre la pratique du chargement à chaud moins avantageuse. Donc, le chargement à chaud aurait pour effet d'annuler les avantages que présente la zone de préchauffage non soumise à la flamme et d'augmenter la nécessité de recourir à la récupération.
- Certaines nuances d'acier doivent être refroidies après la coulée pour l'obtention des propriétés métallurgiques voulues.

5

SECTEURS POSSIBLES D'ACCROISSEMENT DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE



5. SECTEURS POSSIBLES D'ACCROISSEMENT DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

5.1 Relever les secteurs possibles de réduction de l'intensité énergétique

La présente étude a pour principal objectif de comparer les valeurs de référence et le taux de pénétration de la technologie entre les usines et par rapport à des valeurs de référence internationales relatives à ces technologies, un exercice qui devrait permettre de déceler les possibilités d'amélioration. Les résultats figurant au chapitre 4 sont révélateurs à cet égard. Dans tous les cas, les comparaisons donnent des indices sur les possibilités qu'ont les usines participantes de réduire leur intensité énergétique.

5.2 Facteurs de réduction de l'intensité énergétique non établis par la présente étude

La présente étude **n'a pas** pour objectif de quantifier les possibilités de réduction de l'intensité énergétique. Au chapitre 4, on compare l'intensité énergétique des procédés des usines participantes avec celle des procédés de l'usine EcoTech de l'IISI. On retrouve dans chaque situation des usines dont les indicateurs d'intensité énergétique sont plus élevés que ceux de l'usine EcoTech. On pourrait être porté à croire que les écarts entre les indicateurs d'intensité énergétique des usines et ceux de l'usine EcoTech constituent des pistes à explorer en vue de réduire l'intensité énergétique de l'industrie sidérurgique. Ce raisonnement peut toutefois être trompeur. En effet, lorsqu'on évalue les possibilités réelles de réduire l'intensité énergétique, on doit tenir compte des facteurs suivants :

1. L'usine EcoTech de l'IISI représente un concept très éconergétique, nettement supérieur (12 p. 100) aux meilleures pratiques actuelles. Comme c'est mentionné au chapitre 3, l'usine EcoTech est un projet virtuel, et ses indicateurs d'intensité énergétique sont, en quelque sorte, théoriques. De plus, dans certains secteurs d'élaboration, il manque des données réelles quant aux procédés et à l'exploitation de l'usine de sorte qu'il est difficile de vérifier si les objectifs visés et les améliorations proposées sont effectivement réalisables.
2. Les données économiques des technologies EcoTech dépendent de facteurs qui diffèrent d'une usine à une autre, et d'un territoire à un autre. De plus, ces technologies ne sont pas nécessairement attrayantes sur le plan économique.
3. Il serait également irréaliste de s'attendre à pouvoir mettre en œuvre l'ensemble des technologies EcoTech dans toutes les usines. Certaines des technologies EcoTech sont difficiles, voire impossibles, à mettre à niveau. Il est peu probable que ce soit économiquement réalisable d'abandonner la plupart des installations existantes et de les remplacer par de nouvelles installations où seraient intégrées les technologies EcoTech.

4. La mise en application de chacune des technologies et pratiques envisagées dans la présente étude comporte des dépenses en immobilisations. La mise en œuvre intégrale des technologies EcoTech dans l'industrie sidérurgique canadienne nécessiterait en effet des milliards de dollars. La disponibilité limitée des capitaux dans l'industrie de l'acier et le nombre de priorités concurrentes pour le peu de capitaux disponibles constituent sans doute les facteurs les plus déterminants dans le degré d'implantation des technologies d'économie d'énergie.
5. Il existe de nouveaux procédés d'élaboration du fer et de l'acier qui permettent de réduire les coûts et l'intensité énergétique. Certains ont été implantés au Canada (la production du préréduit, le procédé de coulée et de laminage en continu de bandes à chaud); d'autres sont disponibles sur le marché et d'autres sont en cours de développement. Il serait probablement rentable d'investir dans ces technologies plutôt que de tenter de rénover des installations existantes. Toutefois, il n'est pas dans la portée et le mandat de la présente étude d'évaluer dans quelle mesure les procédés préconisés peuvent réduire l'intensité énergétique des procédés d'élaboration du fer et de l'acier.
6. Les facteurs suivants, dont on ne tient pas compte dans le rendement de l'usine EcoTech, peuvent augmenter l'intensité énergétique de façon importante :
 - Utilisation de l'équipement – L'intensité énergétique augmente si l'équipement ne fonctionne pas à sa capacité nominale, ou presque; ce facteur est tributaire de la situation du marché et de la concurrence.
 - Gamme de produits – L'intensité énergétique est plus élevée pour les laminoirs qui produisent une vaste gamme de produits à cause des pertes de matières et de la consommation d'énergie qui surviennent durant la période requise pour passer au produit suivant.
 - Climat – L'intensité énergétique des laminoirs canadiens est plus élevée en raison de l'énergie requise pour protéger l'équipement et le personnel du climat hivernal rigoureux et pour compenser les pertes de chaleur plus grandes découlant des procédés, causées par de faibles températures ambiantes.

Pour tous ces motifs, on ne peut se fonder sur les résultats énoncés au chapitre 4 pour évaluer les possibilités effectives de réduction d'intensité énergétique dans l'industrie sidérurgique canadienne.

5.3 Repérer les secteurs au potentiel le plus élevé

Comme prévu, les résultats permettent de déterminer les secteurs qui présentent des possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique. En examinant les technologies EcoTech mises en œuvre dans l'industrie sidérurgique canadienne, et celles qui ne l'ont pas été, on a une idée des technologies qui peuvent être les plus efficaces et les plus réalisables. À cette fin, les observations suivantes mettent l'accent sur les secteurs où le potentiel de réduction de l'intensité est le plus réaliste et le plus exploitable.

Les pratiques et technologies qui présentent le meilleur rendement énergétique pour chaque procédé d'élaboration sont illustrées dans les données énergétiques et technologiques figurant au chapitre 4. Elles comprennent l'ensemble des pratiques et technologies propres à l'usine EcoTech ainsi que d'autres technologies et pratiques recommandées par les usines participantes de l'ACPA. La pénétration de ces technologies a été quantifiée pour chacune des usines et reliée à leur intensité énergétique. D'après les données recueillies, la pénétration des technologies EcoTech peut se résumer comme suit :

1. Certaines technologies EcoTech n'ont pas été mises en œuvre dans certains secteurs d'élaboration.
2. Certaines technologies EcoTech ont été implantées dans chaque procédé d'une ou de plusieurs usines.
3. Certains secteurs d'élaboration, comme le FEA et le haut fourneau, affichent un taux élevé de pénétration de la technologie EcoTech.
4. Chaque secteur d'élaboration présente des possibilités, dans une ou plusieurs usines, de réduire l'intensité énergétique en mettant en œuvre des technologies EcoTech.
5. Dans certains secteurs, comme les fours de réchauffage de l'acier et les centrales électriques des usines intégrées, la mise en œuvre de la technologie EcoTech pourrait se traduire par une réduction appréciable de l'intensité énergétique.
6. Dans certains secteurs d'élaboration, l'écart de l'intensité énergétique entre les usines participantes ne saurait s'expliquer par la pénétration de la technologie et des pratiques.

5.3.1 Secteurs où la mise en œuvre de la technologie et des pratiques est improbable

Certaines technologies EcoTech n'ont pas été mises en œuvre dans certains secteurs d'élaboration. Il est possible que les usines concernées n'aient pas été en mesure de justifier l'adoption de la technologie, et ce, notamment pour les raisons suivantes :

1. La durée de vie du procédé ou de l'installation est jugée trop courte pour produire un rendement sur le capital investi.
 - Citons, par exemple, l'absence de pénétration de la technologie EcoTech dans le secteur de la fabrication du coke. Les cokeries canadiennes sont vieilles et ont une durée de vie limitée. (Toutefois, la technologie du haut fourneau en vue de réduire la dépendance au coke a été mise en œuvre.) Le coke est disponible sur le marché mondial et provient d'installations plus modernes. La réduction directe et les nouvelles technologies d'élaboration du fer par fusion-réduction, qui sont aptes à remplacer les vieux hauts fourneaux, ne requièrent pas de coke.
2. La technologie n'est pas efficace compte tenu de la conception et des caractéristiques de fonctionnement de l'installation existante.
 - Par exemple, l'absence de technologie de la récupération de l'énergie relativement au gaz de gueulard des hauts fourneaux. Les hauts fourneaux canadiens sont conçus pour fonctionner à une pression du gaz de gueulard relativement basse. Par conséquent, la quantité d'énergie-pression à récupérer est inférieure à celle des hauts fourneaux conçus pour fonctionner à une pression élevée du gaz de gueulard.

Certaines technologies EcoTech ont été mises en œuvre dans une ou plusieurs usines, mais pas dans la majorité. Il est possible que les usines ne soient pas toutes en mesure de justifier l'adoption de la technologie. Un des motifs possibles serait que la technologie n'était pas disponible ou praticable lorsque l'installation a été construite, ou encore qu'elle est difficile ou impossible à mettre à niveau.

- Par exemple, deux des convertisseurs à oxygène ne sont pas munis d'un système de récupération du gaz. Ils ont été construits à une époque où la technologie en cours consistait à brûler les gaz de dégagement et à récupérer une partie de la chaleur dans des hottes de production de vapeur. Le coût de mise à niveau d'un système de récupération du gaz et d'un réseau d'acheminement du gaz récupéré aux utilisateurs est probablement inabordable.
- Un autre exemple concerne la longueur de la zone de préchauffage de chargement non soumise à la flamme d'un four de réchauffage. L'ajout d'une telle zone, ou le prolongement d'une zone existante, requiert un allongement global du four, une opération souvent très difficile à effectuer, car les laminoirs sont aménagés de telle sorte que le four est situé entre l'équipement de chargement et l'équipement de déchargement. Pour modifier la longueur du four, il faudrait réaménager le laminoir et déplacer l'équipement, une formule coûteuse et peut-être impossible à mettre en application.

5.3.2 Secteurs où la mise en œuvre de la technologie et des pratiques est probable, mais où le potentiel de mise en application est limité

Certains secteurs d'élaboration affichent un taux élevé de pénétration de la technologie EcoTech. Cela démontre que la mise en œuvre de cette technologie est justifiable et que l'implantation des autres technologies serait probablement efficace et réalisable, si l'on se fonde sur les résultats positifs observés dans toute l'industrie.

- L'élaboration de l'acier par FEA en est un exemple. Le taux de pénétration élevé de la technologie dans les FEA est illustré au tableau « Technologie ou pratique » à la figure 4-10, « Élaboration de l'acier par four électrique à arc et coulée continue – Énergie et technologie », où figurent huit technologies EcoTech. Le nombre des technologies EcoTech mises en œuvre dans les neuf aciéries électriques varie de cinq à sept, avec une moyenne de six. Toutefois, en raison de la pénétration élevée de la technologie, il reste peu à faire. L'injection d'oxygène dans la technologie de postcombustion n'a été implantée que dans un four. Si l'on procédait à cette opération dans les autres fours, on obtiendrait une réduction de 5 p. 100 de l'intensité énergétique, ce qui constitue à peu près le potentiel qui reste.
- Autre exemple, l'utilisation de la technologie d'injection de combustible dans le haut fourneau pour réduire la dépendance au coke. La pénétration élevée de cette technologie est illustrée au tableau « Technologie ou pratique » à la figure 4-5, « Haut fourneau – Énergie et technologie ». Deux fours ont dépassé le taux d'injection de combustible d'EcoTech de 3 870 MJ par tonne de fonte liquide et ont atteint le taux de coke d'EcoTech établi à 361 tonnes de coke par tonne de fonte liquide. De plus, le taux moyen d'injection de combustible dans tous les fours dépasse le rendement de l'usine EcoTech, et le taux moyen de coke se rapproche de celui de l'usine EcoTech. Le potentiel

de réduction de la dépendance au coke encore accessible à l'ensemble de l'industrie grâce à la technologie EcoTech est évalué à 27 kg de coke par tonne de fonte liquide. Voilà l'objectif à atteindre, mais c'est peu comparativement à ce qui a été réalisé.

5.3.3 Secteurs où la mise en œuvre de la technologie et des pratiques est probable, et où le potentiel de réduction de l'intensité énergétique est élevé

Dans certains secteurs, la mise en œuvre de la technologie pourrait réduire l'intensité énergétique de façon importante. Dans ces secteurs, les technologies permettent de grandes économies d'énergie et peuvent être mises en application rapidement. Il est fort possible que ces avenues aient été analysées et qu'elles soient bien connues des usines participantes. D'autres facteurs, comme la disponibilité des capitaux, les priorités concurrentes et la politique externe, ont vraisemblablement empêché les usines de poursuivre dans ce sens.

- La centrale électrique dans les aciéries intégrées en est un exemple. Le potentiel de réduction de l'intensité énergétique dans toutes les aciéries intégrées canadiennes est énormément limité par la technologie inadéquate des centrales électriques, comme il est expliqué à la section 4.5.2.2. Si l'on se fonde sur le rendement de l'usine EcoTech, les aciéries intégrées canadiennes seraient en mesure de produire suffisamment d'électricité, sans consommer de combustible supplémentaire, pour être presque autosuffisantes. Étant donné que les quatre aciéries intégrées se trouvent en Ontario, où les centrales électriques alimentées au charbon sont marginales, l'impact des usines intégrées qui produiraient cette quantité d'électricité est immense. Les économies possibles pourraient atteindre près de 2,7 millions de MWh par an d'énergie électrique, ce qui représente une réduction des émissions de CO₂ de 2,3 millions de tonnes par an, et de 140 millions de dollars en coûts énergétiques.

La technologie de la centrale de cogénération à vapeur d'EcoTech est arrivée à maturité et elle ne présente aucun risque technique. Elle a été implantée partout dans le monde, y compris dans les États voisins aux États-Unis. Une des raisons pour lesquelles cette technologie n'a pas été mise en application en Ontario (où sont situées l'ensemble des usines intégrées) pourrait être la politique de la province en matière de production d'électricité. Il y a d'autres motifs possibles :

- des priorités concurrentes à l'aciérie (la centrale électrique n'améliore pas la productivité ni la qualité des produits);
- une politique environnementale incertaine;
- le manque de capitaux (enjeux commerciaux et fiscaux).

Il existe certains secteurs où :

- la technologie a été mise en œuvre dans un nombre suffisant d'aciéries canadiennes pour confirmer que le rendement de l'usine EcoTech est un objectif réalisable;
- la mise en œuvre de la technologie dans les autres usines pourrait réduire l'intensité énergétique de façon importante.

À la lumière de ces résultats, on peut conclure que, pour demeurer concurrentielles, toutes les usines devront finalement adopter et implanter les technologies et pratiques mentionnées plus haut.

- Les fours de réchauffage, par exemple. Dans le secteur des blooms et des billettes, 33 p. 100 des fours de réchauffage des billettes sont plus efficaces que le four de l'usine EcoTech, ce qui signifie que l'intensité énergétique d'EcoTech est un objectif que l'on peut atteindre, et même dépasser. L'intensité énergétique de quatre fours à billettes pourrait être réduite de façon appréciable (de 20 à 25 p. 100) en mettant en application la technologie de la récupération. Il est également intéressant de constater que les fours poussants peuvent être aussi efficaces que le four à longerons mobiles d'EcoTech, puisqu'il est souvent nécessaire d'installer un nouveau four pour passer du four poussant au four à longerons mobiles.
- Dans le secteur des fours de réchauffage des brames, le rendement des six fours dotés de la plupart des technologies EcoTech se rapproche de celui d'EcoTech, une autre indication que l'on peut atteindre l'intensité énergétique d'EcoTech. Les 11 autres fours ne sont équipés d'aucune technologie EcoTech, sinon de quelques-unes seulement; ils sont, en conséquence, très inefficaces. Doter ces fours des technologies EcoTech (ce qui, dans la plupart des cas, comporterait probablement l'installation de nouveaux fours) pourrait réduire leur intensité énergétique de 50 à 65 p. 100.

L'industrie sidérurgique et les usines participantes pourront mieux déterminer les possibilités à explorer en classant tous les secteurs d'amélioration selon les critères suivants :

- secteurs où la mise en œuvre de la technologie et des pratiques est improbable;
- secteurs où la mise en œuvre de la technologie et des pratiques est probable, mais où le potentiel de mise en application est limité;
- secteurs où la mise en œuvre de la technologie et des pratiques est probable, et où le potentiel de réduction de l'intensité énergétique est élevé.

6

SOURCES DE
RÉFÉRENCE



6. SOURCES DE RÉFÉRENCE

1. *Consommation d'énergie dans l'industrie sidérurgique*, Comité de la technologie, International Iron and Steel Institute, Bruxelles, 1998.
2. *Rapport sur l'énergie du Comité européen de l'énergie des aciéries*, Yann de Lassat, Association Technique de la Sidérurgie française, juin 2001.
3. *Le présent et l'avenir de la consommation d'énergie dans l'industrie sidérurgique canadienne*, CANMET – Énergie, Mines et Ressources Canada (maintenant Ressources naturelles Canada), mars 1993.

7

FIGURES, DIAGRAMMES ET TABLEAUX



7. FIGURES, DIAGRAMMES ET TABLEAUX

Figure 2-1. Usines d'élaboration du fer et de l'acier, et fabrication de ferro-alliages, consommation d'énergie en 2002 (Total : 247 050 TJ)

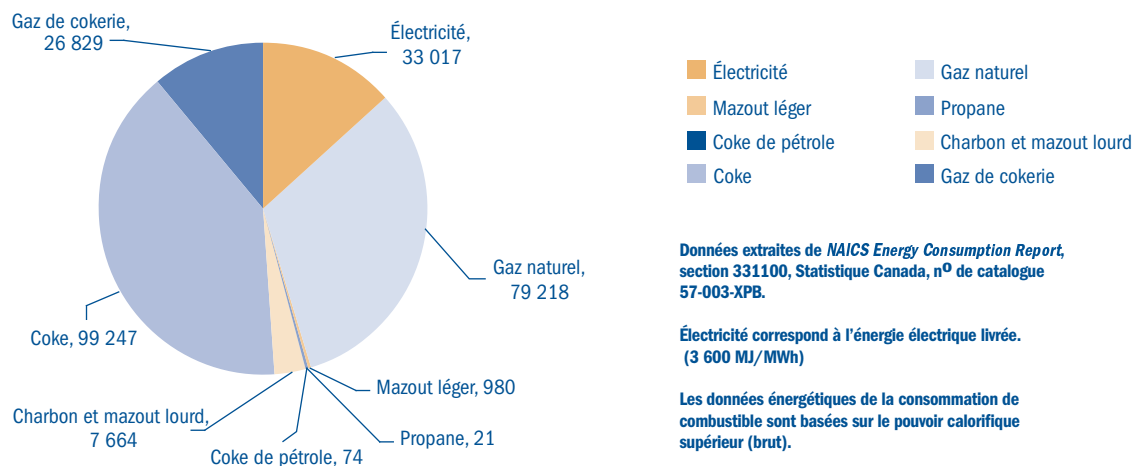


Figure 2-2. Organigramme de production de l'aciérie électrique

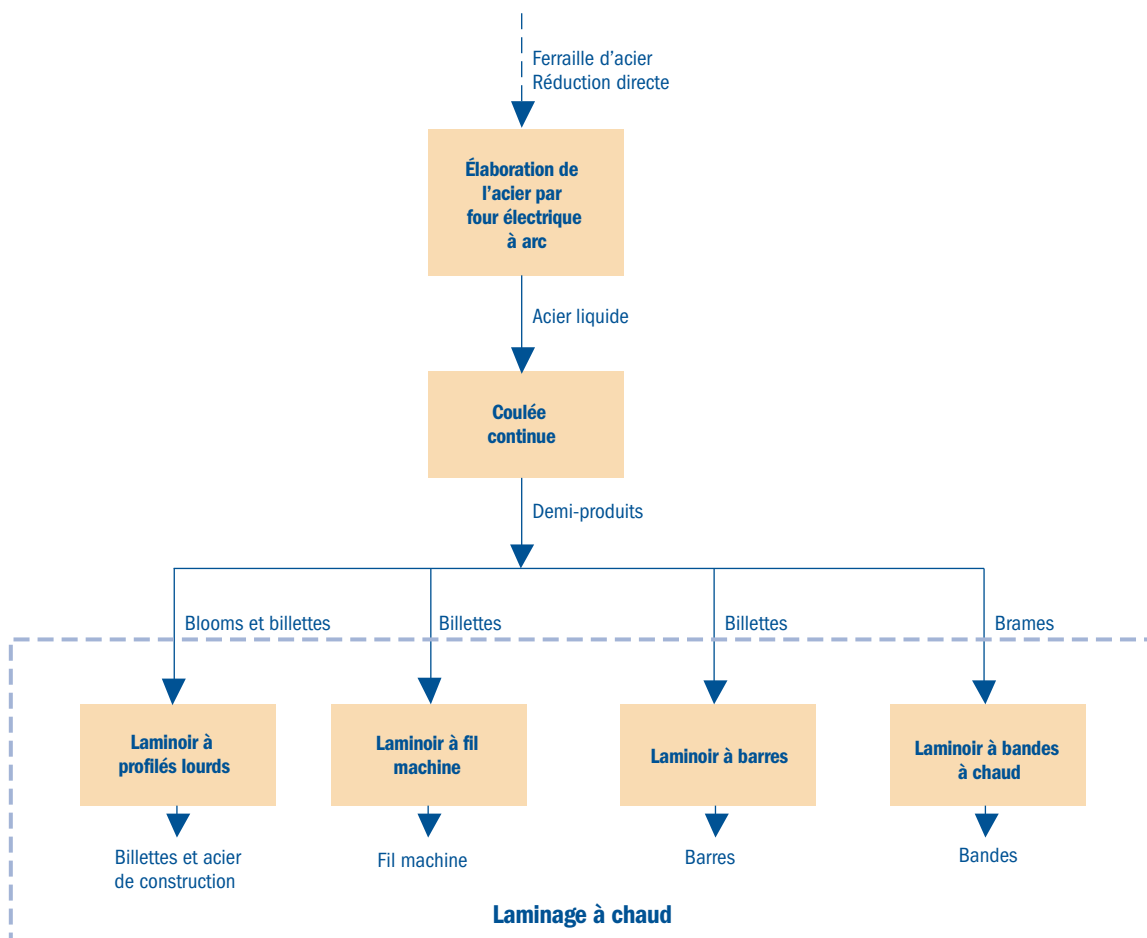
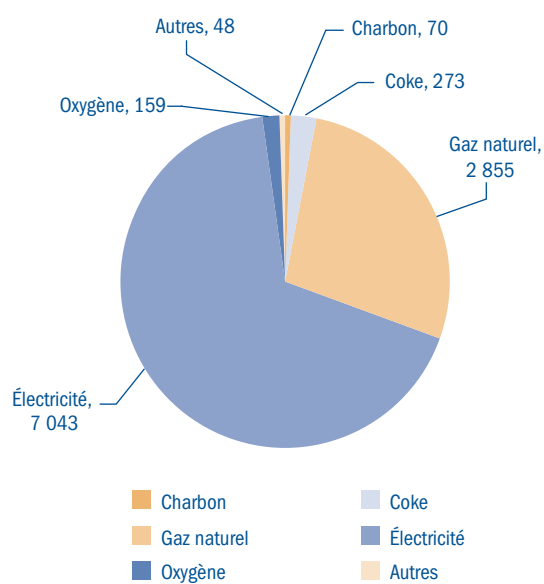


Figure 2-3. Indicateur d'intensité énergétique – Aciéries électriques, 2002
 (MJ/tonne de produit laminé à chaud)
 (Total : 10 450 MJ/t)



L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

Figure 2-4. Organigramme de production de l'usine intégrée

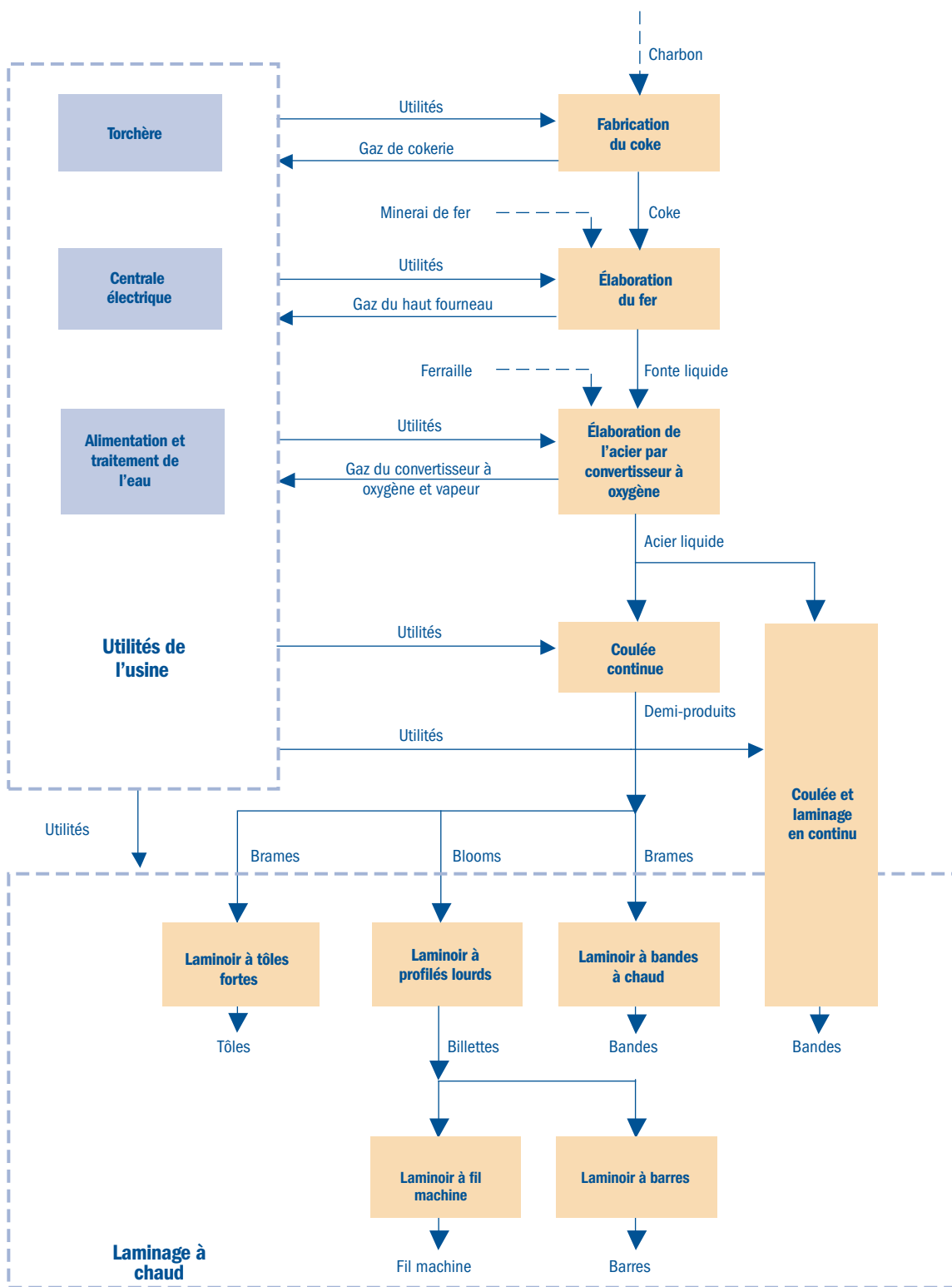


Figure 2-5. Indicateur d'intensité énergétique – Usines intégrées, 2002
(MJ/tonne de produit laminé à chaud)
(Total : 21 050 MJ/t)

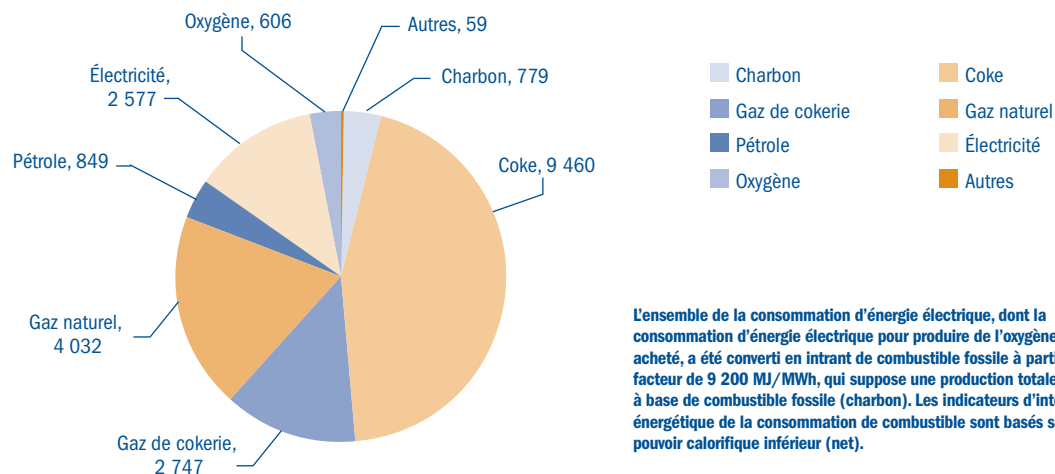
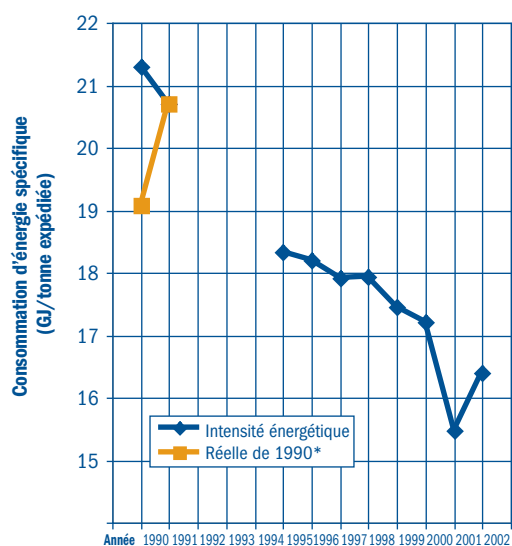


Figure 2-6. Consommation d'énergie spécifique
(GJ/tonne expédiée)



*Le niveau réel de 1990 a été rajusté pour enlever l'impact des conflits de travail.

23 p. 100 d'amélioration de la consommation d'énergie spécifique de 1990 à 2002

Rapport annuel 2002-2003 du Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne : des idées d'énergie à l'œuvre, page 78. ISBN 0-662-37418-5

Les données énergétiques de la consommation de combustible sont basées sur le pouvoir calorifique supérieur (brut).

Les données pour la période de 1992 à 1994 ne sont pas disponibles dans les sources de référence citées.

Figure 3-1. Aciérie électrique à barres d'EcoTech

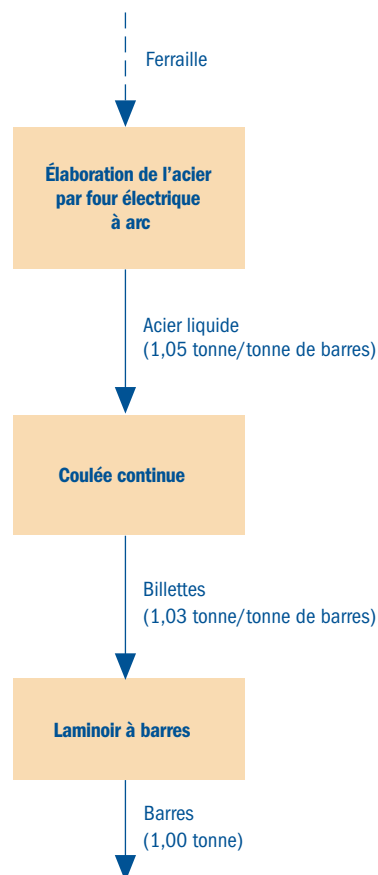
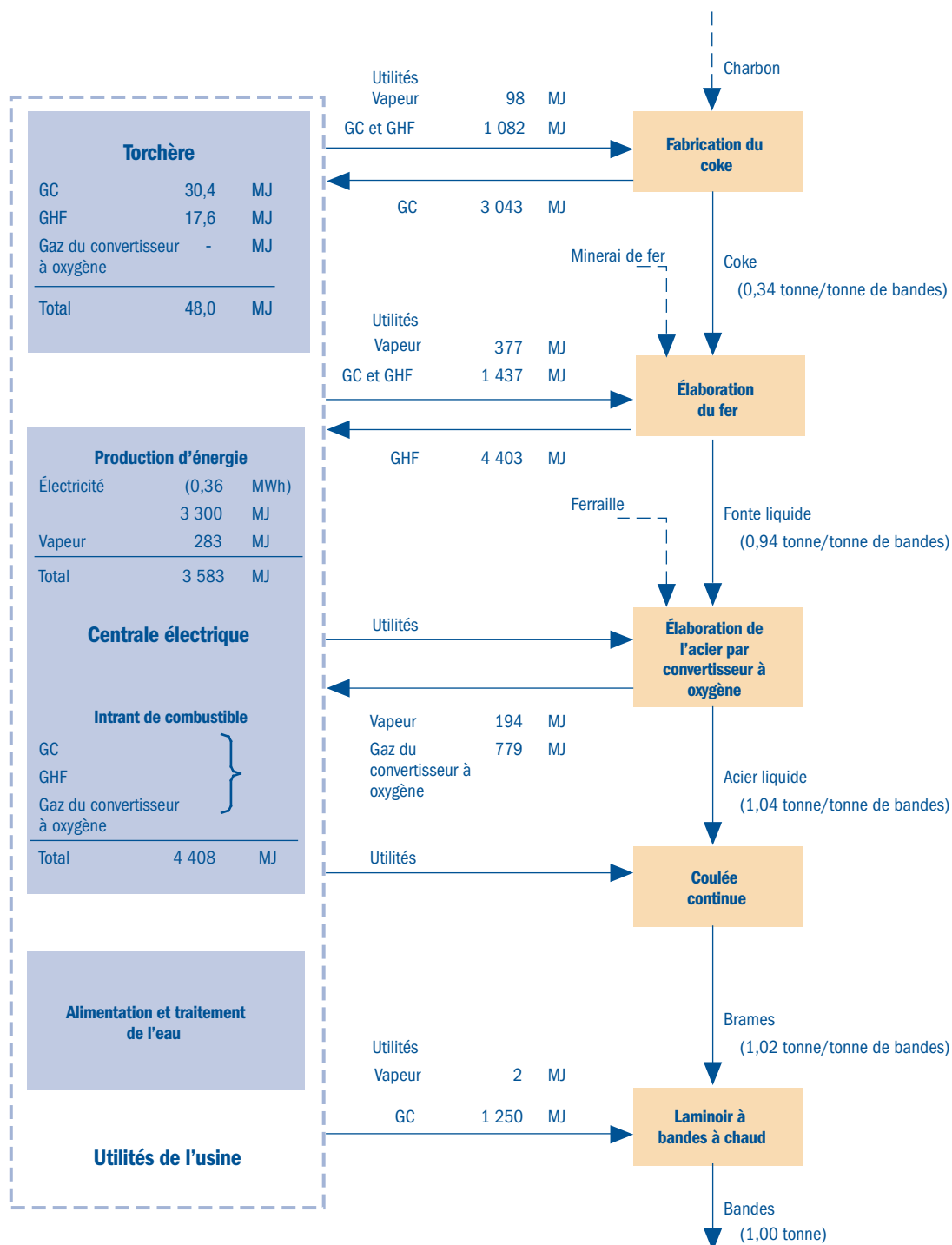
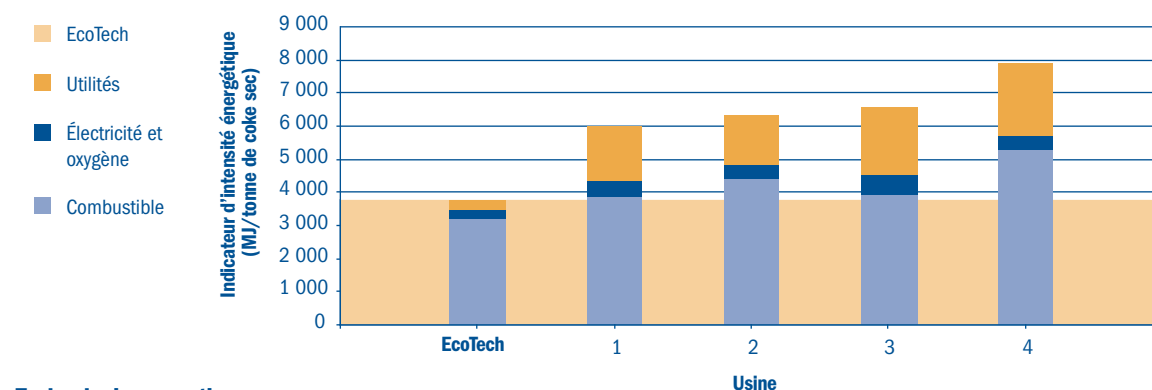


Figure 3-2. Usine intégrée à bandes à chaud en bobines d'EcoTech et utilités de l'usine



Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

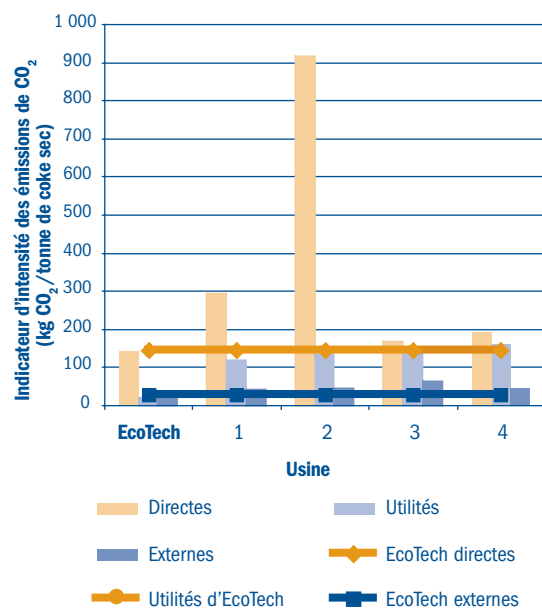
Figure 4-1. Fabrication du coke – Énergie et technologie



Technologie ou pratique

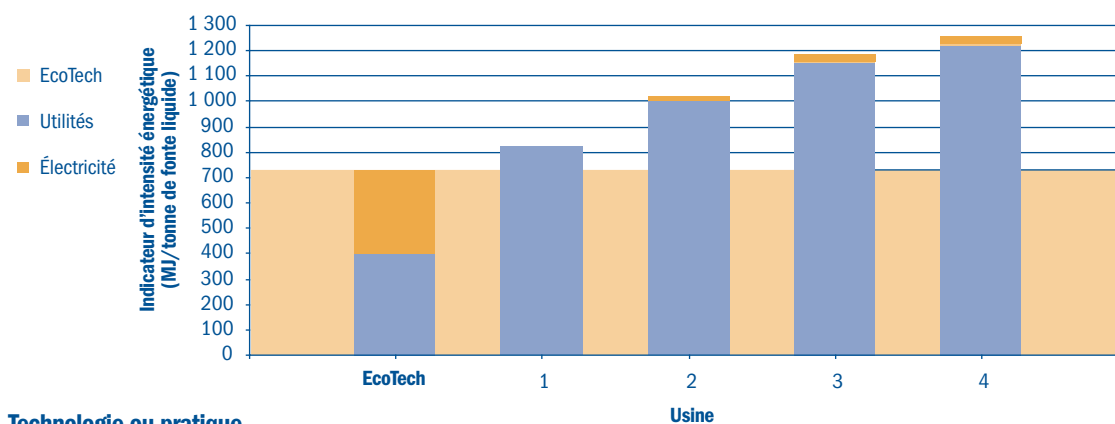
Aspiration à haute pression de jets d'ammoniac	EcoTech	non	non	non	oui
Entraînements à vitesse variable	EcoTech	oui	non	non	oui
Contrôle amélioré de la combustion	CANMET	non	non	oui	non
Extinction à sec de coke	AlITech	non	non	non	non
Séchage	AlITech et CANMET	non	non	non	non
Récupération de chaleur notable du gaz de cokerie	AlITech	non	non	non	non
Récupération de chaleur du gaz de combustion	AlITech	oui	oui	non	oui

L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

Figure 4-2. Fabrication du coke – CO₂

Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-3. Soufflage – Énergie et technologie

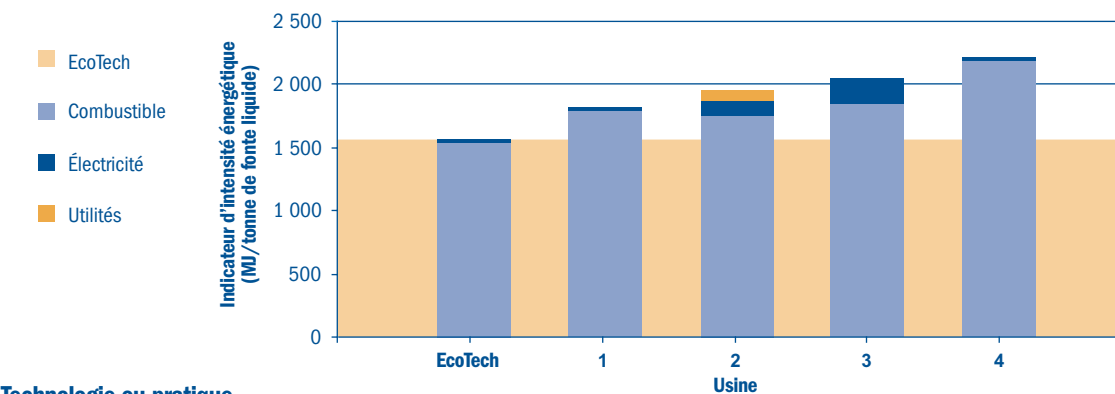


Technologie ou pratique

Soufflantes à débit axial	EcoTech	non	oui	non	non
Enrichissement de l'oxygène de la fonte à l'air froid	EcoTech 35 m ³ /t/tf AllTech 50 m ³ /t/tf	oui	oui	non	oui

L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

Figure 4-4. Cowpers – Énergie et technologie



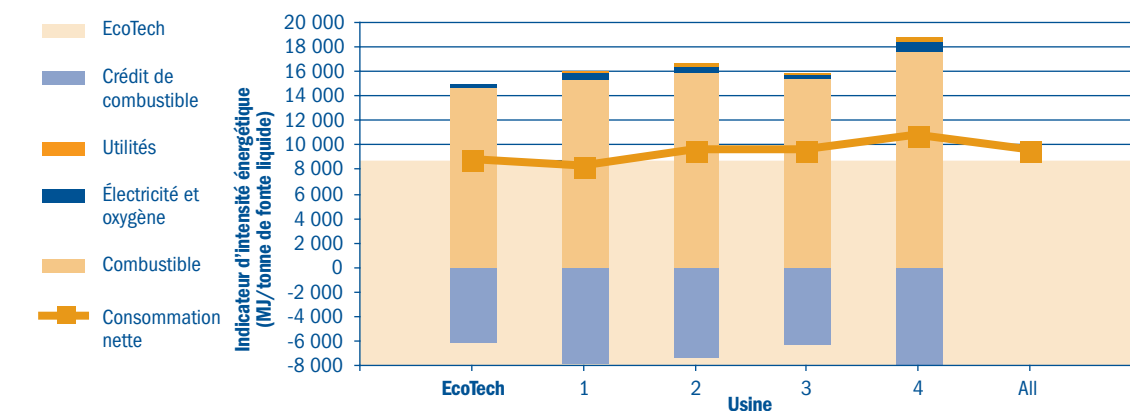
Technologie ou pratique

Récupération de chaleur du gaz de combustion	EcoTech	non	oui	non	non
Fonctionnement des cowpers disposés en quinconce/en parallèle	EcoTech	non	non	non	non
Enrichissement d'oxygène de la fonte à l'air froid	EcoTech	oui	oui	non	oui
Contrôle de la combustion (<5 % d'air excédentaire)	EcoTech	10 %	17 %	10 %	50 %
Efficacité des cowpers (85 %)	EcoTech	78 %	76 %	78 %	67 %

Nota : L'usine 4 fonctionnait à un taux anormalement élevé d'air excédentaire à cause de brûleurs endommagés. Ce mode de fonctionnement entraîne une baisse importante de l'efficacité. Par conséquent, l'efficacité des cowpers est sous la normale.

L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

Figure 4-5. Haut fourneau – Énergie et technologie

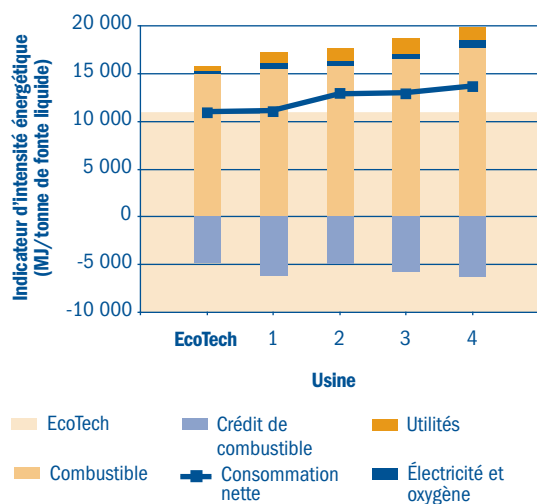


Technologie ou pratique

Turbine de récupération du gaz de gueulard	EcoTech		non	non	non	non		
Produits injectés dans le haut fourneau								
Taux de coke (kg/tfi)	EcoTech	361	non	oui	non	oui	388	
Taux d'injection (MJ/tfi)	EcoTech	3 870	non	oui	non	oui	4 625	
Système de contrôle des émissions de la moulerie	EcoTech	7,0	s/o	non	oui	s/o		

L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

Figure 4-6. Élaboration du fer – Énergie



L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

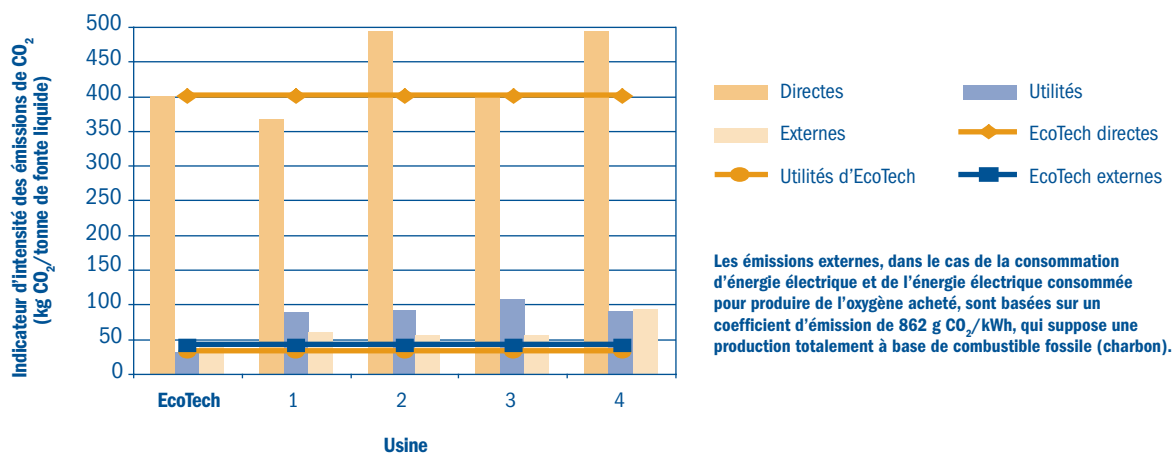
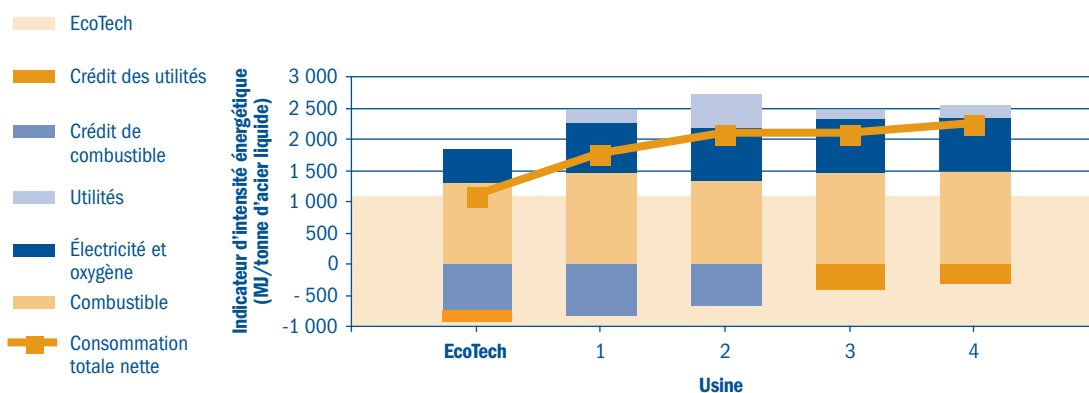
Figure 4-7. Élaboration du fer – CO₂

Figure 4-8. Élaboration de l'acier par convertisseur à oxygène – Énergie et technologie



Technologie ou pratique

Récupération du gaz	EcoTech	oui		oui		non		non
Système d'épuration du gaz sec	EcoTech	non		non		non		non
Système expert et contrôle de la pression du gaz	EcoTech	non		non		non		non
Récupération de la vapeur	EcoTech	non		non		non		non
Gestion de la poche de coulée	CANMET	oui		oui		oui		oui
Stratégie de chauffage programmé de la poche de coulée	CANMET	non		non		non		non
Récupération de la chaleur perdue	CANMET	oui		oui		oui		oui
Couvercles de poche de coulée utilisés pour réduire la perte de chaleur	CANMET	oui		non		non		non
Brassage du fond de récipient	CANMET	oui		non		non		non
Fonctionnement d'un seul récipient	CANMET	oui		non		non		non

L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

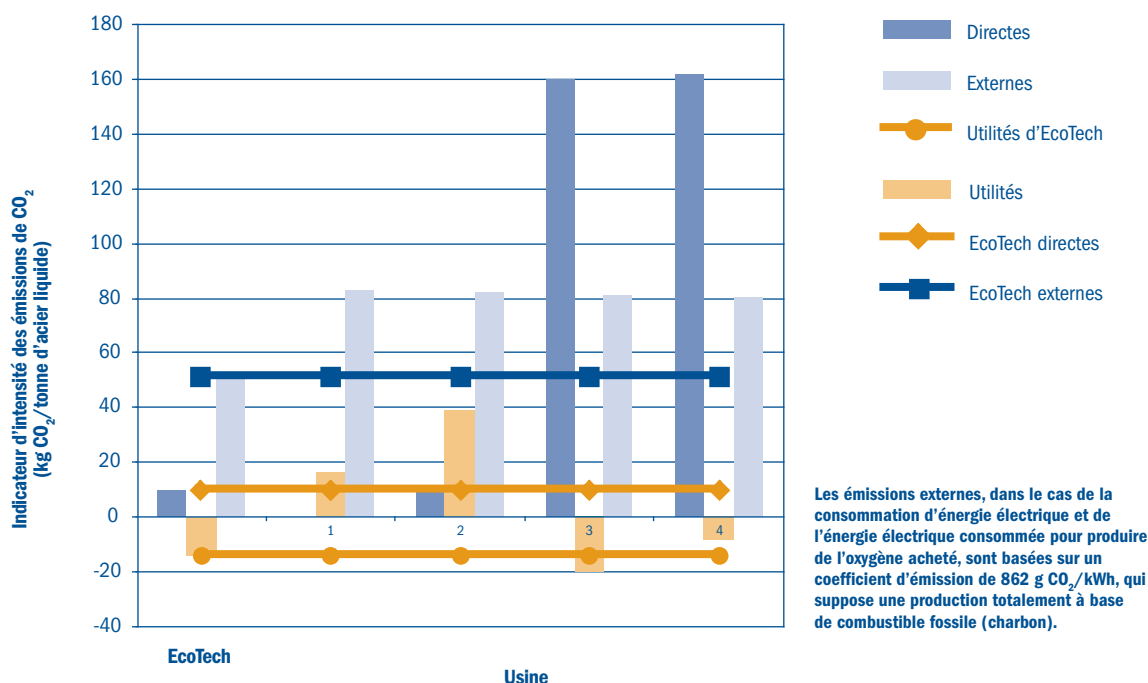
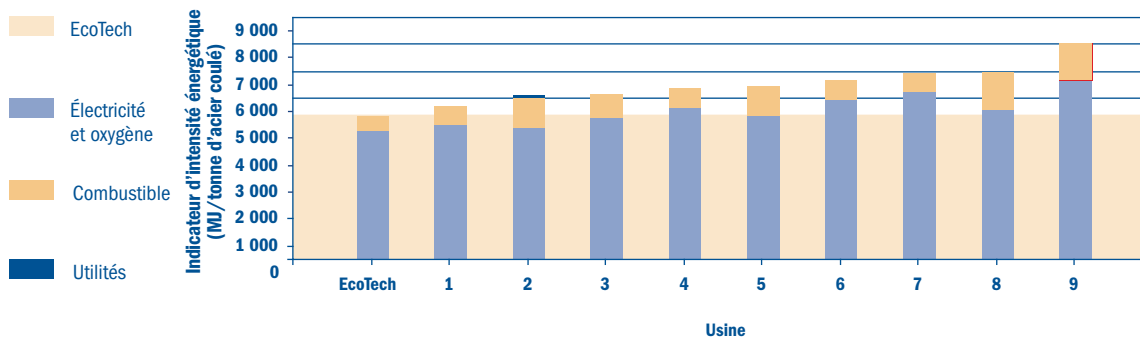
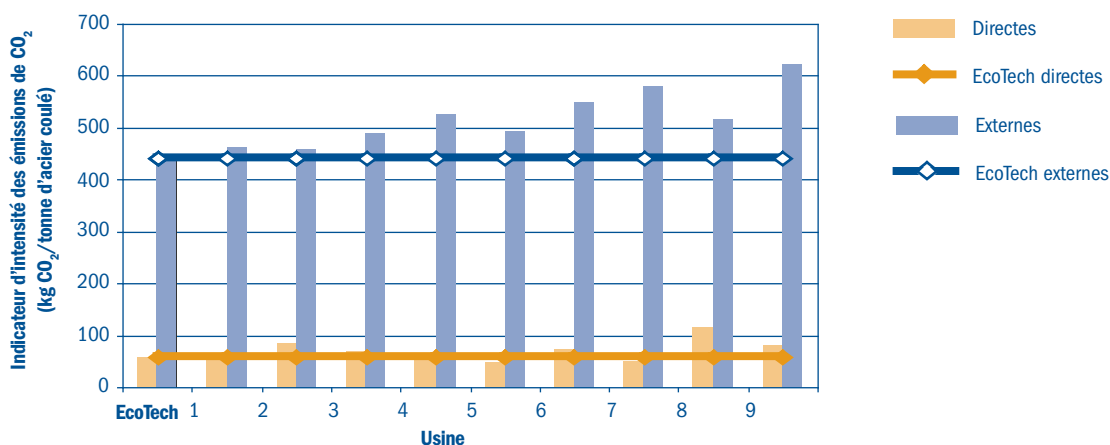
Figure 4-9. Élaboration de l'acier par convertisseur à oxygène – CO₂

Figure 4-10. Élaboration de l'acier par four électrique à arc et coulée continue – Énergie et technologie



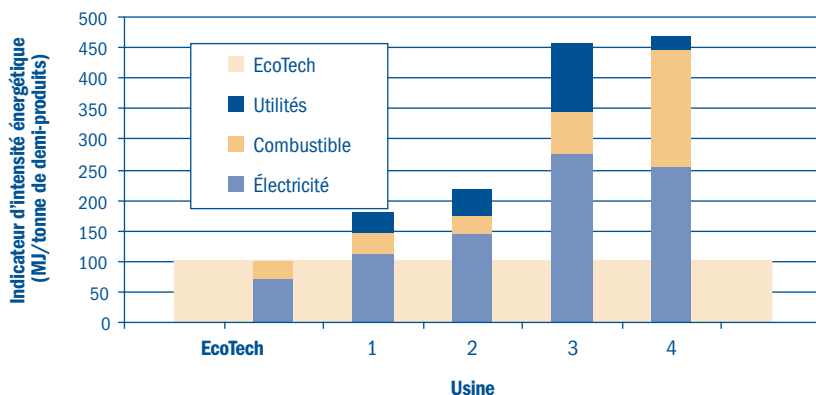
Technologie ou pratique		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Soufflage d'oxygène pour la postcombustion	EcoTech	non	non	non	non	oui	non	non	non	non
Brûleurs d'oxygène et de combustible	EcoTech	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui
Dispositifs métallurgiques secondaires	EcoTech	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui
Préchauffage de la ferraille	AllTech	non	oui	non	non	non	non	non	non	non
Combustible d'appoint (injection de charbon/charge)	EcoTech	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	oui
Panneaux et toiture refroidis à l'eau	EcoTech	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Transformateur CA ultra-puissant	EcoTech	oui	oui	non	oui	non	oui	oui	oui	oui
Piquage du fond excentrique	EcoTech	oui	non	non	oui	oui	oui	oui	oui	non
Contrôles de niveau I et de niveau II	ACPA	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Changements de piquage du transformateur	ACPA	oui	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui

L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en Intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

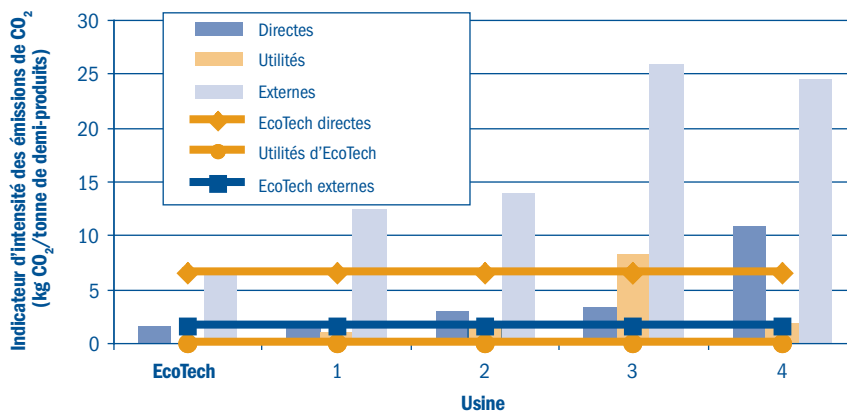
Figure 4-11. Élaboration de l'acier par four électrique à arc et coulée continue - CO₂

Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-12. Coulée continue - Énergie



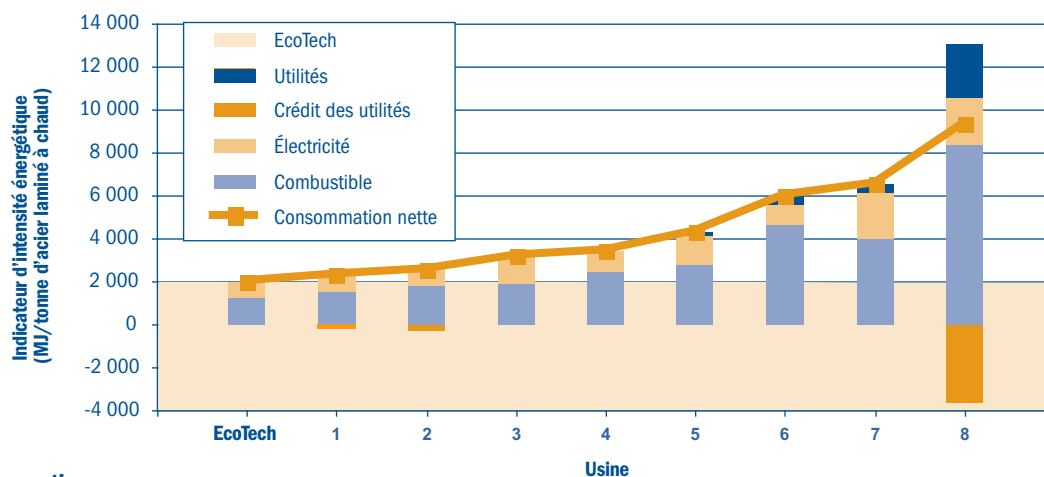
L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

Figure 4-13. Coulée continue - CO₂

Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-14. Laminaires à bandes à chaud et à tôles fortes – Énergie et technologie

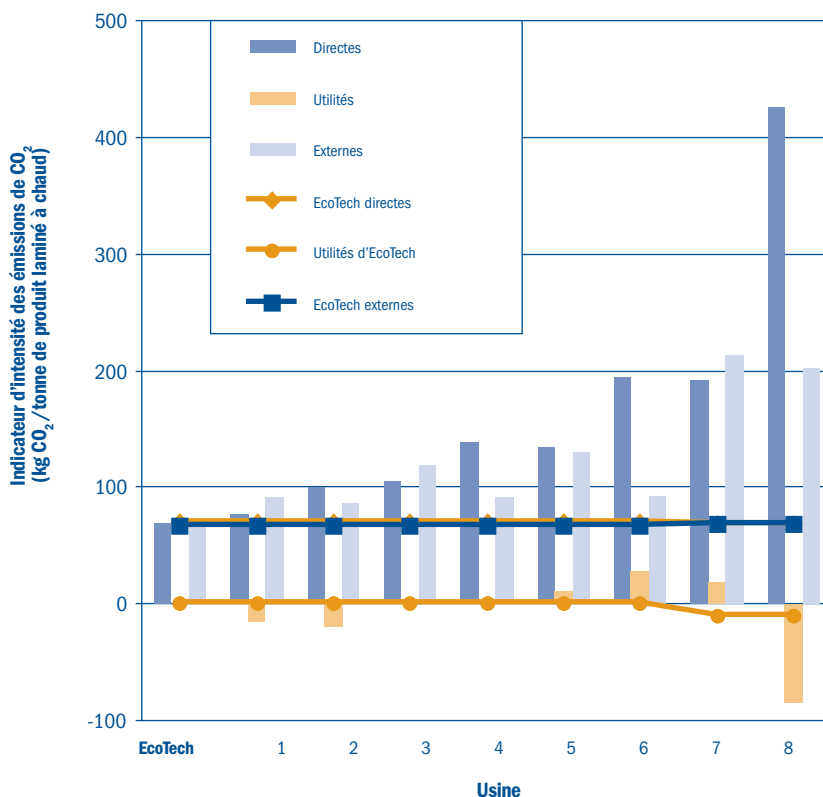
75



Technologie ou pratique

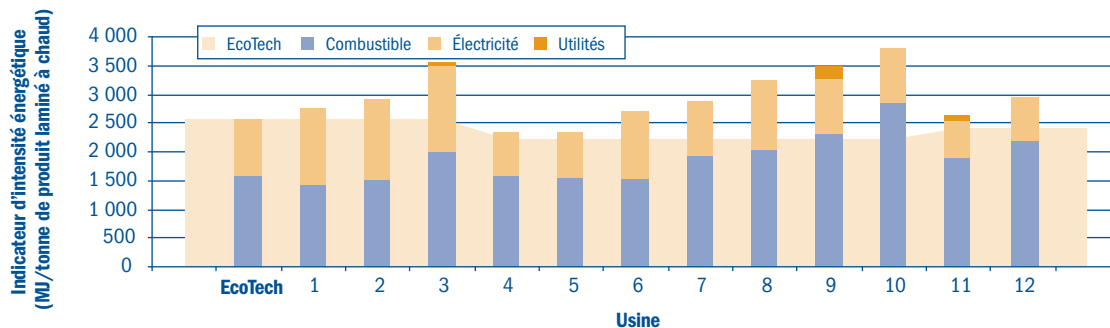
		1	2	3	4	5	6	7	8
« Coilbox » pour barres de transfert	EcoTech	non	oui	non	oui	oui	oui	s/o	s/o
Couvercle thermique sur les tables de transfert et de livraison du laminoir	EcoTech	oui	non	non	non	non	non	s/o	s/o
Laminage sans ordonnancement	EcoTech	non	non	non	non	non	non	s/o	s/o
Réchauffeurs de rives de barres de transfert	EcoTech	oui	non	non	non	non	non	s/o	s/o
Laminage élevé de rives	EcoTech	moyen	non	min.	min.	non	min.	s/o	s/o
Moteur de cage dégrossisseuse CA	EcoTech	non	non	oui	non	non	non	s/o	s/o

L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

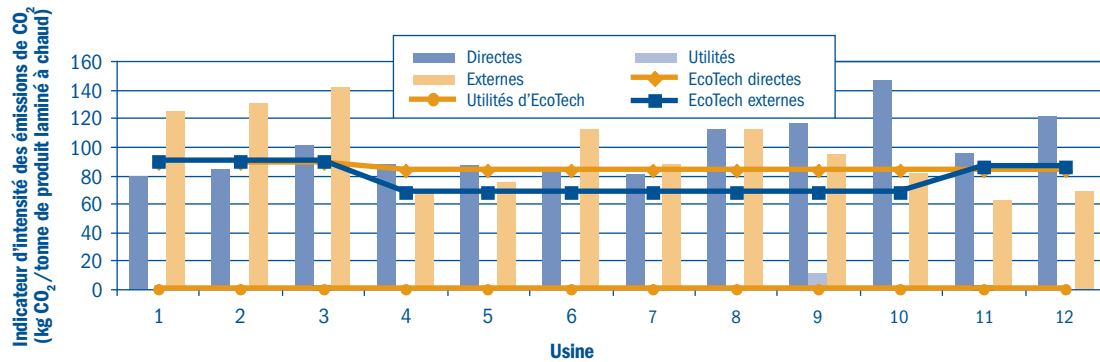
Figure 4-15. Laminaires à bandes à chaud et à tôles fortes – CO₂

Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-16. Laminier à profilés – Énergie

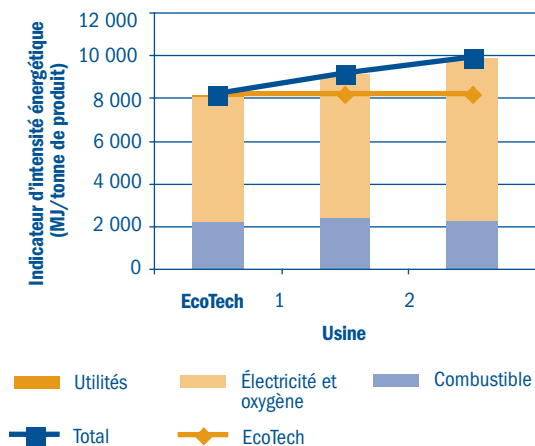


L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

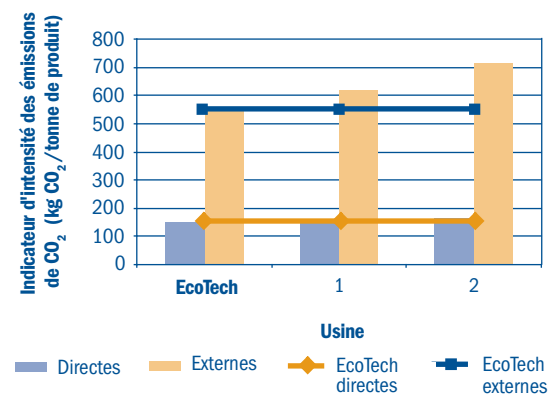
Figure 4-17. Laminoir à profilés – CO₂

Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-18. Aciérie électrique à fil machine – Énergie

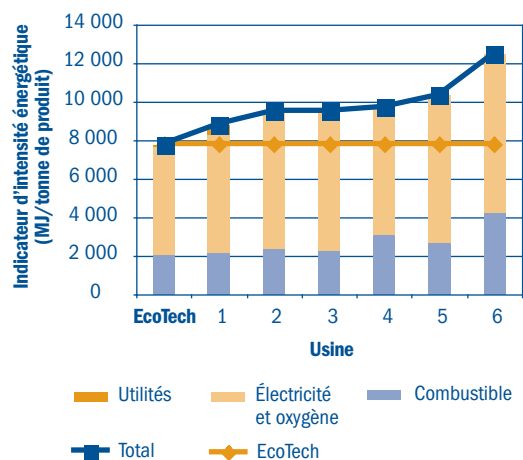


L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

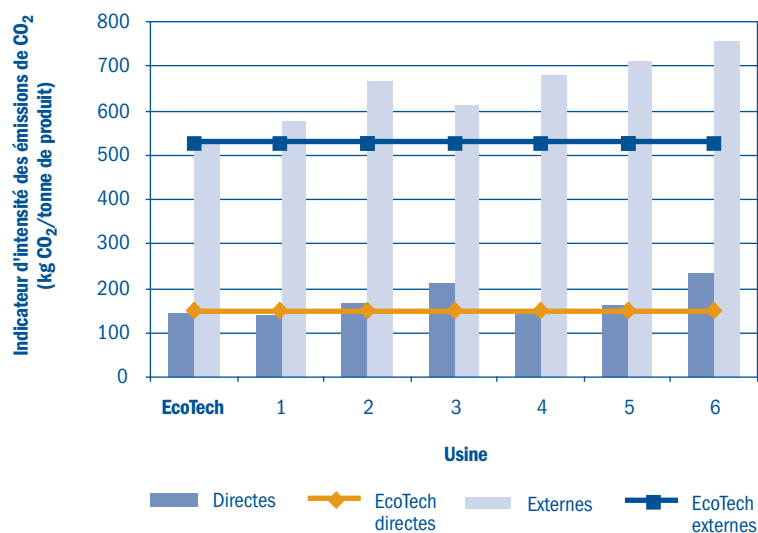
Figure 4-19. Aciérie électrique à fil machine – CO₂

Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-20. Aciérie électrique à barres – Énergie

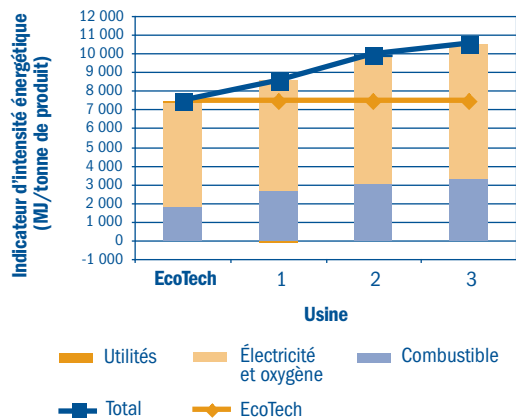


L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

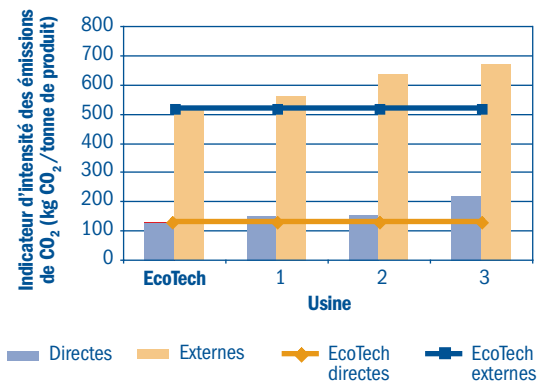
Figure 4-21. Aciérie électrique à barres – CO₂

Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-22. Aciérie électrique à bandes à chaud – Énergie

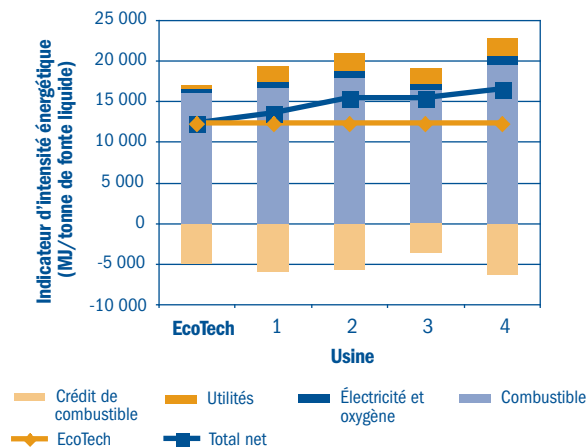


L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

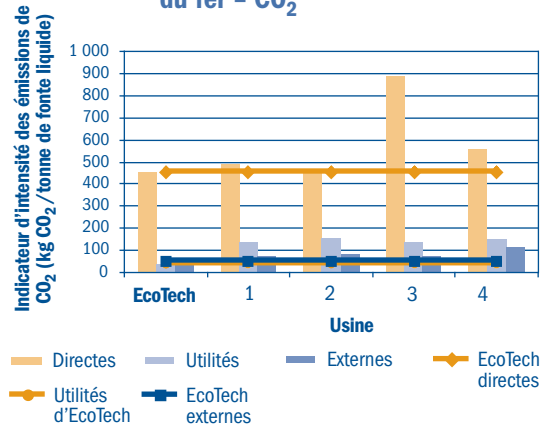
Figure 4-23. Aciérie électrique à bandes à chaud – CO₂

Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-24. Usine intégrée d'élaboration du fer – Énergie

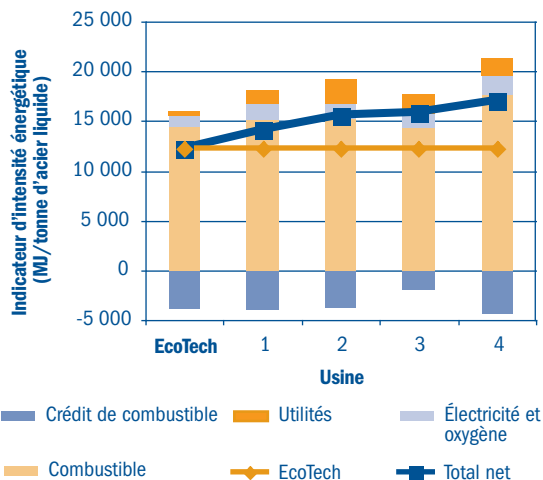


L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

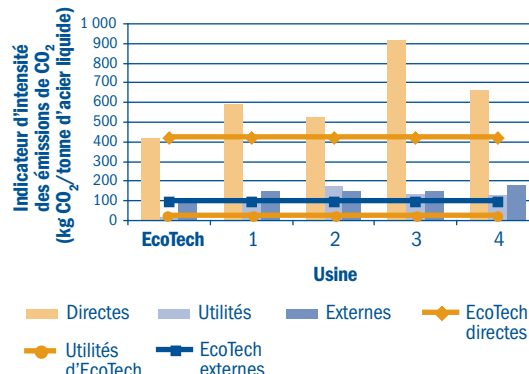
Figure 4-25. Usine intégrée d'élaboration du fer – CO₂

Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-26. Aciérie intégrée – Énergie

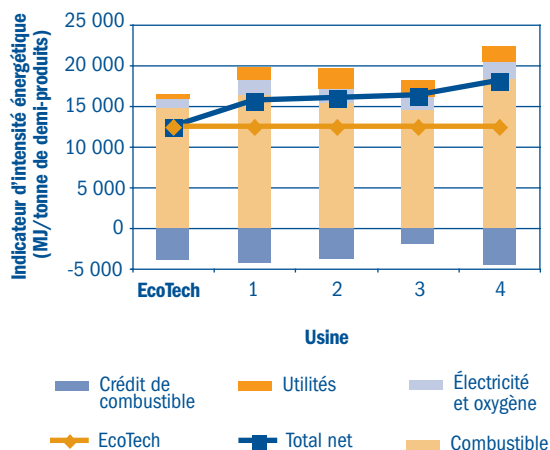


L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

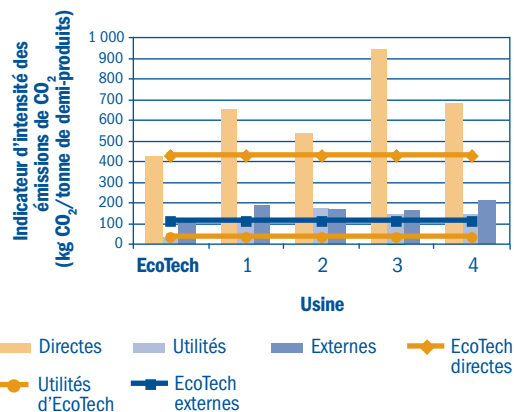
Figure 4-27. Aciérie intégrée – CO₂

Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-28. Aciérie intégrée à demi-produits – Énergie

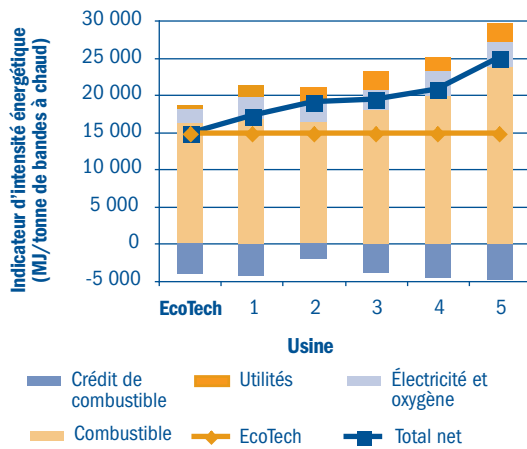


L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

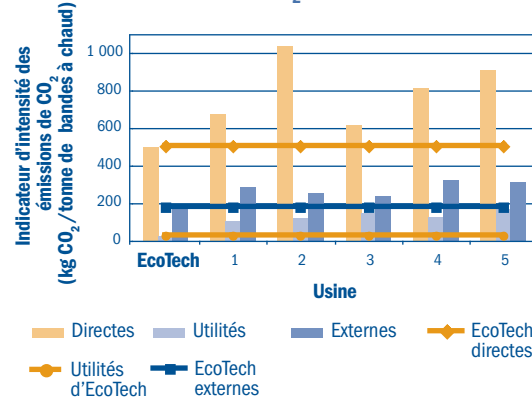
Figure 4-29. Aciérie intégrée à demi-produits – CO₂

Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-30. Usine intégrée à bandes à chaud – Énergie

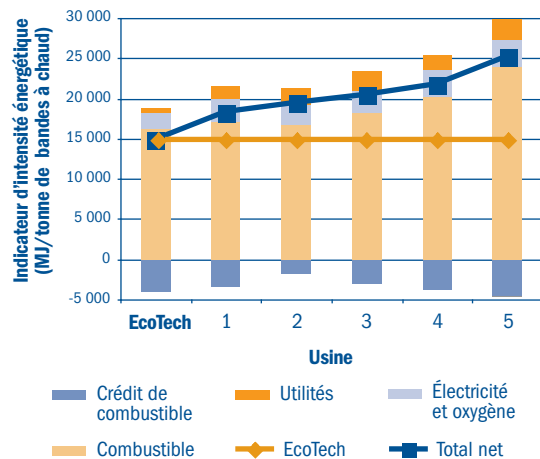


L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

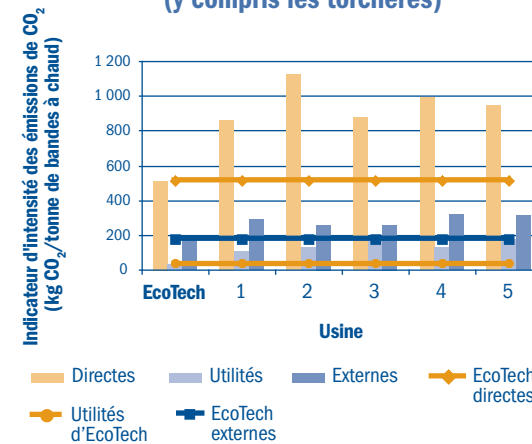
Figure 4-31. Usine intégrée à bandes à chaud – CO₂

Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-32. Usine intégrée à bandes à chaud – Énergie (y compris les torchères)

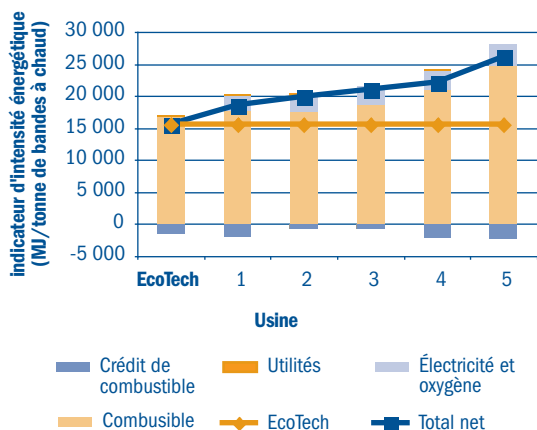


L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

Figure 4-33. Usine intégrée à bandes à chaud – CO₂ (y compris les torchères)

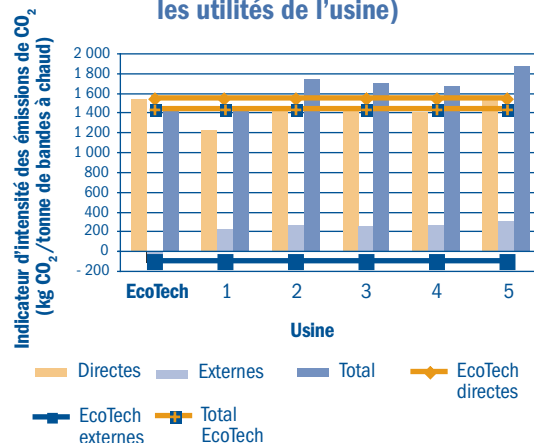
Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-34. Usine intégrée à bandes à chaud – Énergie (y compris les torchères et les utilités de l'usine)



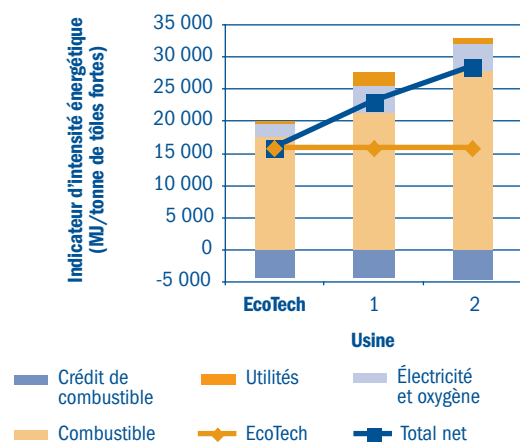
L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

Figure 4-35. Usine intégrée à bandes à chaud – CO₂ (y compris les torchères et les utilités de l'usine)



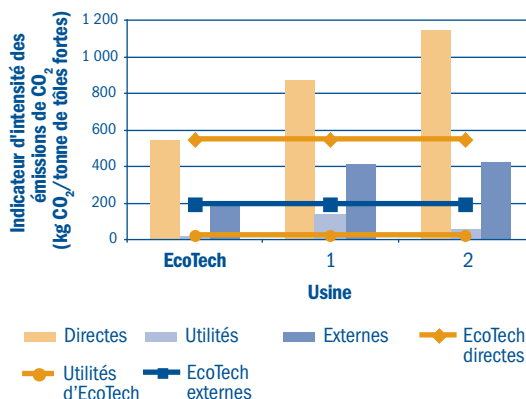
Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-36. Usine intégrée à tôles fortes – Énergie



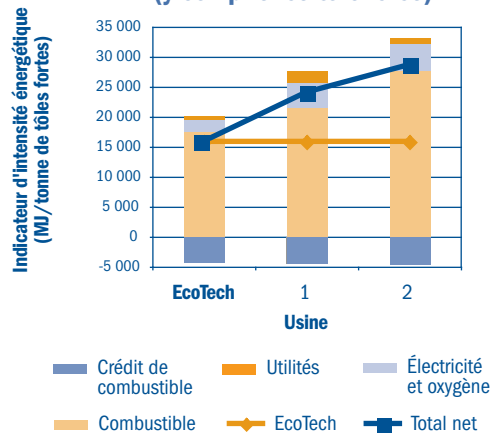
L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

Figure 4-37. Usine intégrée à tôles fortes – CO₂



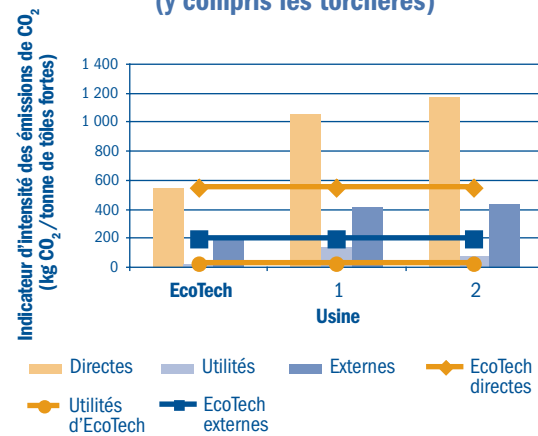
Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-38. Usine intégrée à tôles fortes – Énergie (y compris les torchères)



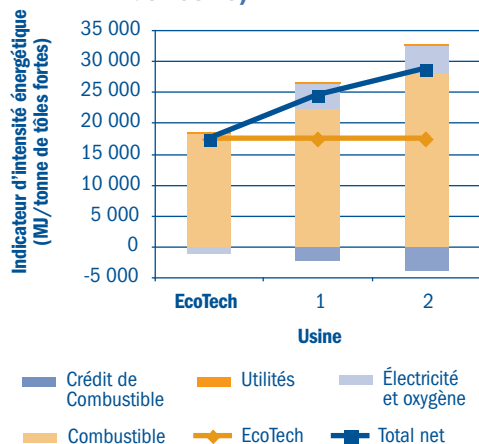
L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

Figure 4-39. Usine intégrée à tôles fortes – CO₂ (y compris les torchères)



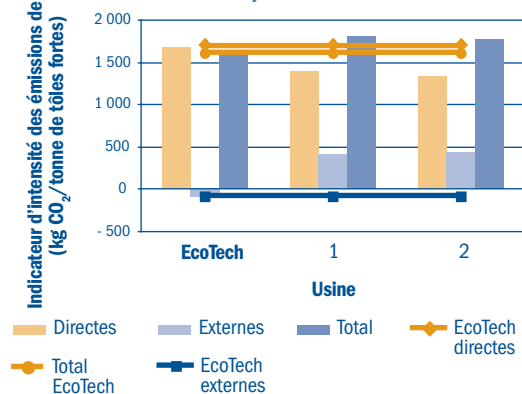
Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-40. Usine intégrée à tôles fortes – Énergie (y compris les torchères et les utilités de l'usine)



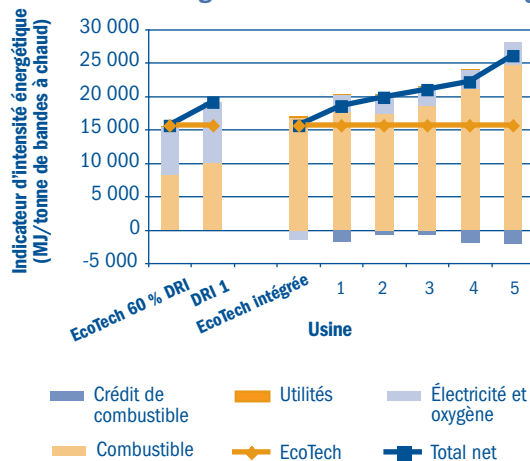
L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

Figure 4-41. Usine intégrée à tôles fortes – CO₂ (y compris les torchères et les utilités de l'usine)



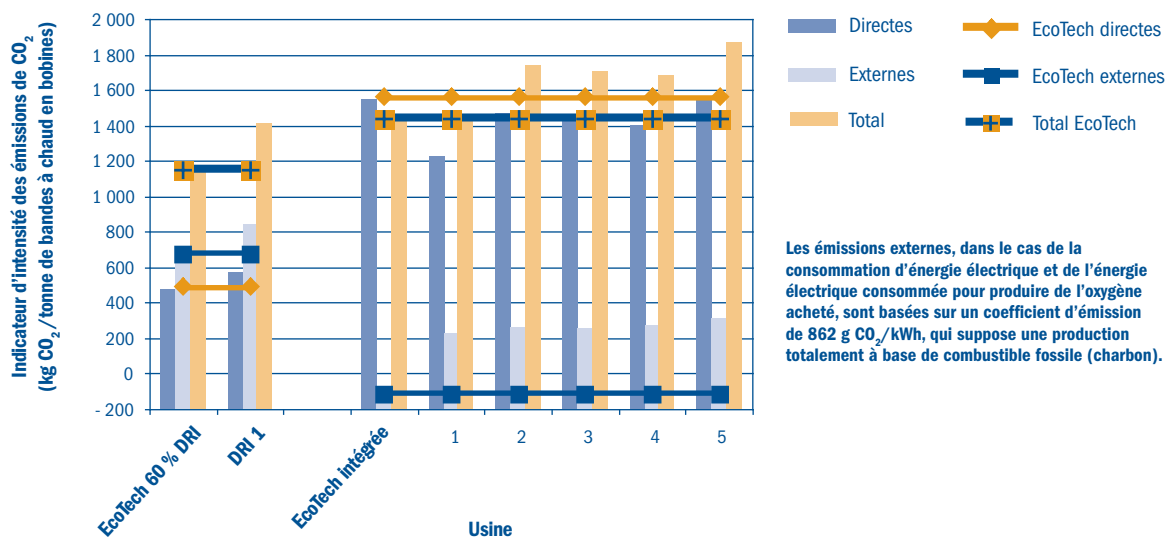
Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-42. Usine de réduction directe et usine intégrée à bandes à chaud – Énergie



L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

Figure 4-43. Usine de réduction directe et usine intégrée à bandes à chaud – CO₂



Les émissions externes, dans le cas de la consommation d'énergie électrique et de l'énergie électrique consommée pour produire de l'oxygène acheté, sont basées sur un coefficient d'émission de 862 g CO₂/kWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon).

Figure 4-44. Surveillance de l'énergie

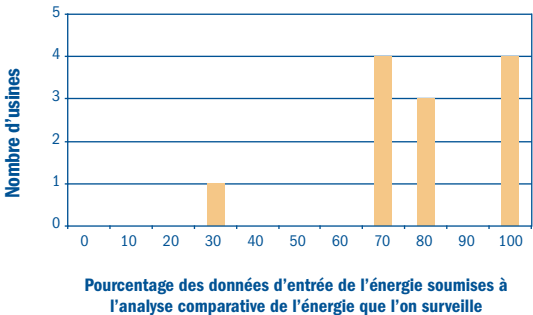


Figure 4-45. Production de rapports en matière d'énergie

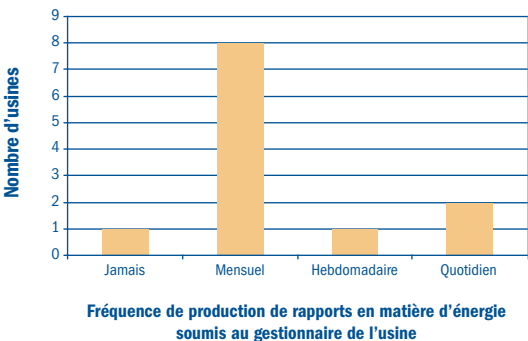


Figure 4-46. Torchères – Énergie et technologie

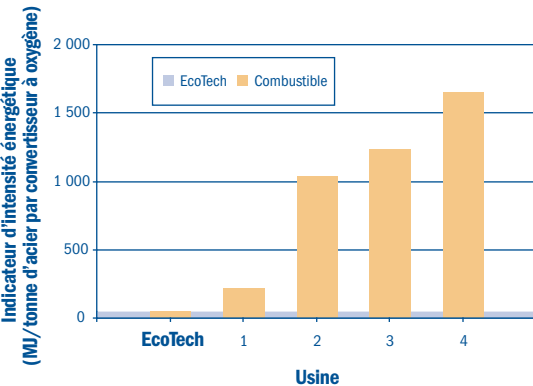
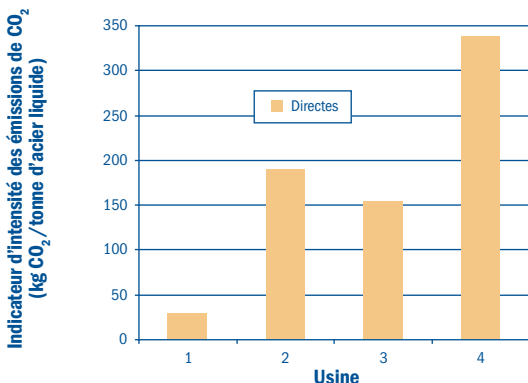
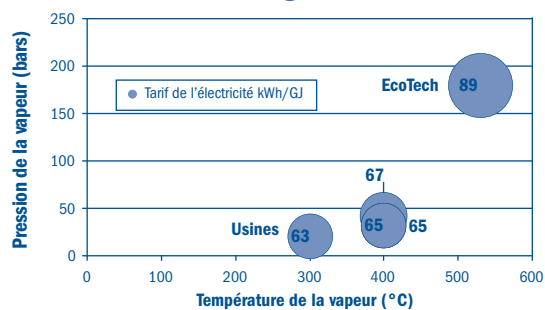


Figure 4-47. Torchères – CO₂



Gestion de la consommation de combustible de sous-produits	1	2	3	4
Pourcentage de production de combustible de sous-produits et utilisation, continuellement surveillé	100	100	87	88
Pourcentage du combustible de sous-produits torchés, continuellement surveillé	75	100	23	95
Pourcentage du temps où le combustible acheté est brûlé et le combustible de sous-produits est torché	75	60	40	100
Système de distribution du combustible à automatisation centrale ou continuellement commandé à la main pour optimiser la concentration du combustible de sous-produits	non	oui	oui	oui

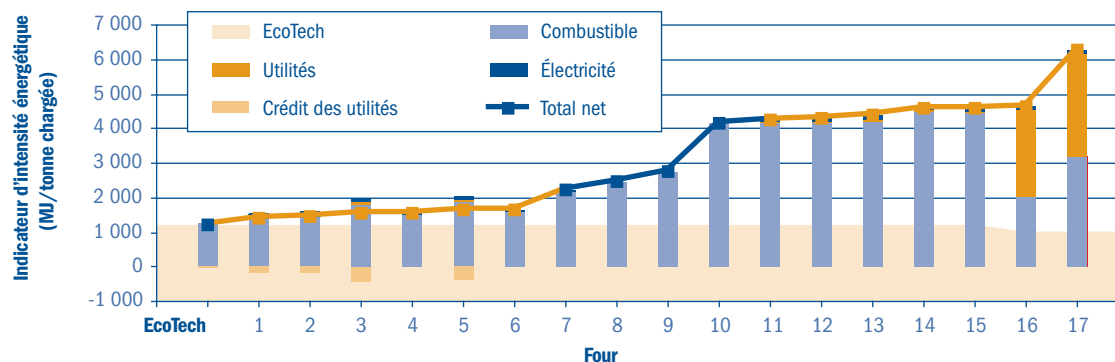
Figure 4-48. Centrale électrique – Rendement et technologie



Technologie ou pratique	EcoTech	Usine			
		1	2	3	4
Production de vapeur					
Pression	180	42	32	32	21
Température (°C)	530	399	399	399	301
Production d'électricité					
MWh/tonne d'acier par convertisseur à oxygène	0,359	0,068	0,012	0	0
Technologie					
Stades de réchauffage de la vapeur	1	0	0	0	0
Stades de régénération	6	1	1	1	1
Rendement					
Consommation d'électricité (kWh/GJ)	89	67	65	65	63
Consommation spécifique de chaleur (MJ/kWh)	11,3	15,0	15,5	15,5	16,0

Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

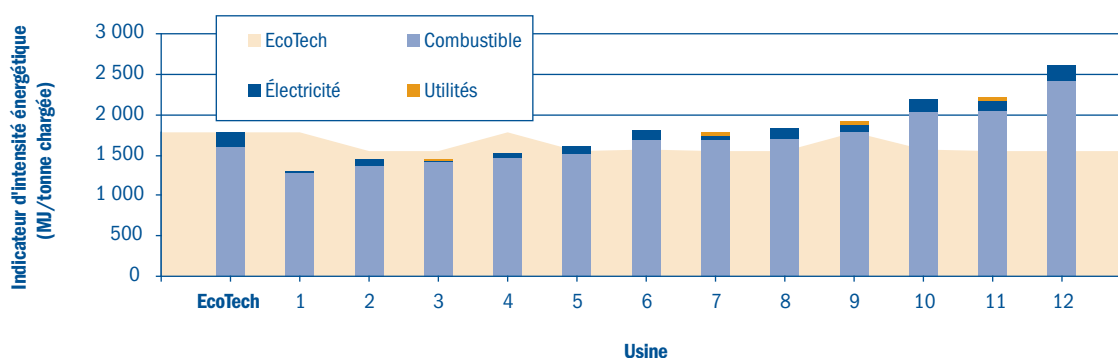
Figure 4-49. Fours de réchauffage des brames – Énergie et technologie



Technologie ou pratique	EcoTech	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Application de four	Mobile	BANDE Mobile	BANDE Mobile	BANDE Poussoir	BANDE Mobile	BANDE Mobile	BANDE Poussoir	BANDE Poussoir	T et B* Mobile	T et B* Mobile	T et B* Mobile	BANDE Poussoir	BANDE Poussoir	BANDE Poussoir	BANDE Poussoir	BANDE Poussoir	TÔLE Poussoir	TÔLE Poussoir
Température de chargement (°C)	200	AMB** 550	AMB** 550	100 450	100 400	350 480	100 425	AMB** 315	AMB** 315	AMB** 371	AMB** 371	AMB** 121	AMB** 232	AMB** 177	AMB** 121	AMB** 93	AMB** 232	AMB** 232
Température de récupération (°C)	450																	
Longueur de la zone de préchauffage de chargement (m)	10	8,8	8,8	6,76	10,82	9,14	6,76	3,4	10	0	0	12,192	7,9	7,0	12,2	7,0	8,7	8,7
Chaudières à vapeur utilisant la chaleur récupérée	AllTech	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	oui	oui
Récupération de la chaleur dans le refroidissement des patins	oui	oui	oui	oui	non	non	oui	non	0	0	0	non	non	non	non	non	non	non
Patins de compensation ou étagés	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	non	non	non	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Patins à double isolation	AllTech	non	non	non	oui	non	non	non	non	oui	oui	non	non	non	non	non	non	non
Contrôle de niveau I	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Contrôle de niveau II	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non	non	oui	oui
Contrôle de niveau III	oui	oui	oui	non	non	non	non	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non	non	oui	oui

L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net). *Tôles et bandes (T et B) **Ambiante (AMB)

Figure 4-50. Fours de réchauffage des billettes et des blooms – Énergie et technologie



Technologie ou pratique	EcoTech	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Application de four	Mobile	Fil machine	Barres	Barres	Fil machine	Barres	Autres	Barres	Barres	Fil machine	Autres	Barres	Barres
Type de four	Mobile	Poussoir	Mobile	Poussoir	Mobile	Poussoir	Mobile	Poussoir	Mobile	Poussoir	Poussoir	Mobile	Mobile
Température de chargement (°C)	400	ambiant	ambiant	ambiant	ambiant	ambiant	564	ambiant	ambiant	ambiant	ambiant	ambiant	ambiant
Température de récupération (°C)	oui	6,5	8,7	400	430	315	385	ambiant	450	316	315	399	0
Longueur de la zone de préchauffage de chargement (m)		non	non	2	6	8,53	3	1,8	0	0	0	0	2,4
Chaudières à vapeur utilisant la chaleur récupérée		non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Récupération de la chaleur dans le refroidissement des patins		non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Patins de compensation ou étagés		non	non	non	oui	non	non	non	non	non	non	oui	non
Patins à double isolation		non	non	non	non	non	non	non	non	non	non	oui	non
Contrôle de niveau I		oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Contrôle de niveau II		oui	non	non	oui	oui	oui	oui	non	non	oui	oui	oui
Contrôle de niveau III		oui	non	non	oui	non	oui	non	non	non	non	oui	non

L'ensemble de la consommation d'énergie électrique, dont la consommation d'énergie électrique pour produire de l'oxygène acheté, a été converti en intrant de combustible fossile à partir d'un facteur de 9 200 MJ/MWh, qui suppose une production totalement à base de combustible fossile (charbon). Les indicateurs d'intensité énergétique de la consommation de combustible sont basés sur le pouvoir calorifique inférieur (net).

Figure 4-51. Température de préchauffage de l'air de combustion

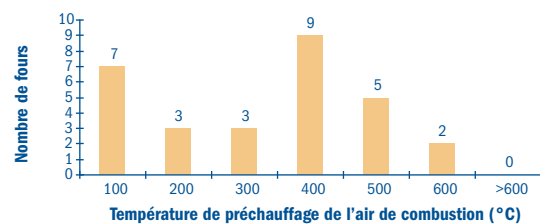


Figure 4-52. Longueur de la zone de préchauffage de chargement non soumise à la flamme

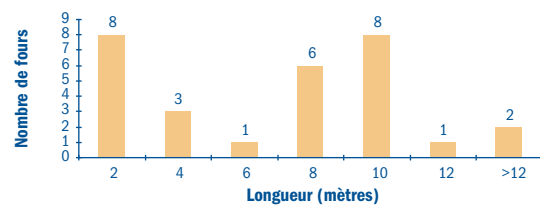
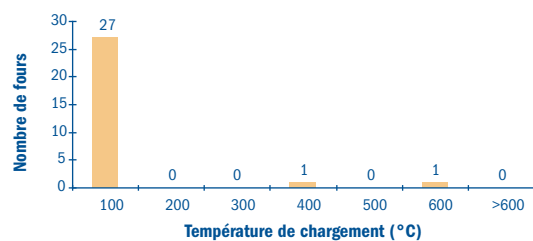


Figure 4-53. Température de chargement moyenne du four



ANNEXES



ANNEXE A – TECHNOLOGIES ECOTECH ET INDICATEURS D'INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE ET D'INTENSITÉ DES ÉMISSIONS DE CO₂

FABRICATION DU COKE			SOURCES*
Aspiration à haute pression de jets d'ammoniaque		EcoTech	Page 36, section 3.1.7
Entraînements à vitesse variable		EcoTech	Page 36, section 3.1.7
Extinction à sec du coke		AllTech	Page 36, section 3.1.7
Séchage		AllTech	Page 36, section 3.1.7
Contrôle amélioré de la combustion		CANMET	
	INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE (MJ/tcs)	INTENSITÉ DES ÉMISSIONS DE CO ₂ (kg/tcs)	
Sous-combustion	3 200	144	Page 36, section 3.1.7
Vapeur pour usine de récupération de sous-produits	290	21	Page 36, section 3.1.7
Électricité	286	27	Page 36, section 3.1.7
Total	3 776	192	
ÉLABORATION DU FER			
COWPERS			SOURCES
Récupération de chaleur du gaz de combustion		EcoTech	Page 64, section 3.3.7.1
Fonctionnement du cowper disposé en quinconce/en parallèle		EcoTech	Page 64, section 3.3.7.1
Enrichissement d'oxygène de la fonte à l'air froid		EcoTech	Page 64, section 3.3.7.1
35 m ³ /tonne de fonte liquide		AllTech	Page 64, section 3.3.7.1
50 m ³ /tonne de fonte liquide		EcoTech	Page 64, section 3.3.7.1
Contrôle de la combustion (5 % d'air excédentaire)		EcoTech	Page 64, section 3.3.7.1
Efficacité des cowpers (plus de 85 %)		EcoTech	Page 64, section 3.3.7.1
	INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE (MJ/tfl)		
Gaz du haut fourneau	1 303		Page 71, tableau 7
Gaz de cokerie	231		Page 71, tableau 7
Électricité	28		Page 68, section 3.3.9
Total	1 562		
PRÉPARATION DU CHARBON PULVÉRISÉ			SOURCE
	INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE (MJ/tfl)		
Électricité	18		Page 68, section 3.3.9

*Consommation d'énergie dans l'industrie sidérurgique, Comité de la technologie, International Iron and Steel Institute, Bruxelles, 1998.

SOUFFLANTES			SOURCES
Soufflantes à débit axial		EcoTech	Page 64, section 3.3.7.2
	INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE (MJ/tfl)		
Vapeur	402		
Électricité	328		Page 71, tableau 7
Total	730		Page 71, tableau 7
HAUT FOURNEAU			SOURCES
Turbine de récupération du gaz du gueulard		EcoTech	Page 65, section 3.3.7.3
Système de contrôle des émissions de la moulerie		EcoTech	Page 67, section 3.3.9
7 KWh/tfl			
Produits injectés dans le haut fourneau			
Taux de coke 361 kg/tfl		EcoTech	Page 65, section 3.3.7.3
Taux de coke 297 kg/tfl		AllTech	Page 65, section 3.3.7.3
	INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE (MJ/tfl)		
Coke	10 827		Page 71, tableau 7
Pétrole	1 320		Page 71, tableau 7
Charbon	2 550		Page 71, tableau 7
Gaz naturel	-		
Vapeur	-		
Électricité	184		Page 68, section 3.3.9
Oxygène	209		Page 71, tableau 7
Autres	-		
Carbone	(1 443)		Page 65, section 3.3.7.3
Gaz du haut fourneau	(4 700)		Page 71, tableau 7
Électricité	(166)		Page 71, tableau 7
Total net	8 781		

TOTAL DE L'ÉLABORATION DU FER

	INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE (MJ/tfl)	INTENSITÉ DES ÉMISSIONS DE CO ₂ (kg/tfl)	SOURCES
Coke	10 827	1 167	Page 71, tableau 7
Pétrole	1 320	103	Page 71, tableau 7
Charbon	2 550	236	Page 71, tableau 7
Gaz naturel	-	-	
Gaz de cokerie (cowpers)	231	10	Page 71, tableau 7
Gaz du haut fourneau (cowpers)	1 303	365	Page 71, tableau 7
Gaz du haut fourneau (crédit)	(4 700)	(1 316)	Page 71, tableau 7
Vapeur (soufflage)	402	33	Page 71, tableau 7
Électricité	230	21	Page 68, section 3.3.9
Électricité (soufflage)	328	30	Page 68, section 3.3.9
Électricité (crédit)	(322)	(30)	Page 71, tableau 7
Oxygène	209	19	Page 71, tableau 7
Carbone	(1 443)	(165)	Page 65, section 3.3.7.3
Total net	10 935	473	

ÉLABORATION DE L'ACIER PAR CONVERTISSEUR À OXYGÈNE

Récupération du gaz à système d'épuration de gaz sec
Récupération de la vapeur
Gestion de la poche de coulée
Brassage du fond du récipient
Fonctionnement d'un seul récipient

EcoTech
CANMET
CANMET
CANMET
CANMET

Page 78, section 3.4.7

Rendement

900 kg fl/tal

Page 78, section 3.4.7

	INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE (MJ/tal)	INTENSITÉ DES ÉMISSIONS DE CO ₂ (kg/tal)	SOURCES
Oxygène	311	29	Page 78, section 3.4.7
Électricité	239	22	Page 78, section 3.4.7
Autres	172	-	Page 78, section 3.4.7
Carbone	1 299	148	Page 78, section 3.4.7
Vapeur (crédit)	(186)	(14)	Page 78, section 3.4.7
Gaz du convertisseur à oxygène (crédit)	(748)	(138)	Page 78, section 3.4.7
Total net	1 087	47	

COULÉE CONTINUE

Rendement

0,98

SOURCES

Page 78, section 3.4.7

Électricité

**INTENSITÉ
ÉNERGÉTIQUE**
(MJ/tac)

**INTENSITÉ DES
ÉMISSIONS
DE CO₂**
(kg/tac)

Page 78, section 3.4.7

Autres

71

7

Page 78, section 3.4.7

Total

30

2

101**9****ÉLABORATION DE L'ACIER PAR FOUR
ÉLECTRIQUE À ARC (FEA)**
**INTENSITÉ
ÉNERGÉTIQUE**
(MJ/tal)

**INTENSITÉ DES
ÉMISSIONS
DE CO₂**
(kg/tal)
SOURCES

Électricité

4 361

406

Page 91, section 3.5.7.1

Oxygène

222

21

Page 91, section 3.5.7.1

Gaz naturel

158

9

Page 91, section 3.5.7.1

Carbone

414

47

Page 91, section 3.5.7.1

Total**5 155****483**

IS 5079 à la page 91

**ÉLABORATION DE L'ACIER PAR FEA
ET COULÉE CONTINUE**

Intrant de matières t/t (=1/rendement)

INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE (MJ/t)**FEA****COULÉE****FEA et COULÉE**

Électricité

4 361

71

4 519

Oxygène

222

30

226

Gaz naturel

158

47

191

Carbone

414

101

422

Total**5 155****101****5 359****INTENSITÉ DES ÉMISSIONS DE CO₂ (kg/tac)****FEA****COULÉE****FEA et COULÉE**

Électricité

406

7,0

421

Oxygène

21

2,0

21

Gaz naturel

9

48

9

Carbone

47

9,0

48

Autres

483

9,0

500

Total**483****9,0****500****NOTA :**

La production d'une tonne d'acier coulé demande un intrant de 1 020 kg d'acier liquide. Donc, l'indicateur d'intensité énergétique du FEA et coulée = 1,02 × l'indicateur d'intensité énergétique de FEA + facteur d'intensité énergétique de la coulée.

LAMINOIR À BANDES À CHAUD

« Coilbox » pour barre de transfert
Couvercle thermique sur les tables de transfert et de livraison du laminoir

Laminage sans ordonnancement

Réchauffeurs de rives de barres de transfert

Laminage élevé de rives

Moteur de cage dégrossisseuse CA

(Voir également Fours de réchauffage des brames)

Rendement	0,98		
	INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE	INTENSITÉ DES ÉMISSIONS DE CO₂	
	(MJ/talc)	(kg/talc)	
Gaz naturel	1 250	69	Page 108, section 3.6.7
Électricité	721	67	Page 108, section 3.6.7
Autres	5	1	Page 108, section 3.6.7
Vapeur	37	3	Page 108, section 3.6.7
Crédit d'énergie récupérée	(35)	(3)	Page 108, section 3.6.7
Total net	1 978	137	

AlITech

SOURCES

Page 116, tableau 10

EcoTech

Page 116, tableau 10

EcoTech

Page 116, tableau 10

EcoTech

Page 116, tableau 10

AlITech

Page 116, tableau 10

EcoTech

Page 116, tableau 10

Page 115, tableau 9

LAMINOIR À TÔLES FORTES

(Voir Fours de réchauffage des brames)

Rendement	0,9		
	INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE	INTENSITÉ DES ÉMISSIONS DE CO₂	
	(MJ/talc)	(kg/talc)	
Combustible	1 229	68	Page 120, section 3.7.6
Électricité	730	68	Page 120, section 3.7.6
Crédit d'énergie récupérée	(150)	(11)	Page 120, section 3.7.6
Total net	1 809	125	

SOURCES

Page 120, section 3.7.6

Page 121, tableau 1

LAMINOIRS À PROFILÉS

LAMINOIR À PROFILÉS LÉGERS (FIL MACHINE)

(Voir Fours de réchauffage des billettes)

Rendement	0,96		SOURCES
			Page 131, section 3.8.7.3
			Page 133, tableau 3
	INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE	INTENSITÉ DES ÉMISSIONS DE CO₂	
	(MJ/talc)	(kg/talc)	
Gaz naturel	1 600	89	Page 131, section 3.8.7.3
Électricité	966	90	Page 131, section 3.8.7.3
Total	2 566	179	

LAMINOIR À PROFILÉS MOYENS (BARRES)

(Voir Fours de réchauffage des billettes)

Rendement	0,97		SOURCES
			Page 130, section 3.8.7.2
			Page 132, tableau 2
	INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE	INTENSITÉ DES ÉMISSIONS DE CO₂	
	(MJ/talc)	(kg/talc)	
Gaz naturel	1 500	83	Page 130, section 3.8.7.2
Électricité	736	68	Page 130, section 3.8.7.2
Total	2 236	151	

LAMINOIR À PROFILÉS LOURDS (BLOOM ET ACIER DE CONSTRUCTION)

(Voir Fours de réchauffage des billettes)

			SOURCES
			Page 130, section 3.8.7.1
	INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE	INTENSITÉ DES ÉMISSIONS DE CO₂	
	(MJ/talc)	(kg/talc)	
Gaz naturel	1 500	83	Page 130, section 3.8.7.1
Électricité	920	86	Page 130, section 3.8.7.1
Total	2 420	169	

FOURS DE RÉCHAUFFAGE DES BRAMES

FOURS DE LAMINOIR À BANDES À CHAUD

Température moyenne de chargement (200 °C)

Récupération

Longueur de zone de préchauffage de
chargement (10 m)

Chaudières à vapeur utilisant la chaleur récupérée

Récupération de la chaleur dans le refroidissement
des patins

Patins de compensation ou étagés

Patins à double isolation

Contrôle de niveau I

Contrôle de niveau II

Contrôle de niveau III

EcoTech

EcoTech

EcoTech

EcoTech

AllTech

EcoTech

EcoTech

EcoTech

SOURCES

Page 108, section 3.6.7

Page 116, tableau 10

Page 116, tableau 10

Page 116, tableau 10

Page 116, tableau 10

Page 116, tableau 10

Page 116, tableau 10

Page 116, tableau 10

INTENSITÉ
ÉNERGÉTIQUE
(MJ/talc)

Gaz naturel

1 250

Électricité

17

Crédit d'énergie récupérée

(35)

Total net

1 232

Page 108, section 3.6.7

Page 108, section 3.6.7

Page 108, section 3.6.7

FOURS DE LAMINOIR À TÔLES FORTES

Température moyenne de chargement (300 °C)

Température de récupération (450 °C)

Longueur de zone de préchauffage de
chargement (10 m)

Chaudières à vapeur utilisant la chaleur récupérée

Récupération de la chaleur dans le refroidissement
des patins

Patins de compensation ou étagés

Patins à double isolation

Contrôle de niveau I

Contrôle de niveau II

Contrôle de niveau III

EcoTech

EcoTech

EcoTech

SOURCES

Page 120, section 3.7.6

Page 120, section 3.7.6

Page 120, section 3.7.6

INTENSITÉ
ÉNERGÉTIQUE
(MJ/talc)

Combustible

1 010

Électricité

150

Crédit d'énergie récupérée

(150)

Total net

1 010

Page 120, section 3.7.6

Page 120, section 3.7.6

Page 120, section 3.7.6

FOURS DE RÉCHAUFFAGE DES BILLETES ET DES BLOOMS

FOUR DE LAMINOIR À PROFILÉS LÉGERS (FIL MACHINE) Combustible total Électricité Total	INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE MJ/talc 1 600 175 1 775		SOURCES Page 131, section 3.8.7.3 Page 135, tableau 6
LAMINOIR À PROFILÉS MOYENS (BARRES) Combustible total Électricité Total	INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE MJ/talc 1 500 55 1 555		SOURCES Page 130, section 3.8.7.2 Page 134, tableau 5
LAMINOIR À PROFILÉS LOURDS (ACIER DE CONSTRUCTION) Combustible total Électricité Total	INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE MJ/talc 1 500 64 1 564		SOURCES Page 130, section 3.8.7.1 Page 134, tableau 4
TORCHÈRES GAZ DE COKERIE Crédit GC 1 % pour inversions GAZ DU HAUT FOURNEAU Crédit du gaz du gueulard Purge max. de 0,4 % GAZ DU CONVERTISSEUR À OXYGÈNE Crédit du gaz Purge max. de 0,4 %	INTENSITÉ ÉNERGÉTIQUE MJ/tcs 9 000 90 MJ/tfl 4 700 18,8 MJ/tal 748 2,99	COEFFICIENT D'ÉMISSION DE CO₂ kg CO₂/MJ 0,045 0,28 0,185	MOYENNE DES CHIFFRES SIGNALÉS RAISONNABLE POUR LES USINES À UNE BATTERIE SOURCES Page 71, tableau 7 Page 235, section 6.3.2 SOURCE Page 235, section 6.3.2

ANNEXE B – COEFFICIENTS D'ÉMISSION DE CO₂

COEFFICIENTS D'ÉMISSION DE CO₂

Carbone	3 664 kg CO ₂ /t	32 066 MJ/t	0,114 kg CO ₂ /MJ
Charbon	3 000 kg CO ₂ /t	32 373 MJ/t	0,093 kg CO ₂ /MJ
Coke	3 227 kg CO ₂ /t	29 951 MJ/t	0,108 kg CO ₂ /MJ
Gaz de cokerie	45 kg CO ₂ /GJ	- kJ/m ³ n	0,045 kg CO ₂ /MJ
Gaz du haut fourneau	280 kg CO ₂ /GJ	- kJ/m ³ n	0,280 kg CO ₂ /MJ
Gaz du convertisseur à oxygène	185 kg CO ₂ /GJ	- kJ/m ³ n	0,185 kg CO ₂ /MJ
Autres gaz d'élaboration du fer	- kg CO ₂ /GJ	0 kJ/m ³ n	- kg CO ₂ /MJ
Gaz naturel	56 kg CO ₂ /GJ	37 000 kJ/m ³ n	0,056 kg CO ₂ /MJ
Gaz de pétrole liquéfiés (GPL)	- -	- -	- kg CO ₂ /MJ
Pétrole lourd	3 170 kg CO ₂ /t	40 569 MJ/t	0,078 kg CO ₂ /MJ
Pétrole léger	3 170 kg CO ₂ /t	- MJ/t	- kg CO ₂ /MJ
Vapeur haute pression	267 kg CO ₂ /t	3 300 MJ/t	0,081 kg CO ₂ /MJ
Vapeur pression moyenne	240 kg CO ₂ /t	3 200 MJ/t	0,075 kg CO ₂ /MJ
Vapeur basse pression	224 kg CO ₂ /t	3 100 MJ/t	0,072 kg CO ₂ /MJ
Électricité	856 g CO ₂ /kWh	9 200 kJ/kWh	0,093 kg CO ₂ /MJ
Oxygène	556 g CO ₂ /m ³ n	650 Wh/m ³ n	0,093 kg CO ₂ /MJ
Azote	171 g CO ₂ /m ³ n	200 Wh/m ³ n	0,093 kg CO ₂ /MJ
Air comprimé	103 g CO ₂ /m ³ n	120 Wh/m ³ n	0,093 kg CO ₂ /MJ
Eau industrielle	86 g CO ₂ /km ³	100 Wh/m ³	0,093 kg CO ₂ /MJ

Électricité

856 kg/MWh

SOURCE

Page 254, section 7.8

NOTA : Les chiffres moyens de l'année dans le cas d'Ontario Hydro s'échelonnent de 850 à 890 kg/MWh selon la combinaison de charbon, de pétrole et de gaz naturel.

SYMBOLES DE L'ANNEXE A

Symbole	Désignation
MJ/tcs	mégajoules par tonne de coke sec
kg/tcs	kilogrammes par tonne de coke sec
MJ/tfl	mégajoules par tonne de fonte liquide
kg/tfl	kilogrammes par tonne de fonte liquide
kWh/tfl	kilowattheures par tonne de fonte liquide
kg fl/tal	kilogrammes de fonte liquide par tonne d'acier liquide
MJ/tal	mégajoules par tonne d'acier liquide
kg/tal	kilogrammes par tonne d'acier liquide
t/t	tonne par tonne
MJ/tac	mégajoules par tonne d'acier coulé
kg/tac	kilogrammes par tonne d'acier coulé
MJ/talc	mégajoules par tonne d'acier laminé à chaud
kg/talc	kilogrammes par tonne d'acier laminé à chaud
kg CO ₂ /MJ	kilogrammes de dioxyde de carbone par mégajoule

SYMBOLES DE L'ANNEXE B

Symbole	Désignation
kg CO ₂ /t	kilogrammes de dioxyde de carbone par tonne
kg CO ₂ /GJ	kilogrammes de dioxyde de carbone par gigajoule
g CO ₂ /kWh	grammes de dioxyde de carbone par kilowattheure
g CO ₂ /m ³ n	grammes de dioxyde de carbone par mètre cube normal*
g CO ₂ /km ³	grammes de dioxyde de carbone par mille mètres cubes (d'eau industrielle)
MJ/t	mégajoules par tonne
kJ/m ³ n	kilojoules par mètre cube normal (de produit gazeux)
kJ/kWh	kilojoules par kilowattheure
Wh/m ³ n	wattheures par mètre cube normal (de produit gazeux)
kg CO ₂ /MJ	kilogrammes de dioxyde de carbone par mégajoule
kg/MWh	kilogrammes par mégawattheure

*L'unité de mesure de tous les produits gazeux est le mètre cube normal (m³n). Un mètre cube normal correspond à un mètre cube de gaz à la pression et à la température standard.