



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada



écoÉNERGIE
une initiative d'écoACTION

LES PRODUCTEURS CANADIENS D'AMMONIAC

ANALYSE COMPARATIVE DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET DES ÉMISSIONS DE DIOXYDE DE CARBONE



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



Canada

En collaboration avec l'Institut canadien des engrais (ICE) et le Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne (PEEIC)

Pour obtenir plus de 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 de Ressources naturelles Canada
580, rue Booth, 18^e étage
Ottawa (Ontario) K1A 0E4

Tél. : 613-995-6839
Télé. : 613-992-3161
Courriel : cipec-peeic@rncan.gc.ca
Site Web : oee.rncan.gc.ca/peeic

ou

L'Institut canadien des engrais
350, rue Sparks, bureau 802
Ottawa (Ontario) K1R 7S8

Tél. : 613-230-2600
Télé. : 613-230-5142
Courriel : fertilizer@cfi.ca
Site Web : www.cfi.ca



Photos : Canadian Fertilizer Ltd. et Agrium Inc.

Also available in English under the title: Canadian Ammonia Producers – Benchmarking Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions

Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives Canada

Les producteurs canadiens d'ammoniac, analyse comparative de l'efficacité énergétique et des émissions de dioxyde de carbone / préparé pour l'Institut canadien des engrais et Ressources naturelles Canada.

Publié par le Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne.
Comprend des réf. bibliogr.: p. 30

N° de cat. M144-155/2007F-PDF (En ligne)
ISBN 978-0-662-09474-6

1. Ammoniac – Industrie – Consommation d'énergie – Canada. 2. Ammoniac – Industrie – Déchets – Élimination – Canada. 3. Gaz carbonique – Aspect de l'environnement – Canada. 4. Audit énergétique – Canada. I. Institut canadien des engrais II. Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne III. Canada. Ressources naturelles Canada IV. Titre: Analyse comparative de l'efficacité énergétique et des émissions de dioxyde de carbone.

J163.5.S83B4614 2007

338.4'7661340682

C2007-980161-7

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2008



Papier recyclé

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	2
1.1 L'industrie canadienne de l'ammoniac	2
1.2 Consommation d'énergie et émissions de dioxyde de carbone provenant de la production d'ammoniac	3
2. ANALYSE COMPARATIVE	6
2.1 Objectifs de l'analyse comparative	6
2.2 Méthodologie	7
3. RÉSULTATS DE L'ANALYSE COMPARATIVE	10
Section 3.1 : Analyse comparative de l'efficacité énergétique et des émissions de CO ₂ des producteurs canadiens d'ammoniac (2000-2002)	11
3.1.1 Production d'ammoniac et utilisation d'énergie	12
3.1.2 Production d'ammoniac et émissions de CO ₂	13
Section 3.2 : Comparaison de l'efficacité énergétique et des émissions de CO ₂ à l'échelle mondiale (2002)	15
3.2.1 Mesures d'efficacité énergétique pour la production d'ammoniac	15
3.2.2 Estimation des émissions de CO ₂ provenant de la production d'ammoniac ..	16
Section 3.3 : Meilleur rendement à l'échelle mondiale et projections	19
3.3.1 Analyse comparative à l'échelle mondiale	19
3.3.2 Le Canada parmi les meilleurs	20
3.3.3 Avenir des concepts d'usine d'ammoniac à faible consommation d'énergie ...	20
ANNEXES	24
ANNEXE A : ABRÉVIATIONS	24
ANNEXE B : MÉTHODOLOGIE DE NORMALISATION DE L'ORGANISME PLANT SURVEYS INTERNATIONAL, INC. LIÉE À L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES USINES D'AMMONIAC ..	25
ANNEXE C : DONNÉES HISTORIQUES	29
ANNEXE D : RÉFÉRENCES	30

I

INTRODUCTION



1. INTRODUCTION

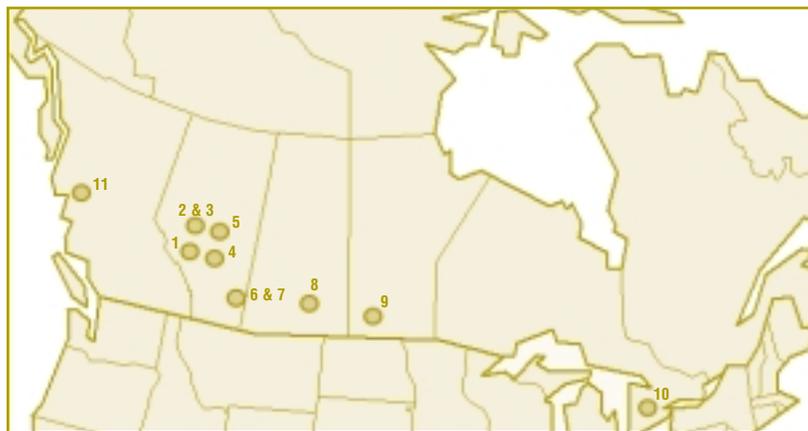
Le Canada fournit environ 12 p. 100 de la matière organique sur le marché mondial. L'industrie des engrais apporte annuellement à l'économie canadienne plus de 6 milliards de dollars. La plus grande partie de la production canadienne de matériel de fertilisation est sous forme d'azote ou de potasse. L'ammoniac anhydre (NH₃), un important engrais azoté, est la composante de base utilisée dans la production en aval d'engrais azotés. La production d'ammoniac est l'étape la plus énergivore de la production d'engrais azotés.

L'Office de l'efficacité énergétique (OEE) de Ressources naturelles Canada (RNCa) a collaboré avec l'Institut canadien des engrais (ICE) en fournissant de l'aide pour la présente étude, laquelle s'inscrit dans l'effort continu de RNCa de promouvoir une utilisation plus efficace de l'énergie au Canada. Ce document présente les résultats de l'analyse comparative de l'efficacité énergétique et des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'industrie canadienne de production d'ammoniac. Les résultats de l'analyse comparative pour l'industrie de la potasse sont publiés séparément.

1.1 L'industrie canadienne de l'ammoniac

Le Canada compte 11 usines d'ammoniac (figure 1), produisant de 4 à 5 millions de tonnes chaque année. Près des 25 p. 100 de l'ammoniac produit au Canada vont aux marchés agricoles de l'Amérique du Nord qui l'utilisent directement. Environ 55 p. 100 servent à la production d'engrais granulaire d'urée et approximativement 20 p. 100 sont utilisés pour produire d'autres engrais azotés et servir à diverses autres utilisations industrielles.

Figure 1 : Usines d'ammoniac au Canada



1. Carseland, Alb.
2. Fort Saskatchewan, Sask.
3. Fort Saskatchewan, Alb.
4. Joffre, Alb.
5. Redwater, Alb.
6. Medicine Hat, Alb.
7. Medicine Hat, Alb.
8. Belle Plaine, Sask.
9. Brandon, Man.
10. Courtright, Ont.
11. Kitimat, C.-B.

Les usines canadiennes d'ammoniac, sauf une, qui est en Ontario, sont situées dans l'ouest du pays. Toutes les usines situées au Canada, à l'exception de l'usine de Kitimat, sont détenues et exploitées par des membres de l'ICE.

1.2 Consommation d'énergie et émissions de dioxyde de carbone provenant de la production d'ammoniac

L'énergie, sous forme de gaz naturel, est un élément important de la production d'ammoniac au Canada. Les coûts du gaz naturel représentent de 70 à 90 p. 100 du coût des intrants; les producteurs d'ammoniac sont donc très intéressés à réduire leur consommation pour demeurer compétitifs. L'industrie des engrais consomme environ 8 p. 100 du gaz naturel utilisé au Canada.

Le gaz naturel utilisé dans les usines d'ammoniac produit deux importantes sources d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂) – *combustible* et *procédé*. Les émissions de CO₂ générées par le *combustible* proviennent de la combustion du gaz naturel (ou d'autres combustibles hydrocarburés) apportant la chaleur pour le reformage vapeur/gaz, ou servant à alimenter les chaudières à vapeur, les dispositifs de chauffage, les turbines à gaz et d'autres équipements de l'usine d'ammoniac. Pendant la combustion, tout le carbone du combustible est converti en CO₂ et rejeté dans l'atmosphère dans les gaz de carneau.

Les émissions de CO₂ générées par le *procédé* proviennent de la conversion en CO₂ et en hydrogène (H₂) du carbone contenu dans le gaz naturel utilisé comme matière de base pendant la production du gaz de synthèse. Le gaz hydrogène est combiné à l'azote provenant de l'air au cours d'un procédé de production subséquent et forme l'ammoniac (NH₃). Le système de suppression du CO₂ de l'usine retire ce composé chimique du flux gazeux issu du procédé afin d'éviter la contamination du catalyseur de synthèse de l'ammoniac. Le CO₂ relativement pur est normalement rejeté dans l'atmosphère à moins de lui trouver une autre utilisation.

Un grand nombre d'usines utilisent une partie ou l'ensemble du CO₂ généré par le procédé pour produire de l'urée. Cette pratique procure un avantage considérable parce qu'elle réduit la quantité du CO₂ issu du procédé et émis dans l'atmosphère. La situation du Canada est unique puisque chacune des usines d'ammoniac participantes comprend une ou plusieurs usines d'urée. Les usines canadiennes d'ammoniac récupèrent donc un pourcentage plus élevé des émissions de CO₂ générées par le procédé, par rapport aux producteurs des autres pays.

2

ANALYSE
COMPARATIVE



2. ANALYSE COMPARATIVE

L'industrie canadienne des engrais est déterminée à réduire de façon efficiente les émissions de CO₂ produites par les usines d'ammoniac et qui contribuent aux gaz à effet de serre (GES). Dans le cadre de cet engagement, l'Institut canadien des engrais (ICE) participe activement au Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne (PEEIC) de Ressources naturelles Canada (RNCAN).

Le PEEIC aide l'industrie canadienne à améliorer ses résultats nets au moyen d'une utilisation plus efficace de l'énergie. Le PEEIC est une collaboration unique qui existe entre le gouvernement du Canada et l'industrie en vue d'offrir plusieurs services visant à aider chaque secteur industriel du Canada à élaborer des objectifs d'efficacité énergétique et des plans d'action. Avec l'industrie, le PEEIC définit des objectifs d'efficacité énergétique propres à chacun des secteurs, élabore et met en œuvre des plans d'action pour les réaliser, et évalue et signale les progrès dans son rapport annuel.

En octobre 2003, l'ICE et le PEEIC ont mandaté conjointement la firme Plant Surveys International, Inc. (PSI), une entreprise reconnue pour son expertise en analyse comparative à l'échelle mondiale des usines d'ammoniac et des émissions de CO₂, pour la production du rapport *Energy Efficiency and CO₂ Emissions Benchmarking Study of CFI Ammonia Producers 2000–2002*. Dix usines canadiennes d'ammoniac, exploitées par six entreprises, ont participé à l'étude.

2.1 Objectifs de l'analyse comparative

L'analyse comparative aide les usines canadiennes d'ammoniac à repérer les possibilités d'améliorer leur efficacité énergétique et de réduire leurs émissions, en les comparant avec leurs concurrents mondiaux. Les objectifs de l'analyse étaient les suivants :

- Présenter des données historiques sur les mesures d'efficacité énergétique et les émissions réelles de CO₂ des usines d'ammoniac;
- Effectuer une comparaison des mesures d'efficacité énergétique et des émissions de CO₂ des usines d'ammoniac du Canada par rapport à celles d'autres régions du monde;
- Conscientiser au rendement optimal et à la position du Canada sur le marché international;
- Déterminer le rendement énergétique futur pour les meilleurs producteurs mondiaux et les usines canadiennes d'ammoniac.

2.2 Méthodologie

Collecte de données et calculs

Chacune des usines a présenté ses données annuelles de rendement pour les périodes d'exploitation relatives aux années 2000, 2001 et 2002 à l'aide d'un questionnaire préparé par la firme Plant Surveys International, Inc. et présenté en format Microsoft Excel. Consulter les annexes A et B pour obtenir des renseignements supplémentaires sur la conversion des données, les activités de collecte et les calculs requis.

Les données relatives au rendement comprennent les données sur les volumes de production, la composition des gaz, les importations et les exportations d'énergie, la distribution du CO₂, les conditions de production et d'autres données sur l'usine. Dans le rapport, les émissions du CO₂ généré par le procédé sont établies en soustrayant de ce dernier le CO₂ utilisé pour la production d'urée.

Les mesures d'efficacité des usines d'ammoniac et les émissions de CO₂ sont présentées de façon individuelle pour chacune des usines et sous forme de moyennes de l'industrie pour la période de trois ans. Les émissions de CO₂ sont présentées sous forme d'émissions massiques en tonnes et d'émissions spécifiques (t CO₂/t NH₃). Les données relatives aux tendances se dégageant d'une année à l'autre (2000, 2001 et 2002) sont présentées sous forme de moyennes de l'industrie.

Ajustements des données

Les données relatives à l'efficacité énergétique ont été normalisées afin de présenter une base commune de comparaison. Les ajustements ont été faits pour des éléments tels que les conditions de production d'ammoniac ainsi que les importations et exportations de vapeur. Une explication complète de cette méthodologie de normalisation est présentée à l'annexe B.

Les mesures d'efficacité énergétique sont indiquées tout au long de ce rapport en fonction du pouvoir calorifique inférieur (Pci), appelé également pouvoir calorifique net, et elles sont exprimées en tonnes d'ammoniac. Le Pci annuel de chaque flux est utilisé pour convertir l'utilisation volumétrique en gigajoules (GJ). Consulter l'annexe B pour obtenir les détails des ajustements du Pci.

3

RÉSULTATS DE L'ANALYSE COMPARATIVE



3. RÉSULTATS DE L'ANALYSE COMPARATIVE

Les résultats du projet d'analyse comparative sont présentés en trois sections.

Section 3.1 : Analyse comparative de l'efficacité énergétique et des émissions de CO₂ des producteurs canadiens d'ammoniac (2000-2002)

Cette section présente un aperçu des données relatives à l'industrie canadienne, décrit les opérations relatives au projet et présente les données sur les mesures d'efficacité énergétique et les émissions de CO₂ pour ce secteur.

Section 3.2 : Comparaison de l'efficacité énergétique et des émissions de CO₂ à l'échelle mondiale (2002)

Les mesures d'efficacité énergétique des usines canadiennes d'ammoniac et leurs émissions de CO₂ ont été comparées avec celles d'autres usines d'ammoniac dans le monde. Les résultats ont été rapportés pour les régions du monde à l'étude. Les données relatives à la production d'ammoniac et d'urée utilisées dans ce rapport s'appuient sur les données de l'International Fertilizer Development Center portant sur la capacité des usines du monde entier.

Section 3.3 : Meilleur rendement à l'échelle mondiale et projections

Cette section passe en revue le classement des usines canadiennes par rapport à celles affichant le meilleur rendement à l'échelle mondiale. Un aperçu de concepts d'usines à faible consommation d'énergie envisagés pour l'avenir est aussi inclus.

Facteurs qui influencent l'efficacité énergétique et la production d'émissions de CO₂

Bon nombre de facteurs influencent l'efficacité énergétique et la production d'émissions de CO₂ de chaque activité; aucun effort n'a été fait pour corriger les différences associées aux éléments suivants :

Circuits de recyclage internes : grâce au recyclage prudent des gaz dégagés et de l'hydrogène, l'efficacité énergétique de l'usine peut être améliorée.

Conditions climatiques : les usines en exploitation dans des climats chauds ou froids, ou à de hautes ou basses altitudes.

État du catalyseur : l'efficacité de l'usine baisse avec la dégradation des catalyseurs utilisés.

Exigences de prétraitement de la matière de base : certaines matières de base contiennent plus de soufre que d'autres et peuvent nécessiter un prétraitement supplémentaire.

Exigences écologiques relatives à l'énergie : plusieurs usines exploitent des systèmes d'appoint pour réduire les émissions, comme un procédé de suppression du condensat et l'injection de vapeur dans les turbines à gaz.

Facteur d'exploitation : ce facteur indique le pourcentage de temps au cours de l'année pendant lequel l'usine est en exploitation et produit de l'ammoniac (c.-à-d. qu'aucune disposition n'est prévue visant les arrêts ou les réductions de production).

Qualité de la matière de base : certaines matières de base affichent des niveaux inertes élevés ou des niveaux excessifs d'hydrocarbures de masse moléculaire élevée; toute exigence de compression est considérée comme étant à l'intérieur des limites de l'installation.

Réduction du catalyseur : au remplacement de vieux catalyseurs, certains nouveaux catalyseurs nécessitent une procédure de réduction avant d'être mis en service. Souvent, cette procédure signifie une perte d'énergie lorsque les gaz sont rejetés dans l'atmosphère.

Rendement de l'équipement : le mauvais rendement de l'équipement peut nuire à l'efficacité énergétique fonctionnelle de l'usine.

Technologie des procédés utilisés pour produire de l'ammoniac : certains procédés sont plus éconergétiques que d'autres (p. ex., le procédé ICI-Katalco LCA, le procédé Kellogg KAAP).

Section 3.1 : Analyse comparative de l'efficacité énergétique et des émissions de CO₂ des producteurs canadiens d'ammoniac (2000-2002)

11

À l'heure actuelle, il y a 11 usines d'ammoniac en exploitation au Canada. Le tableau 1 ci-dessous présente une liste des 10 usines canadiennes d'ammoniac, exploitées par six entreprises, qui ont participé à l'analyse comparative et à l'étude de leur capacité nominale de production.

Tableau 1 : Usines canadiennes d'ammoniac participant au projet d'analyse comparative de 2000-2002

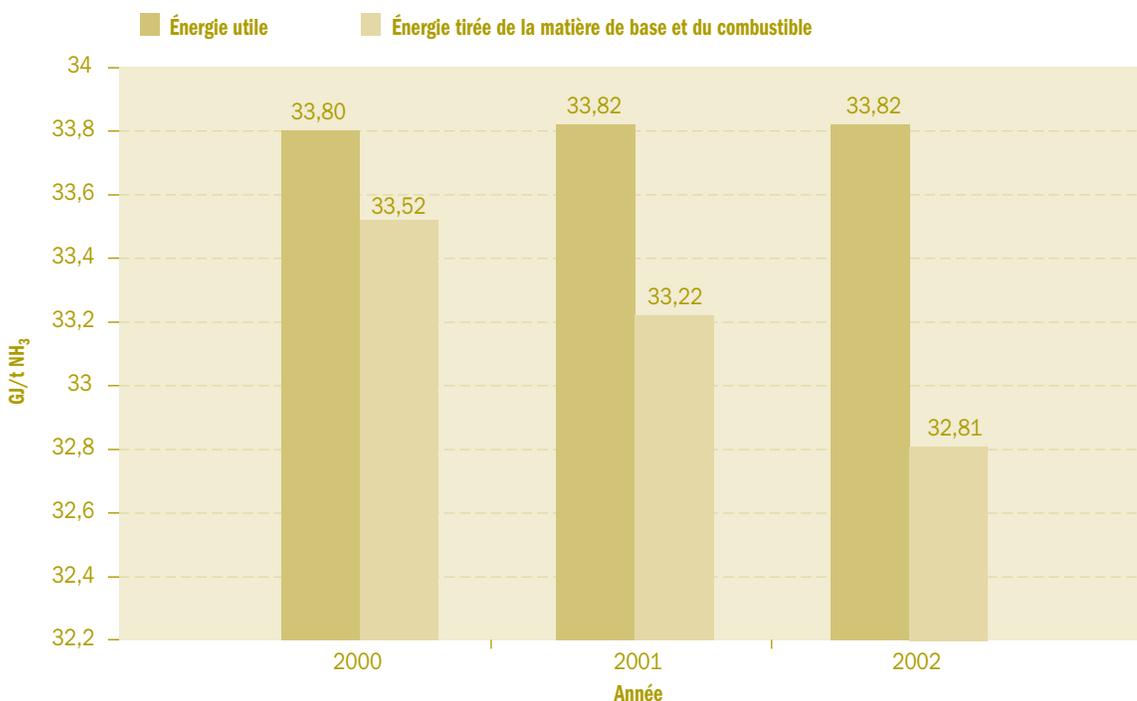
Entreprise et nom de l'usine	Emplacement	Capacité nominale de production (milliers de tonnes métriques/an)
Agrium Carseland	Carseland, Alb.	535
Agrium Fort Saskatchewan	Fort Saskatchewan, Alb.	465
Agrium Joffre*	Joffre, Alb.	450
Agrium Redwater n° 2	Redwater, Alb.	950
Canadian Fertilizers Limited Medicine Hat 1	Medicine Hat, Alb.	530
Canadian Fertilizers Limited Medicine Hat 2	Medicine Hat, Alb.	530
Saskferco Ammonia	Belle Plaine, Sask.	625
Sherritt Ammonia	Fort Saskatchewan, Alb.	155
Simplot Brandon	Brandon, Man.	425
Terra Courtright 2	Courtright, Ont.	412

* **Nota** : Toutes les usines utilisent le gaz naturel comme matière de base pour produire de l'ammoniac à l'exception de l'usine établie à Joffre, laquelle est alimentée par un sous-produit de l'hydrogène. Les données de l'usine Joffre ne sont pas comprises dans les comparaisons entre usines qui incluent des données sur l'énergie comme matière de base.

3.1.1. Production d'ammoniac et utilisation d'énergie

L'efficacité énergétique nette annuelle moyenne des 10 usines canadiennes est demeurée constante pendant les trois années qu'a duré l'analyse comparative; elle s'est établie à 33,8 GJ/t NH₃ tel qu'il est illustré à la figure 2. Toutefois, l'efficacité énergétique nette de l'énergie provenant de la matière de base et de l'énergie tirée du combustible est passée de 33,5 à 32,8 GJ/t NH₃. Cette amélioration de 2 p. 100 a donné le même pourcentage de réduction du CO₂ produit. L'énergie utile est demeurée constante puisque l'autre utilisation de l'énergie a dépassé la réduction de l'énergie provenant de la matière de base et de l'énergie tirée du combustible.

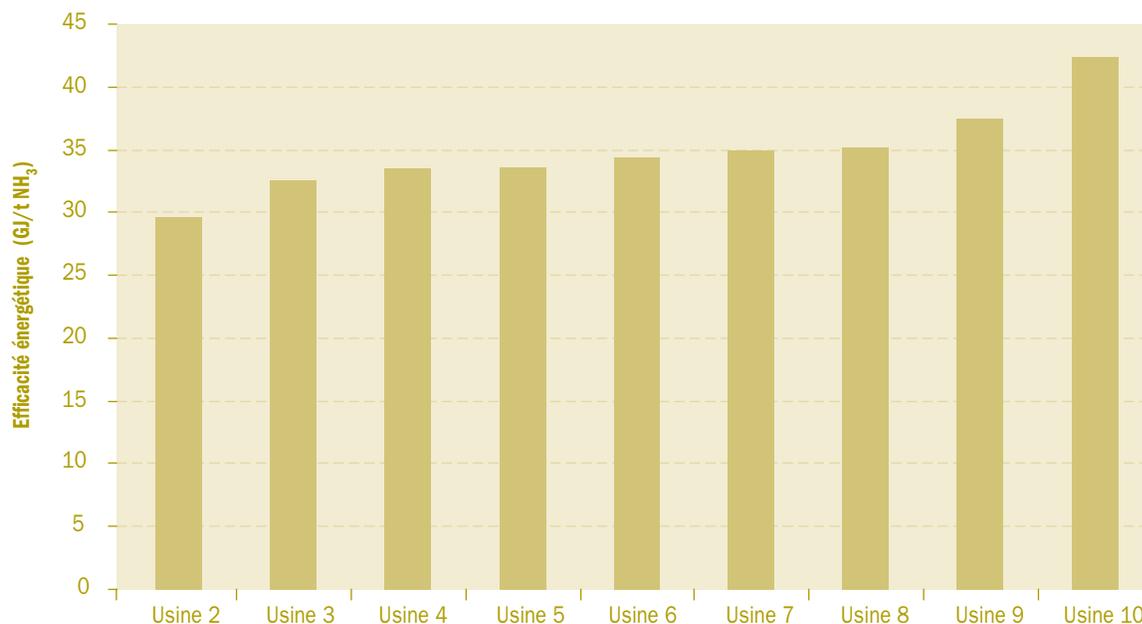
Figure 2 : Tendence relative à l'efficacité énergétique moyenne des producteurs canadiens d'ammoniac (2000-2002)



L'efficacité énergétique *normalisée* ou nette moyenne des trois années pour les usines d'ammoniac canadiennes utilisant le gaz naturel comme matière de base est présentée à la figure 3. L'efficacité énergétique des neuf usines au gaz naturel se situe entre 29,7 et 42,3 GJ/t NH₃, avec une moyenne de 34,4 GJ/t NH₃, pour les usines utilisant le gaz naturel. La moyenne du groupe est de 33,2 GJ/t NH₃, incluant l'usine utilisant l'hydrogène. L'usine la plus efficace sur le plan énergétique utilise environ 70 p. 100 de l'énergie utilisée par l'usine la moins efficace en matière d'énergie, par tonne d'ammoniac produit.

Moyenne* (GJ/t NH ₃)	Élevée* (GJ/t NH ₃)	Faible* (GJ/t NH ₃)
34,4	42,3	29,7

*GN : usines au gaz naturel utilisant le pouvoir calorifique inférieur (Pci) pour le gaz.

Figure 3 : Efficacité énergétique normalisée nette des usines d'ammoniac (2000-2002)

3.1.2 Production d'ammoniac et émissions de CO₂

Les usines canadiennes d'ammoniac génèrent 7 459 188 t/an de CO₂ (moyenne pour la période allant de 2000 à 2002). Toutes les usines d'ammoniac du Canada utilisant le gaz naturel produisent également de l'urée. La production d'urée combine deux molécules d'ammoniac avec une molécule de CO₂ pour former une solution d'urée et d'eau. La solution d'urée est évaporée pour former l'engrais granulaire d'urée. Au total, 3 013 689 t/an de CO₂ servent à la production d'urée. Il s'agit d'un facteur de récupération de 40 p. 100 du CO₂ qui serait, autrement, émis dans l'atmosphère.

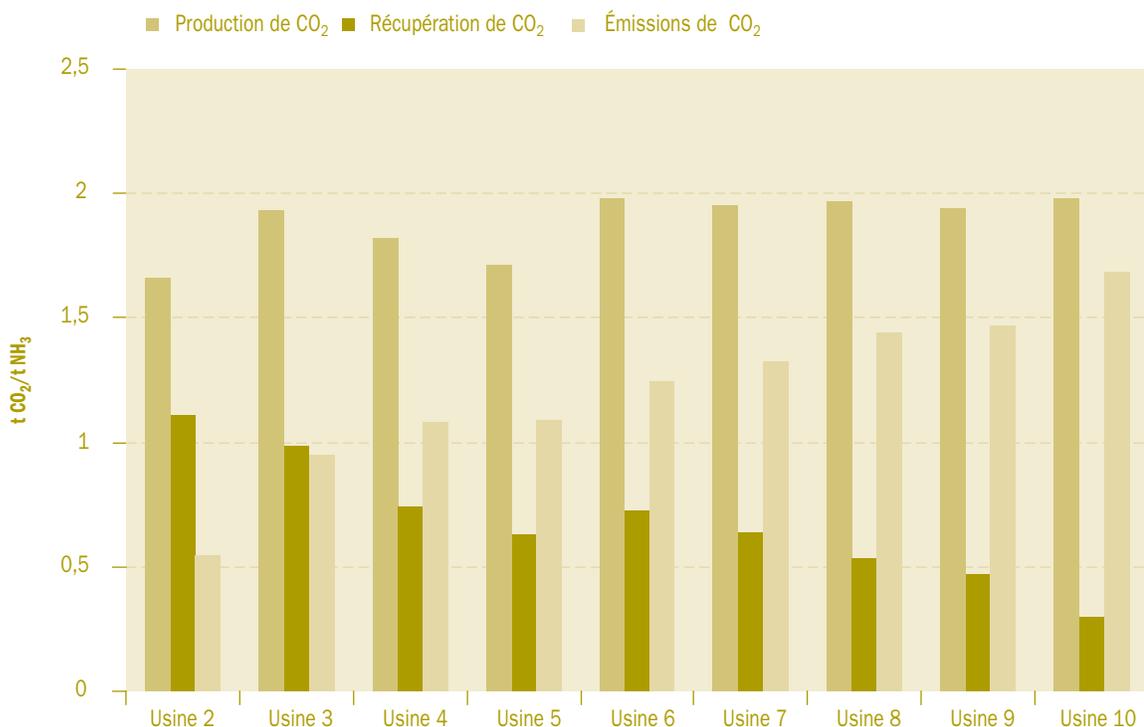
La production spécifique de CO₂ se situe entre 1,66 et 1,98 t CO₂/t NH₃ pour les usines d'ammoniac alimentées au gaz naturel comme matière de base (tel qu'il est indiqué au tableau 2). La variabilité est principalement due à l'efficacité énergétique de l'usine et, de façon moindre, au contenu en carbone de la matière de base et du combustible (voir l'encadré sur les Facteurs qui influencent l'efficacité énergétique et la production d'émissions de CO₂ à la page 10). Les usines ayant une plus grande efficacité énergétique produisent moins de CO₂ puisqu'une quantité moindre de combustible et de matière de base est utilisée pour produire la même quantité d'ammoniac.

Tableau 2 : Récupération des émissions de CO₂ des producteurs canadiens d'ammoniac (2000-2002)

	Moyenne (GN) (t CO ₂ /t NH ₃)	Élevée (t CO ₂ /t NH ₃)	Faible (t CO ₂ /t NH ₃)
Production totale de CO₂	1,68	1,98	1,66
Récupération totale de CO₂	0,61	1,11	0,30
Émissions totales de CO₂	1,07	1,68	0,55

L'incidence favorable de la récupération d'une partie du CO₂ généré par le procédé est présentée à la figure 4. Puisque toutes les usines au gaz naturel sont associées à des usines d'urée, elles récupèrent le CO₂, qui serait autrement rejeté dans l'atmosphère, pour produire l'urée. La récupération spécifique va de 0,30 à 1,11 t CO₂/t NH₃ pour une moyenne générale de 0,61 t CO₂/t NH₃.

Le résultat total des émissions de CO₂ des usines d'ammoniac (production totale – récupération totale) oscille de 0,55 à 1,68 t CO₂/t NH₃, avec une moyenne spécifique d'émissions de CO₂ pour les usines au gaz naturel de 1,09 t CO₂/t NH₃. Les niveaux spécifiques d'émissions de CO₂ pour chaque usine sont présentés à la figure 4.

Figure 4 : Récupération et émissions spécifiques de CO₂

Section 3.2 : Comparaison de l'efficacité énergétique et des émissions de CO₂ à l'échelle mondiale (2002)

15

Les mesures d'efficacité énergétique des usines canadiennes d'ammoniac et leurs émissions de CO₂ ont été comparées avec celles d'autres usines d'ammoniac ailleurs dans le monde. Il y a 71 pays qui produisent de l'ammoniac et 58 qui produisent de l'urée. Pour l'établissement du présent rapport, ces pays ont été regroupés en 13 régions (tableau 3). Les données relatives à la production d'ammoniac et d'urée utilisées aux fins de l'analyse dans ce rapport s'appuient sur les données de l'organisme International Fertilizer Development Center portant sur la capacité des usines à l'échelle mondiale.

Tableau 3 : Régions productrices d'ammoniac

1. Afrique	7. Inde
2. Asie (excluant la Chine et l'Inde)	8. Mexique
3. Canada	9. Océanie
4. Chine	10. Amérique du Sud
5. Europe orientale	11. Trinité-et-Tobago
6. ancienne Union soviétique	12. États-Unis
	13. Europe occidentale

3.2.1 Mesures d'efficacité énergétique pour la production d'ammoniac

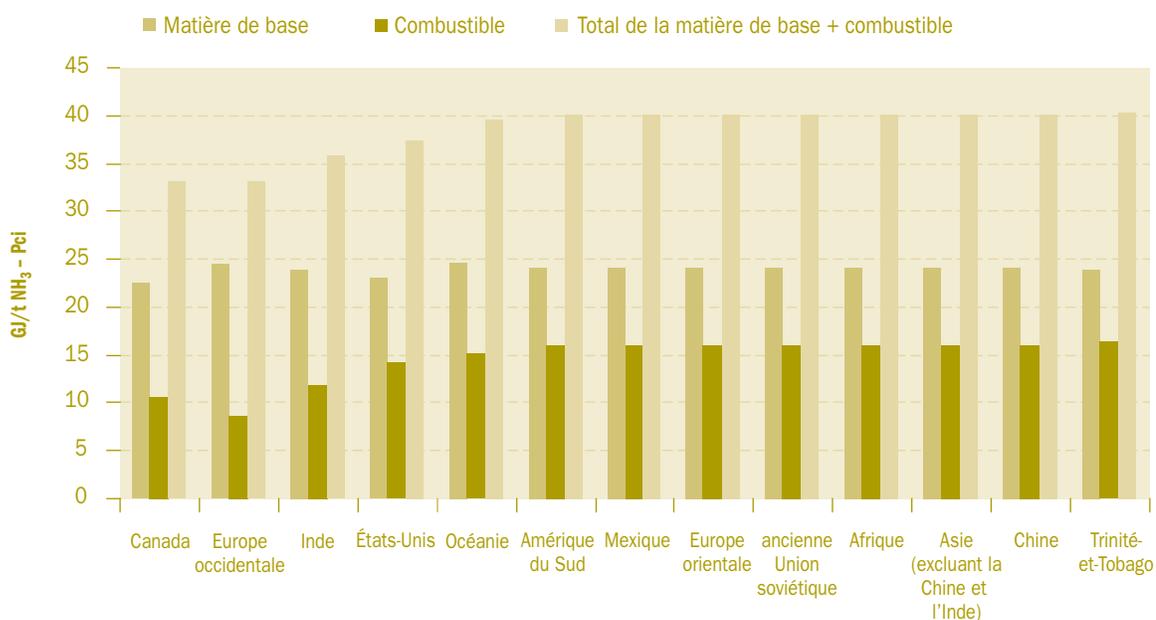
La production et les émissions de CO₂ des usines d'ammoniac sont calculées à l'aide des mesures liées à l'énergie provenant de la matière de base et de l'énergie tirée du combustible, soit « matière de base + combustible » plutôt qu'à l'aide de mesures d'efficacité énergétique nette. La « matière de base + combustible » est directement liée à la production de CO₂ dans l'usine d'ammoniac, alors que les mesures d'efficacité énergétique nette comprennent l'utilisation de l'électricité et les ajustements relatifs aux autres débits et crédits d'énergie, auxquels peuvent être associées des émissions de CO₂ provenant d'installations extérieures et non directement de l'usine d'ammoniac.

Les usines canadiennes se placent au premier rang à l'échelle mondiale des usines les plus efficaces concernant les mesures d'efficacité énergétique liées à la « matière de base + combustible ».

Les mesures d'efficacité énergétique liées à la « matière de base + combustible » et estimées pour chaque région à l'étude à l'échelle mondiale sont présentées à la figure 5 sur la page 16. Ces valeurs vont de 33,1 à 40,4 GJ/t NH₃ avec une moyenne mondiale de 38,6 GJ/t NH₃. Le Canada arrive au premier rang des usines les plus efficaces concernant ces mesures d'efficacité énergétique liées à la « matière de base + combustible ». Ces usines génèrent la plus petite quantité de CO₂/NH₃.

Efficacité énergétique des usines d'ammoniac à l'échelle mondiale			
Moyenne (GJ/t NH ₃)	Élevée (GJ/t NH ₃)	Faible (GJ/t NH ₃)	Canada (GJ/t NH ₃)
38,6	40,4	33,1	33,1

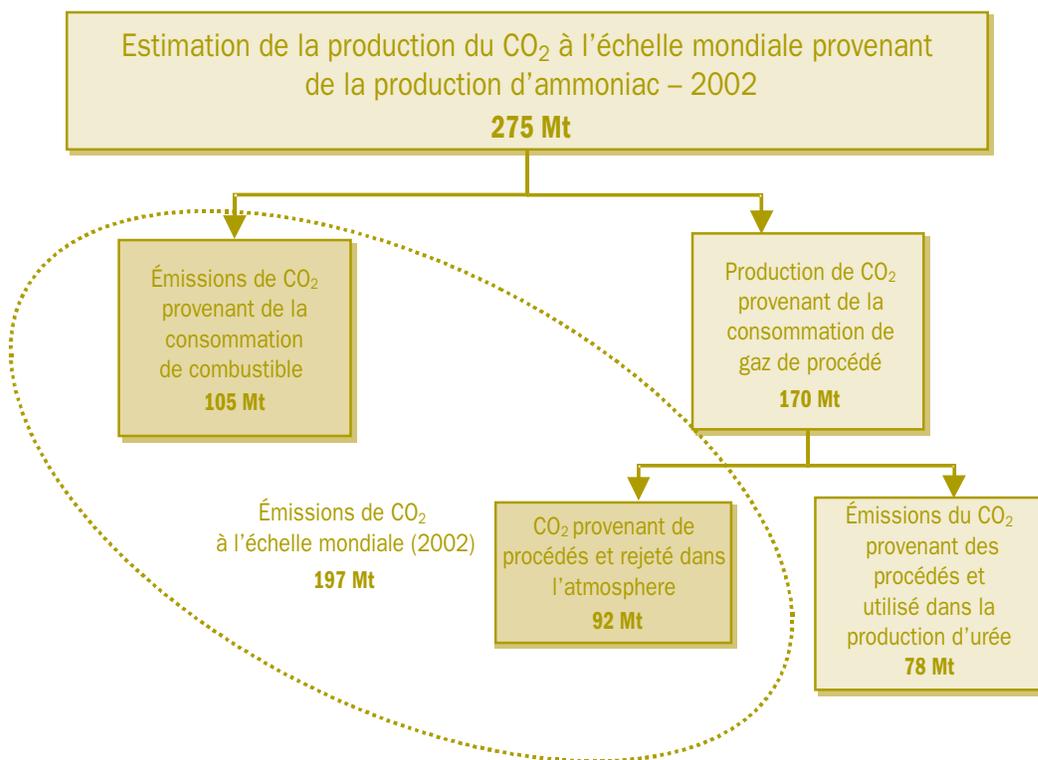
Figure 5 : Estimation de l'efficacité énergétique des usines d'ammoniac pour les régions à l'étude à l'échelle mondiale



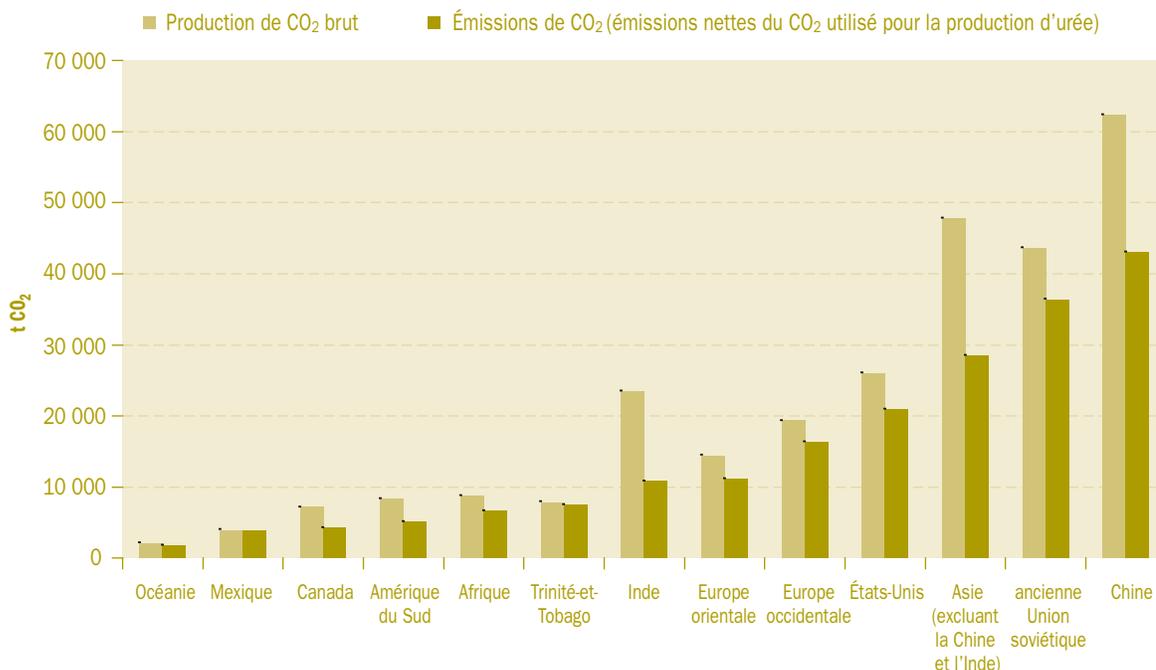
3.2.2 Estimation des émissions de CO₂ provenant de la production d'ammoniac

Les émissions de CO₂ ont été estimées d'après les évaluations de production d'ammoniac et d'urée et une capacité d'utilisation de 79,5 p. 100 pour chaque région à l'étude à l'échelle mondiale. Les estimations pour le Canada s'appuient sur la production réelle de 2002 des neuf usines d'ammoniac utilisant le gaz naturel. Les émissions de CO₂ provenant de la production d'ammoniac sont dérivées de la combustion du gaz naturel utilisé comme source d'énergie et du procédé de reformage à la vapeur employé pour obtenir le flux d'hydrogène du gaz naturel servant de matière de base. Ces flux d'émissions de CO₂ sont appelés respectivement combustible et procédé (ou matière de base).

La production mondiale totale d'ammoniac pour 2002 est estimée à 128 mégatonnes (Mt). La quantité totale de CO₂ produit par les usines d'ammoniac est estimée à 275 Mt, dont près des 62 p. 100, ou 170 Mt, sont liés au procédé ou à la matière de base. Une quantité importante (28,5 p. 100) du CO₂ total produit est récupérée pour la production d'urée, ce qui porte à 197 Mt les émissions de CO₂ de l'ensemble des usines d'ammoniac à l'échelle mondiale. Un résumé des estimations de la production et des émissions de CO₂ provenant des usines d'ammoniac à l'échelle mondiale pour 2002 apparaît à la figure 6.

Figure 6 : Production et émissions de CO₂ provenant des usines d'ammoniac

La quantité brute de CO₂ provenant des usines d'ammoniac et les émissions nettes du CO₂ utilisé dans la production d'urée sont présentées à la figure 7 pour les diverses régions à l'étude à l'échelle mondiale. La Chine se place au premier rang pour le taux le plus élevé d'émissions de CO₂ (21,9 p. 100); l'Océanie affiche, quant à elle, le taux le plus faible. Le Canada figure parmi les régions produisant le moins d'émissions de CO₂; il se situe au 11^e rang (du plus élevé au plus faible), et émet 2,2 p. 100 du total de CO₂ produit par les usines d'ammoniac à l'échelle mondiale.

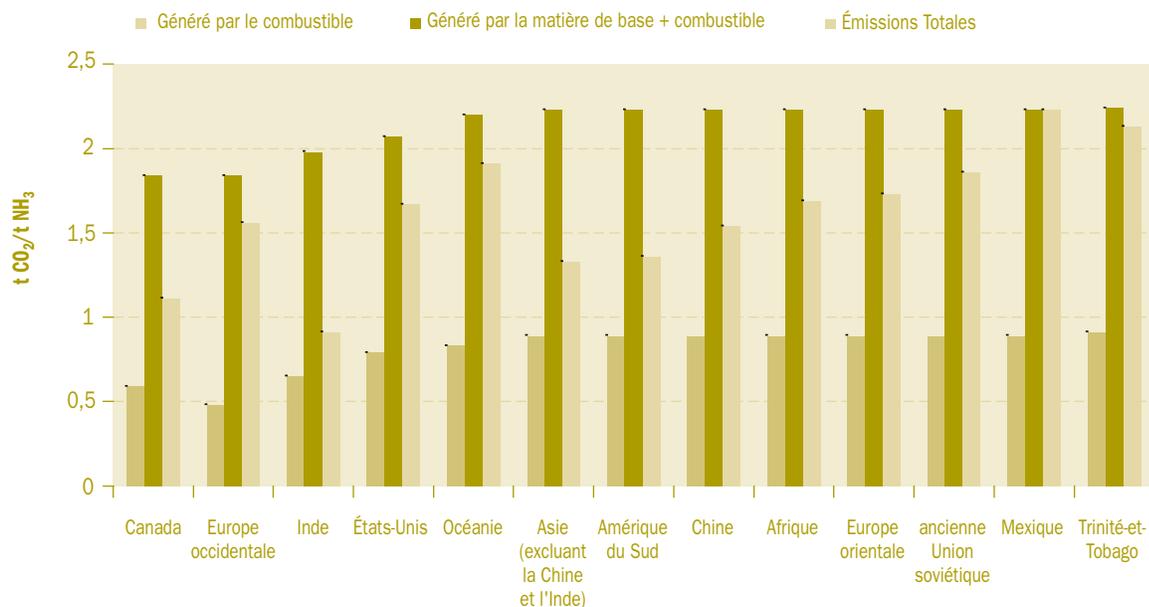
Figure 7 : Production et émissions de CO₂ pour les régions à l'étude – 2002

Sur la base d'une tonne d'ammoniac produite, la production de CO₂ se situe entre 1,84 et 2,24 t CO₂/t NH₃ avec une moyenne mondiale de 2,14 t CO₂/t NH₃. Le Canada et l'Europe occidentale affichent les meilleures performances en matière d'efficacité, présentant des facteurs de production respectivement de 1,81 et 1,84 t CO₂/t NH₃.

	Moyenne (t CO ₂ / t NH ₃)	Élevée (t CO ₂ / t NH ₃)	Faible (t CO ₂ / t NH ₃)	Canada (t CO ₂ / t NH ₃)
Production de CO₂ à l'échelle mondiale par tonne d'ammoniac produite	2,14	2,24	1,81	1,81
Émissions de CO₂ à l'échelle mondiale par tonne d'ammoniac produite	2,14	2,23	0,91	1,11

Lorsque la masse du CO₂ capté et utilisé dans la production d'urée est comptabilisée, le total des émissions de CO₂ provenant de la production d'ammoniac se situe entre 0,91 et 2,23 t CO₂/t NH₃. Le Canada se situe au deuxième rang parmi les régions produisant le moins d'émissions par tonne d'ammoniac produite, soit 1,11 t CO₂/t NH₃. La figure 8 présente les taux spécifiques de production et d'émissions de CO₂ par région à l'étude à l'échelle mondiale pour 2002.

Les usines du Canada et d'Europe occidentale affichent les meilleures performances en matière d'efficacité à l'échelle mondiale, émettant respectivement 1,81 et 1,84 t de CO₂/t de NH₃ produit.

Figure 8 : Taux spécifiques de production et d'émissions de CO₂ pour les régions à l'étude – 2002

Section 3.3 : Meilleur rendement à l'échelle mondiale et projections

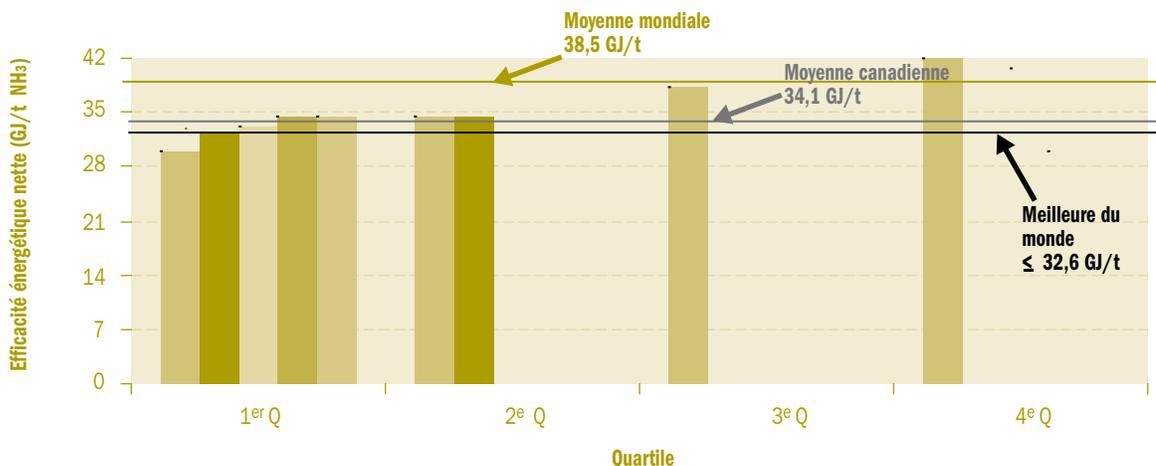
3.3.1 Analyse comparative à l'échelle mondiale

Presque toute la production d'ammoniac commerciale à l'échelle mondiale provient de matières de base et de combustibles hydrocarbonurés. Tel qu'il est mentionné précédemment, l'amélioration de l'efficacité énergétique dans la production d'ammoniac est une importante stratégie visant la réduction des émissions de CO₂.

Deux des usines canadiennes sont les plus performantes à l'échelle mondiale en matière d'efficacité énergétique – elles se situent parmi les usines qui se classent dans le premier décile au niveau mondial en termes d'efficacité énergétique.

L'analyse comparative de l'efficacité énergétique de chacune des usines d'ammoniac est une façon sûre de mesurer le rendement d'une usine par rapport à celles d'autres producteurs et de déterminer les meilleures usines du monde. Cette démarche fournit une mesure quantitative de ce qui peut être réalisé au moyen de la technologie actuelle et elle peut être utilisée pour déterminer la faisabilité des améliorations. La figure 9 illustre le rendement de chacune des usines canadiennes d'ammoniac par rapport à celui d'autres usines ailleurs dans le monde.

Figure 9 : Mesures d'efficacité énergétique normalisée nette



3.3.2 Le Canada parmi les meilleurs

Une évaluation servant à établir les « meilleures usines du monde » classe ces dernières dans un des 10 groupes en fonction de leur efficacité énergétique. Lorsqu'une usine est classée dans le groupe supérieur, elle est considérée comme une des meilleures du monde. Une usine d'ammoniac ayant une efficacité énergétique de 32,6 GJ/t NH₃ ou moins est considérée comme une des meilleures du monde. Tel qu'il est indiqué précédemment, la production d'ammoniac au Canada est effectuée de façon efficace sur le plan énergétique. En comparant diverses régions à l'échelle mondiale, les neuf producteurs canadiens d'ammoniac se classent au deuxième rang en matière d'efficacité énergétique, derrière les producteurs de l'Europe occidentale. L'efficacité énergétique nette moyenne des neuf producteurs canadiens est de 34,1 GJ/t NH₃. Ce résultat est supérieur de 11 p. 100 à la moyenne mondiale de 38,5 GJ/t NH₃.

L'usine Agrium de Joffre, en Alberta, constitue un excellent exemple canadien d'intégration entre usines. Un sous-produit du flux d'hydrogène provenant d'une usine adjacente remplace le besoin de reformage à la vapeur du gaz naturel par l'approvisionnement de la matière de base servant à la production d'ammoniac.

3.3.3 Avenir des concepts d'usine d'ammoniac à faible consommation d'énergie

La technologie moderne de production d'ammoniac a pris son essor dans les années 1960. L'efficacité énergétique des usines de cette époque était généralement de 39,5 GJ/t. À la faveur du développement de nombreux concepts innovateurs, des usines de conception nouvelle ont connu d'importantes améliorations en matière d'efficacité énergétique. En 1991, des concepts d'usine offrant une efficacité de 28,0 GJ/t ont été présentés. Depuis, des améliorations ont été apportées, mais à un rythme beaucoup plus lent. Présentement, des concepts d'usine à faible consommation d'énergie approchant 27,0 GJ/t sont offerts.

La meilleure estimation des améliorations à venir en matière d'efficacité énergétique pour les usines d'ammoniac à faible consommation d'énergie est tirée de la publication *Ammonia : Principles and Industrial Practice*. Après avoir effectué une étude approfondie de l'histoire de la production industrielle d'ammoniac et des technologies actuelles, l'auteur de l'ouvrage, Max Appl, fait les prédictions générales suivantes :

- Le gaz naturel restera la matière de base préférée pour au moins les 10 à 15 prochaines années. La gazéification du charbon n'aura pas d'incidence majeure sur la production d'ammoniac pendant cette période.
- La technologie actuelle de production d'ammoniac ne subira pas de changements fondamentaux, du moins pour les 10 à 15 prochaines années. Même en cas de développements complets et imprévisibles, la mise en œuvre commerciale demandera du temps.
- Avec les concepts traditionnels, les marges d'améliorations supplémentaires se sont amenuisées après des années de recherche et développement intensifs.
- Seules des améliorations mineures devraient être apportées à des étapes bien précises ainsi qu'à certains catalyseurs et à de l'équipement.
- Il est peu probable de voir d'autres réductions significatives de consommation d'énergie du procédé de reformage à la vapeur de l'ammoniac alimenté au gaz naturel; l'efficacité énergétique se situant entre 27 et 28 GJ/t se rapproche du minimum théorique qui se situe à 20,9 GJ/t.
- Pour les 10 à 15 prochaines années, la grande part de la production d'ammoniac continuera d'être effectuée dans les usines de calibre mondial qui produisent de 1 000 à 2 000 tonnes de NH₃ par jour. Les usines à faible capacité se retrouveront dans les emplacements où les conditions logistiques, financières ou d'approvisionnement en matière de base leur seront favorables.
- Les nouveaux développements de la technologie relative à l'ammoniac viendront principalement réduire les coûts d'investissement et augmenteront la fiabilité opérationnelle. Les plus petites unités de procédé intégré contribuent à cette réduction et permettent des économies supplémentaires en simplifiant l'installation de la tuyauterie et l'équipement. La fiabilité peut être améliorée par des avancées au chapitre de la qualité des catalyseurs et de l'équipement et par une amélioration des appareils et des contrôles informatisés.

En gardant ces prévisions en tête, on estime que l'amélioration de l'utilisation de l'énergie combustible des usines nouvelles à faible consommation d'énergie progressera à un rythme plus lent en comparaison de la période comprise entre 1991 et 2003, au cours de laquelle le facteur d'amélioration énergétique (FAE) a été, en moyenne, de 1,0 p. 100 par année pour le combustible. Jusqu'en 2014, l'amélioration de l'utilisation du combustible est estimée à 35 p. 100 inférieure à celle de la décennie précédente. Cette donnée équivaut à

22

un FAE de 0,65 p. 100 par année. On s'attend à ce que l'efficacité énergétique découlant de ces concepts favorisant une faible consommation énergétique passe de 6,2 à 5,8 GJ/t, alors que l'efficacité du procédé restera fixée par la chimie. L'efficacité énergétique totale en 2014 sera de 26,7 GJ/t.

De récentes études d'intégration de procédés menées dans les usines canadiennes de production d'ammoniac ont mis en évidence des possibilités d'améliorer l'intégration entre les usines d'ammoniac et les usines d'urée. En recherchant des possibilités d'inclure davantage des méthodes d'intégration de procédés pendant la phase de conception des nouvelles usines d'ammoniac et d'urée, les futures usines peuvent être construites avec une encore plus grande efficacité énergétique et ce, à un coût moindre ou faible en capital différentiel.

ANNEXES



ANNEXE A : ABRÉVIATIONS

- G – giga – 10^9
- J – joule
- k – kilo – 10^3
- M – méga – 10^6
- t – tonne métrique
- m^3 – mètre cube

Facteurs de conversion pour les émissions de gaz à effet de serre provenant des combustibles

Pour convertir	en	Multiplier par
gaz naturel (gigajoules)	tonnes équivalent CO ₂	0,0513
diesel (litres)	tonnes équivalent CO ₂	0,00276
essence (litres)	tonnes équivalent CO ₂	0,00249
mazout n° 2 (litres)	tonnes équivalent CO ₂	0,00284

Source : *Inventaire canadien des gaz à effet de serre (1990-2000)*, Division des gaz à effet de serre, Environnement Canada (juin 2002).

ANNEXE B : MÉTHODOLOGIE DE NORMALISATION DE L'ORGANISME PLANT SURVEYS INTERNATIONAL, INC. LIÉE À L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES USINES D'AMMONIAC

Efficacité énergétique

L'une des principales raisons de mener une analyse comparative est de comparer les résultats du rendement énergétique de différentes usines. Dans certains cas, il est souhaitable de faire des ajustements aux mesures de rendement énergétique afin de comparer les procédés des usines à partir d'une base commune. Cette démarche s'applique aux mesures d'efficacité énergétique des usines d'ammoniac pour lesquelles des ajustements sont faits afin d'obtenir une usine standardisée ou normalisée. La méthode utilisée pour faire ces ajustements est présentée dans le tableau ci-dessous.

Usine d'ammoniac normalisée Exemple de calcul de l'efficacité énergétique	
	GJ/t (Pci)
Total pour la matière de base	25,1
Total pour le combustible	8,2
Total pour « matière de base + combustible »	33,3
Importations d'électricité (40 %)	1,2
Importations d'azote (N ₂) (40 % d'électricité)	- 0,0
Importations d'oxygène (O ₂) (40 % d'électricité)	0,0
Total des importations de vapeur (90 %)	0,0
Total des exportations de vapeur (90 %)	- 1,1
Total des importations d'autres sources d'énergie	0,0
Total des exportations d'autres sources d'énergie	- 0,0
Ajustement de l'ammoniac (NH ₃) produit	0,1
Ajustement de la consommation d'énergie pour l'eau de refroidissement	0,3
Ajustement de la consommation d'énergie pour l'eau d'alimentation de chaudière	0,0
Autres énergies	0,5
Efficacité énergétique nette	33,8

Normalisation de l'efficacité énergétique

Fondement

- Les données réelles de l'usine pour l'année civile sont utilisées. Toutes les quantités sont fournies sur une base annuelle. La production annuelle d'ammoniac et toutes les données concernant la consommation annuelle d'énergie d'une usine par rapport à la matière de base et au combustible sont enregistrées. Ces données comprennent l'énergie pour produire l'ammoniac ainsi que celle utilisée lors de démarrages, d'arrêts d'exploitation, de ralentissement des catalyseurs, etc. La consommation de l'énergie combustible de l'usine d'ammoniac comprend l'énergie servant au démarrage du reformeur ainsi qu'à l'utilisation de chaudière auxiliaire, de turbine à gaz, de dispositif de chauffage pour le procédé, etc.
- Le pouvoir calorifique inférieur (Pci), appelé également pouvoir calorifique net, est utilisé dans toutes les usines. Le Pci annuel moyen de chaque flux est utilisé pour convertir l'utilisation volumétrique en gigajoules (GJ).

Ajustements

- Les flux de gaz résiduel importé sont évalués selon leur Pci. Ces données représentent généralement un faible pourcentage de la consommation totale de la matière de base et du combustible. Toutefois, dans le cas des importations d'hydrogène qui constituent la grande part du besoin en matière de base, une estimation de l'énergie nécessaire pour produire ce gaz est incluse dans la consommation de l'énergie tirée de la matière de base.
- L'électricité importée est convertie en équivalent de chaleur à une efficacité de 40 p. 100 (selon le Pci du combustible fossile, où 1 kWh = 9 000 kJ Pci). Il s'agit d'une efficacité générale type pour la production et la distribution d'électricité provenant du service public et produite à partir de combustible fossile. Le but de cet ajustement de l'efficacité électrique est de refléter l'utilisation du combustible fossile associée à sa production. Cette conversion a une incidence sur le calcul de l'efficacité énergétique de l'usine mais n'a aucun effet sur le calcul des émissions de CO₂ de l'usine. Seuls les flux porteurs de carbone directement employés dans une usine sont utilisés dans les calculs d'émissions de CO₂. Les exportations d'électricité correspondent à 100 p. 100 du rendement de conversion (1 kWh = 3 600 kJ Pci). Un coefficient élevé de rendement de conversion est utilisé pour la production interne d'électricité destinée à l'exportation parce que cet élément est considéré comme lié au procédé et représente normalement la récupération de la chaleur perdue.
- Les importations d'azote pour le procédé (azote utilisé dans le procédé) sont basées sur l'énergie réelle utilisée pour la production et la livraison à l'usine d'ammoniac. Autrement, l'estimation utilisée relative à l'électricité nécessaire pour produire et fournir l'azote à l'usine d'ammoniac s'appuie sur la production d'une usine de séparation d'air dont le rendement de conversion électrique en Pci est de 40 p. 100. Aucune dette d'énergie n'est comptabilisée en ce qui concerne l'importation d'azote pour les besoins opérationnels, comme ceux se rapportant au manteau de gaz inerte ou à la purge des réservoirs.

- Les importations d'oxygène pour le procédé (oxygène utilisé dans le procédé) sont basées sur l'énergie réelle utilisée pour la production et la livraison d'ammoniac à l'usine. Autrement, l'estimation utilisée relative à l'électricité nécessaire pour produire et fournir l'oxygène à l'usine d'ammoniac s'appuie sur la production d'une usine de séparation d'air dont le rendement de conversion électrique en Pci est de 40 p. 100.
- Les importations et les exportations de vapeur sont basées sur le calcul réel de leur enthalpie en fonction des conditions des limites de l'usine (tel qu'il est défini plus loin). L'exportation de vapeur doit avoir une utilisation valable. Le rejet de vapeur n'est pas qualifié d'exportation de vapeur. Il en est de même pour d'autres utilisations semblables. Un rendement de conversion de 90 p. 100 est utilisé ($\text{enthalpie}/0,90 = 1,11 \times \text{enthalpie}$). Cette donnée est caractéristique des systèmes de condensation. Les usines ont la possibilité d'utiliser leurs mesures réelles d'efficacité d'utilisation dans les situations où les mesures diffèrent grandement de la conversion par défaut établie à 90 p. 100.
Nota : Le rendement de conversion établi à 90 p. 100 est fondé sur une arrivée d'eau dont la température est de 15 °C et l'enthalpie est de 63 kJ/kg.
- Les autres importations et exportations d'énergie sont évaluées à leur pouvoir calorifique inférieur (Pci).
- Les ajustements concernant la production d'ammoniac sont effectués afin de normaliser la production d'ammoniac en liquide à la pression atmosphérique (-32 °C), en utilisant la différence de l'enthalpie. L'ammoniac gazeux est converti en liquide en utilisant une chaleur latente de vaporisation de 1 148 kJ/kg. Une température atteignant plus de -32 °C pour l'ammoniac liquide est ajustée en utilisant une chaleur spécifique de 4,63 kJ/kg °C. Ces calculs mènent à un ajustement mineur pour la majorité des usines et à un ajustement plus important pour les usines produisant un pourcentage élevé d'ammoniac à l'état gazeux.
- L'ajustement concernant l'eau de refroidissement est basé sur l'énergie nécessaire pour produire et pomper toute l'eau de refroidissement comprise dans l'utilisation énergétique de l'usine. Lorsqu'une usine importe de l'eau de refroidissement (d'une tour de refroidissement, d'une rivière, de la mer, etc.), l'énergie de pompage et l'énergie du ventilateur (pour les tours de refroidissement) sont ajoutées comme débit d'énergie. L'utilisation réelle d'énergie est utilisée si cette information est connue. Autrement, des estimations sont utilisées lorsque l'énergie de pompage est basée sur l'utilisation d'une pompe centrifuge monoétage à admission bilatérale avec une efficacité de 85 p. 100. Combinée à un gros moteur électrique efficace à 96 p. 100, l'efficacité de pompage résultante est de 82 p. 100. Une charge supplémentaire d'énergie de 44 kWh/km³ est utilisée pour le fonctionnement du ventilateur de la tour de refroidissement. L'utilisation nette d'énergie pour l'eau de refroidissement est ensuite établie en utilisant un rendement de conversion de 40 p. 100.

- Les ajustements se rapportant à l'eau d'alimentation de chaudière sont effectués pour les usines qui importent cette eau. La valeur réelle de l'énergie électrique de pompage est utilisée, si elle est connue. Autrement, l'énergie de pompage est estimée d'après une pompe centrifuge à plusieurs étages ayant une efficacité de 65 p. 100. Combinée à un gros moteur électrique efficace à 96 p. 100, l'efficacité de pompage résultante est de 62 p. 100. L'utilisation nette d'énergie est ensuite établie en utilisant un rendement de conversion électrique de 40 p. 100.

Limites de l'installation de l'usine

Les limites de l'installation de l'usine représentent la « barrière » autour de l'usine d'ammoniac. À l'intérieur des limites de l'installation, l'ammoniac est fabriqué et l'efficacité énergétique est établie à partir des mesures concernant la matière de base et les flux d'énergie à travers cette barrière. Les services essentiels qui servent à la fabrication de l'ammoniac proviennent habituellement de l'extérieur des limites de l'installation, puis sont livrés à l'usine. Habituellement, les matières de base hydrocarburées et les combustibles, l'électricité et (parfois) la vapeur sont produits à l'extérieur des limites de l'installation et livrés à l'usine d'ammoniac.

Configuration standard d'une usine d'ammoniac :

limites intérieures de l'installation

- Production de l'eau d'alimentation de chaudière
- Production et circulation de l'eau de refroidissement
- Prétraitement de la matière de base
- Compression de la matière de base
- Brûlage à la torche des sous-produits issus du procédé
- Traitement du condensat issu du procédé

limites extérieures de l'installation

- Génération d'électricité
- Stockage et manutention de l'ammoniac
- Brûlage à la torche des émissions provenant des réservoirs de stockage d'ammoniac

Dans une usine d'ammoniac normalisée, la production de l'eau de refroidissement se situe dans les limites intérieures de l'installation. Dans les usines utilisant de l'eau de refroidissement provenant hors site, l'énergie de pompage et de refroidissement (ventilateur de la tour de refroidissement) pour toute l'eau de refroidissement doit être établie puisque le flux complet de circulation franchit les limites de l'installation. Le stockage et la manutention de l'ammoniac appartiennent aux limites extérieures de l'installation.

ANNEXE C : DONNÉES HISTORIQUES

Il y a plus de 400 usines d'ammoniac dans le monde. La firme PSI possède des données historiques sur près du quart de ces usines. Les données les plus précises concernent les régions pour lesquelles la firme PSI détient un grand nombre de données, comme l'Europe occidentale, les États-Unis, Trinité-et-Tobago, l'Océanie et le Canada. Dans les régions pour lesquelles les données sont limitées, la moyenne de la moitié inférieure apparaissant dans le tableau ci-dessous a été utilisée.

Données historiques sur les mesures d'efficacité concernant la matière de base + combustible (hydrocarburés) des usines d'ammoniac tirées des dossiers d'analyse comparative de la firme PSI - GJ/t NH ₃ Pci			
Moyenne	Matière de base	Combustible	Total de la matière de base + combustible
1 ^{er} quartile	23,3	8,2	31,6
2 ^e quartile	23,6	11,0	34,7
3 ^e quartile	23,5	13,7	37,2
4 ^e quartile	24,9	18,2	43,1
Moitié inférieure	24,2	16,0	40,2
À l'échelle mondiale	23,8	12,9	36,7

ANNEXE D : RÉFÉRENCES

- 1 Centre international de développement des engrais (International Fertilizer Development Center [IFDC]). *Worldwide Ammonia Capacity Listing by Plant* (FSR-10), septembre 2003.
- 2 Centre international de développement des engrais (IFDC). *Worldwide Urea Capacity Listing by Plant* (FSR-7), octobre 2003.
- 3 Plant Surveys International, Inc., *1997–1998 Worldwide Ammonia Plant Benchmarking Study*.
- 4 Plant Surveys International, Inc., *2000–2001 Worldwide Ammonia Plant Benchmarking Study*.
- 5 Nand, S. *Downtime in Indian Ammonia and Urea Plants*, The Fertilizer Association of India, septembre 1999. [Communication présentée à l'American Institute of Chemical Engineers (AIChE)].
- 6 Nand, S. et Manish Goswami, *On-Stream and Energy Efficiency of Indian Ammonia and Urea Plants – An Analysis*, The Fertilizer Association of India (RÉSUMÉ). (Communication à être présentée au Ammonia Symposium de 2004.)
- 7 Appl, Max, *Ammonia, Methanol, Hydrogen, Carbon Monoxide – Modern Production Technologies*, British Sulphur Publishing, 1997. ISBN 1-873387-26-1.
- 8 Appl, Max, *Ammonia: Principles and Industrial Practice*, Wiley-VCH, 1999. ISBN 3-527-29593-3.
- 9 European Fertilizer Manufacturers' Association (EFMA). « Production of Ammonia », *Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry*, livret n° 1 de 8, 2^e éd. rév., 2000.
- 10 Williams, G.P. *Efficacité de conception de l'usine CNCC proposée pour l'île Hainan, en Chine*. [Correspondance privée avec Kellogg Brown et Root].