

Étude de cas sur la politique fiscale et l'efficacité énergétique

Étude de base

Préparée pour
La Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie

par
M.K. Jaccard & Associates

Juin 2004

Document de travail

Cette version de l'étude de cas est une version légèrement modifiée par rapport à la précédente. C'est un paragraphe de la page B 12, sur les technologies de l'électrolyse de l'aluminium, qui a été modifié.

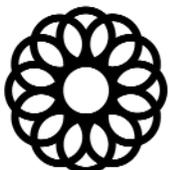


Table ronde nationale
sur l'environnement
et l'économie

National Round Table
on the Environment
and the Economy

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Définitions et concepts	1
	<i>L'industrie</i>	1
	<i>Décarbonisation</i>	2
	<i>Distinction entre politique et mesure</i>	2
	<i>Émissions directes, indirectes et totales de GES</i>	2
1.2	Aperçu du rapport	3
2	Contexte	3
2.1	Définition de l'efficacité énergétique	3
	<i>Mesure de l'efficacité énergétique</i>	4
	<i>Efficacité énergétique et décarbonisation</i>	5
2.2	Caractéristiques du secteur industriel	5
	<i>Utilisation de l'énergie dans l'industrie canadienne</i>	5
2.3	Contexte de la politique actuelle	7
	<i>Politique sur l'énergie et les GES touchant le secteur industriel</i>	7
	<i>Politique fiscale – Investissements dans l'efficacité énergétique</i>	9
	<i>EF et efficacité énergétique industrielle</i>	10
3	Méthodologie de base	12
3.1	Aperçu de la méthodologie	12
3.2	Le modèle du SCMI	13
3.3	Élaboration du scénario de base	15
3.4	Résultats et analyse – Scénario de base	16

1 Introduction

La Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE) a lancé un programme afin d'étudier l'écologisation de la fiscalité (EF) au Canada. L'EF signifie l'harmonisation systématique de la politique fiscale avec les autres outils de politique afin d'atteindre simultanément les objectifs économiques et environnementaux. La phase initiale étant terminée, il s'agit, dans le cadre du programme d'EF, de trouver des moyens pour élaborer et promouvoir une politique fiscale qui réduise, de façon constante et systématique, les émissions de carbone d'origine énergétique sans augmenter les autres polluants, tant en termes absolus qu'en ratio du produit intérieur brut (PIB) du Canada.

Dans l'étude actuelle, nous analysons le rôle de la politique fiscale relativement à la promotion de l'efficacité énergétique à long terme dans le secteur industriel canadien, en vue d'atteindre une meilleure efficacité énergétique qui entraîne une diminution à long terme des émissions de carbone d'origine énergétique. La présente fait partie de trois études de cas parallèles dont l'objet est de fournir des recommandations de politique pragmatiques et pertinentes sur la façon dont la politique fiscale peut favoriser, en appuyant le grand objectif du programme, l'évolution de l'efficacité énergétique dans les énergies renouvelables, l'hydrogène et l'énergie industrielle. L'autre objectif des études est de mettre à l'épreuve les approches, mécanismes et méthodologies qui lient les questions de l'énergie, du changement climatique, du développement technologique et de la politique fiscale, dans le but d'en tirer des leçons et des constatations qui éclaireront l'élaboration de la politique dans ce domaine.

Ce rapport couvre le premier volet de l'étude de cas sur la décarbonisation, à savoir l'étude de base. Dans ce rapport, nous examinons la nature de l'efficacité énergétique et les tendances des émissions industrielles de carbone, pour parvenir à l'élaboration d'un scénario de base sur les émissions de carbone. Un second rapport, l'étude économique, porte sur les perspectives spécifiques d'efficacité énergétique qui s'offrent à l'industrie et les défis liés à leur adoption. Nous élaborons des scénarios de rechange concernant les émissions de carbone, évaluons les répercussions économiques et établissons des recommandations de politique.

1.1 Définitions et concepts

L'industrie

Dans la présente étude de cas, l'industrie se compose des établissements dont les activités sont la fabrication et l'exploitation minière. L'exploitation minière est l'activité liée à l'extraction des minéraux présents dans la nature, minéraux qui peuvent être solides, comme le charbon et le minerai, liquides, comme le pétrole brut, ou gazeux, comme le gaz naturel. Les activités de fabrication supposent la transformation physique ou chimique de matériaux ou de substances en nouveaux produits. Ces produits peuvent être finis, en ce sens qu'ils sont prêts à l'utilisation ou à la consommation, ou semi-finis, c'est-à-dire qu'ils deviennent la matière première qu'un établissement utilise pour lui conférer une surtransformation¹.

1 Ces activités correspondent à celles définies dans le Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN), classes 21, 31, 32 et 33. Pour plus de renseignements sur ce que recouvrent ces activités, consulter le site Web Strategis d'Industrie Canada à l'adresse : <strategis.ic.gc.ca>.

Dans la présente étude de cas, l'industrie exclut les établissements des secteurs de la production d'électricité, de l'agriculture et des services².

Décarbonisation

Dans le présent document et dans l'étude économique qui l'accompagne, le terme « décarbonisation » signifie réduire les émissions de carbone d'origine énergétique, tant en termes absolus qu'en ratio de la production au Canada, sans augmenter les autres polluants³. Les émissions de carbone, dans l'analyse numérique, sont englobées par une mesure plus large des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Distinction entre politique et mesure

Dans la conception des politiques et l'évaluation de leurs répercussions et coûts, il est utile d'établir une nette distinction entre mesure et politique. On entend par mesure un changement dans l'acquisition d'équipement, le taux d'utilisation de l'équipement, le style de vie ou les méthodes de gestion des ressources, changement qui entraîne un changement net des émissions de carbone par rapport à ce qu'elles seraient autrement. Notre étude se concentre sur les mesures d'efficacité énergétique découlant de changements dans l'acquisition de technologies, mais elle tient compte de ces mesures par rapport à d'autres qui visent la décarbonisation. Nous pouvons évaluer le coût d'une mesure, individuellement ou dans le cadre d'un ensemble (portefeuille) de mesures. Le coût est le changement marginal des coûts (positifs ou négatifs) découlant de la prise de la ou des mesures. Une politique ou un instrument de politique se définit comme un effort des pouvoirs publics pour introduire une mesure. Dans le volet modélisation de l'étude de cas, nous veillons à bien distinguer les deux termes.

Émissions directes, indirectes et totales de GES

Il est utile, pour décrire les émissions actuelles et futures d'origine carbonique pour une partie seulement de l'économie (le secteur industriel), de recourir à un concept d'émissions directes et indirectes. Le terme « émissions directes » sert à décrire les émissions produites par une source relevant du contrôle d'une entité (aux fins de ce projet, l'industrie), alors que le terme « émissions indirectes » sert à décrire les émissions résultant de l'activité de cette entité, mais produites par une source externe à celle-ci.

Dans l'analyse des répercussions des mesures, il est important de tenir compte de l'effet combiné des émissions directes et indirectes, car si l'on ne prenait que les émissions directes, on constaterait en fait une augmentation des émissions attribuables à une mesure, comme la cogénération, alors que si l'on tient compte des émissions directes et indirectes prises ensemble, on observe une tendance à la baisse des émissions totales (selon l'intensité de carbone de l'électricité produite par la centrale électrique).

2 Nous incluons toutefois le secteur de l'électricité dans la modélisation des prix fictifs du carbone pour construire des scénarios de rechange (afin qu'un prix fictif du carbone soit répercuté dans le prix de l'électricité perçu par le secteur industriel). Voir la section 3.2 de l'Étude économique.

3 La principale émission de carbone d'origine énergétique décrite dans le présent rapport est le dioxyde de carbone (CO₂), l'un des principaux gaz à effet de serre. Le méthane (CH₄) découle du brûlage des combustibles fossiles et contribue à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère; toutefois, ses sources sont avant tout étrangères à la combustion.

1.2 Aperçu du rapport

Le rapport est structuré comme suit dans la partie contextuelle : 1) nous traitons des concepts fondamentaux relatifs à l'efficacité énergétique; 2) nous examinons les tendances dans l'industrie canadienne en matière d'utilisation de l'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre et; 3) nous donnons un aperçu de la politique actuelle relative à l'efficacité énergétique industrielle. Nous décrivons ensuite la méthode que nous avons retenue pour préparer les prévisions de base, en abordant avec un certain niveau de détails le modèle économie-énergie du SCMI, utilisé à la fois pour ces prévisions et, ultérieurement, pour d'autres prévisions de rechange et les analyses économiques décrites dans l'étude économique. Nous terminons par un exposé des prévisions de base, désagrégées par sous-secteur de l'industrie.

2 Contexte

2.1 Définition de l'efficacité énergétique

L'analyse de l'efficacité énergétique englobe de nombreux concepts. Nous prenons le temps de les préciser et d'établir le lien entre l'efficacité énergétique et les objectifs de décarbonisation.

L'efficacité énergétique désigne le rapport entre l'extrait (service) d'un dispositif ou système et l'énergie qui y est consommée. L'amélioration de l'efficacité énergétique consiste à faire davantage avec un intrant énergétique égal ou inférieur, par exemple moins de kilowatts par tonne d'aluminium produit. L'efficacité énergétique peut s'évaluer à la fois d'après l'efficacité selon la première loi et l'efficacité selon la seconde loi. La première loi a trait au ratio d'intrant énergétique par rapport à la production d'énergie d'un appareil. Nombre d'appareils modernes ont un rendement faible en ce qui a trait à l'efficacité selon la première loi, ce qui prouve que des améliorations appréciables sont possibles. Néanmoins, la meilleure façon de saisir l'ampleur des améliorations possibles est de tenir compte de l'efficacité selon la seconde loi, à savoir le ratio entre l'intrant énergétique d'un appareil et la quantité minimale d'énergie théoriquement nécessaire pour exécuter une tâche. Cette consommation énergétique moindre n'est pas nécessairement liée aux changements techniques, car elle peut également résulter, par exemple, d'une organisation et d'une gestion améliorées.

L'analyse de l'efficacité énergétique peut s'appliquer à divers points du système énergétique, notamment le matériel utilisateur d'énergie, les grands procédés industriels, les technologies d'approvisionnement, les réseaux d'acheminement, voire même la forme et l'infrastructure urbaines. On obtiendra un tableau différent de l'efficacité énergétique selon que l'on tiendra compte des éléments du système ensemble ou séparément⁴. Les décisions prises concernant l'emplacement de l'industrie, l'infrastructure d'approvisionnement en énergie et les grands procédés industriels auront des répercussions durables sur l'efficacité énergétique du système, façonnant les décisions prises plus

⁴ Un exemple est le choix de la technologie de chauffage. Si on utilise un radiateur à résistance électrique pour chauffer l'intérieur d'un bâtiment, l'efficacité du chauffage électrique intérieur selon la première loi est de 100 %, puisque la presque totalité de l'énergie électrique est transformée en chaleur à l'intérieur de la pièce chauffée. Par contre, si l'électricité est générée à partir d'une centrale thermique éloignée, le ratio de l'énergie chimique du combustible de la centrale (p. ex., gaz naturel) à l'électricité qu'il permet de produire pourrait n'être que de 40 % de l'efficacité de la centrale. En ce cas, 10 % de cette électricité pourrait être perdue dans les lignes de transport haute tension (efficacité de transport de 90 %). L'utilisation de l'électricité pour chauffer les locaux, par conséquent, a une efficacité système totale de $40 \text{ p. } 00 \times 90 \text{ \%} \times 100 \text{ \%} = 36 \text{ \%}$.

fréquemment concernant chaque pièce d'équipement (moteurs, systèmes de déplacement d'air, éclairage, etc.).

La gestion énergétique communautaire et l'écologie industrielle sont deux concepts qui se chevauchent et empruntent une approche systémique à l'efficacité énergétique (et à la gestion de l'énergie en général). Dans la gestion énergétique communautaire, toutes les décisions d'infrastructure et d'affectation des terres qui influent sur l'évolution de la forme urbaine doivent soigneusement tenir compte des moyens d'améliorer l'efficacité énergétique du système urbain. L'écologie industrielle vise notamment à localiser les installations industrielles suffisamment près pour pouvoir mutuellement utiliser leurs déchets et énergies résiduelles, et ce, de manière économique⁵. Cela peut supposer la cogénération d'électricité et de vapeur, cette dernière étant distribuée aux usines adjacentes, ou comporter simplement la capture de la chaleur résiduelle d'une usine par une autre, même s'il n'y a pas production d'électricité.

Le terme « économie d'énergie » est parfois utilisé de façon interchangeable pour signifier « efficacité énergétique », mais dans les faits, il s'agit de concepts distincts. L'économie d'énergie correspond aux mesures prises pour réduire la demande d'énergie, ce qui ne se limite pas aux réductions de la demande dues à une efficacité énergétique accrue. Ce terme peut également servir à décrire les mesures prises pour réduire la consommation d'un service (c.à.d. éteindre l'éclairage).

Mesure de l'efficacité énergétique

L'intensité énergétique est un indicateur commun dans l'analyse énergétique, qui sert à inférer les changements dans l'efficacité énergétique, puisque l'efficacité énergétique ne peut être mesurée directement au niveau global. On définit l'intensité énergétique comme étant l'énergie unitaire par production unitaire, ce que l'on peut décrire à la fois pour la production en termes d'unités matérielles, ou d'unités monétaires (PIB ou production brute)⁶. Les indicateurs à base matérielle ou à base d'unités monétaires ne mesurent pas la même chose; il faut éviter une comparaison directe entre eux. Même si nombre d'analyses présupposent un solide lien corrélatif entre la production matérielle et la production économique, il existe des exceptions, nombreuses et importantes. Même si l'augmentation de l'efficacité énergétique tend à réduire l'intensité énergétique, un changement dans l'intensité énergétique peut être attribuable à des facteurs non liés à l'efficacité énergétique, comme des changements structurels dans l'économie et des effets d'interaction. Un certain nombre de méthodologies ont été mises au point pour isoler ces effets et construire des index composites « structurellement ajustés »⁷.

5 C'est ce qu'on appelle parfois l'utilisation séquentielle ou en cascade de l'énergie, car la qualité de l'énergie régresse après chaque utilisation – deuxième loi de la thermodynamique – les installations industrielles peuvent être harmonisées aux besoins énergétiques de qualité progressivement inférieure.

6 *La production brute* est définie comme la valeur totale des biens et services produits par une industrie, somme des intrants de l'industrie, plus le changement de valeur dû au travail et aux investissements en capital. Le PIB se définit comme le changement de valeur attribuable au travail et aux investissements en capitaux. Les valeurs de production brute ne peuvent s'additionner entre industries, contrairement au PIB.

7 Pour un examen détaillé de ces approches et de l'utilité des indicateurs d'intensité énergétique comme instruments de politique, voir : M. Nanduri, J. Nyboer, M. Jaccard, « Aggregating Physical Intensity Indicators: Results of Applying the Composite Indicator Approach to the Canadian Industrial Sector », *Energy Policy* 30 (2002): 151-137.

Efficacité énergétique et décarbonisation

Il existe divers moyens de réduire l'intensité de carbone de l'énergie, notamment abandonner les combustibles fossiles, passer de combustibles fossiles à haute teneur en carbone à des combustibles fossiles à faible teneur en carbone, capturer et emprisonner les émissions de carbone et augmenter l'efficacité énergétique. Dans ce dernier cas, il en résultera une baisse des émissions de carbone si l'intensité de carbone de l'énergie (tonnes de carbone par gigajoule d'énergie) n'augmente pas de façon appréciable en raison du changement, ce qui, souvent, pourrait se produire⁸. Néanmoins, il arrive que la hausse de l'efficacité énergétique soit même associée à une intensité accrue de carbone. À titre d'exemple, une chaudière au charbon est plus efficace qu'une chaudière au bois ou même qu'une autre au gaz naturel (selon la qualité du charbon). Augmenter l'efficacité énergétique en utilisant une chaudière au charbon au lieu des autres moyens aboutirait à une augmentation des émissions de carbone.

L'objet, dans cette étude de cas, est d'étudier le rôle que l'efficacité énergétique pourrait jouer pour promouvoir les objectifs de programme de la TRNEE, à savoir la décarbonisation du système énergétique. Au lieu de se concentrer exclusivement sur l'efficacité énergétique, cette approche tient compte du rôle de l'efficacité énergétique et de son influence sur la décarbonisation du système énergétique, avec d'autres options offertes à l'industrie. C'est là une distinction importante, qui influe sur l'approche analytique élaborée dans l'étude économique, dont nous traitons plus longuement ailleurs dans le rapport de cette dernière étude.

2.2 Caractéristiques du secteur industriel

Utilisation de l'énergie dans l'industrie canadienne

Le secteur industriel, qui englobe l'exploitation minière et les activités de fabrication, est un important producteur de GES au Canada. En 2000, le secteur a produit 237 Mt de CO₂e en émissions directes de GES, la plus grande partie découlant de la consommation d'énergie⁹. L'énergie totale consommée par l'industrie cette même année était de 3 187,2 PJ¹⁰.

L'énergie est particulièrement essentielle à la production des produits industriels de base qui, souvent, servent à fabriquer des biens de consommation finale, au Canada ou à l'étranger. Ces industries primaires, souvent appelées industries du premier palier, sont responsables de plus de 80 % de la consommation énergétique totale de l'industrie. Cela comprend les industries comme le fer et l'acier, les pâtes et papiers, la fusion des métaux, le raffinage du pétrole, la fabrication de produits chimiques et les minéraux industriels (ciment et chaux). Les mines sont responsables d'un autre 5 % de la consommation énergétique. Les industries qui restent, nombreuses et diversifiées (transformation des aliments, fabrication de matériels de transport, etc.) utilisent relativement peu d'énergie, soit 15 %,

8 Le terme « intensité de carbone » a plusieurs sens. Il peut décrire une unité d'émission de carbone par unité de production. La production peut être exprimée en production monétaire ou matérielle. Le second sens décrit les émissions de carbone associées à la forme d'énergie, souvent en tonnes de carbone par gigajoule, comme nous le faisons ici.

9 Résumé du tableau S-1 dans : Environnement Canada, *Inventaire canadien des gaz à effet de serre 1990–2000* (Ottawa : 2002), 3. Comprend les émissions de combustion, les émissions fugitives et les émissions de procédé dans les catégories suivantes : industries des combustibles fossiles, exploitation minière, fabrication, total des émissions fugitives, total des procédés industriels.

10 Ressources naturelles Canada, *Guide des données sur la consommation d'énergie des utilisations finales, 1990 à 2001* (Ottawa, Ontario : 2003), 12.

mais représentent 60 % de la production économique industrielle, telle que mesurée par le produit intérieur brut (PIB)¹¹.

L'intensité énergétique (d'après le PIB) dans l'industrie canadienne a généralement diminué depuis 1990, pour atteindre en 2002 un niveau de 27 % inférieur à celui de 1990¹². Les tendances en matière d'intensité de carbone sont analogues (telles que mesurées par les émissions de GES par unité du PIB). Au cours de la même période, l'intensité de carbone de l'industrie canadienne a lentement régressé, pour se situer en 2002 à environ 34 % en deçà des niveaux de 1990¹³. Le recul en matière d'intensité d'énergie et de carbone est, à la fois, attribuable à l'amélioration de l'efficacité chez les utilisateurs d'énergie, de même qu'à des changements structurels dans l'industrie. Dans ce contexte, le terme « changement structurel » désigne un changement dans la composition des produits ou de l'industrie qui détermine le volume total de la production industrielle. De 1995 à 2001, la part d'activité des industries moins énergivores a augmenté, tandis que celle des industries plus énergivores a diminué, d'où un déclin de l'utilisation totale de l'énergie de 11,5 % par rapport à 1995¹⁴.

De plus, les tendances reposant sur la production économique ne peuvent donner un tableau précis de l'intensité énergétique, car les unités monétaires sont affectées par de nombreux facteurs non liés à l'énergie, par exemple le coût de la main-d'œuvre ou le prix de vente du produit final. Les indicateurs composites calculés pour l'intensité énergétique physique agrégée dans l'industrie canadienne de 1990 à 1996 laissent supposer un recul plus modeste de l'intensité énergétique par rapport aux mesures fondées sur le PIB¹⁵.

On estime que les gestionnaires sont plus directement motivés par la réduction du coût que les consommateurs résidentiels et commerciaux¹⁶. Ainsi, il est possible que les entreprises aient déjà eu recours à plusieurs options rentables pour réduire la consommation d'énergie, surtout si les coûts de l'énergie constituent un fort pourcentage du coût total de production. Dans certains secteurs, la capacité matérielle de réduire la consommation d'énergie est plus limitée, notamment le recours aux combustibles fossiles. Cela pourrait être attribuable aux exigences thermiques minimales des procédés industriels (affinage du minerai, production de pâte, etc.). Quoiqu'il en soit, le potentiel d'augmentation de l'efficacité énergétique peut être important, notamment dans certains secteurs industriels.

On a essayé dans plusieurs études de préciser ce potentiel dans le contexte canadien, tant dans l'analyse de certaines industries qu'avec celles d'autres secteurs de l'économie. Les mesures d'efficacité énergétique figuraient parmi toute une gamme de mesures de réduction des GES, analysées pour les

11 Résumé des données relevées dans : Centre canadien de données et d'analyse de la consommation finale d'énergie dans l'industrie (CIEEDAC), *Development of Intensity Energy Indicators for Industry 1990-2002* (Burnaby : Université Simon Fraser, 2004).

12 Ibid., 11.

13 Centre canadien de données et d'analyse sur la consommation d'énergie des utilisations finales industrielles (CIEEDAC), *Development of Greenhouse Gas Intensity Indicators for Canadian Industry 1990 to 2002* (Burnaby : Université Simon Fraser, 2004).

14 Office de l'efficacité énergétique, *Évolution de l'efficacité énergétique au Canada, 1990 à 2001*, chapitre 5 : Secteur industriel (Ottawa, Ontario : Ressources naturelles Canada, 2003).

15 Nanduri et al., « Aggregating Physical Intensity Indicators », 151-137.

16 W. Golove, « Are Investments in Energy Efficiency Over or Under: An Analysis of the Literature », *Proceedings of the 1994 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, Asilomar, USA., 1994.

tables de concertation (Table de l'industrie, Table du secteur forestier et Groupe de l'analyse et de la modélisation) dans le Processus national sur le changement climatique, ainsi que dans des analyses de modélisation subséquentes¹⁷. Les sociétés de services publics se sont, elles aussi, employées à évaluer les possibilités d'efficacité énergétique, de façon à informer les responsables des programmes de gestion, côté demande, même si ces études se concentrent sur un seul type d'énergie et ont une portée régionale¹⁸. Les études qui évaluent l'efficacité énergétique à l'échelle nationale et les perspectives d'économies dans l'ensemble des industries sont moins nombreuses¹⁹. Les mesures d'efficacité énergétique sont remarquables par leur diversité : il existe une vaste gamme de possibilités, notamment celles déjà diffusées, celles en développement et celles promises à la commercialisation. Elles sont uniques par leur application à divers sous-secteurs de l'industrie, malgré qu'il existe certaines mesures transsectorielles. Nous analysons en détail les options d'efficacité énergétique offertes à l'industrie dans la partie de l'étude économique de ce projet.

2.3 Contexte de la politique actuelle

Nous donnons un bref aperçu de la politique gouvernementale actuelle concernant l'énergie et les émissions de GES dans le secteur industriel, ainsi qu'une description des politiques actuelles touchant l'EE.

Politique sur l'énergie et les GES touchant le secteur industriel

Les politiques actuelles qui touchent l'efficacité énergétique industrielle prennent leurs racines dans les années 1970. Le choc des prix pétroliers, en 1973, a conféré à la sécurité énergétique une grande priorité, ce qui a donné lieu, entre autres, à la création de nombreux programmes d'efficacité énergétique, tant au Canada qu'à l'échelle internationale. Le *Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne* (PEEIC), lancé en 1975, est un organisme-cadre qui supervise un partenariat entre le gouvernement et l'industrie privée dans le but d'accroître l'efficacité énergétique industrielle du Canada. Le PEEIC possède des groupes de travail sectoriels, dont chacun représente des entreprises engagées dans des activités industrielles analogues et qui participent au programme par l'entremise de leurs associations professionnelles²⁰.

Le PEEIC est géré par l'Office de l'efficacité énergétique (de Ressources naturelles Canada) et a le mandat global de travailler avec l'industrie canadienne afin d'augmenter l'efficacité énergétique, de limiter les émissions de gaz à effet de serre et d'accroître la compétitivité sur le plan économique.

17 Voir le site Web national sur le changement climatique à l'adresse <www.nccp.ca/NCCP/national_process/issues/index_f.html> où l'on trouve de nombreuses études et analyses des mesures. Les mesures de l'industrie ont été intégrées dans un programme de modélisation d'intégration (le cumulatif) du modèle SCMI et du modèle MARKAL. Voir : *Groupe de l'analyse et de la modélisation, Une évaluation des conséquences économiques et environnementales pour le Canada du Protocole de Kyoto* (Ottawa : Processus national sur le changement climatique, 2000).

18 Par exemple, la B.C. Hydro a publié récemment une étude sur les possibilités : *BC Hydro, BC Hydro Conservation Potential Review, Industrial Sector Report*, préparée par Marbek Resources Consultants et Willis Energy Services, Vancouver, juillet 2003.

19 Dans une étude préparée en 1996 pour Ressources naturelles Canada, les chercheurs constataient que les possibilités techniques d'économie d'énergie dans six grandes industries consommatrices d'énergie se situaient entre 3 et 25 % de la consommation énergétique projetée en 2010. MK Jaccard and Associates et Willis Energy Services Ltd, *Industrial Energy End-Use Analysis & Conservation Potential in Six Major Industries in Canada*, préparée pour Ressources naturelles Canada, 1996.

20 Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne, *Rapport annuel 2002-2003* (Ottawa : Ressources naturelles Canada, 2004).

L'Office, par l'entremise du PEEIC, administre également le Programme des innovateurs énergétiques industriels qui mobilise et encourage les utilisateurs industriels de l'énergie, au niveau des entreprises, à se doter de stratégies de planification de la gestion de l'énergie à long terme et à les reproduire dans leurs entreprises.

L'efficacité énergétique industrielle est devenue étroitement liée aux initiatives de la politique sur le changement climatique. Elle figurait en bonne place dans les efforts de l'industrie visant à réduire ses émissions dans le cadre du programme Mesures volontaires et Registre Inc. Le Registre a été lancé en 1994 afin d'encourager les organismes privés et publics à limiter volontairement leurs émissions nettes de GES par des mesures planifiées et exécutées par les participants²¹.

Les discussions et débats sur la formulation de la politique relative au changement climatique se sont intensifiés au cours des années 90. Un peu avant la ratification du Protocole de Kyoto en décembre 2002, le gouvernement du Canada publiait, en novembre de la même année, le *Plan du Canada sur les changements climatiques*, où il énonçait une approche en trois volets pour réduire les émissions des grands émetteurs industriels²² :

- cibles de réduction établies par ententes assorties de renforts réglementaires ou financiers (réduction de 55 mégatonnes (Mt));
- accès à un système canadien d'échange de droits d'émissions et à des compensations intérieures, ainsi qu'à des permis internationaux offrant une marge de manœuvre;
- mesures complémentaires (réduction supplémentaire de 11 Mt).

On incite les PME à viser des cibles volontaires d'efficacité énergétique.

Le groupe des grands émetteurs finaux (GGEF) de Ressources naturelles Canada, créé à la fin de 2002, est chargé de mettre en application cette partie du plan et préconise une démarche fondée sur l'intensité des émissions afin d'établir des cibles pour les grands émetteurs industriels²³. Les cibles d'intensité d'émission seront fixées à un certain niveau, de sorte que cette mesure entraîne les réductions nécessaires en fonction des prévisions gouvernementales. Le GGEF collabore avec les principaux secteurs industriels (et d'autres intervenants) pour mettre au point des politiques et des mesures qui favorisent des réductions de cet ordre. Il devrait recourir à un certain nombre d'instruments pour atteindre ces objectifs, notamment des renforts législatifs ou réglementaires, des ententes négociées, de même que des mécanismes d'observation souples, comme un système canadien d'échange d'émissions, un système de compensations intérieures, et le marché international du carbone.

Le budget fédéral de 2003, qui faisait suite au *Plan du Canada sur les changements climatiques*, comportait des affectations budgétaires permettant un appui, à long terme, à la recherche-développement sur les technologies naissantes d'efficacité énergétique (250 millions de dollars) et pour subventionner dans le secteur industriel, des mesures d'efficacité énergétique et de compensations du

21 Mesures volontaires et Registre Inc. du Défi-climat canadien, *Rapport annuel 2003* (Ottawa : 2004).

22 Gouvernement du Canada, *Plan du Canada sur les changements climatiques* (Ottawa : 2002).

23 L'intensité des émissions est le ratio des émissions par unité de production. Les grands émetteurs industriels comprennent notamment le secteur de l'approvisionnement en électricité. Pour plus de précisions sur les entités considérées comme de grands émetteurs, voir le site Web du GGEF, à l'adresse : <www.nrcan-rncan.gc.ca/lfeg-ggef/>

carbone (303 millions de dollars)²⁴. La recherche-développement sur les technologies perfectionnées d'efficacité des utilisateurs finaux est l'un des cinq secteurs prioritaires en science et en technologie (les autres sont les combustibles fossiles moins polluants, la production décentralisée d'énergie, les biocombustibles et l'économie fondée sur l'hydrogène).

À l'extérieur des politiques et initiatives fédérales, les gouvernements provinciaux et sociétés de services publics d'État ont également, à divers degrés, déployé des efforts pour promouvoir l'efficacité énergétique dans l'industrie ainsi que la politique sur le changement climatique en général.

Politique fiscale – Investissements dans l'efficacité énergétique

Il est possible que le régime fiscal établisse un terrain où les règles sont inégales à l'égard des investissements énergétiques qui se font concurrence. Selon une étude menée en 1996, les investissements dans l'efficacité énergétique et ceux dans le pétrole et le gaz font l'objet de traitements fiscaux différents²⁵. Dans l'étude en question, on évaluait les investissements éventuels selon le niveau du « coup de pouce » que le régime fiscal offrait à un investissement par ses caractéristiques incitatives (crédits d'impôt, exonérations fiscales ou taux d'imposition préférentiel) par rapport à un « régime fiscal neutre ». Les projets d'efficacité énergétique recevaient un « coup de pouce » négatif, alors que les investissements dans le pétrole et le gaz (notamment les grands investissements pétroliers et gaziers) bénéficiaient d'un coup de pouce de l'ordre de 5 à 20 %. Il est important de signaler que les investissements dans l'efficacité énergétique visés par cette étude (panneaux solaires, chauffage de district et modernisation des bâtiments) excluaient les investissements dans l'efficacité énergétique des procédés industriels, qui bénéficient de toute une gamme de traitements selon la catégorie de déductions pour amortissement (DA)²⁶. Les investissements visés à l'étude reçoivent un traitement de 4 % pour DA de classe 1, alors que les investissements dans l'efficacité énergétique pourraient s'appliquer à différents types de biens et de traitements DA (supérieurs à 4 %). Néanmoins, dans la plupart des cas, les équipements « efficaces » et « non-efficaces » ont le même DA.

Il existe une exception, soit une classe DA spéciale pour l'équipement relatif à l'économie d'énergie et aux énergies renouvelables (classe 43.1) où certains investissements sont admissibles à un taux annuel

24 Dans les initiatives non industrielles, il faut mentionner des fonds pour subventionner les améliorations aux enveloppes et aux systèmes de chauffage des bâtiments résidentiels et pour créer des programmes qui favorisent les achats éconergiques chez les Canadiens (131 millions de dollars).

25 Ressources naturelles Canada, *Égalité des chances : le traitement fiscal des investissements concurrentiels dans le secteur de l'énergie* (Ottawa : Ressources naturelles Canada; Finances Canada, 1996).

26 Au Canada, on utilise l'amortissement dégressif, et cette méthode nécessite un regroupement par classes de certains éléments d'actif; les déductions pour amortissement sont autorisées à un taux prescrit d'après le coût des éléments d'actif de la catégorie. Lorsqu'une entreprise acquiert un nouvel équipement, son coût est ajouté à un groupe de la catégorie appropriée de déductions pour amortissement (groupe défini par règlement pris en application de la *Loi de l'impôt sur le revenu*). Si l'équipement est vendu ou aliéné par d'autres moyens, le coût de l'actif ou le produit de son aliénation, à la valeur la plus faible, est déduit du groupe. Un contribuable peut déduire de son revenu un certain pourcentage du solde non amorti pour le groupe (le coût d'immobilisation non amorti) dans une année où de l'équipement de ce groupe sert à générer des revenus. Ce montant est également réduit de 50 % des ajouts nets à la catégorie DA dans une année. Lorsque le dernier article des biens du groupe de DA est vendu ou aliéné par d'autres moyens, le contribuable peut demander la DA résiduelle à titre de « perte finale ». Si le montant déduit du groupe à la vente de l'actif (au moindre du coût ou du produit) dépasse le coût d'immobilisation non amorti du groupe, ce montant excédentaire s'ajoute au revenu à titre de récupération de l'amortissement. Si l'actif est vendu à un montant supérieur à son coût initial, la différence entre le produit et le coût initial constitue un gain en capital, dont seulement la moitié est actuellement incluse dans le revenu.

d'amortissement de 30 %. Cette classe vise spécifiquement les systèmes combinés d'énergie et de chaleur, la production de gaz haute efficacité et le matériel de récupération thermique à titre d'investissements dans l'efficacité énergétique pertinents au secteur industriel. Pour la plupart, les investissements visés et compris dans cette classe sont les systèmes d'énergie renouvelable (systèmes thermo-solaires, systèmes photovoltaïques, petites centrales électriques, systèmes de conversion de l'énergie éolienne et systèmes de génération d'électricité utilisant les gaz de décharge, l'énergie géothermique, la biomasse, le gaz naturel dissous et les combustibles résiduels). Un ajout important à cet incitatif fiscal est celui des frais liés aux énergies renouvelables et aux économies d'énergie au Canada, grâce auxquels les coûts intangibles (p. ex., les dépenses pour les études de faisabilité, les frais pré-construction, etc.) liés aux projets qui entrent dans la catégorie 43.1, soit 1) pour être passés en dépenses dans l'année où ils sont engagés, 2) pour être pris en déduction une année ultérieure ou 3) pour être transmis aux investisseurs par des conventions d'émission d'actions accréditatives (AC). En transmettant aux investisseurs la déduction, les conventions d'émission d'actions accréditatives aident à encourager l'investissement et facilitent le financement.

Le Canada n'utilise pas d'autre incitatif fiscal dans le régime d'impôt sur le revenu des particuliers ou des entreprises, bien que certains crédits soient offerts dans le cadre des systèmes provinciaux de redevances. La Saskatchewan offre un crédit de redevances (Saskatchewan Petroleum Research Incentive) pouvant aller jusqu'à 30 % des coûts des projets admissibles pour mettre en œuvre de nouvelles technologies dans les secteurs du pétrole et du gaz naturel. Cet incitatif comprend expressément l'augmentation de l'efficacité et de la rentabilité des technologies du pétrole et du gaz naturel parmi ses grands objectifs. L'autre objectif est de réduire les répercussions environnementales de la production. Le gouvernement albertain, dans le cadre de son programme OFSG (Otherwise Flared Solution Gas ou gaz naturel dissous qui serait autrement brûlé) renonce à la redevance sur le gaz naturel dissous qui serait autrement brûlé et les sous-produits connexes, lorsqu'ils sont utilisés d'une manière qui exigerait normalement le versement de redevances (c.à.d. conservés).

L'EF et l'efficacité énergétique industrielle

À l'extérieur du régime fiscal, quelques programmes gouvernementaux et des sociétés de services publics offrent des incitatifs pour que l'industrie favorise l'efficacité énergétique. Pour la plupart, les programmes s'inscrivent dans des lignes de conduite plus générales comportant des éléments comme la fourniture de renseignements. À titre d'exemple, le programme d'incitatifs pour les vérifications énergétiques industrielles, qui aide les entreprises à trouver des façons d'augmenter leur efficacité énergétique en les aidant à financer des vérifications, est administré dans le cadre du programme PEEIC de Ressources naturelles Canada.

Dans le *Plan du Canada sur les changements climatiques*, on veut établir un système de permis négociables favorisant la décarbonisation (ceci, à titre d'outil d'internalisation des coûts et de recettes fiscales, pourrait être considéré comme faisant partie de l'EF). La préparation d'un système canadien d'échange d'émissions s'inscrit dans l'approche à trois volets de ce plan pour s'attaquer aux émissions des grands émetteurs industriels (les « grands émetteurs finaux »). Grâce à ce système, une entreprise qui aurait besoin d'un permis pour couvrir ses émissions de GES (dépassant celles couvertes par les permis) pourrait acheter des permis des entreprises ayant un excédent, se tourner vers des sources internationales ou, sur le marché canadien, vers des créateurs de « mesures compensatoires » réduisant les émissions des activités non visées. Le gouvernement tente actuellement de déterminer pour son

système de permis, quelles modalités conceptuelles favoriseraient le mieux le développement de ce marché²⁷.

Il existe actuellement un système pilote « volontaire » d'échange d'émissions. Le *Projet pilote d'élimination, de réduction et d'information sur les émissions* (PP-ERIE) est conçu pour offrir aux entreprises, organismes et particuliers du Canada un incitatif économique à la prise immédiate de mesures pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Par l'entremise du PP-ERIE, le gouvernement fédéral achète les droits touchant des réductions vérifiées des émissions de gaz à effet de serre des projets admissibles à un prix fixe à la tonne. Le programme doit fonctionner jusqu'à la fin de 2007, et on a réservé un budget de 13,2 millions de dollars pour l'achat de réductions et d'éliminations.

Recherche et développement

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le *Plan du Canada sur les changements climatiques* permet de financer directement la recherche-développement (R-D) en rapport avec les technologies d'efficacité énergétique. Le Bureau de recherche et de développement énergétiques (BRDE) coordonne les activités fédérales de recherche-développement énergétique et la participation du Canada aux activités internationales de R-D. Il dirige le Programme de recherche et de développement énergétiques, qui inclut une stratégie d'efficacité énergétique dans l'industrie.

Des fonds sont également fournis par le Centre de la technologie de l'énergie de Canmet (CTEC), qui offre des programmes de financement contractuels remboursables et en partage de coûts, ainsi que de l'Initiative de recherche innovatrice (IRI) pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, pour stimuler l'exécution de recherches exploratoires risquées visant à trouver des solutions au problème du changement climatique (cela comprend les projets d'efficacité énergétique)²⁸.

Dans l'ensemble, le Canada a favorisé les incitatifs fiscaux par rapport au financement direct qui appuie la R-D et offre l'un des systèmes les plus généreux de tous les pays de l'OCDE. D'après les estimations, les crédits d'impôt en R-D au Canada équivalaient à environ 13 % des dépenses de R-D de l'industrie. En 1999 par contre, aux États-Unis les incitatifs fiscaux à la R-D représentaient moins de 1,6 % des dépenses de R-D de l'industrie²⁹. Les dispositions du régime fiscal sur la R-D comprennent :

- les crédits d'impôt autorisés sur les frais généraux réels ou les allocations pour frais généraux d'après un pourcentage des salaires ou de la rémunération du personnel de recherche;
- la radiation immédiate à 100 % des dépenses d'équipement de R-D;
- le remboursement des crédits d'impôt de R-D non utilisés aux petites corporations privées sous contrôle canadien (rétroactif à trois ans ou reporté sur 10 ans);

27 Les grands émetteurs finaux recevront des permis au moyen de méthodes d'affectation définies par règlement, mais la méthode d'attribution des permis et la conception du système ont des répercussions importantes sur le marché qui pourrait en résulter. Cela comporte, notamment, la question à savoir si les permis sont distribués ex ante ou ex post, l'échéancier des cibles (annuelles ou simples pour la période d'engagement de Kyoto) et quelles seront les cibles (égales chaque année ou se resserrant progressivement). Voir : Groupe des grands émetteurs finaux, Ressources naturelles Canada, *Moment et fréquence de l'apurement et de la distribution des permis* < http://www.nrcan-rncan.gc.ca/lfeq-ggef/Francais/timing_fr.pdf > [site consulté le 30 janvier 2004].

28 Pour l'exercice 2002/2003, l'aide financière de CANMET aux initiatives industrielles est évaluée à environ 11 millions de dollars, fournie en partie par le Programme de recherche et de développement énergétiques de Ressources naturelles Canada. L'IRI est un fonds de 1,45 million de dollars.

29 Organisation pour la coopération et le développement économiques (OCDE), *Tax Incentives for Research and Development: Trends and Issues* (Paris : 2002).

- les crédits d'impôt aux entreprises qui font des versements à des instituts de recherche ou universités approuvés à l'égard de recherches touchant les activités de l'entreprise;
- les incitatifs fiscaux pour la recherche fondamentale menée par le secteur privé.

Les incitatifs fiscaux décrits, ci-dessus, s'appliquent à tous les investissements en R-D et ne visent donc pas uniquement les investissements dans l'efficacité énergétique.

3 Méthodologie

3.1 Aperçu de la méthodologie

En raison de la diversité de l'industrie, tout programme de modélisation doit comporter une désagrégation pour qu'il soit possible de prévoir la demande énergétique, les émissions et d'autres aspects du système énergétique. À cette fin, nous utilisons le modèle du SCMI, qui offre une illustration détaillée et régionale de l'utilisation de l'énergie dans l'industrie canadienne, telle que représentée par 54 sous-modèles spécifiques. Ces sous-modèles (voir la liste à la figure 3-1) sont des groupes de technologies qui produisent ou consomment de l'énergie dans ce sous-secteur, en termes de quantité annuelle de produits et services intermédiaires et finaux fournis (c.-à-d. tonnes de journal, mètres cubes de produits pétroliers raffinés). La demande de produits et la demande de services énergétiques sont liées dans les modèles de flux des sous-secteurs qui décrivent la séquence des activités nécessaires pour générer ce produit ou ce service. Nous donnons à l'annexe A un exemple de modèle de flux d'un sous-secteur industriel.

La prévision des demandes de services détermine la simulation du modèle par tranche de cinq ans, autorisant ainsi des hypothèses détaillées sur la production industrielle (par produit). Le rythme du changement technologique est modélisé selon une fonction de mise au rancart qui saisit la durée utile normale et technique du matériel utilisateur d'énergie, de même que des nouveaux équipements nécessaires pour répondre à la demande supplémentaire.

Figure 3-1 : Sous-modèles de secteurs industriels dans le SCMI

Sous-secteurs industriels	C-B	ALB	SASK	MAN	ON	QUÉ	ATL
Produits chimiques	✓	✓	–	–	✓	✓	–
Mines de charbon	✓	✓	✓	–	–	–	✓
Minéraux industriels	✓	✓	–	–	✓	✓	✓
Fer et acier	–	–	–	–	✓	✓	–
Fusion de métaux	✓	–	–	✓	✓	✓	✓
Mines, métaux	✓	–	✓	✓	✓	✓	✓
Extraction du gaz naturel	✓	✓	✓	*	*	*	✓
Autre, fabrication	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Raffineries de pétrole	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓
Pétrole brut	✓	✓	✓	–	✓	–	✓
Pâtes et papiers	✓	✓	✓	–	✓	✓	✓

* Transport seulement

Ces sous-modèles industriels sont intégrés dans un cadre de modélisation global simulant l'interaction entre les secteurs utilisateurs d'énergie (dans les secteurs industriel, résidentiel, commercial/ institutionnel et des transports) et les secteurs qui produisent ou transforment l'énergie (génération d'électricité, extraction du pétrole brut, raffinage du pétrole et extraction et traitement du gaz naturel). La modélisation de l'interaction entre ces secteurs est importante pour saisir la dynamique des prix de l'énergie guidant les prises de décisions; ainsi, l'adoption généralisée de moteurs électriques et systèmes auxiliaires haute efficacité aurait des répercussions sur la demande d'électricité, ce qui pourrait se répercuter sur les prix et avoir un effet sur les décisions liées à l'énergie dans l'ensemble de l'économie.

Puisque le SCMI est incontournable dans la construction des analyses de base et des analyses subséquentes de l'étude économique, nous décrivons le modèle plus en détail.

3.2 Le modèle du SCMI

Depuis 1986, le SCMI est continuellement développé par l'Energy and Materials Research Group de la faculté de la gestion des ressources et de l'environnement, à l'Université Simon Fraser³⁰. Actuellement, il représente sept régions du Canada, mais peut être appliqué à n'importe quel pays ou n'importe quelle région. Comme nous l'avons mentionné, le modèle fait ressortir le niveau macro-économique d'analyse en ce sens qu'il simule, avec des détails considérables, les décisions concernant l'équipement et les bâtiments des entreprises et des ménages en réponse à des

³⁰ Le volet demande énergétique du modèle, auparavant appelé ISTUM, a été mis au point pour la première fois au début des années 80 par le département de l'Énergie des É.-U. en tant que modèle d'utilisation de l'énergie dans le secteur industriel.

changements dans l'information, le coût et l'existence de solutions de rechange³¹. Toutefois, on peut aussi y intégrer des rétroactions indirectes normalement associées aux modèles macro-économiques, notamment les changements dans la demande de produits finaux et intermédiaires au fil de l'évolution des coûts de production.

Une simulation du SCMI compte six étapes de base :

1. *Évaluation de la demande* : On représente dans le modèle les technologies en termes de quantité de services fournis, ce qui pourrait, par exemple, être le nombre de kilomètres parcourus en véhicule, le nombre de tonnes de papier, ou de mètres carrés de locaux chauffés et climatisés. Le système donne alors une prévision de la croissance de la demande de services énergétiques³², qui détermine la simulation du modèle, habituellement en tranches de cinq ans (c. à. d., 2000, 2005, 2010, 2015, etc.).
2. *Mise au rancart* : Dans chaque période à venir, on met au rancart une partie du stock initial de technologies. La mise au rancart ne dépend que de l'âge³³. Les stocks résiduels de technologies dans chaque période sont soustraits de la demande de services énergétiques prévue, et la différence détermine de façon quantitative les stocks de nouvelles technologies dans lesquels il convient d'investir.
3. *Concurrence des nouvelles technologies/de la modernisation* : Les technologies possibles se font concurrence pour ces nouveaux investissements. L'objectif du modèle est de simuler cette concurrence afin que le résultat corresponde approximativement à ce qui se produirait en réalité. Donc, le déterminant de la concurrence est la réduction des coûts annualisés sur le cycle utile, mais ces coûts sont fortement ajustés pour rendre compte de la recherche sur les comportements antérieurs et prévus des entreprises et des ménages³⁴. Ainsi, les coûts technologiques dépendent non seulement des coûts financiers reconnus, mais aussi des différences indiquées dans les préférences non financières (p. ex., dans la qualité de l'éclairage de diverses ampoules) et les risques d'échecs (on pense qu'une certaine technologie risque plus d'échouer qu'une autre). Même l'établissement des coûts financiers n'est pas simple, car les préférences chronologiques (taux d'actualisation) peuvent différer selon le décideur (ménage ou entreprise) et le type de décision (discrétionnaire ou non). Le modèle fait également une répartition probabiliste des parts de marché entre technologies³⁵. Nous donnons à l'annexe A plus de précisions sur l'algorithme de concurrence des technologies.

31 À ce propos, le SCMI ressemble aux modèles mis au point et appliqués dans les années 1980 par les sociétés d'électricité pour estimer les effets des politiques visant à influencer les choix technologiques aux fins des objectifs d'efficacité énergétique et de remplacement des combustibles. Le SCMI a été utilisé à cette fin par les sociétés d'électricité et de gaz du Canada.

32 La croissance de la demande de services énergétiques (p. ex., tonnes d'acier) est souvent dérivée d'une prévision donnée en termes économiques (p. ex., valeur en dollars de la production du secteur de l'acier).

33 On dispose de preuves considérables selon lesquelles le rythme de remplacement de la technologie dépend du cycle économique mais, à plus longue échéance, tel que simulé au SCMI, l'âge est le facteur le plus important et le plus prévisible.

34 Dans le cas des technologies existantes, il pourrait y avoir des données sur le comportement des consommateurs. Toutefois, en ce qui a trait aux technologies naissantes (particulièrement les technologies hétérogènes dans l'industrie), il faut un recensement des entreprises et des ménages (officiel et officieux) sur leurs préférences éventuelles.

35 Par contre, les modèles optimiseurs tendent à produire des résultats, où une seule technologie obtient la totalité de la part de marché des nouveaux stocks.

Modernisation : Dans chaque période, il survient une concurrence analogue touchant les stocks technologiques résiduels afin de simuler la modernisation (si cela est souhaitable et probable du point de vue de l'entreprise ou du ménage)³⁶. Les mêmes renseignements financiers et non financiers sont nécessaires, sauf que les coûts d'immobilisation des stocks technologiques résiduels sont exclus, puisque les sommes ont été dépensées lorsque le stock technologique résiduel a été acquis.

4. *Équilibre de l'offre et de la demande d'énergie* : Lorsque, dans les sous-modèles de la demande énergétique, on a choisi des technologies, les demandes d'énergie résultantes sont acheminées aux modèles de l'offre d'énergie. Ces modèles choisissent alors des technologies d'approvisionnement appropriées, évaluent le changement de coût de production de l'énergie, et s'il est important, renvoient aux modèles de la demande de nouveaux prix de l'énergie. Ce cycle se poursuit jusqu'à la stabilisation en équilibre des prix et de la demande d'énergie³⁷.
5. *Équilibre de la demande de services d'énergie* (non utilisé dans cette étude) : Lorsque le cycle de l'offre et de la demande d'énergie s'est stabilisé, le système fait appel au cycle macro-économique (s'il est activé), qui corrige la demande de services énergétiques selon les changements de prix global, d'après l'élasticité des prix. Si l'ajustement est important, le système complet redémarre à partir de l'étape 1, avec de nouvelles données sur la demande.
6. *Extrant* : Puisque chaque technologie est marquée par sa propre utilisation nette de l'énergie, les émissions nettes d'énergie et les coûts afférents, la simulation se termine par la totalisation de ces données. La différence entre une simulation « ne rien faire » ou statu quo et une simulation de politique donne une évaluation des résultats probables et du coût d'une politique ou d'un ensemble de politiques.

3.3 Élaboration du scénario de base

Nous élaborons une prévision de base des émissions de carbone dans le secteur industriel de 2000 à 2030 à l'aide du modèle du SCMI, en respectant les étapes de simulation 1 à 3 et 6 décrites à la section précédente³⁸. La simulation prévisionnelle s'effectue spécifiquement en invoquant les sous-modèles du SCMI concernant l'industrie et l'offre d'énergie³⁹.

Comme nous l'avons mentionné à l'étape 1 de la simulation, les technologies sont représentées dans le modèle en fonction de la quantité de services qu'elles fournissent. Le modèle contient de l'information sur les parts de marché initiales des stocks d'équipement en 2000. Individuellement, les types d'équipements sont caractérisés en fonction de leur capacité, de leur coût d'immobilisation, de leur consommation énergétique unitaire (et de leur production, dans le cas de l'équipement de conversion

36 Si cela est justifié, on peut simuler la modernisation comme équivalant au remplacement complet des stocks technologiques résiduels par de nouveaux stocks technologiques.

37 Cette procédure de convergence, modélisée d'après le modèle NEMS du gouvernement américain, arrête le mode itératif lorsque les changements dans la demande et les prix de l'énergie tombent en deçà d'une valeur seuil. Par contre, dans le modèle MARKAL, on n'a pas besoin de ce type de procédure de convergence; le modèle est intrinsèquement conçu pour une itération jusqu'à l'équilibre.

38 Les étapes 5 et 6 interviennent si la modélisation porte sur une simulation de politique ou autre que de base.

39 Même si nous appliquons le modèle de l'offre d'électricité dans les scénarios de base et de rechange, nous n'indiquons pas dans les résultats la consommation d'énergie ou les émissions.

d'énergie), des coûts d'exploitation non énergétiques, des émissions, de la durée utile prévue dans le cas des nouvelles technologies et de la première année où ces technologies sont offertes sur le marché. Il y a une certaine mesure d'inexactitude dans la caractérisation des stocks d'équipement existants, particulièrement en ce qui a trait aux caractéristiques actuelles de fonctionnement de l'équipement plus ancien. Pour surmonter cette difficulté, les données sur les stocks existants sont prises en compte avec les données de consommation énergétique désagrégées et propres à l'industrie en 2000.

Pour la simulation du modèle, il faut une prévision macro-économique initiale. Aux fins de notre étude, les hypothèses concernant la croissance économique (plus précisément les taux régionaux de croissance de la production brute pour 2000 à 2020) et les prix futurs de l'énergie sont tirés de *Perspective des émissions du Canada : une mise à jour* (PEC-MJ)⁴⁰. Aux fins de la simulation au-delà de 2020, les tendances annuelles relatives au prix et à la croissance dans la période 2015-2020 sont présumées se poursuivre de 2020 à 2030. Puisque la croissance industrielle est exprimée en fonction de la valeur monétaire de la production, nous la convertissons en croissance prévue de la production matérielle, car cela est nécessaire pour établir la projection des demandes de services énergétiques à l'étape 1 de la procédure de simulation du modèle. Même si les changements dans la production brute donnent généralement un indice des changements dans la croissance matérielle, nous nous sommes basés sur d'autres renseignements pour établir les taux réels de croissance matérielle retenus au modèle.

Les prévisions d'émissions générées par le SCMI sont étalonnées en fonction des prévisions officielles d'émissions de GES (en décembre 2003), formulées depuis la publication de PEC-MJ. Le SCMI étalonne en deçà de 1,6 % les prévisions de GES pour l'ensemble du Canada en 2010. L'industrie est étalonnée en deçà de 1 %⁴¹. L'étalonnage est atteint en corrigeant les hypothèses sur les taux de croissance et la part du combustible dans la prévision.

Le SCMI, comme tout modèle, est une simplification d'un système; la plupart des variables comportent divers degrés d'incertitude qui se répercuteront sur les prévisions de base⁴². Nous traitons à l'annexe A de l'incertitude liée à l'analyse de modélisation dans l'étude de cas.

3.4 Résultats et analyse – Scénario de base

Dans cette section, nous donnons la prévision de base de la production, des émissions de GES et de la consommation énergétique et calculons les indicateurs d'intensité à partir de ces données. Le tableau 3-1 est un résumé des résultats pour le Canada. Dans l'ensemble, les émissions du secteur industriel (telles que définies pour l'étude de cas) augmentent de 50 % sur l'horizon de simulation de trente ans, soit une augmentation des émissions directes et une baisse des émissions indirectes⁴³. La part de l'électricité produite par cogénération dans le secteur augmente, sur la période de simulation, particulièrement dans l'exploitation des sables bitumineux. Les émissions totales augmentent à un

40 Les prévisions de GES ont été revues depuis la publication de PEC-MJ, mais ce n'est que dans ce document que l'on trouve un tableau complet des hypothèses sous-jacentes. Groupe de la modélisation et de l'analyse, *Perspective des émissions du Canada : une mise à jour* (Ottawa : Processus national sur le changement climatique, 2000).

41 L'industrie comprend des secteurs définis dans notre étude.

42 Certains analystes soutiennent qu'il ne faut jamais établir un seul cas-étalon, puisque cela donne une fausse impression d'atténuation de l'incertitude.

43 Les émissions indirectes sont celles qui résultent de l'activité de l'entité en question (consommation d'électricité), mais produites par une source externe à celle-ci (société de services publics). L'électricité produite et consommée par l'industrie par cogénération est prise en compte dans les émissions directes.

rythme annuel de 1,53 %, ce qui est légèrement plus rapide que la croissance de la consommation nette d'énergie (qui augmente au rythme annuel de 1,48 %). Même si les profils de base généraux des émissions et de l'énergie sont analogues, le tableau des émissions dépend des tendances au niveau des parts du combustible et des émissions autres que de combustion, en plus de la consommation énergétique sur la période prévisionnelle.

Tableau 3-1 : Prévion de base des émissions de GES et de la consommation énergétique pour le Canada

	2000	2010	2020	2030	Croissance annuelle moyenne (%)
Émissions de GES (Mt CO ₂ e)	288	343	396	453	1,53 %
Directes	237	307	358	407	1,82 %
Indirectes	50	36	38	46	-0,30 %
Énergie (PJ)	4 239	5 030	5 783	6 579	1,48 %

Il y a croissance des émissions parce qu'on s'attend à une augmentation appréciable de la production dans un certain nombre de sous-secteurs énergivores et carbonigènes. Le secteur du pétrole et du gaz est celui qui génère la plus grande quantité d'émissions de GES, déterminée par une forte croissance des exportations de pétrole et de gaz aux États-Unis. Nous donnons les ventilations par sous-secteur aux tableaux 3-2 à 3-12. L'énergie et les émissions décrites aux tableaux qui suivent correspondent à l'ensemble des sous-modèles du SCMI, qui peuvent, dans certains cas, différer de ceux de Statistique Canada, du PEC-MJ ou de la perception de l'industrie par les associations industrielles⁴⁴. Nous analysons le « tableau » d'ensemble des sous-modèles et les tendances de base des sous-secteurs. Les grandes différences résident dans le traitement des combustibles et des émissions pour la cogénération, les émissions hors-route et les charges d'alimentation. Dans ces tableaux, nous donnons les prévisions de production brute (d'après les hypothèses posées dans PEC-MJ) qui éclairent les hypothèses de production matérielle retenues pour actionner le modèle. Nous calculons trois indicateurs d'intensité. Les deux premiers de chaque tableau établissent le lien entre les émissions directes de GES et le rapport énergie-production matérielle, alors que le dernier (t CO₂e/GJ énergie) laisse entrevoir l'intensité de GES découlant de l'utilisation de l'énergie.

Nous donnons aussi les émissions indirectes afin de présenter un tableau plus complet des émissions de GES. Les émissions indirectes sont un facteur découlant, à la fois, des changements dans la consommation d'électricité et des changements régionaux dans les émissions par unité de production d'électricité (facteurs d'émissions indirectes). Ces facteurs sont générés par la simulation du sous-modèle du secteur de la production d'électricité. Puisque les facteurs sont spécifiques aux régions, un changement relatif de production entre provinces influera également sur le tableau national des émissions indirectes. Nous donnons ces facteurs à l'annexe A.

⁴⁴ Il faut également signaler des écarts entre les données de Statistique Canada et celles des associations industrielles, souvent en raison de différences générales et de questions méthodologiques.

Tableau 3-2 : Intensité d'énergie et de GES de base, sous-secteur des produits chimiques

	2000	2010	2020	2030	Changement annuel moyen
Énergie (PJ)	237	273	328	398	1,75 %
Émissions directes de GES (Mt CO ₂ e)	20	24	28	34	1,75 %
Émissions indirectes de GES (Mt CO ₂ e)	4	3	3	5	0,72 %
Émissions totales de GES (Mt CO ₂ e)	24	26	32	38	1,61 %
Production Matérielle (kt de produits chimiques)	16 052	20 476	25 829	32 351	2,36 %
Production brute (millions \$ 1997)	40 279	52 569	68 608	85 933	2,56 %
Intensité énergétique (GJ / t unité mat.)	14,74	13,33	12,69	12,32	-0,60 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / t unité mat.)	1,25	1,16	1,10	,04	-0,60 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / GJ)	0,085	0,087	0,086	0,085	0,00 %

Remarques :

- Les indicateurs d'intensité de GES excluent les émissions indirectes.
- La production est la somme des produits simulés dans le modèle du SCMI – chlore, hydroxyde de sodium, chlorate de sodium, peroxyde d'hydrogène, ammoniacque, méthanol, éthylène, propylène et polymères.

Le sous-secteur des produits chimiques (tableau 3-2) génère une vaste gamme de produits. Nous ne modélisons que les produits à grande intensité énergétique, afin de conserver la simplicité, tout en saisissant le gros des activités énergivores de l'industrie. Ces produits sont : le chlore, l'hydroxyde de sodium, le chlorate de sodium, le peroxyde d'hydrogène, l'ammoniacque, le méthanol, l'éthylène, le propylène et les polymères. Les émissions de GES de ce sous-secteur comprennent les émissions des procédés de production de l'ammoniacque, de l'acide hexanedioïque et de l'acide nitrique, de même que du CO₂ provenant d'utilisations non énergétiques. Les sous-modèles régionaux spécifiques illustrent l'activité en Colombie-Britannique, en Alberta, en Ontario et au Québec. Les émissions directes comprennent celles de la cogénération (production simultanée de vapeur et d'électricité).

Des réductions importantes de l'intensité des GES ont été observées dans ce sous-secteur au cours de la dernière décennie, notamment une baisse importante des émissions de N₂O dans la production d'acide hexanedioïque. Dans la période prévisionnelle, nous présumons que les taux de croissance des produits chimiques seront différents, la croissance la plus forte intervenant dans la production des

polymères, du chlorate de sodium et du peroxyde d'hydrogène. On note une croissance plus modeste dans la production pétrochimique (éthylène et propylène), ainsi que de l'ammoniac et du méthanol, de même que dans la production de chlore et de soude caustique. Ce profil de croissance relative entraîne, de façon structurelle, un recul de l'intensité énergétique et de GES directs. Puisque le sous-secteur dépend beaucoup du gaz naturel, les options de rechange sont limitées, ce qui explique pourquoi les tendances d'intensité de GES (t CO₂e/GJ) ne changent pas au cours de la période prévisionnelle.

Tableau 3-3 : Intensité d'énergie et de GES de base, sous-secteur de l'extraction du charbon

	2000	2010	2020	2030	Changement annuel moyen
Énergie (PJ)	19	20	23	27	1,04 %
Émissions directes de GES (Mt CO ₂ e)	2	3	3	4	1,44 %
Émissions indirectes de GES (Mt CO ₂ e)	1	1	0	0	-2,75 %
Émissions totales de GES (Mt CO ₂ e)	3	3	3	4	0,77 %
Production					
Matérielle (kt de charbon)	69 163	81 381	98 872	120 767	1,88 %
Intensité énergétique (GJ / t unité mat.)	0,28	0,25	0,23	0,22	-0,82 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / t unité mat.)	0,03	0,03	0,03	0,03	-0,43 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / GJ)	0,120	0,128	0,133	0,135	0,39 %

Remarques :

- Les indicateurs d'intensité de GES excluent les émissions indirectes.
- Source pour la production de l'année de base : Statistique Canada, Statistique du charbon et du coke, décembre 2000, n° au catalogue : 45-002, tableau 3.
- Les émissions directes de GES incluent les émissions fugitives des couches de houille.

Le modèle du SCMI sur l'extraction du charbon englobe les mines souterraines et à ciel ouvert au Canada, qui se concentrent dans les provinces de l'Ouest. Tandis que l'efficacité énergétique augmente sur la période prévisionnelle dans l'extraction du charbon (tableau 3-3), on constate aussi un déclin de l'intensité énergétique, car on suppose que la production augmentera comparativement davantage en Alberta, où le charbon subit moins de transformations⁴⁵. Le SCMI n'établit des simulations que pour la Colombie-Britannique, l'Alberta, la Saskatchewan et la région de l'Atlantique⁴⁶. Les émissions de GES de ce sous-secteur comprennent des émissions fugitives de méthane de la couche de houille.

⁴⁵ En Alberta, le charbon n'est pas lavé parce qu'il sert directement à la production d'électricité.

⁴⁶ La C.-B. produit du charbon pour l'exportation, alors que la production charbonnière des autres régions sert surtout à la production d'électricité.

L'intensité de GES augmente, et les émissions indirectes fléchissent en raison d'un remplacement de l'électricité par le diesel dans les exploitations minières.

Le sous-secteur des minéraux industriels (tableau 3-4) est une description des établissements participant à la production de l'ensemble des produits minéraux non métalliques. Le sous-modèle du SCMI se concentre sur la production du ciment et de la chaux et illustre la situation en Colombie-Britannique, en Alberta, en Ontario, au Québec et dans la région de l'Atlantique exclusivement. Les émissions de CO₂ proviennent, à la fois, du brûlage des combustibles fossiles et des réactions chimiques dans la calcination du calcaire pour la fabrication du ciment et de la chaux. Dans ce sous-secteur, des gains considérables d'efficacité énergétique se sont produits dans le passé, notamment le passage au procédé du four de déshydratation. On note dans ce sous-secteur une hausse de l'utilisation du combustible résiduel au cours de la période prévisionnelle, malgré la prédominance des combustibles fossiles. Dans la prévision, les changements structurels sont limités – il y a déclin de l'intensité énergétique principalement en raison des améliorations constantes de l'efficacité.

Tableau 3-4 : Intensité d'énergie et de GES de base, sous-secteur des minéraux industriels

	2000	2010	2020	2030	Changement annuel moyen
Énergie (PJ)	80	85	98	120	1,39 %
Émissions directes de GES (Mt CO ₂ e)	14	15	18	22	1,55 %
Émissions indirectes de GES (Mt CO ₂ e)	1	1	1	1	0,88 %
Émissions totales de GES (Mt CO ₂ e)	14	16	18	23	1,53 %
Production Matérielle (kt de mâchefer)	13 021	14 920	18 284	23 551	1,99 %
Production brute (millions \$ 1997)	1 407	1 630	2 014	2 595	2,06 %
Intensité énergétique (GJ / t unité mat.)	6,12	5,68	5,35	5,12	-0,60 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / t unité mat.)	1,06	1,02	0,97	0,93	-0,43 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / GJ)	0,173	0,179	0,181	0,182	0,16 %

Remarque : Les indicateurs d'intensité de GES excluent les émissions indirectes.

Tableau 3-5 : Intensité d'énergie et de GES de base, sous-secteur du fer et de l'acier

	2000	2010	2020	2030	Changement annuel moyen
Énergie (PJ)	251	267	288	320	0,82 %
Émissions directes de GES (Mt CO ₂ e)	17	17	19	21	0,88 %
Émissions indirectes de GES (Mt CO ₂ e)	1,55	1,58	1,85	2,43	1,51 %
Émissions totales de GES (Mt CO ₂ e)	18	19	21	24	0,94 %
Production Matérielle (kt d'acier fondu)	16 496	18 678	21 082	23 808	1,23 %
Production brute (millions \$ 1997)	13 752	15 101	16 544	18 683	1,03 %
Intensité énergétique (GJ / t unité mat.)	15,21	14,28	13,66	13,46	-0,41 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / t unité mat.)	1,00	0,93	0,90	0,90	-0,35 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / GJ)	0,066	0,065	0,066	0,067	0,06 %

Dans les sous-modèles régionaux spécifiques, nous décrivons la production de fer et d'acier en Ontario et au Québec (tableau 3–5). Au SCMI, on présume un éloignement des aciéries intégrées au profit des petites aciéries dans la période visée par le scénario⁴⁷. Cela contribue au recul de l'intensité énergétique et de GES sur la période prévisionnelle, car le procédé intégré est beaucoup plus carbonigène : le coke, dérivé du charbon, réduit les oxydes de fer du minerai en gueuse de fonte dans un haut-fourneau. Par la suite, le fer liquide est purifié dans des convertisseurs basiques, en même temps qu'un peu de ferraille, par injection d'oxygène très pur qui, en soi, est un produit à forte intensité énergétique. Dans un procédé en mini-acierie, on utilise des fours à arc pour recycler uniquement de la ferraille à l'aide d'électricité.

Nous donnons au tableau 3–5 l'énergie qui entre dans le charbon métallurgique et qui sert à convertir le charbon en coke et ensuite, le coke servant à réduire l'oxyde de fer du minerai en gueuse de fonte. Le gaz de cokerie généré par le procédé de cokéfaction est utilisé dans l'ensemble de l'installation comme substitut du gaz naturel ou autre combustible fossile. L'intensité de GES directe d'après l'énergie (t CO₂e/GJ) augmente légèrement au cours de la période prévisionnelle, compte tenu d'un recours accru au gaz naturel (par rapport à l'électricité) en tant que source de combustible pour les procédés de fusion et de finissage.

⁴⁷ Cela repose sur l'information du : Groupe de travail des minéraux et des métaux, Table de l'industrie, *Industrie minière, et Document de base*, préparé pour le Secrétariat national sur le changement climatique, mars 1999.

Tableau 3-6 : Intensité d'énergie et de GES de base, sous-secteur des mines

	2000	2010	2020	2030	Changement annuel moyen
Énergie (PJ)	104	103	103	106	0,06 %
Émissions directes de GES (Mt CO ₂ e)	4,2	4,0	3,9	3,9	-0,31 %
Émissions indirectes de GES (Mt CO ₂ e)	2,9	1,79	1,81	1,91	-1,34 %
Émissions totales de GES (Mt CO ₂ e)	7,1	5,8	5,7	5,8	-0,69 %
Production Matérielle (production en kt)	278 086	266 450	280 670	296 510	0,21 %
Production brute (millions \$ 1997)	54 270	61 737	65 614	69 317	0,82 %
Intensité énergétique (GJ / t unité mat.)	0,37	0,39	0,37	0,36	-0,15 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / t unité mat.)	0,02	0,02	0,01	0,01	-0,52 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / GJ)	0,041	0,039	0,037	0,037	-0,37 %

Remarque : Les indicateurs d'intensité de GES excluent les émissions indirectes.

Le sous-modèle de l'exploitation minière au SCMI illustre principalement les mines de métaux. Nous donnons des sous-modèles régionaux spécifiques pour la Colombie-Britannique, la Saskatchewan, le Manitoba, l'Ontario, le Québec et la région de l'Atlantique. Les mines non métalliques ne sont pas modélisées, sauf en Saskatchewan, où la modélisation porte sur la potasse⁴⁸. Les activités liées à l'extraction du charbon et du pétrole et du gaz sont traitées ailleurs au SCMI.

L'énergie nécessaire pour extraire et concentrer les métaux dépend davantage de la production et de la dureté du minerai que du type de métal; le minerai doit être broyé en particules suffisamment fines pour libérer le métal à séparer. Sur la période prévisionnelle, le ratio production/produit final décline, d'après un changement de la production, des mines à ratio élevé aux mines à faible ratio. Les hypothèses sur le taux de croissance, à l'égard des divers métaux, reposaient sur l'information tirée de l'*Annuaire des minéraux du Canada*⁴⁹. L'extraction du minerai de fer (avec un ratio de production à concentré de 2,7) est présumée correspondre à la croissance mondiale prévue de l'industrie de l'acier, soit 1 % par an. Nous avons pris comme hypothèse une croissance limitée ou nulle pour les mines de cuivre-zinc et de plomb-zinc (avec des ratios beaucoup plus élevés), en raison de la fermeture de plusieurs mines dans l'Ouest canadien, de la faiblesse des prix du cuivre et de l'absence de producteurs éventuels. Pour le nickel, nous présumons une croissance beaucoup plus forte en raison en partie de

48 Nous ne représentons pas les autres non-métaux car, actuellement, ils ne consomment qu'un pourcentage relativement modeste de l'énergie totale de l'exploitation minière.

49 Ressources naturelles Canada, *Annuaire des minéraux du Canada* (Ottawa : 2002).

l'ouverture prévue de nouvelles mines dans le Canada atlantique et de l'existence de plusieurs autres producteurs éventuels. Le changement global vers des mines à moindre ratio production/produit final influe sur la tendance dans les intensités énergétiques et de GES au tableau 3-6. Même si on prévoit une croissance globale de la capacité, d'après les ouvertures et fermetures de mines, les niveaux de production sont liés aux facteurs économiques, et donc difficiles à prévoir.

Tableau 3-7 : Intensité d'énergie et de GES de base, industrie du gaz naturel

	2000	2010	2020	2030	Changement annuel moyen
Énergie (PJ)	1121	1195	1413	1664	1,32 %
Émissions directes de GES (Mt CO ₂ e)	56	60	71	82	1,27 %
Émissions indirectes de GES (Mt CO ₂ e)	17	15	15	16	-0,08 %
Émissions totales de GES (Mt CO ₂ e)	73	75	86	99	1,00 %
Production Matérielle (1 000 m ³ de GN)	216 785	273 454	314 929	348 239	1,59 %
Intensité énergétique (GJ / 1000 m ³)	5 172,92	4 368,98	4 486,57	4 777,53	-0,26 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / 1000 m ³)	260,09	219,92	224,14	236,42	-0,32 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / GJ)	0,050	0,050	0,050	0,049	-0,05 %

Remarque : Les indicateurs d'intensité de GES excluent les émissions indirectes.

Le modèle de l'industrie du gaz naturel dans le SCMI illustre la production, la transformation et le transport du gaz naturel. L'énergie, au tableau 3-7, comprend le gaz naturel perdu par fuite et ventilation, en plus de celui consommé en combustible. Les émissions de GES se composent du brûlage et des émissions fugitives. Sur la période prévisionnelle, le sous-secteur obtient des gains constants d'efficacité dans l'acheminement du gaz naturel au marché. Le remplacement de combustible est presque inexistant.

Tableau 3-8 : Intensité d'énergie et de GES de base, autre, fabrication

	2000	2010	2020	2030	Changement annuel moyen
Énergie (PJ)	672	714	775	846	0,77 %
Émissions directes de GES (Mt CO ₂ e)	24	27	30	32	0,94 %
Émissions indirectes de GES (Mt CO ₂ e)	11	9	9	10	-0,33 %
Émissions totales de GES (Mt CO ₂ e)	36	36	38	43	0,59 %
Production Production brute (millions \$ 1997)	126 413	159 219	196 854	214 089	1,77 %
Intensité énergétique (GJ / millions \$ 1997)	5 315	4 486	3 936	3 954	-0,98 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / millions \$ 1997)*	193,50	169,23	150,29	151,33	-0,82 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / GJ)*	0,34	0,36	0,38	0,42	0,72 %

Remarque : Les indicateurs d'intensité de GES excluent les émissions indirectes.

Le sous-modèle du SCMI pour les autres entreprises du secteur de la fabrication prend en compte les industries d'une région qui, par elles-mêmes, ne consomment pas suffisamment d'énergie pour justifier la préparation d'un sous-modèle distinct. Cela comprend les industries énergivores dont la présence dans la région est faible, de même que les industries moins énergivores, comme les secteurs de la fabrication des aliments, boissons et produits du tabac, les usines de textiles et de vêtements, de produits du bois, l'impression, la fabrication de produits de plastique et de caoutchouc, la fabrication de produits métalliques ouvrés, la fabrication de produits informatiques et électroniques et de matériels de transport (entre autres). En tant que groupe, ces industries peuvent consommer une part importante de l'énergie dans n'importe quelle région.

Au tableau 3-8, nous n'illustrons que la production brute, car les autres industries du secteur de la fabrication ne sont pas caractérisées par un produit spécifique dominant les mécanismes des procédés de production et auquel on pourrait facilement rattacher la fabrication de tous les autres produits. Sur la période de prévision, les intensités d'émissions et d'énergie (d'après la production brute) fléchissent, alors que l'intensité directe de GES de l'utilisation d'énergie augmente légèrement. Dans ce dernier cas, cela est dû à une diminution de la part de l'électricité par rapport à la consommation de combustibles fossiles. On note des gains d'efficacité dans les services thermiques et les services auxiliaires d'électricité.

Tableau 3-9: Intensité d'énergie et de GES de base, sous-secteur de l'extraction du brut

	2000	2010	2020	2030	Changement annuel moyen
Énergie (PJ)	274	859	1137	1334	5,42 %
Émissions directes de GES (Mt CO ₂ e)	53	103	126	140	3,27 %
Émissions indirectes de GES (Mt CO ₂ e)	2	-3	-4	-4	-3,97 %
Émissions totales de GES (Mt CO ₂ e)	55	100	122	136	3,06 %
Production Matérielles (1 000 m ³ de brut)	116 360	203 116	244 248	323 015	3,46 %
Intensité énergétique (GJ / m ³)	2,35	4,23	4,65	4,13	1,89 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / m ³)	0,46	0,51	0,51	0,43	-0,19 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / GJ)	0,194	0,120	0,111	0,105	-2,04 %

Remarque :

- Les indicateurs d'intensité de GES excluent les émissions indirectes.
- Les données sur la production de brut de l'année de base viennent de Statistique Canada, *Extraction du pétrole et du gaz*, n° au catalogue : 26-213, tableau 7 (Approvisionnement et disposition du pétrole brut et équivalent, par source, Canada).

Le sous-modèle de l'extraction du pétrole brut (tableau 3–9) du SCMI comprend l'extraction du pétrole léger et du pétrole lourd de sources classiques et non conventionnelles, extraction sur place et extraction du bitume en mine à ciel ouvert, de même que valorisation. Dans les sous-modèles régionaux spécifiques, on décrit l'activité en Colombie-Britannique, en Alberta, en Saskatchewan, en Ontario et dans la région de l'Atlantique. Les émissions sont attribuables à la fois à la consommation d'énergie et aux émissions fugitives. Au cours de la période de prévision, l'hypothèse est que la production de pétrole léger et lourd diminuera, alors que celle du bitume (sur place et en mines de surface) augmentera et deviendra le brut dominant produit au Canada.⁵⁰ Puisque l'extraction et la valorisation du bitume ont une intensité relativement plus élevée en matière de GES et d'énergie, l'intensité énergétique et l'intensité de GES augmentent au cours des 20 premières années de la période de simulation. La tendance s'inverse de 2020 à 2030. Sur l'ensemble de la période de simulation, les émissions indirectes fléchissent et deviennent même négatives en raison d'une sensible augmentation de la cogénération dans ce sous-secteur⁵¹. L'existence d'émissions indirectes négatives indique que l'électricité de cogénération compense les émissions indirectes dans d'autres sous-secteurs (car l'électricité est vendue au secteur ou réseau). Le combustible utilisé pour produire cette électricité est intégré aux émissions directes de GES.

50 Cela reflète les tendances observées dans : Office national de l'énergie, *L'avenir énergétique du Canada : offre et demande jusqu'en 2025*. (Calgary : 2003).

51 Athabasca Regional Issues Working Group, *Oil Sands Cogeneration Potential: Survey Results* (Fort McMurray, Alberta, May 2003).

Tableau 3-10 : Intensité d'énergie et de GES de base, sous-secteur du raffinage du pétrole

	2000	2010	2020	2030	Changement annuel moyen
Énergie (PJ)	310	288	327	375	0,64 %
Émissions directes de GES (Mt CO ₂ e)	18	22	26	31	1,82 %
Émissions indirectes de GES (Mt CO ₂ e)	2	0	-1	-2	-2,25 %
Émissions totales de GES (Mt CO ₂ e)	20	22	25	29	1,27 %
Production Matérielles (1 000 m ³ de PPR)	92 233	102 678	114 771	126 102	1,05 %
Production brute (millions \$ 1997)	19 667	21 531	24 500	26 918	1,05 %
Intensité énergétique (GJ / m ³)	3,36	2,81	2,85	2,97	-0,41 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / m ³)	0,19	0,21	0,23	0,24	0,76 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / GJ)	0,058	0,076	0,080	0,082	1,17 %

Remarque :

- Les indicateurs d'intensité de GES excluent les émissions indirectes.
- PPR signifie produits pétroliers raffinés.
- Les valeurs de production pour 2000 proviennent de Statistique Canada, Produits pétroliers raffinés, n° au catalogue : 45-004, sont données nettes de la « consommation du producteur ».

Les sous-modèles régionaux spécifiques offrent une description du raffinage du pétrole en Colombie-Britannique, en Alberta, en Saskatchewan, en Ontario et au Québec, ainsi que dans la région de l'Atlantique. Le raffinage du brut est un procédé complexe, énergivore. Le type et la qualité du brut et les exigences de transformation pour parvenir aux produits finaux déterminent la complexité de la raffinerie et ont des répercussions importantes sur la consommation énergétique de celle-ci. Le sous-modèle du raffinage du pétrole (tableau 3-10) exclut la valorisation du bitume, qui figure au modèle d'extraction du brut. Au cours de la période prévisionnelle, la production des raffineries connaît une augmentation modeste. L'intensité des GES directs augmente légèrement au cours de la période, en raison d'une moindre consommation nette d'électricité.

Tableau 3-11 : Intensité d'énergie et de GES de base, sous-secteur des pâtes et papiers

	2000	2010	2020	2030	Changement annuel moyen
Énergie (PJ)	901	934	986	1068	0,57 %
Émissions directes de GES (Mt CO ₂ e)	11,9	13	15	18	1,38 %
Émissions indirectes de GES (Mt CO ₂ e)	8	5	6	8	0,21 %
Émissions totales de GES (Mt CO ₂ e)	20	19	21	26	0,96 %
Production Matérielles (kt de pâtes et papiers)	28 569	32 585	37 232	43 121	1,38 %
Production brute (millions \$ 1997)	25 497	31 091	36 923	42 763	1,74 %
Intensité énergétique (GJ / t unité mat.)	31,54	28,68	26,47	24,77	-0,80 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / t unité mat.)	0,42	0,41	0,40	0,42	0,00 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / GJ)	0,013	0,014	0,015	0,017	0,81 %

Remarque : Les indicateurs d'intensité de GES excluent les émissions indirectes.

Le sous-modèle des pâtes et papiers du SCMI (tableau 3-11) comprend le marché de la pâte, les journaux, les papiers spéciaux, les cartonnages, les cartons de construction et autres sous-secteurs du papier⁵². Dans le SCMI, la modélisation porte expressément sur cinq régions : Colombie-Britannique, Alberta, Ontario, Québec et région de l'Atlantique. L'énergie comprend les combustibles utilisés dans la cogénération, ce qui est assez important dans ce sous-secteur. De plus, une part appréciable de la consommation d'énergie repose sur les ressources renouvelables – résidus de bois et liqueur de pâte épuisée (dans la fabrication de la pâte chimique). Cette combustion est présumée être neutre en CO₂.

Dans la période prévisionnelle, la croissance est plus faible sur le marché de la pâte et des journaux, comparativement aux produits à valeur ajoutée. La disponibilité économique des résidus de bois en limite l'utilisation comme source de combustible, ce qui entraîne une augmentation de la part du gaz naturel au fil du temps, comparativement aux sources renouvelables issues de la biomasse. Cette tendance détermine une augmentation de l'intensité des émissions (t CO₂e/GJ).

⁵² Ces établissements figurent dans les sous-modèles du SCMI parce qu'il s'agit de grandes installations et que leurs produits sont très énergivores comparativement aux produits d'autres industries. Les produits du papier qui ne font pas partie du sous-modèle des pâtes et papiers sont : produits d'asphalte, cartonnages et sacs de papier et autres produits de papier transformé. On peut retrouver ces industries regroupées avec celles du sous-modèle « autres industries de fabrication ».

Le sous-secteur de la fusion et du raffinage des métaux non ferreux (tableau 3-12) représente les établissements qui fabriquent surtout des produits métalliques finis excluant le fer et l'acier. Le sous-modèle du SCMI pour ce secteur illustre expressément les procédés touchant l'aluminium, le nickel, le cuivre, le zinc, le plomb, le magnésium et le titane. Précisons toutefois que des éléments importants sur le plan économique, mais mineurs, par exemple l'or, l'argent, le platine, le cadmium et d'autres, ne sont pas expressément représentés, car ils sont souvent transformés en même temps que d'autres métaux de cette précédente liste ou traités en trop faible quantité pour que le modèle en fasse la représentation directe. Le système établit des sous-modèles régionaux spécifiques pour la Colombie-Britannique, le Manitoba, l'Ontario, le Québec et la région de l'Atlantique.

Tableau 3-12 : Intensité d'énergie et de GES de base, sous-secteur de la fusion et du raffinage des métaux non ferreux

	2000	2010	2020	2030	Changement annuel moyen
Énergie (PJ)	269	290	303	320	0,58 %
Émissions directes de GES (Mt CO ₂ e)	16	18	19	19	0,62 %
Émissions indirectes de GES (Mt CO ₂ e)	1.11	2.29	4.13	6.25	5,94 %
Émissions totales de GES (Mt CO ₂ e)	17	21	23	26	1,34 %
Production Matérielle (kt de produit raffiné)	4 257	5 220	5 991	6 904	1,62 %
Production brute (millions \$ 1997)	15 088	19 347	23 404	26 971	1,96 %
Intensité énergétique (GJ / t unité mat.)	63,27	55,65	50,52	46,39	-1,03 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / t unité mat.)	3,78	3,54	3,11	2,81	-0,99 %
Intensité de GES (t CO ₂ e / GJ)	0,060	0,064	0,062	0,061	0,04 %

Remarques :

- Les indicateurs d'intensité de GES excluent les émissions indirectes.
- L'énergie comprend le coke pétrolier et le procédé du brai de pétrole dans les électrodes d'aluminium.

Les tendances d'intensité au tableau 3–12 rendent compte d'effets structurels importants pendant la période prévisionnelle. On suppose que la production sera relativement supérieure dans le secteur de l'aluminium, alors que la croissance de la fusion et du raffinage du zinc, du cuivre, du plomb et du nickel devrait être relativement moins élevée⁵³. Les émissions indirectes affichent une croissance en raison de l'augmentation de la production de l'aluminium, où la consommation d'électricité est intense; alors que la consommation d'électricité vient actuellement de l'hydroélectricité là où sont situées les alumineries, une part plus grande de l'électricité devrait provenir de combustibles fossiles, au cours de la période prévisionnelle⁵⁴. Les émissions dans la production d'aluminium sont surtout attribuables au procédé; trois types d'émissions de GES (CO₂, tétrafluorure de carbone – CF₄, et hexafluorure de carbone C₂F₆) découlent de la réduction électrique de l'aluminium par fusion dans des cuves Hall-Heroult où on utilise des anodes de carbone. Une partie du CO₂ associé à la production d'aluminium sert en fait à produire le précurseur de l'aluminium, l'alumine, à partir de la bauxite.

L'intensité de GES dans la production d'aluminium (tonne de CO₂e par tonne d'aluminium produite) a beaucoup fléchi – passant de 5,59 tonnes de CO₂e la tonne d'aluminium en 1990 à 3,94 tonnes de CO₂e en 2000.⁵⁵ Cette baisse est surtout attribuée à la diminution du CF₄ et du C₂F₆ (par les fluorocarbones) dans les cuves Hall-Heroult. On présume que la diminution de l'intensité se poursuivra à mesure qu'on continuera d'accroître la capacité par la modernisation.

En plus des émissions de procédés décrites pour la production de l'aluminium, il y en a d'autres qui découlent de l'utilisation de l'hexafluorure de soufre (SF₆) utilisé comme gaz de couverture antioxydation dans la production du magnésium. Bien qu'émis en faible quantité, le SF₆ est un puissant gaz à effet de serre.⁵⁶ Les producteurs de magnésium ont commencé à modifier leurs procédés de façon à réduire le plus possible le recours à ce gaz. On présume que cette tendance se maintiendra au cours de la période prévisionnelle.

53 Les tendances de la production reposent sur les données de croissance sur l'aluminium et l'exploitation minière des métaux dans : Ressources naturelles Canada, *Annuaire des minéraux du Canada* (Ottawa : 2002).

54 Le facteur moyen d'émissions indirectes de GES calculé à l'échelon régional pour le modèle de l'électricité du SCMI est utilisé pour calculer les émissions indirectes. La production d'aluminium intervient en Colombie-Britannique et au Québec, où l'électricité est surtout l'hydroélectricité. Le SCMI ne modélise pas expressément la génération d'électricité pour le secteur de l'aluminium.

55 Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne, *Rapport annuel 2001–2002* (Ottawa : Ressources naturelles Canada, 2003), 35.

56 Une tonne de SF₆ équivaut à 23 900 tonnes de CO₂.

Étude de cas sur la politique fiscale et l'efficacité énergétique

Étude économique

Préparée pour
La Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie

par
M.K. Jaccard & Associates

Juin 2004

Document de travail

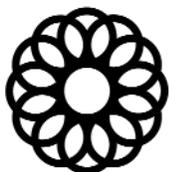


Table ronde nationale
sur l'environnement
et l'économie

National Round Table
on the Environment
and the Economy

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Définitions et concepts	1
	<i>Industrie</i>	1
	<i>Décarbonisation</i>	2
	<i>Distinction entre politique et mesure</i>	2
	<i>Émissions directes, indirectes et totales de GES</i>	2
1.2	Aperçu du rapport	3
2	Perspectives d'efficacité énergétique	3
2.1	Possibilités d'efficacité énergétique	3
2.2	Obstacles à l'adoption des possibilités d'efficacité énergétique	4
2.3	Défis pour lier l'efficacité énergétique à l'énergie à long terme. Consommation et décarbonisation	6
3	Prévisions de rechange	7
3.1	L'utilisation de modèles pour évaluer les possibilités d'efficacité énergétique	7
3.2	Préparation de scénarios de rechange	7
	<i>Méthodologie</i>	8
3.3	Résultats/Analyse – Scénarios de rechange	9
4	Analyse économique et de la politique	18
4.1	Méthodologie d'analyse économique	18
	<i>Méthodologie détaillée du prix de revient</i>	18
4.2	Résultats/Analyse – Analyse économique	18
4.3	Co-avantages	19
4.4	Outil de la politique d'EF	20
	<i>Taxes environnementales et déplacements d'impôt</i>	21
	<i>Permis négociables (réglementation axée sur le marché)</i>	22
	<i>Subventions</i>	23
4.5	Conception de la politique	26
	<i>Efficacité pour atteindre des cibles/objectifs environnementaux</i>	27
	<i>Innovation technologique</i>	30
5	Conclusions et recommandations	31

1 Introduction

La Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE) a lancé un programme d'étude sur l'écologisation de la fiscalité (EF) au Canada. Il faut entendre par EF l'harmonisation systématique de la politique fiscale et des autres instruments de politique afin d'atteindre simultanément les objectifs économiques et environnementaux. La phase initiale étant terminée, il s'agit, dans le cadre du programme d'EF, de trouver des moyens de préparer et de promouvoir une politique fiscale qui réduise de façon constante et systématique les émissions de carbone d'origine énergétique, sans augmenter les autres polluants, tant en termes absolus qu'en ratio du produit intérieur brut (PIB).

Dans l'étude actuelle, nous analysons le rôle de la politique fiscale pour ce qui est de promouvoir l'efficacité énergétique, à long terme, du secteur industriel canadien, dans le but d'atteindre une meilleure efficacité énergétique d'une manière aboutissant à des diminutions, à long terme, des émissions de carbone d'origine énergétique. La présente fait partie de trois études de cas parallèles dont l'objet est de fournir des recommandations de politique pragmatiques et pertinentes sur la façon dont la politique fiscale peut favoriser, en appuyant le grand objectif du programme, l'évolution de l'efficacité énergétique dans les énergies renouvelables, l'hydrogène et l'énergie industrielle. L'autre objectif des études est de mettre à l'épreuve les approches, mécanismes et méthodologies qui lient les questions de l'énergie, du changement climatique, du développement technologique et de la politique fiscale, dans le but d'en tirer des leçons et des constatations permettant d'éclairer l'élaboration de la politique dans ce domaine.

Ce rapport couvre le deuxième volet de l'étude de cas sur la décarbonisation, à savoir l'étude économique. Le premier volet, l'étude de base, portait sur la nature de l'efficacité énergétique et des tendances dans les émissions industrielles canadiennes fondées sur le carbone. Il a abouti à la préparation d'un scénario de base sur les émissions de carbone. L'étude économique donne suite à cette première étude en examinant spécifiquement les possibilités d'efficacité énergétique et le rôle éventuel de l'EF pour promouvoir un système énergétique décarbonisé.

1.1 Définitions et concepts

Diverses définitions présentées dans le rapport sur l'étude de base s'appliquent également au présent rapport et nous les reprenons ici.

Industrie

Aux fins de cette étude de cas, l'industrie se compose des établissements dont les activités sont la fabrication et l'exploitation minière. L'exploitation minière est l'activité liée à l'extraction de minéraux présents dans la nature, minéraux qui peuvent être solides, par exemple le charbon et le minerai, liquides, par exemple le pétrole brut, ou gazeux, par exemple le gaz naturel. Les activités de fabrication supposent la transformation physique ou chimique de matériaux ou de substances en nouveaux produits. Ces produits peuvent être finis, en ce sens qu'ils sont prêts à l'utilisation ou à la consommation, ou semi-finis, c'est-à-dire qu'ils deviennent la matière première qu'un établissement utilise pour lui conférer une surtransformation¹.

¹ Ces activités correspondent à celles définies au Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN), classes 21, 31, 32 et 33. Pour plus de renseignements sur ce que recouvrent ces activités, consulter le site Web Stratégis d'Industrie Canada à l'adresse : <strategis.ic.gc.ca>.

Dans cette étude, l'industrie exclut les établissements des secteurs de la production d'électricité, de l'agriculture et les secteurs des services².

Décarbonisation

Dans ce document et dans l'étude de base qui l'accompagne, le terme « décarbonisation » signifie réduire les émissions de carbone d'origine énergétique, tant en termes absolus qu'en ratio de la production au Canada, sans augmenter les autres polluants³. Les émissions de carbone, dans l'analyse numérique, sont englobées par une mesure plus large des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Distinction entre politique et mesure

Dans la conception des politiques et l'évaluation de leurs répercussions et coûts, il est utile d'établir une nette distinction entre mesure et politique. On entend par mesure un changement dans l'acquisition de matériel, le taux d'utilisation de l'équipement, le style de vie ou les méthodes de gestion des ressources qui entraîne un changement net des émissions de carbone par rapport à ce qu'elles seraient autrement. Notre étude se concentre sur les mesures d'efficacité énergétique découlant de changements dans l'acquisition de technologies, mais elle tient compte de ces mesures par rapport à d'autres visant la décarbonisation. Nous pouvons évaluer le coût d'une mesure, individuellement ou dans le cadre d'un ensemble (portefeuille) de mesures. Le coût est le changement marginal des coûts (positifs ou négatifs) découlant de la prise de la ou des mesures. Une politique ou un instrument de politique se définit ici comme un effort des pouvoirs publics pour introduire une mesure. Dans le volet modélisation de cette étude de cas, nous veillons à bien distinguer les deux termes. Sans cette distinction, il est impossible de préciser les effets des politiques individuelles ou ensembles de politiques et de mesures pour réduire les émissions de GES⁴.

Émissions directes, indirectes et totales de GES

Il est utile, pour décrire les émissions actuelles et futures d'origine carbonique pour une partie seulement de l'économie (le secteur industriel), de recourir à un concept d'émissions directes et indirectes. Le terme « émissions directes » sert à décrire les émissions produites par une source relevant du contrôle d'une entité (aux fins de ce projet, l'industrie), alors que le terme « émissions indirectes » sert à décrire les émissions résultant de l'activité de cette entité, mais produites par une source externe à celle-ci.

Dans l'analyse des répercussions des mesures, il est important de tenir compte de l'effet combiné des émissions directes et indirectes, puisque, si l'on ne prenait que les émissions directes, on constaterait, en fait, une augmentation des émissions due à une mesure, comme la cogénération, alors que si l'on tient compte ensemble des émissions directes et indirectes, on observe une tendance à la baisse des émissions totales (selon l'intensité de carbone de l'électricité produite par la centrale électrique).

-
- 2 Nous incluons toutefois le secteur de l'électricité dans la modélisation des prix fictifs du carbone, afin de construire des scénarios de rechange (afin qu'un prix fictif du carbone soit répercuté dans le prix de l'électricité perçu par le secteur industriel). Voir la section 3.2.
 - 3 La principale émission de carbone d'origine énergétique décrite dans le présent rapport est le dioxyde de carbone (CO₂), l'un des principaux gaz à effet de serre. Le méthane (CH₄), découle du brûlage des combustibles fossiles et contribue à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère; toutefois, ses sources sont, avant tout, étrangères à la combustion.
 - 4 Malheureusement, on confond souvent les deux termes dans les débats publics.

1.2 Aperçu du rapport

Voici la structure du rapport : à la section 2, nous analysons certaines possibilités d'efficacité énergétique offertes à l'industrie et les défis inhérents à leur adoption. Nous éclairons ainsi la méthodologie permettant l'élaboration de prévisions de rechange en matière d'émissions de carbone; nous les présentons, avec les prévisions pertinentes, à la section 3. Ces éléments servent directement de base à une analyse économique, qui figure à la section 4, où nous examinons les répercussions des divers scénarios de rechange, en matière de coûts, et où nous nous demandons comment orienter les politiques pour parvenir aux réductions des émissions de carbone indiquées dans ces scénarios. En guise de conclusion, nous présentons des recommandations de politiques.

2 Perspectives d'efficacité énergétique

2.1 Possibilités d'efficacité énergétique

Nous pouvons percevoir l'utilisation de l'énergie dans l'industrie en termes de services génériques ou auxiliaires et de procédés spécifiques. Les services énergétiques génériques sont ceux qui ne sont pas propres à une industrie, mais qui se concentrent sur des systèmes auxiliaires fournissant des services énergétiques qui font fonctionner les grands équipements de transformation. Ces systèmes auxiliaires se répartissent en quatre catégories générales : systèmes de vapeur (chaudières et cogénéatrices), systèmes d'éclairage, systèmes CVC et systèmes à moteurs électriques (pompes, ventilateurs, compresseurs ou convoyeurs). Dans certains cas, les services énergétiques répondent à un besoin direct de chaleur, de pompage ou de compression alors que, dans d'autres, ils offrent les conditions favorables à la poursuite de la production, par exemple les systèmes d'éclairage et de CVC. Ces derniers jouent un rôle relativement mineur; il est possible de parvenir à des réductions importantes de consommation par l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de vapeur et de calorifères, de même que des moteurs électriques et des dispositifs auxiliaires qui leur sont rattachés.

En ce qui a trait à la production de vapeur, l'efficacité varie énormément selon la conception et l'âge de la chaudière et en fonction du combustible utilisé. Il est possible de parvenir à des améliorations appréciables de l'efficacité énergétique par cogénération, plutôt que par de simples chaudières à vapeur. Les possibilités d'augmenter l'efficacité des moteurs électriques sont également appréciables, mais les perspectives d'amélioration de l'efficacité des appareils qu'ils actionnent — pompes, aérauliques, compresseurs, convoyeurs et autres types d'entraînement de machines⁵ — sont encore plus appréciables.

Les possibilités d'efficacité énergétique qui restent sont assez particulières aux procédés spécifiques à chaque industrie. Dans certaines industries, on utilise de grandes quantités de chaleur. Ainsi, les industries de production de matériaux, comme le fer, l'acier et les autres métaux primaires, de même que les matériaux de construction, se distinguent par une forte utilisation de chaleur directe de procédé pour des activités comme le chauffage et la fonte des métaux, la fusion, l'agglomération du minerai, la calcination de la chaux et du ciment, la cuisson de l'argile et de la brique, la fusion du verre, etc. D'autres industries dépendent beaucoup de l'électricité pour actionner des moteurs de grande taille (dans l'exploitation des minerais métalliques, on broie le minerai pour en extraire le métal) ou encore, pour produire ou purifier des produits chimiques ou des métaux dans les piles électrolytiques. Dans les

5 Dans cette dernière catégorie, on trouve la totalité du matériel mû à l'électricité et propre à un procédé de production spécifique.

industries à fort apport énergétique, les choix en matière de réduction de l'énergie (ou du CO₂) sont habituellement moins nombreux, car les procédés sont directs et énergivores, comparativement aux industries où des dizaines ou des centaines de procédés, chacun n'exigeant qu'une faible quantité d'énergie, servent à transformer ces produits semi-finis en produits terminés.

Les technologies efficaces sur le plan énergétique peuvent également se concevoir sur une échelle chronologique. Nombreuses sont les technologies qui existent déjà et qui sont peut-être commercialisées depuis un certain temps, mais qui pourraient encore effectuer des percées considérables. D'autres ne peuvent qu'émerger et sont actuellement à un stade de démonstration ou n'ont été appliquées que dans un créneau relativement étroit (c.à.d. réduction directe du fer et de l'acier). Et en plus, d'autres n'ont pas encore donné les résultats attendus, sur le plan technique, et font l'objet de programmes dynamiques de recherche-développement. L'innovation technologique peut être soit radicale (perturbatrice), soit progressive. L'innovation technologique radicale constitue une transition vers une technologie nouvelle ou un nouveau paradigme, ce qui, souvent, modifie la façon dont les gens perçoivent le produit ou le procédé. L'innovation progressive intervient lentement, graduellement, au sein des technologies existantes. Ainsi, les améliorations de procédés dans les usines intégrées — la principale méthode de production d'acier pour laquelle on utilise du coke dans les hauts fourneaux pour la réduction du fer constitueraient des changements progressifs, alors que les technologies de « réduction directe du fer » (nouveau procédé dans lequel on n'a plus besoin de hauts fourneaux) peuvent être perçues comme une innovation radicale.

Une bonne partie de notre analyse s'est concentrée sur certaines technologies, mais la manière d'exploiter le procédé ou la technologie peut également avoir des répercussions sur la consommation énergétique. L'optimisation des procédures d'exploitation, les horaires d'utilisation de l'équipement et les procédures générales d'entretien peuvent donner lieu à d'importantes améliorations de l'efficacité énergétique. De plus, les possibilités d'efficacité énergétique peuvent être perçues plus largement au niveau des systèmes, par exemple en localisant les établissements industriels de façon à parvenir à l'utilisation économique des flux d'énergie et de matériel de chacune (écologie industrielle), et en évaluant les flux d'énergie le long de la chaîne de production (évaluation du cycle de vie).

Nous donnons une analyse détaillée des possibilités d'efficacité énergétique de l'industrie à l'annexe B.

2.2 Obstacles à l'adoption des possibilités d'efficacité énergétique

Il existe de nombreuses occasions de parvenir à l'efficacité énergétique sur le plan technique, et c'est là une source de motivation et d'optimisme pour de nombreuses personnes. En fait, nombre de ces occasions s'avèrent déjà rentables, si l'on compare la valeur monétaire des économies d'énergie aux coûts d'immobilisation. Toutefois, la recherche menée depuis 30 ans montre que les consommateurs et les entreprises négligent, apparemment, les investissements rentables dans l'efficacité énergétique. Les consommateurs et les entreprises semblent moins valoriser les économies futures attribuables aux investissements dans l'efficacité énergétique et ce, dans une proportion bien supérieure aux taux commerciaux pour les emprunts ou les épargnes. Autrement dit : il existe un écart entre les niveaux d'investissements dans l'efficacité énergétique qui semblent rentables et les niveaux, plus modestes d'investissements effectués.

C'est ce que l'on a souvent appelé l'« écart d'efficacité énergétique », dont débattent depuis un certain temps les analystes de la politique énergétique⁶. C'est une question d'importance capitale pour cette étude de cas, notamment pour évaluer un scénario de remplacement pour les émissions de carbone, de même que le coût économique et le potentiel de la politique d'EF pour influencer sur l'adoption de technologies efficaces sur le plan énergétique.

Les études montrent que les entreprises sont sensibles aux risques, lorsqu'il s'agit d'investir dans les technologies nouvelles, pas encore éprouvées sur le plan commercial, plus particulièrement en ce qui a trait à leur effet possible sur la qualité du produit, la fiabilité du procédé, les besoins d'entretien ou encore, l'incertitude générale à propos du rendement d'une technologie nouvelle⁷. À titre d'exemple, dans le secteur des pâtes et papiers, l'utilisation du procédé Thermopulp pour la pâte mécanique présente des économies de l'ordre de 10 à 20 % dans la consommation d'énergie⁸. Néanmoins, l'adoption de cette technologie est à la fois touchée par une perte de brillance, qui exige des dépenses supplémentaires en produits chimiques de blanchiment, et un rétrécissement du créneau d'exploitation et, de ce fait, nécessite des contrôles plus serrés⁹.

Les nouvelles technologies peuvent comporter un plus grand risque d'échec prématuré. Lorsque l'on fait des investissements irréversibles que l'on peut reporter, l'existence de cette incertitude peut être à l'origine d'un obstacle majeur à l'investissement. L'investisseur perçoit un gain de valeur, tout en reportant l'investissement et en attendant d'être mieux informé pour éclairer sa décision (« valeur d'option »)¹⁰. L'effet s'amplifie si l'incertitude concernant les prix de l'énergie et de la technologie augmente et que les coûts technologiques chutent plus rapidement¹¹. Les coûts d'acquisition, d'installation et d'exploitation varieront en fonction des différences entre consommateurs et endroits, et l'équipement conviendra mieux à certaines situations qu'à d'autres. À titre d'exemple, si une pièce d'équipement sert rarement, on est moins porté à investir dans un modèle éconergique. Si l'analyse repose sur des estimations uniques, elle aboutira inévitablement à un niveau « optimal » d'efficacité énergétique trop élevé pour une certaine proportion des acheteurs¹².

Manifestement, il est très complexe de savoir dans quelle mesure les entreprises peuvent apporter des améliorations servant l'efficacité énergétique. D'autres défis se posent quand on se demande comment l'adoption de technologies éconergiques influencerait sur la consommation énergétique totale et les émissions de carbone.

6 Par exemple, voir A. Jaffe et R. Stavins, « The Energy-Efficiency Gap: What Does it Mean? », *Energy Policy* 22, 10 (1994): 804-810; J. Scheraga, « Energy and the Environment: Something New under the Sun? » *Energy Policy* 22, 10 (1994): 811-818; R. Sutherland, « The Economics of Energy Conservation Policy », *Energy Policy* 24, 4 (1996): 361-370.

7 Voir : Office of Technology Assessment, U.S. Congress, *Industrial Energy Efficiency* (Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1993).

8 Le procédé Thermopulp est une variante du procédé de fabrication de la pâte thermo-mécanique, où la pâte sortant du raffineur de première étape est traitée brièvement à haute température dans un « thermo-mixeur » et dans un raffineur secondaire. Nous donnons une description plus complète à l'annexe B.

9 E. Cannel, « Mechanical Pulping Technologies Focus on Reducing Refining Energy », *Pulp and Paper* (mai 1999). Consulté sur le site : <http://www.pponline.com/db_area/archive/p_p_mag/1999/9905/contents.htm>.

10 R. Pindyck, « Irreversibility, Uncertainty and Investment », *Journal of Economic Literature* 29, 3 (1991): 1110-1152.

11 Jaffe et Stavins, « The Energy-Efficiency Gap: What Does it Mean? »

12 M. Jaccard, J. Nyboer et A. Fogwill, « How Big is the Electricity Conservation Potential in Industry? », *The Energy Journal* 14, 2 (1993): 139-156; Jaffe, Newell et Stavins, *Energy Efficient Technologies and Climate Change Policies: Issues and Evidence*.

2.3 Défis pour lier l'efficacité énergétique à l'énergie à long terme

Consommation et décarbonisation

Même si l'on adopte des occasions plus nombreuses d'efficacité énergétique, quels peuvent en être les effets sur la consommation totale d'énergie et la décarbonisation? Plusieurs facteurs rendent complexes l'atteinte de cet objectif. Tout d'abord, comme nous l'avons mentionné dans l'étude de base, viser l'efficacité énergétique peut être pertinent en ce qui a trait à la décarbonisation. Il ne faut pas oublier que les combustibles primaires diffèrent considérablement entre eux sur le plan de leurs émissions de carbone par unité d'énergie consommée. À titre d'exemple, un producteur pourrait passer d'une chaudière au mazout à faible efficacité à une autre, également au mazout, mais à haut rendement, ou encore, à une chaudière au gaz naturel à haute efficacité. L'effet sur les émissions de carbone est différent selon le choix qui a été fait.

Ont également leur importance, les réactions « de second ordre » qui peuvent intervenir dans l'économie. Cela comprend l'interaction entre les secteurs de la demande et de l'offre d'énergie dans l'économie, ainsi que les changements de la demande de produits finis ou intermédiaires, à mesure que les coûts de production changent. À titre d'exemple, l'adoption généralisée de moteurs électriques et de systèmes auxiliaires à haute efficacité aurait un effet sur la demande d'électricité, ce qui pourrait se répercuter sur les prix et influencer sur les décisions liées à l'énergie, dans l'ensemble de l'économie. Si des technologies efficaces sur le plan énergétique réussissent à pénétrer fortement le marché, il en résulte une baisse du coût des services énergétiques, qui provoque un effet de rebond, soit une augmentation de la demande de services énergétiques et donc, une plus grande consommation d'énergie. Cela peut mener à un ajustement appréciable des gains attendus de l'efficacité énergétique. L'ampleur de l'effet de rebond suscite toutefois des désaccords, les estimations variant largement selon le service énergétique visé¹³. Dans une étude récente, où l'on faisait appel à l'analyse économétrique pour examiner l'effet de rebond dans le secteur manufacturier américain, on estimait que cet effet était de 24 %¹⁴. Règle générale, les économistes constatent que les améliorations globales de la productivité énergétique (l'efficacité énergétique) sont associées au changement technologique et à la croissance économique et que ces gains de productivité favorisent une utilisation accrue de l'énergie¹⁵.

13 En 2000, un numéro complet de *Energy Policy* était consacré aux recherches sur l'effet de rebond; pour en avoir un aperçu, voir L. Schipper, éd., « On the Rebound: The Interaction of Energy Efficiency, Energy Use and Economic Activity », *Energy Policy* 28, 6-7 (2000): 351-354. Voir aussi M. Jaccard et C. Bataille, « Estimating Future Elasticities of Substitution for the Rebound Debate », *Energy Policy* 28 (2000): 451-455.

14 J. Bentzen, « Estimating the Rebound Effect in US Manufacturing Energy Consumption », *Energy Economics* 26 (2004) 123-134. La méthode de calcul utilisée par l'auteur pour établir une fonction de production agrégée à partir des données historiques ne permettait pas de bien cerner tous les effets à long terme. Voir M. Jaccard, J. Nyboer, C. Bataille et B. Sadownik, « Modelling the Cost of Climate Policy: Distinguishing Between Alternative Cost Definitions and Long-Run Cost Dynamics », *The Energy Journal* 21, 1 (2003): 49-73.

15 R. Ayres, L. Ayres et B. Warr, « Energy, Power and Work in the US Economy, 1900-1998 », *Energy* 28 (2003): 219-273.

3 Prévisions de rechange

3.1 L'utilisation de modèles pour évaluer les possibilités d'efficacité énergétique

On peut utiliser toute une gamme de modèles énergie-économie pour déterminer de quelle façon les changements dans l'efficacité énergétique, le type de combustible ou le contrôle des émissions des technologies peuvent aboutir à des concentrations différentes d'émissions de GES. Parmi ces modèles, ceux qui offrent une représentation technologique détaillée se prêtent davantage à la modélisation des études de cas du présent programme de recherche de la TRNEE. Habituellement, dans une analyse de l'efficacité énergétique, les technologies (chaudières, ampoules électriques, moteurs électriques) qui fournissent le même service énergétique (chauffage, éclairage, force motrice industrielle) sont généralement présumées être de parfaits substituts, hormis leurs différences de coûts financiers et d'émissions de GES et autres polluants. Lorsque l'on convertit leurs coûts financiers (immobilisation et exploitation) à diverses périodes à leur valeur actuelle en utilisant un taux d'actualisation social, nombre de technologies actuelles et naissantes utilisables pour réduire les émissions de GES semblent rentables ou, tout au plus, légèrement plus coûteuses par rapport à l'équipement en place. Dans ces analyses, on constate souvent qu'une diminution importante des émissions de GES peut être rentable ou peu coûteuse, si ces technologies faiblement émettrices augmentent leur (faible) part de marché et parviennent à dominer le marché¹⁶.

Néanmoins, dans ces types d'analyses, on néglige les complexités inhérentes à l'adoption de technologies efficaces sur le plan énergétique, en se concentrant sur une seule estimation ex ante (pré-anticipée) du coût financier¹⁷. Dans l'évaluation d'un scénario de rechange ou un examen de l'adoption de l'efficacité énergétique par l'industrie, il faut explicitement reconnaître les questions d'« écart d'efficacité » soulignées à la section 2.2. Un modèle énergie-économie dont le comportement est explicite offrira une évaluation plus réaliste des possibilités de décarbonisation. De plus, le modèle doit être explicite sur le plan technologique. Dans l'industrie, cela signifie que les technologies et procédés spécifiques et les interactions technologiques des divers sous-secteurs d'un même secteur doivent être suffisamment représentées. Il est également important d'intégrer un modèle entre les secteurs de l'offre et de la demande, parce que les rétroactions de prix ont leur poids en termes d'ajustements provoqués par les changements techniques dans un secteur.

3.2 Préparation de scénarios de rechange

Ce sont ces préoccupations qui ont orienté l'élaboration du modèle du SCMI, que nous avons utilisé pour préparer les prévisions fondamentales dans l'étude de base et utilisé également dans l'étude économique pour concevoir les scénarios de rechange.

16 À titre d'exemples, voir : M. Brown, M. Levine, J. Romm, A. Rosenfeld et J. Koomey, « Engineering-Economic Studies of Energy Technologies to Reduce Greenhouse Gas Emissions: Opportunities and Challenges », *Annual Review of Energy and the Environment* 23 (1998): 287-385; A. Lovins et H. Lovins, « Least-Cost Climate Stabilization », *Annual Review of Energy and the Environment* 16 (1991): 433-531.

17 Le terme latin ex ante signifie « auparavant ». Dans les modèles où l'incertitude est dissipée dans le cours des événements, les valeurs ex ante (p. ex., de gain prévu) sont celles calculées avant la résolution de l'incertitude.

Nous avons donné certains détails sur le SCMI dans l'étude de base (section 3.2). Nous nous concentrons ici sur la méthodologie de préparation des scénarios de rechange.

Méthodologie

Le modèle du SCMI permet de faire ressortir un potentiel « atteignable », plutôt qu'une possibilité techniquement réalisable. Les mesures d'efficacité énergétique (telles que représentées par les technologies générant moins d'émissions de carbone) sont adoptées, dans le modèle, en fonction du stade de concurrence technologique décrit à l'étape 3 de la simulation du SCMI (section 3.2 de l'étude de base). Dans cette « concurrence », on s'efforce d'illustrer les décisions d'achat des entreprises non seulement d'après l'atténuation des coûts annualisés sur le cycle de vie, mais également selon les préférences en matière de rendement, l'hétérogénéité des coûts, la valeur d'option et les risques d'échec.

Par la simulation, dans le SCMI, du prix fictif des émissions de carbone dans les sous-modèles du secteur industriel, on peut avoir un indice du potentiel des mesures d'efficacité énergétique en matière de réduction des émissions. Cette méthode repose sur le principe suivant : l'objectif de la décarbonisation déterminerait la formulation d'un scénario GES de rechange (simulé par un prix fictif pour le carbone), ce qui indiquerait le rôle que les investissements en efficacité énergétique pourraient jouer dans la décarbonisation, parmi d'autres options, notamment le remplacement du combustible, la réduction des émissions fugitives, la réduction des émissions des procédés, ainsi que la capture et le stockage du CO₂. Les mesures de réduction du carbone interviennent jusqu'à ce que soit atteint le coût différentiel de réduction du carbone.

Puisque le SCMI décrit les services énergétiques en modèles de flux qui montrent la séquence des activités nécessaires pour générer des produits et services particuliers (voir l'étude de base, section 3.1), les mesures d'efficacité peuvent être modélisées de façon intégrée. Il s'agit d'une approche importante, car comme l'indique constamment la documentation sur l'efficacité énergétique, se concentrer isolément sur les mesures individuelles d'efficacité énergétique donnera des estimations différentes du potentiel d'efficacité et des coûts, comparativement à une approche par systèmes intégrés. Les mesures d'efficacité énergétique sont souvent inter-reliées et c'est seulement par une approche systémique que nous pouvons analyser ces influences croisées¹⁸.

Aux fins de notre étude, nous avons établi deux prévisions de rechange, à savoir les scénarios *hypocarboné I* et *hypocarboné II*, en simulant deux prix fictifs différents sur un horizon de simulation de 25 ans (2005-2030). Nous appliquons ce prix fictif non seulement aux sous-modèles du secteur de l'industrie, mais également aux prix du secteur de l'électricité afin de pouvoir répercuter un prix du carbone dans celui de l'électricité qui a servi à évaluer les décisions d'investissements technologiques dans les modèles des sous-secteurs de l'industrie¹⁹. Dans l'un et l'autre cas, les profils d'investissement et les flux d'énergie changent, par rapport à leur évolution dans le modèle de base, pour donner une prévision où les émissions de carbone sont moindres. Nous avons simulé un prix de 15 \$ la tonne de

18 À titre d'exemple, pour des dispositifs qui se font concurrence et consomment à la fois de la vapeur et de l'électricité (directement et par des services auxiliaires) à des ratios différents, un changement du prix de l'électricité, de la demande d'électricité ou du coût d'un service auxiliaire affecterait la demande de vapeur.

19 Comme nous l'avons décrit à l'étape 5 de la description de la simulation du SCMI (étude de base, section 3.2), ces simulations intégraient les rétroactions entre l'offre et la demande d'énergie, même si elles ne sont appliquées que dans le cas du charbon et de l'électricité pour maintenir la cohérence avec les hypothèses d'analyse de simulation dans les études cumulatives du Processus national sur le changement climatique.

CO₂e dans le modèle hypocarboné I et de 30 \$ la tonne de CO₂e dans le modèle hypocarboné II pour influencer sur un changement dans les profils d'investissement au SCMI, et rendre ainsi compte d'un « potentiel atteignable », relativement modeste, que l'on pourrait influencer par une politique d'écologisation de la fiscalité.

Même si les fonctions de rétroaction du prix et de la demande d'énergie sont comprises dans la simulation, on nous a demandé de ne pas intégrer la fonction de rétroaction macroéconomique au SCMI. L'objet était de maintenir la cohérence avec les deux autres études de cas sur la décarbonisation. La TRNEE pourra utiliser les résultats des études de cas comme intrants pour un modèle macroéconomique à un stade ultérieur de son programme de recherche. Cela entraîne souvent des incohérences méthodologiques en raison des différences dans les modèles macroéconomiques et un modèle à fort apport technologique, comme le SCMI. Une solution de rechange serait de simuler dans le SCMI diverses politiques ou mesures de décarbonisation, notamment celle-ci²⁰.

Dans le cadre du projet, l'horizon temporel est plus long que ce qui est habituellement retenu dans la plupart des analyses des émissions de GES (décision concentrée sur la cible établie par le Protocole de Kyoto, soit de six à huit ans). Les technologies naissantes sont plus susceptibles d'être acceptées sur le marché en un horizon de 25 ans. Pour intégrer la promotion à long terme de ces technologies par le soutien à la R-D et à la commercialisation, nous ajustons les « coûts intangibles » du modèle dans les divers scénarios afin de rendre compte d'un effort de commercialisation plus ciblé. Voici les technologies touchées par ces ajustements :

Tableau 3-1 : Technologies naissantes

Secteur	Technologie
Aluminium	Anodes passives / cathodes humides
Produits chimiques	Nouveaux catalyseurs
Fer et acier	Coulée en brames minces et en bandes
Fer et acier	Fer de réduction directe
Minéraux industriels	Fours à lit fluidisé
Pâtes et papiers	Séchage intense
Pâtes et papiers	Gazéification de la liqueur noire
Métaux	Hydrométallurgie (nickel)

3.3 Résultats / Analyse – Scénarios de rechange

Au tableau 3-2, nous résumons les résultats des scénarios hypocarboné I et hypocarboné II, comparativement au scénario présenté dans l'étude de base. Les scénarios hypocarbonés I et II donnent respectivement des réductions des GES de 46 Mt de CO₂e et de 58 Mt de CO₂e en 2030. Même si le prix fictif double entre les deux scénarios (de 15 \$/t CO₂e à 30 \$/t CO₂e), l'augmentation de prix ne permet qu'une réduction supplémentaire de 26 %. Cette relation non linéaire entre le prix

²⁰ Voir, par exemple : M. Jaccard, N. Rivers et M. Horne, *The Morning After: Optimal GHG Policies for Canada's Kyoto Commitment and Beyond* (Toronto : Institut C.D. Howe, 2004).

fictif et les réductions d'émissions rend compte du coût relatif des mesures qui sous-tendent les résultats²¹.

Les réductions d'émissions se situent en grande partie dans les émissions directes, bien que la réaction des émissions indirectes à l'imposition d'un prix fictif soit plus forte que celle des émissions directes (les émissions indirectes fléchissent de 53 à 62 % en 2030, tandis que les émissions directes ne régressent que de 5 à 7 %). Les mesures à l'origine de cette forte réaction des émissions indirectes comprennent une adoption plus large de systèmes de cogénération et d'autres mesures qui augmentent l'efficacité globale des systèmes moteurs auxiliaires.

Nous donnons les résultats pour les sous-secteurs individuels aux tableaux 3-3 à 3-13. Nous ne montrons que les émissions totales (somme des émissions directes et indirectes). Pour chaque secteur, nous indiquons les tendances relatives des intensités directes de GES (t CO₂e/GJ) et intensités énergétiques (GJ/production physique) dans chaque simulation. Ces indicateurs laissent entrevoir le rôle relatif de l'efficacité énergétique comparativement au changement de combustible, sur le plan des résultats. Toutefois, pour certains secteurs, la différence n'est pas nette. À titre d'exemple, les changements dans l'indicateur d'intensité énergétique sont également attribuables aux économies de gaz naturel dues aux programmes anti-fuites (secteur de l'extraction du gaz naturel), et les changements dans l'indicateur d'intensité des GES sont aussi attribuables à des modifications dans les émissions des procédés (fonte de métaux, produits chimiques, fer et acier) et dans les émissions fugitives (secteurs en amont du pétrole et du gaz, extraction du charbon). Dans les secteurs des produits chimiques et des pâtes et papiers, les émissions totales dans les scénarios hypocarbonés I et II régressent malgré l'augmentation de la consommation énergétique. Cela est dû à l'adoption accrue de la cogénération, qui entraîne des hausses de l'énergie totale, compensées par des économies dans les émissions indirectes associées à la cogénération d'électricité.

Les mesures d'efficacité énergétique figurent parmi divers types de mesures de réduction des GES dans chaque sous-secteur. Les secteurs en amont du pétrole et du gaz, auxquels sont attribuables des réductions importantes des émissions durant chaque période, obtiennent nombre de ces réductions par des mesures qui réduisent les émissions fugitives²². Le secteur de la fusion et de l'affinage des métaux, le raffinage du pétrole et les sous-secteurs du fer et de l'acier sont ceux qui contribuent le plus aux réductions des émissions par l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les simulations des scénarios de rechange.

21 Pour plus de précisions sur ces rapports, voir : M.K. Jaccard & Associates Inc., *Construction and Analysis of Sectoral, Regional and National Cost Curves of GHG Abatement in Canada*, préparé pour l'Office de l'efficacité énergétique, Ressources naturelles Canada, Ottawa, mars 2003; et M.K. Jaccard & Associates Inc., *Construction and Analysis of Sectoral, Regional and National Cost Curves of GHG Abatement in Canada*, préparé pour le Groupe de travail sur les courbes de coûts, Groupe d'analyse et de modélisation, Processus national de mise en œuvre du changement climatique. Dans ces études, on a utilisé le modèle du SCMI pour élaborer des courbes de coûts des réductions d'émissions par rapport à une série de prix fictifs (de 10 \$ jusqu'à des niveaux de 250 \$ t/CO₂e). Les courbes de coûts ont été préparées pour les régions, les sous-secteurs et l'ensemble du Canada.

22 Les émissions fugitives sont les rejets intentionnels ou non de GES provenant de la production, de la transformation, de l'acheminement, du stockage et de la livraison de combustibles fossiles. Ces rejets comportent un peu de dioxyde de carbone, mais en gros, il s'agit de méthane, un GES plus puissant.

Le potentiel de décarbonisation décrit dans les scénarios de rechange est probablement conservateur pour les raisons suivantes :

1. Ni les mesures d'exploitation et d'entretien, ni l'ensemble des relations à l'écologie industrielle ne figurent dans l'analyse²³.
2. Sur un horizon prévisionnel prolongé, les options technologiques naissantes pourraient être moins lourdes en coûts d'immobilisation du fait de leur déploiement sur le marché. De plus, ces technologies pourraient devenir plus intéressantes pour les entreprises, à mesure qu'elles se répandront dans l'économie. Ces facteurs ne sont pas intégrés à cette analyse.
3. Le modèle ne peut prévoir les innovations technologiques radicales futures. Il illustre plutôt un déploiement accru des technologies actuelles et naissantes (bien que certaines, comme celle du fer de réduction directe, constituent des innovations radicales).

Si on utilisait dans le scénario de rechange des prix plus élevés pour le carbone, cela donnerait des réductions plus importantes des émissions, bien que l'analyse de la courbe de coûts au moyen du SCMI laisse entrevoir la possibilité d'un recul des réductions supplémentaires des émissions au-delà d'un prix fictif de 50 \$/tonne CO₂e²⁴. Néanmoins, il faut savoir que des prix fictifs plus élevés pourraient avoir un plus grand effet pour induire l'innovation technologique dans les technologies hypocarbonées et éconergiques (par des innovations tant radicales que progressives), en augmentant le potentiel de décarbonisation à long terme. De plus, il y aurait probablement des changements dans les types particuliers de produits, car l'industrie privilégierait les intrants à moindre intensité de carbone.

23 Le SCMI peut simuler des pratiques améliorées d'exploitation et d'entretien, si l'on intègre des estimations exogènes de potentiel, mais il ne comprend pas ces estimations dans la version retenue pour cette étude. Le SCMI est actuellement limité dans sa capacité d'illustrer la totalité des relations de l'écologie industrielle (par exemple, les transferts de vapeur entre sous-secteurs de l'industrie).

24 M.K. Jaccard & Associates, *Construction and Analysis of Sectoral, Regional and National Cost Curves of GHG Abatement in Canada*, préparé pour l'Office de l'efficacité énergétique, Ressources naturelles Canada, Ottawa, mars 2003, p. 24.

Tableau 3-2 : Émissions de GES et énergie pour les scénarios de rechange, Canada

	2000	2010	2020	2030
Émissions totales de GES (Mt CO₂e)				
NRF	288	343	396	453
Hypocarboné I	288	322	365	407
Hypocarboné II	288	316	355	395
Émissions directes de GES (Mt CO₂e)				
NRF	237	307	358	407
Hypocarboné I	237	292	339	386
Hypocarboné II	237	293	335	378
Émissions indirectes de GES (Mt CO₂e)				
NRF	50	36	38	46
Hypocarboné I	50	29	26	22
Hypocarboné II	50	23	20	17
Énergie (PJ)				
NRF	4 239	5 030	5 783	6 579
Hypocarboné I	4 239	4 822	5 537	6 298
Hypocarboné II	4 239	4 818	5 497	6 232

Tableau 3-3 : Émissions, énergie et indicateurs d'intensité, secteur des produits chimiques

	2000	2010	2020	2030
Émissions totales de GES (Mt CO₂e)				
NRF	24	26	32	38
Hypocarboné I	24	21	25	31
Hypocarboné II	24	21	25	30
Énergie totale (PJ)				
NRF	236,7	272,9	327,8	398,5
Hypocarboné I	236,7	287,4	352,6	433,8
Hypocarboné II	236,7	281,6	346,9	433,4
Intensité de GES (t directe de CO₂e / GJ)				
NRF	0,08	0,09	0,09	0,08
Hypocarboné I	0,08	0,09	0,09	0,09
Hypocarboné II	0,08	0,09	0,09	0,09
Intensité énergétique (GJ / t de produits chimiques)				
NRF	14,7	13,3	12,7	12,3
Hypocarboné I	14,7	14,0	13,7	13,4
Hypocarboné II	14,7	13,8	13,4	13,4

Tableau 3-4 : Émissions, énergie et indicateurs d'intensité, secteur des mines de charbon

	2000	2010	2020	2030
Émissions totales de GES (Mt CO₂e)				
NRF	3,1	3,2	3,4	3,9
Hypocarboné I	3,1	2,8	2,7	3,0
Hypocarboné II	3,1	2,2	2,2	2,5
Énergie totale (PJ)				
NRF	19,5	20,4	22,7	26,6
Hypocarboné I	19,5	18,8	19,9	23,0
Hypocarboné II	19,5	15,6	16,9	20,7
Intensité de GES (t directe de CO₂e / GJ)				
NRF	0,12	0,13	0,13	0,14
Hypocarboné I	0,12	0,12	0,11	0,12
Hypocarboné II	0,12	0,12	0,11	0,11
Intensité énergétique (GJ / t de charbon)				
NRF	0,3	0,3	0,2	0,2
Hypocarboné I	0,3	0,2	0,2	0,2
Hypocarboné II	0,3	0,2	0,2	0,2

Tableau 3-5 : Émissions, énergie et indicateurs d'intensité, secteur des minéraux industriels

	2000	2010	2020	2030
Émissions totales de GES (Mt CO₂e)				
NRF	14,4	15,8	18,4	22,7
Hypocarboné I	14,4	14,6	16,6	20,6
Hypocarboné II	14,4	14,7	15,2	18,2
Énergie totale (PJ)				
NRF	79,7	84,8	97,9	120,5
Hypocarboné I	79,7	81,3	92,8	114,7
Hypocarboné II	79,7	81,5	89,1	108,0
Intensité de GES (t directe de CO₂e / GJ)				
NRF	0,17	0,18	0,18	0,18
Hypocarboné I	0,17	0,18	0,18	0,18
Hypocarboné II	0,17	0,18	0,17	0,17
Intensité énergétique (GJ / t de mâchefer)				
NRF	6,1	5,7	5,4	5,1
Hypocarboné I	6,1	5,4	5,1	4,9
Hypocarboné II	6,1	5,5	4,9	4,6

Remarque : Il y a également une réduction des émissions de GES par diminution de la demande (à la suite de la rétroaction de la demande et de l'offre entre les sous-modèles qui demandent du charbon et le sous-modèle de l'extraction du charbon).

Tableau 3-6 : Émissions, énergie et indicateurs d'intensité, secteur du fer et de l'acier

	2000	2010	2020	2030
Émissions totales de GES (Mt CO₂e)				
NRF	18,1	19,0	20,9	23,9
Hypocarboné I	18,1	18,4	19,7	22,2
Hypocarboné II	18,1	18,4	19,6	22,1
Énergie totale (PJ)				
NRF	250,9	266,6	288,0	320,4
Hypocarboné I	250,9	252,7	261,3	281,3
Hypocarboné II	250,9	253,1	260,8	280,0
Intensité de GES (t directe de CO₂e / GJ)				
NRF	0,07	0,07	0,07	0,07
Hypocarboné I	0,07	0,07	0,07	0,07
Hypocarboné II	0,07	0,07	0,07	0,07
Intensité énergétique (GJ / t d'acier)				
NRF	15,2	14,3	13,7	13,5
Hypocarboné I	15,2	13,5	12,4	11,8
Hypocarboné II	15,2	13,5	12,4	11,8

Tableau 3-7 : Émissions, énergie et indicateurs d'intensité, secteur minier

	2000	2010	2020	2030
Émissions totales de GES (Mt CO₂e)				
NRF	7,1	5,8	5,7	5,8
Hypocarboné I	7,1	5,6	5,4	5,4
Hypocarboné II	7,1	5,6	5,4	5,3
Énergie totale (PJ)				
NRF	103,7	102,6	103,1	105,8
Hypocarboné I	103,7	100,4	99,1	100,6
Hypocarboné II	103,7	100,5	98,7	99,7
Intensité de GES (t directe de CO₂e / GJ)				
NRF	0,04	0,04	0,04	0,037
Hypocarboné I	0,04	0,04	0,04	0,036
Hypocarboné II	0,04	0,04	0,04	0,035
Intensité énergétique (GJ / t de capacité)				
NRF	0,4	0,4	0,4	0,4
Hypocarboné I	0,4	0,4	0,4	0,3
Hypocarboné II	0,4	0,4	0,4	0,3

Tableau 3-8 : Émissions, énergie et indicateurs d'intensité, secteur du gaz naturel

	2000	2010	2020	2030
Émissions totales de GES (Mt CO₂e)				
NRF	73,2	75,3	86,1	98,7
Hypocarboné I	73,2	66,3	74,4	86,0
Hypocarboné II	73,2	66,2	73,8	84,5
Énergie totale (PJ)				
NRF	1121,4	1194,7	1413,0	1663,7
Hypocarboné I	1121,4	1046,2	1220,7	1461,6
Hypocarboné II	1121,4	1044,4	1207,4	1431,4
Intensité de GES (t directe de CO₂e / GJ)				
NRF	0,05	0,05	0,05	0,05
Hypocarboné I	0,05	0,05	0,05	0,05
Hypocarboné II	0,05	0,05	0,05	0,05
Intensité énergétique (GJ / 1 000 m³)				
NRF	5,2	4,4	4,5	4,8
Hypocarboné I	5,2	3,8	3,9	4,2
Hypocarboné II	5,2	3,8	3,8	4,1

Tableau 3-9 : Émissions, énergie et indicateurs d'intensité, secteur de la fabrication - autre

	2000	2010	2020	2030
Émissions totales de GES (Mt CO₂e)				
NRF	35,6	35,6	38,3	42,5
Hypocarboné I	35,6	32,9	35,6	39,6
Hypocarboné II	35,6	33,3	35,5	39,2
Énergie totale (PJ)				
NRF	671,9	714,2	774,8	846,4
Hypocarboné I	671,9	708,3	764,8	833,2
Hypocarboné II	671,9	708,9	764,4	832,0
Intensité de GES (t directe de CO₂e / GJ)				
NRF	0,34	0,36	0,38	0,42
Hypocarboné I	0,34	0,35	0,38	0,41
Hypocarboné II	0,34	0,35	0,38	0,41
Intensité énergétique (GJ / millions \$ 1997)				
NRF	5 314,9	4 486,0	3 935,9	3 953,7
Hypocarboné I	5 314,9	4 448,4	3 884,9	3 892,0
Hypocarboné II	5 314,9	4 452,6	3 883,2	3 886,2

Tableau 3-10 : Émissions, énergie et indicateurs d'intensité, secteur de l'extraction du pétrole brut

	2000	2010	2020	2030
Émissions totales de GES (Mt CO₂e)				
NRF	55,1	100,0	121,7	135,9
Hypocarboné I	55,1	104,7	124,1	132,2
Hypocarboné II	55,1	99,4	119,0	129,2
Énergie totale (PJ)				
NRF	273,7	858,5	1 136,5	1 334,0
Hypocarboné I	273,7	827,1	1 104,2	1 305,6
Hypocarboné II	273,7	834,7	1 093,5	1 282,5
Intensité de GES (t directe de CO₂e / GJ)				
NRF	0,19	0,12	0,11	0,10
Hypocarboné I	0,19	0,12	0,11	0,11
Hypocarboné II	0,19	0,12	0,11	0,11
Intensité énergétique (GJ / 1 000 m³)				
NRF	2,4	4,2	4,7	4,1
Hypocarboné I	2,4	4,1	4,5	4,0
Hypocarboné II	2,4	4,1	4,5	4,0

Tableau 3-11 : Émissions, énergie et indicateurs d'intensité, secteur du raffinage du pétrole brut

	2000	2010	2020	2030
Émissions totales de GES (Mt CO₂e)				
NRF	19,9	21,9	25,1	29,1
Hypocarboné I	19,9	21,8	24,7	28,4
Hypocarboné II	19,9	21,8	24,5	28,1
Énergie totale (PJ)				
NRF	310,0	288,3	327,3	374,9
Hypocarboné I	310,0	287,8	325,8	370,8
Hypocarboné II	310,0	287,6	325,5	370,5
Intensité de GES (t directe de CO₂e / GJ)				
NRF	0,06	0,08	0,08	0,08
Hypocarboné I	0,06	0,07	0,08	0,08
Hypocarboné II	0,06	0,08	0,08	0,08
Intensité énergétique (GJ / 1 000 m³)				
NRF	3,4	2,8	2,9	3,0
Hypocarboné I	3,4	2,8	2,8	2,9
Hypocarboné II	3,4	2,8	2,8	2,9

Tableau 3-12 : Émissions, énergie et indicateurs d'intensité, secteur des pâtes et papiers

	2000	2010	2020	2030
Émissions totales de GES (Mt CO₂e)				
NRF	19,7	18,5	21,2	26,3
Hypocarboné I	19,7	15,2	16,8	20,3
Hypocarboné II	19,7	14,6	14,7	17,0
Énergie totale (PJ)				
NRF	901,2	934	986	1 068
Hypocarboné I	901,2	929	1 007	1 100
Hypocarboné II	901,2	928	1 005	1 101
Intensité de GES (t directe de CO₂e / GJ)				
NRF	0,01	0,01	0,02	0,02
Hypocarboné I	0,01	0,01	0,01	0,01
Hypocarboné II	0,01	0,01	0,01	0,01
Intensité énergétique (GJ / t de produit)				
NRF	31,5	28,7	26,5	24,8
Hypocarboné I	31,5	28,5	27,0	25,5
Hypocarboné II	31,5	28,5	27,0	25,5

Tableau 3 13 : Émissions, énergie et indicateurs d'intensité, secteur de la fusion et du raffinage des métaux non ferreux

	2000	2010	2020	2030
Émissions totales de GES (Mt CO₂e)				
NRF	17,2	20,8	22,8	25,6
Hypocarboné I	17,2	18,9	20,3	22,0
Hypocarboné II	17,2	18,8	19,9	21,3
Énergie totale (PJ)				
NRF	269,4	290,5	302,6	320,3
Hypocarboné I	269,4	282,1	286,6	296,3
Hypocarboné II	269,4	281,7	285,2	293,9
Intensité de GES (t directe de CO₂e / GJ)				
NRF	0,06	0,06	0,06	0,06
Hypocarboné I	0,06	0,06	0,06	0,06
Hypocarboné II	0,06	0,06	0,06	0,05
Intensité énergétique (GJ / t de produit)				
NRF	63,3	55,6	50,5	46,4
Hypocarboné I	63,3	54,0	47,8	42,9
Hypocarboné II	63,3	54,0	47,6	42,6

4 Analyse économique et de la politique

Les simulations des scénarios de rechange révèlent que l'on pourrait parvenir à une réduction pouvant atteindre jusqu'à 58 Mt CO₂e d'ici 2030. Ces changements engendrés par une combinaison de mesures, à savoir que des modifications dans l'acquisition de matériel augmentent l'efficacité énergétique de l'industrie. Nous évaluons le coût de ces mesures pour chaque sous-secteur de l'industrie et procédons à une analyse qualitative des co-avantages. Nous examinons ensuite ce qui ressort des résultats de la modélisation, à propos de la politique d'EF et, plus précisément, en quoi le choix des instruments de politique pourrait influencer sur le coût et la capacité d'atteindre les réductions (efficacité économique et environnementale). En outre, nous examinons dans une plus large perspective les enjeux, en matière de choix et de conception de politiques d'EF axées sur la décarbonisation dans le secteur de l'industrie.

4.1 Méthodologie d'analyse économique

Comme nous l'avons mentionné, les mesures qui sous-tendent la décarbonisation dans les scénarios de rechange forment la base d'une analyse économique détaillée.

Méthodologie détaillée du prix de revient

Nous calculons les coûts financiers ex ante, soit la différence entre la valeur actuelle nette des coûts d'immobilisation, d'énergie, d'exploitation et d'entretien en 2004 (en dollars CAN 2000) escomptée à un taux d'actualisation social pour l'horizon 2005-2030 entre le scénario de base et chacun des scénarios de rechange²⁵. Les coûts d'immobilisation indiqués ici sont les nouveaux achats et les dépenses théoriques de modernisation sur les 10 ans. Si, toutefois, la durée utile d'une pièce d'équipement s'étend au-delà de 2030, le coût d'immobilisation ne comprend que le coût jusqu'en 2030. Les coûts d'exploitation et d'énergie sont les coûts annuels sur l'horizon de 25 ans.

4.2 Résultats/Analyse – Analyse économique

Nous résumons au tableau 4-1 les coûts financiers ex ante des deux scénarios de rechange. Dans tous les sous-secteurs de l'industrie, les coûts sont négatifs, car la valeur des économies d'énergie (escomptée en 2004 à un taux de 10 %) est supérieure à toute augmentation des coûts d'immobilisation initiaux en rapport avec l'adoption de ces mesures. Les coûts sociaux peuvent être et sont habituellement beaucoup plus élevés et sont intégrés aux choix technologiques des entreprises et des ménages.

²⁵ Les coûts financiers ex ante sont une estimation ponctuelle des différences de coûts financiers des technologies, ce qui n'intègre pas l'évaluation du risque. Pour une analyse des diverses définitions de coûts utilisées dans la modélisation, voir : Jaccard et al., « Modelling the Cost of Climate Policy: Distinguishing Between Alternative Cost Definitions and Long-Run Cost Dynamics ».

Tableau 4-1 : Coûts financiers ex ante, 2005–2030 (en milliards de dollars)

	Hypocarboné I	Hypocarboné II
Produits chimiques	-4,98	-4,04
Mines de charbon	-0,99	-2,19
Minéraux industriels	-1,16	-2,08
Fer et acier	-1,84	-1,93
Fusion et affinage des métaux	-1,42	-1,76
Mines	-0,26	-0,59
Autre, fabrication	-1,92	-2,75
Extraction du pétrole brut	-0,04	-0,03
Raffinage du pétrole	-0,19	-0,38
Pâtes et papiers	-3,39	-4,80
Industrie du gaz naturel	-1,45	-4,32
Total	-17,64	-24,87

Remarque : Chiffres en dollars de 2004.

Puisque dans le SCMI, la simulation n'intégrait pas les rétroactions macroéconomiques (étape 5 de la simulation SCMI), les résultats n'illustrent que partiellement l'équilibre de la réaction au prix fictif du CO₂e. Les effets macroéconomiques agrégés comprennent les répercussions commerciales et structurelles résultant des changements dans les prix de l'énergie et, en retour, les prix des autres produits intermédiaires et finis. Si les technologies éconergiques réussissent à pénétrer fortement le marché, le coût moindre des services énergétiques qui en résulte peut également susciter un effet de rebond, soit une augmentation de la demande de services énergétiques et donc, une plus grande consommation d'énergie.

4.3 Co-avantages

L'objectif environnemental de cette étude de cas se concentre sur le niveau futur des émissions de carbone d'origine énergétique. Nous cherchons donc à répondre aux préoccupations liées à ces émissions et à notre capacité de tenir nos engagements internationaux actuels et futurs en rapport avec le changement climatique. De plus, en simulant la décarbonisation par ces moyens, il est possible que nous puissions relever un certain nombre d'autres enjeux de politique, notamment les craintes concernant la sécurité énergétique, l'environnement local et l'innovation.

Puisque la baisse de l'intensité énergétique réduira les coûts d'énergie par unité de production de service, la croissance économique sera moins freinée par les coûts futurs de l'énergie et la croissance énergétique pourra mieux s'adapter aux fluctuations des prix de l'énergie, contribuant ainsi à une plus grande sécurité énergétique. De plus, la sécurité énergétique peut être accrue par l'expansion des réserves canadiennes disponibles de ressources en combustibles fossiles non renouvelables, selon que le combustible est économisé ou exporté.

Les réductions peuvent aussi aider à réduire les externalités environnementales liées non seulement à une diminution des émissions de carbone, mais également aux torts associés aux autres répercussions, et aux risques actuels qui ont trait à l'interaction des activités touchant les combustibles fossiles avec

l'air, l'eau et la terre. Cela comprend les effets néfastes sur la santé découlant de la mauvaise qualité de l'air des villes en raison du rejet des principaux contaminants atmosphériques (PCA). Même si une diminution de la consommation de combustibles fossiles aboutit habituellement à une diminution des PCA, il n'en est pas toujours ainsi, par exemple si on utilise davantage la biomasse ou si les PCA sont fugitifs et découlent de procédés, au lieu d'être simplement issus de l'utilisation des combustibles. Même si les PCA diminuent, cela n'apporte pas toujours un avantage net²⁶. Contrairement aux émissions de GES, dont l'effet négatif n'est pas lié à l'endroit, les répercussions de ces changements dans les PCA sur la qualité de l'air ambiant dépendent de l'endroit des émissions et de leur proximité avec les centres de population.

Par la promotion d'une plus grande efficacité énergétique, nous pouvons appuyer les objectifs du Canada en matière d'innovation en renforçant les compétences et la capacité de fabrication canadiennes dans le secteur des technologies efficaces sur le plan énergétique. Le gouvernement du Canada rappelle que l'innovation prend de plus en plus d'importance dans l'économie canadienne fondée sur le savoir. L'innovation dans les technologies efficaces permettra au Canada d'abaisser ses coûts de réduction des émissions de GES par unité de production économique et d'atteindre des cibles plus ambitieuses de réduction des émissions de GES sans nuire à son rendement économique²⁷. Toutefois, il faut considérer l'innovation en matière d'efficacité énergétique, par rapport à d'autres investissements – les investissements dans l'efficacité énergétique peuvent en « remplacer » d'autres, qui se seraient, par ailleurs, produits et qui auraient peut-être mieux fait pour augmenter la productivité par l'innovation.

L'innovation technologique fructueuse offre aussi la possibilité d'accroître les exportations de technologies éconergiques, dont la demande augmentera probablement, car la collectivité internationale applique des politiques concernant le changement climatique²⁸. Cela est possible dans la mesure où les entreprises canadiennes se mettent à développer de nouvelles technologies, plutôt que d'acquérir la technologie nécessaire par des importations de machines et matériel et autres moyens d'acquisitions technologiques, par exemple l'investissement étranger direct et le recours aux compétences étrangères. C'est cette dernière solution qui a été le plus souvent retenue²⁹.

4.4 Outils de la politique d'EF

La réorientation des programmes fiscaux et de dépenses d'un gouvernement pour appuyer le changement vers un système énergétique décarbonisé peut faire appel à de nombreux instruments financiers, combinés ou utilisés de concert avec d'autres types d'instruments de politiques, comme le volontarisme, ainsi qu'à des outils d'information et de réglementation. L'EF, telle que définie par la TRNEE, est une approche large, où l'on peut recourir à toute une gamme d'instruments qui se renforcent mutuellement pour appuyer un changement en faveur du développement durable. L'objet commun de ces instruments, décrit dans le rapport intitulé « Vers un programme d'écologisation de la

26 D. Burtraw et M. Toman, « Ancillary Benefits of Greenhouse Gas Mitigation Policies », dans M. Toman (éd.), *Climate Change Economics and Policy: An RFF Anthology* (Washington, D.C.: Resources for the Future, 2001), 80-92.

27 Gouvernement du Canada, « Atteindre l'excellence - Investir dans les gens, le savoir et les possibilités », (Ottawa : Industrie Canada, février 2002).

28 Table de concertation sur la technologie, « Mise en valeur des innovations technologiques visant à atténuer les émissions de gaz à effet de serre », (Ottawa : Processus national sur le changement climatique, décembre 1999).

29 Table de l'industrie, survol, Rapport sur les options (Ottawa : Processus national sur le changement climatique, 2000), 7.

fiscalité : les premiers pas », est d'inciter les producteurs et les consommateurs à modifier leurs décisions et leurs comportements, soit par une internalisation des coûts environnementaux, soit en récompensant les pratiques plus durables³⁰. Nous rattachons trois grands instruments de politiques à l'analyse de modélisation : l'application de taxes environnementales, les permis négociables (dans une réglementation axée sur le marché) et les subventions. Les deux premiers instruments donnent une internalisation des coûts environnementaux, alors que les subventions récompensent les pratiques plus durables. Ultérieurement, nous aborderons les avantages relatifs de ces instruments en tant qu'ensemble d'outils de politique.

Taxes environnementales et déplacements d'impôt

Les résultats de la modélisation pointent directement vers l'application d'une taxe sur les GES, à payer sur chaque combustible fossile, et proportionnelle à la quantité de GES émis lors de la combustion³¹. Le scénario hypocarboné I indique une taxe de 15 \$ la tonne de CO₂e, alors que le scénario hypocarboné II représente une taxe de 30 \$ la tonne de CO₂e, équivalant au prix fictif imposé dans les simulations du modèle. Toutefois, puisque le prix du carbone a été appliqué à toutes les émissions de GES représentées dans les sous-secteurs de l'industrie (y compris les émissions de procédés et les émissions fugitives), les émissions autres que de la combustion ont été également touchées par le prix fictif, de sorte que les résultats pourraient causer une surestimation de l'effet, comparativement à une taxe appliquée directement au brûlage des combustibles. Une taxe sur les GES, appliquée dans l'ensemble du secteur de l'industrie, incite chaque sous-secteur à augmenter ou à modérer ses efforts de réduction des émissions jusqu'à ce que chacun se retrouve devant le même coût marginal pour l'unité de réduction suivante. Idéalement, l'importance de la taxe rendrait compte de l'ampleur du dommage environnemental causé. Ainsi, la teneur en carbone d'un combustible pourrait servir d'approximation de son rôle dans le changement climatique. Les taxes qui satisfont à cette exigence sont parfois appelées « taxes de Pigou »³².

Il serait possible, pour viser les objectifs de la décarbonisation, d'appliquer un certain nombre de taxes environnementales :

1. la *taxe sur le carbone* est un impôt à payer sur chaque combustible fossile, proportionnellement à la quantité de carbone émis lors de son brûlage; une taxe sur le CO₂ est formulée par tonne de CO₂ émis, plutôt que de carbone, et une taxe sur les GES est aussi appliquée aux autres émissions de GES résultant du brûlage du combustible³³;
2. une *taxe sur l'énergie* dépend de la quantité d'énergie consommée et est exprimée dans une unité commune; même si la taxe sur l'énergie peut influencer sur les mesures d'efficacité énergétique, elle peut être coûteuse pour les combustibles sans CO₂, comme l'énergie éolienne.

30 Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, Vers un programme canadien d'écologisation de la fiscalité : les premiers pas (Ottawa : 2002), 5.

31 Une taxe sur le CO₂ est indiqué par tonne de CO₂ émis, plutôt que de carbone. On peut la transformer facilement en taxe sur le carbone – une tonne de carbone correspondant à 3,67 tonnes de CO₂. La taxe sur les GES couvre les autres GES et se mesure en tonnes de CO₂e.

32 La taxe de Pigou est prélevée sur chaque unité de production d'un pollueur, à un montant qui correspond aux dommages différentiels qu'il inflige au niveau de production efficient.

33 On peut facilement la transformer en taxe sur le carbone – une tonne de carbone correspond à 3,67 tonnes de CO₂.

Les recettes perçues grâce aux taxes environnementales peuvent servir à diverses fins; par exemple être versées aux recettes générales, être réservées à certains projets environnementaux, servir de rabais ou permettre de réduire d'autres taxes. Chaque option a ses coûts spécifiques selon les membres et secteurs de l'économie. En pratique, dans la conception des taxes environnementales on a fait appel, à divers degrés, aux remboursements, aux différences de taux d'imposition appliqué aux industries et aux ménages et aux exemptions pour régler certains problèmes d'équité et de compétitivité.

Permis négociables (réglementation axée sur le marché)

Il faut mentionner un domaine important d'innovation en matière de politiques, soit l'établissement de règlements axés sur le marché qui, individuellement, offrent une certaine souplesse pour atteindre des limites ou exigences obligatoires. Contrairement à la réglementation classique fondée sur le pouvoir hiérarchique, la manière de participer est laissée à la discrétion de l'entreprise ou du ménage (qu'il s'agisse de réduire les émissions ou d'acquérir la technologie désignée, ou de payer d'autres intervenants pour le faire). Les permis négociables (droits de rejet de polluants) peuvent être échangés dans un marché de permis libres ou contrôlés³⁴.

Les résultats du modèle laissent entrevoir un système de plafonnement des émissions et de permis négociables (PEPN) qui pourrait être appliqué à toute l'industrie, avec des permis et plafonnements aux enchères équivalant aux niveaux d'émissions signalés dans les scénarios de rechange – 407 Mt de CO₂e en 2030 dans le scénario hypocarboné I et 395 Mt de CO₂e dans le scénario hypocarboné II (tableau 32). Les prix des permis négociables correspondent aux prix fictifs appliqués dans ces scénarios (15 \$ la tonne de CO₂e et 30 \$ la tonne de CO₂e, respectivement). Dans les systèmes de PEPN, les gouvernements fixent un niveau maximal d'émissions (plafond) et attribuent ensuite des permis d'émissions négociables à tous les émetteurs visés par le programme. Habituellement, les permis diminuent en nombre ou en valeur à la longue, réduisant progressivement le plafond global d'émissions.

Les systèmes de PEPN offrent une gamme considérable d'options de conception, notamment dans la façon dont les permis sont attribués (enchères ou droits acquis ou combinaison des deux) et les participants visés (un seul secteur, l'ensemble de l'économie). La réglementation axée sur le marché peut également se concentrer sur les technologies ou formes d'énergie, en spécifiant le résultat souhaité sur le marché, plutôt que le résultat environnemental³⁵. En Californie, les constructeurs d'automobiles doivent garantir qu'un pourcentage minimum de véhicules vendus satisfait à diverses catégories de plafonds d'émissions. Dans une certaine mesure, ces exigences donnent de la souplesse (échancier, échanges entre participants) de façon à réduire au minimum les coûts d'observation.

Dans une norme de portefeuille d'énergies renouvelables (NPER), on oblige les fournisseurs d'électricité à garantir qu'un pourcentage minimum de leur électricité est produite à l'aide d'énergies renouvelables. Ce système a été appliqué dans de nombreux pays³⁶. On peut également étendre la

34 Ceux dont les coûts de réduction de la pollution sont relativement élevés ont intérêt à soumissionner pour obtenir des permis. Donc, les acheteurs de permis tendent à produire davantage d'émissions que les vendeurs de permis et pourtant, dans l'ensemble, les normes environnementales demeurent inchangées parce qu'on délivre juste assez de permis pour atteindre la norme générale.

35 M. Jaccard et Y. Mao, « Making Markets Work Better », dans T. Johansson et J. Goldemberg (éd.), *Energy for Sustainable Development: A Policy Agenda* (New York : Programme du développement des Nations Unies, 2002).

36 T. Berry et M. Jaccard, « The Renewable Portfolio Standard: Design Considerations and an Implementation Survey », *Energy Policy* 29 (2001): 263-277.

NPER à l'électricité produite de façon plus efficace par cogénération (« normes d'émissions pour l'électricité »). De nombreux pays européens étudient actuellement cette possibilité; le système est déjà en usage dans la région wallonne de la Belgique.

Subventions

L'EF peut appuyer la décarbonisation par l'élimination ou la réorientation des subventions en vigueur et l'introduction de nouvelles subventions. L'appui financier sous forme de subventions directes, de prêts à taux d'intérêts faibles ou garantis et d'incitatifs fiscaux peut servir à appuyer directement une plus grande adoption des technologies éconergiques, ainsi que les efforts à long terme de recherche-développement de nouvelles technologies éconergiques. De plus, l'EF peut éliminer ou réduire les subventions aux combustibles qui aboutissent actuellement à une composition de l'offre et à des prix de l'énergie inefficaces, qui pourraient nuire à la mise au point et à l'adoption de technologies éconergiques³⁷.

Les scénarios de rechange pourraient faire ressortir les répercussions d'un programme de subventions dûment conçu pour cibler les mesures rentables. Même si nous n'avons pas entrepris l'évaluation exhaustive des mesures qui sous-tendent les résultats de la modélisation, les réductions des GES se concentrent sur les sous-secteurs industriels suivants : pâtes et papiers, fusion des métaux, minéraux industriels et gaz naturel. Ces perspectives de réduction n'excluent pas les possibilités inhérentes à des mesures d'efficacité énergétique. Si on se préoccupait seulement des possibilités d'efficacité énergétique (sans changement de combustible, par exemple), cela aboutirait à des effets plus modestes.

L'ampleur de l'incitatif requis pour cibler les mesures inhérentes à la simulation du modèle peut être évaluée en calculant les coûts privés perçus des scénarios de rechange. Pour ce faire, on calcule la zone située sous une courbe où sont tracées les réductions cumulatives des émissions en fonction de prix fictifs croissants du CO₂e. La zone située sous la courbe de coût marginal résultante, jusqu'au prix fictif du scénario de rechange, représente l'indemnisation nécessaire pour que les entreprises prennent des mesures qu'elles n'auraient autrement pas prises (leur coût privé perçu). Ces coûts rendent compte de l'hétérogénéité des coûts, du risque, de la valeur d'option et des avantages qualitatifs et quantitatifs des choix technologiques, ainsi que des coûts financiers (ou avantages) associés à un changement de technologie. Nous dressons des courbes de coût marginal pour chaque année de la simulation en exécutant maintes fois le SCMI selon des niveaux de prix fictifs du CO₂e différents et en établissant ensuite les réductions d'émissions (directes et indirectes) atteintes à chaque niveau de prix. Les coûts calculés à partir de la zone située sous la courbe sont actualisés à 2005 selon un taux de 10 %. Nous montrons au tableau 4-2 ces estimations du coût privé perçu pour les scénarios de rechange.

³⁷ Facteur particulièrement pertinent à cette étude de cas : les options d'efficacité énergétique font face à des obstacles plus grands lorsqu'on les évalue d'après des prix de l'énergie (plus faibles) subventionnés.

**Tableau 4-2 : Coût des incitatifs (coût privé perçu) de 2005 à 2030
(en milliards de dollars)**

	Hypocarboné I	Hypocarboné II
Produits chimiques	0,528	1,284
Mines de charbon	0,026	0,104
Minéraux industriels	0,047	0,194
Fer et acier	0,070	0,158
Fusion et affinage des métaux	0,124	0,309
Mines	0,015	0,036
Autre, fabrication	0,189	0,436
Extraction du pétrole brut	0,101	0,093
Raffinage du pétrole	0,003	0,026
Pâtes et papiers	0,203	0,608
Extraction du gaz naturel	0,707	1,636
Total	2,012	4,885

Remarque : Chiffres en dollars de 2004.

Les estimations de coûts qui figurent au tableau 4-2 ne comprennent pas les dépenses nécessaires pour subventionner les entreprises qui auraient amorcé l'achat de technologies éconergiques dans le scénario de base (« resquilleurs »). D'après les évaluations des programmes d'incitation à l'efficacité énergétique, la part des resquilleurs peut être importante. Ainsi, dans une évaluation de la prime à l'énergie (Dutch Energy Bonus) en Hollande, on a constaté que le système de subventions semblait être affligé par un effet de « resquillage » considérable, soit de l'ordre de 85 % des économies d'énergie³⁸. On a fait une constatation analogue concernant l'efficacité des programmes américains de gestion axée sur la demande (GAD) des entreprises de services publics, tout comme dans des études empiriques antérieures³⁹. Dans le cadre d'une étude récente, on a utilisé le SCMI pour évaluer l'effet des programmes de subventions orientées vers les technologies industrielles auxiliaires (pompes, convoyeurs, compresseurs et moteurs) et les équipements, dans le secteur résidentiel, notamment les réfrigérateurs, lave-linge et les équipements du secteur commercial comme les techniques d'éclairage et de refroidissement. D'après les résultats, la part des resquilleurs serait de 40 à 82 % des bénéficiaires

38 J. Farla et K. Blok, « Energy Conservation Investments of Firms », *Industrial Energy Efficiency Policies: Understanding Success and Failure*, atelier organisé par l'International Network for Energy Demand Analysis in the Industrial Sector, Université d'Utrecht, Pays-Bas, novembre 1998. Cette prime à l'énergie était un vaste programme de subventions par crédits d'impôts offerts par les Pays-Bas entre 1980 et 1988 pour favoriser les améliorations en matière d'efficacité énergétique et les énergies renouvelables.

39 Voir : D. Loughran et J. Kulick, « Demand-Side Management and Energy Efficiency in the United States », *The Energy Journal* 25, #1 (2004): 19-40. Cette étude GAD portait sur des données de 324 sociétés de services publics sur un horizon de 11 ans, et ses auteurs ont constaté que les dépenses de GAD ne donnent pas de bons résultats pour ce qui est de cibler les consommateurs sur le point d'investir dans l'efficacité énergétique et, pour cette raison, la plupart des sociétés de services publics ont sur-déclaré l'efficacité et sous-déclaré les coûts de ces programmes. Pour obtenir des précisions sur les enquêtes empiriques antérieures des programmes GAD, voir : D. Waldman et M. Ozog, « Natural and Incentive-Induced Conservation in Voluntary Energy Management Programs », *Southern Economic Journal* 62, 4 (1996): 1054-71; K. Train, « Incentives for Energy Conservation in the Commercial and Industrial Sectors », *The Energy Journal* 9, 3 (1988): 113-28.

des subventions, selon le type d'utilisation finale et l'ampleur de la subvention, car la part des resquilleurs régressait lorsque les subventions étaient plus élevées⁴⁰.

À titre d'exemple, dans l'une des simulations de l'étude, les catégories de pompes les plus efficaces ont reçu un niveau de subventions équivalant à 20 % du coût d'immobilisation. L'adoption totale des nouvelles pompes efficaces en 2010 dans la simulation de subventions était de 5 193 pompes. Par comparaison, lorsqu'on n'offrait pas de subventions, l'adoption totale des pompes efficaces n'était que de 3 767 pompes. Nous avons calculé que 74 % des entreprises sont des resquilleurs dans la simulation des subventions. Ce niveau élevé de resquillage se produit parce qu'il faut verser la subvention non seulement au différentiel ($5\,193 - 3\,767 = 1\,426$) des entreprises qui ont acquis des pompes efficaces lorsque la subvention a été mise en œuvre, mais aussi aux 3 767 entreprises qui auraient quand même acquis des pompes efficaces, même en l'absence de subventions, car il n'existe aucun moyen d'établir une distinction entre ces deux groupes dans l'administration du programme de subventions. Ces 3 767 resquilleurs augmentent le coût du programme de subventions, sans contribuer à son efficacité.

Parmi les solutions possibles concernant les nouvelles subventions, on pourrait trouver les transferts financiers directs (en subventions ou prêts préférentiels à faible taux d'intérêts) ou les incitatifs fiscaux, par exemple l'application de la déduction pour amortissement du paragraphe 43.1 à un plus grand nombre de technologies éconergiques. L'efficacité d'une subvention dépend considérablement de la conception du programme. Les incitatifs financiers peuvent être axés sur la réduction des coûts initiaux ou des coûts d'exploitation des investissements dans l'efficacité énergétique et peuvent reposer sur des critères prescriptifs ou fonctionnels (fondés sur le rendement). Les subventions axées sur les coûts d'immobilisation initiaux reconnaissent que le coût d'immobilisation plus élevé des technologies éconergiques peut être un dissuasif à l'investissement. Dans une étude empirique sur le comportement des entreprises industrielles en ce qui a trait aux investissements dans la cogénération, on a constaté que les subventions à l'investissement peuvent être jusqu'à neuf fois plus efficaces par dollar de subvention que les subventions à la production⁴¹. Toutefois, les mesures axées sur les coûts initiaux ne reposent pas sur la capacité réelle de l'investissement à atteindre l'objectif de politiques voulu et pourraient ne pas être aussi efficaces quant à l'atteinte des objectifs environnementaux. Les subventions fondées sur le rendement peuvent être plus souples lorsqu'il s'agit d'autoriser les entreprises à atteindre des améliorations « éprouvées » au chapitre de l'efficacité énergétique ou de la réduction des émissions de carbone.

Dans la conception des subventions, il faut tenir compte des différences dans la façon dont les entreprises peuvent réagir aux instruments incitatifs⁴². Les PME n'ont pas toutes le même accès aux capitaux qui leur permettraient de tirer parti des incitatifs fiscaux et auront probablement besoin de périodes de remboursement plus courtes de leurs investissements dans l'efficacité énergétique. Il est possible que, pour ces entreprises, les prêts, garanties de prêts et programmes de taux d'intérêts subventionnés soient plus intéressants, de même que le soutien par des mécanismes incitatifs privés, par exemple les contrats de rendement énergétique, les baux et le capital de risque⁴³. On observe au

40 M.K. Jaccard & Associates Inc., « Comparison of How Absolute vs. Intensity-based GES Emissions Reduction Strategies Might Affect Energy Efficiency Actions and Programs », préparé pour Ressources naturelles Canada, 2004.

41 N. Rivers, Behavioural Realism in a Technology Explicit Energy-Economy Model: The Adoption of Industrial Cogeneration in Canada, Energy and Materials Research Group, Université Simon Fraser; préparé pour l'Office de l'efficacité énergétique, Ressources naturelles Canada, septembre 2003.

42 R. Elliott et M. Pye, « Investing in Industrial Innovation: A Response to Climate Change », *Energy Policy* 26, 5 (1998): 417.

Canada la popularité croissante des programmes de prêts renouvelables pour financer divers investissements environnementaux et éconergiques de la part des municipalités. Ces instruments pourraient être utilisés dans un contexte industriel⁴⁴. Les fonds de prêts renouvelables font circuler les capitaux entre nombre d'emprunteurs afin de financer de nombreux projets sur plusieurs années. Dans ce système, on crée un programme doté de capitaux d'amorçage, qui constituent la base à partir de laquelle le fonds renouvelable accorde des prêts.

Pour la conception de ces fonds, il existe une multitude de choix, par exemple le recours à des institutions financières commerciales, la portée de l'objectif (peut avoir un objectif environnemental plus général ou toucher expressément les projets d'efficacité) et la mesure dans laquelle l'analyse technico-économique s'effectue à l'interne ou est impartie. Dans un atelier parrainé par la Banque mondiale à l'intention des praticiens des fonds d'efficacité énergétique, on signalait que ce type de programme est utile lorsque, en raison des prix du marché et de politiques gouvernementales pertinentes, il existe une demande de projets d'efficacité énergétique⁴⁵. Parmi les autres recommandations, il faut mentionner :

- établir un objectif clair guidant l'organisation et le fonctionnement du fonds;
- maximiser la transparence des procédures afin de réduire l'interférence gouvernementale dans les décisions de financement;
- s'en tenir au plus simple et éviter les procédures et structures complexes;
- recourir à des tiers, par exemple des entreprises de services énergétiques, pour la commercialisation et le développement des projets du fonds, évitant ainsi des coûts de transaction élevés.

4.5 Conception de la politique

L'importance à accorder à certains outils de politique et la conception ultime d'un ensemble de politiques supposent nombre de points à considérer. Ainsi, ce qui pourrait être plus efficace ou efficace sur le plan économique pour atteindre des avantages environnementaux pourrait s'avérer difficile du point de vue de la faisabilité administrative ou de l'acceptabilité politique. Pour régler ces questions de choix, nous évaluons les instruments de politique en fonction des critères suivants : efficacité pour atteindre les cibles environnementales, efficacité économique, faisabilité administrative et acceptabilité politique. Dans notre analyse, nous puisons abondamment dans bon nombre d'études sur ces questions publiées ces dernières décennies dans le contexte de la politique d'atténuation du changement climatique⁴⁶.

43 Les contrats de rendement énergétique sont un type de financement de tiers dans lequel les entreprises de services énergétiques (ESE) offrent leurs compétences techniques et du financement dans les investissements éconergiques, en garantissant une diminution des coûts d'énergie. Les ESE peuvent aplanir les difficultés inhérentes au choix et à l'installation de nouveaux équipements éconergiques qui, autrement, pourraient sembler trop coûteux comparativement à la solution de simplicité qu'est l'achat d'énergie. Voir : *Interlaboratory Working Group, Scenarios for a Clean Energy Future* (Oak Ridge, TN; Oak Ridge National Laboratory et Berkeley, CA; Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000) 5.22.

44 Le gouvernement du Canada a créé deux fonds supplémentaires pour stimuler l'investissement dans les projets d'infrastructure municipale et les pratiques environnementales à l'intention des administrations municipales canadiennes et de leurs partenaires des secteurs public et privé. Ces fonds tirent profit des investissements des administrations municipales et des gouvernements provinciaux et territoriaux et favorisent les partenariats publics et privés.

45 Energy Efficiency Operational Exchange Program, Banque mondiale, *Efficiency Fund Practitioners Workshop: Workshop Summary* (Washington, D.C.: Banque mondiale, 2000), 12.

46 Pour un recensement des questions de conception des politiques intérieures, voir le chapitre 8 de M. Jaccard, J. Nyboer et B. Sadownik, *The Cost of Climate Policy* (Vancouver, UBC Press, 2002).

Pour beaucoup d'autres facteurs de conception, par exemple la compétitivité, les répercussions sur la distribution et le budget, une analyse empirique détaillée s'impose. Nous n'avons pas fait cette analyse ici, mais nous présentons une analyse générale de ces facteurs⁴⁷.

Efficacité pour atteindre des cibles/objectifs environnementaux

Puisque, dans un système de PEPN, on précise la réduction des émissions, ce type d'instrument de politique serait le moyen le plus efficace pour atteindre un objectif environnemental particulier. Dans le cas d'une subvention, il est possible qu'on ne parvienne pas à des réductions suffisantes si la subvention est trop faible ou mal orientée. Dans le cas d'une taxe environnementale, le niveau de celle-ci doit être suffisamment élevé pour atteindre l'objectif environnemental fixé. Dans l'un et l'autre cas, une faiblesse conceptuelle peut affaiblir les répercussions visées par la politique. Il importe également de tenir compte du fait que l'imposition de mesures de réforme ne s'effectue pas dans un univers statique et que d'autres facteurs peuvent, par écrasement, se substituer aux effets prévus dans la réforme. Les instruments économiques globaux (taxes et systèmes de permis) sont plus efficaces que les subventions pour prévenir l'effet de rebond. Le coût d'utilisation de la forme d'énergie polluante, si cet instrument est bien conçu pour rendre compte des dommages spécifiques à chaque forme d'énergie, demeure élevé, de sorte que les particuliers et les entreprises doivent se tourner vers d'autres solutions.

Efficacité économique

Parmi les outils offerts dans le cadre d'un programme d'EF pour promouvoir la décarbonisation, la solution théoriquement la plus efficace pour atteindre un objectif de décarbonisation serait l'imposition d'une taxe uniforme sur le carbone ou un système de plafonnement d'émissions et de permis négociables (PEPN), en raison de sa capacité inhérente de stimuler d'abord, dans l'ensemble de l'économie, l'adoption des mesures de réduction les moins coûteuses, car les intervenants adoptent seulement les mesures de réduction tant qu'elles sont rentables. Une politique de taxe ou de prix de permis est plus efficace qu'une subvention, car cette dernière pourrait être accaparée par les entreprises dont les coûts de réduction sont plus élevés (à moins qu'elle ne soit attribuée dans le cadre d'un mécanisme d'appel d'offres). Un autre inconvénient des subventions est qu'elles peuvent entraîner des dépenses publiques importantes par unité d'effet, puisque les entreprises qui auraient commencé à acquérir des technologies éconergiques en l'absence de subventions sont subventionnées pour leurs achats (resquilleurs). En période de restriction des dépenses publiques, cela soulève des questions sur la faisabilité d'un système de subventions suffisamment important pour atteindre l'effet souhaité⁴⁸. De plus, dans un système de subventions, il faut percevoir des recettes ailleurs dans l'économie, ce qui peut également être à l'origine de pertes par inertie⁴⁹.

47 Nous avons étudié ces questions à l'aide de la fonction macro-économique du SCMI dans d'autres études.

48 Jaffe, Newell et Stavins, *Energy Efficient Technologies and Climate Change Policies*, 11.

49 GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat), *Climate Change 2001: Mitigation*. Metz, Bert, Ogunlade Davidson, Rob Swart and Jiahua Pan (éd.), *Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge: Cambridge University Press, 2001)

Faisabilité administrative

Les approches relatives à la réglementation axée sur le marché et aux subventions peuvent être différentes, tout comme leur coût administratif. Ainsi, dans un système de plafonnement des émissions et des permis négociables, plus la portée est vaste, plus la complexité administrative est grande, surtout s'il s'applique aux petites entreprises. La complexité administrative peut être très élevée dans le cas de programmes détaillés et originaux où l'on essaie de s'attaquer aux questions de compétitivité et de répartition et d'augmenter l'acceptabilité d'une politique. Le manque de données statistiques désagrégées peut rendre plus difficile la préparation et la surveillance de politiques ciblées proprement « sous-sectorielles ».

Les régimes d'incitatifs fiscaux favorisant expressément les investissements éconergiques peuvent être difficiles à cibler précisément et donc, difficiles à administrer. C'est souvent un problème, pour les industries, de distinguer les dépenses visant l'efficacité énergétique des autres dépenses, celles qui sont liées aux procédés. D'un point de vue politique, les activités éconergiques doivent faire l'objet d'une surveillance, et il faut établir des lignes directrices rigoureuses sur la conformité. Si le gouvernement choisit de ne cibler que certaines catégories d'équipements, l'actualisation de la liste nécessite une somme considérable de données et de ressources.

En plus des coûts administratifs assumés par le gouvernement, les entreprises pourraient devoir absorber un lourd fardeau en temps et en coûts pour demander des subventions et prêts et présenter des demandes de crédits d'impôts. Cela pourrait être particulièrement lourd pour les petites entreprises. À titre d'exemple, selon une étude de Finances Canada, les coûts d'observation des petites entreprises correspondaient à 15 % de la valeur du crédit d'impôts de R-D, comparativement à 5,5 % dans les grandes entreprises⁵⁰. Les coûts de transactions des entreprises dépendront beaucoup de la cible visée et de la conception de la subvention. Les participants pourraient devoir absorber des coûts de transaction pour mener à terme des négociations d'échanges et obtenir l'approbation réglementaire dans les systèmes de PEPN. Toutefois, il est possible que ces coûts soient relativement modestes; le marché des permis de SO₂ aux É.-U. a montré que le secteur privé peut jouer un rôle de premier plan pour réduire ces coûts, particulièrement lorsqu'il s'agit de trouver des partenaires et de négocier un échange. Les entrepreneurs se sont mis à offrir toute une gamme de services, notamment le courtage privé, les babillards électroniques et les prévisions de prix des autorisations⁵¹.

Acceptabilité politique

Il faudra équilibrer les facteurs concernant l'acceptabilité politique et les objectifs d'efficacité environnementale et d'efficacité économique et, en théorie, comme nous l'avons mentionné précédemment, on peut y parvenir par un instrument économique global, comme un programme de taxe sur le CO₂ ou de PEPN. Les craintes en matière d'acceptabilité politique ont freiné le recours aux instruments de politique comme les éco-taxes pour atteindre les objectifs de décarbonisation, même dans les pays où ils sont actuellement appliqués. Par des politiques de subventions, on essaie de contourner le fait, politiquement dangereux, d'imposer des coûts aux entreprises et, au lieu de cela, on

50 Finances Canada, *Le régime fédéral d'encouragements fiscaux à la recherche scientifique et au développement expérimental* (Ottawa : 1998).

51 Robert N. Stavins, « What Can We Learn from the Grand Policy Experiment? Lessons from SO₂ Allowance Trading », *Journal of Economic Perspectives* 12, 3 (1998): 69-88.

favorise la compétitivité de certaines technologies moins carbonigènes en améliorant les rendements financiers des producteurs et les perspectives, pour ces technologies moins établies, de faire concurrence aux formes mieux implantées. Toutefois, le gouvernement doit trouver les fonds ailleurs dans l'économie, ce qui peut avoir des effets importants sur l'efficacité et la compétitivité globales, sans compter que ces mesures n'ont pas échappé à la critique. Les incitatifs fiscaux ont l'avantage d'être une forme de subvention moins visible, car leur effet est de réduire les recettes fiscales du gouvernement plutôt que d'augmenter les transferts financiers directs.

Les groupes de l'industrie se sont prononcés en faveur des incitatifs volontaires et fiscaux dans le débat sur la politique concernant le changement climatique. Ils ont aussi soutenu que toute taxe ou mesure financière introduite pour accélérer la prise de mesures concernant le changement climatique doit se situer dans un cadre global conforme à la grande orientation financière et économique du pays. À titre d'exemple, la Table de l'industrie du Processus national sur le changement climatique précisait, dans son document d'option, qu'il est important que ces mesures ne dérogent pas à l'orientation nécessaire sur la réforme fiscale et la réduction du fardeau des taxes pour les entreprises et les particuliers canadiens⁵². Nombre d'associations industrielles et organismes cadres estiment que le régime fiscal qui s'applique aux industries canadiennes doit les autoriser à soutenir la concurrence sur le marché international et que la récente réforme fiscale ne va pas suffisamment loin pour éliminer les obstacles à la compétitivité⁵³.

Questions de distribution et de compétitivité

Dans le cas d'une taxe sur le CO₂ ou d'un système de plafonnement des émissions et de permis négociables, les modalités de participation sont laissées à la discrétion de l'entreprise. Celle-ci peut apporter ses propres changements jusqu'à un niveau où cela n'est plus rentable et acquérir des permis d'émissions ou payer la taxe, lorsque les autres moyens ne sont plus rentables. Il y aura des incidences sur la compétitivité si la politique impose des niveaux de coûts différents à des firmes concurrentes, soit parce que les politiques sont différentes entre pays, que la réglementation diffère entre entreprises nationales ou simplement parce que les intensités de carbone, les possibilités de substitution et les niveaux d'échange ne sont pas les mêmes ou sont spécifiques à l'entreprise.

La conception de la politique est un facteur essentiel pour réduire les répercussions en matière de distribution et de compétitivité. Il est possible qu'un instrument de politique entraîne des coûts indirects qui compensent ou accentuent les coûts directs de réduction des émissions. Ainsi, il pourrait arriver qu'une subvention soit financée par différents moyens de perception de recettes, chacun ayant

52 Table de l'industrie, Rapport d'aperçu de la Table de l'industrie, Processus national sur le changement climatique, Ottawa, 2000. Le PNCC a été constitué en tant que tribune pour évaluer les répercussions socio-économiques et environnementales des politiques et des programmes afin d'élaborer la Stratégie nationale de mise en œuvre en réponse aux engagements du Canada dans le cadre du Protocole de Kyoto. À cette fin, le PNCC a créé, au printemps de 1998, nombre de groupes de travail sectoriels et centrés sur les enjeux appelés Tables de concertation, dans le cadre du processus national, pour offrir des conseils, recueillir de l'information et évaluer les options de mise en œuvre offertes au Canada afin de réduire les émissions de GES et d'atteindre la cible fixée à Kyoto. Au cours des deux années subséquentes, les tables de concertation ont exposé diverses solutions de rechange et possibilités de réduction des émissions dans des rapports sur les options.

53 Après l'élimination du déficit, on a institué un plan fédéral quinquennal de réduction des taxes, dans lequel on prévoyait une diminution de 10,1 milliards de dollars sur l'impôt aux entreprises entre 2000 et 2005. Cela supposait que le taux d'imposition des entreprises passerait de 28 % à 21 % d'ici 2004 pour les revenus ne provenant pas des ressources et, en 2007 pour les revenus provenant des ressources. L'Ontario, l'Alberta, le Nouveau-Brunswick et le Manitoba réduisent ou comptent réduire le taux d'imposition des entreprises. De plus, certaines provinces réduisent ou éliminent les taxes sur le capital.

des coûts différents pour divers membres et secteurs de l'économie. De la même façon, les recettes d'une taxe sur le CO₂ pourraient être affectées à diverses fins par un gouvernement (réduction de la dette, autres allègements fiscaux, augmentation des dépenses dans les programmes sociaux), chacun différant par le coût selon les membres et secteurs de l'économie. Dans l'élaboration de réformes EF en Europe, les gouvernements ont réglé les problèmes de distribution et de compétitivité en ayant recours à divers degrés de remboursements, à des différences dans les taux d'imposition appliqués à l'industrie et aux ménages, ainsi qu'à des exemptions.

La translation de l'impôt en tant que stratégie peut donner naissance à des gagnants et à des perdants dans le secteur industriel, en raison de la composition hétérogène du secteur dans lequel les entreprises ont recours à diverses combinaisons de capital, d'énergie et de main-d'œuvre dans leur production. Une autre affectation des recettes fiscales pourrait être de réserver les fonds à des projets qui facilitent l'adaptation aux nouveaux prix. Dans le cas d'un programme de plafonnement des émissions et de permis négociables, le coût des permis se répercutera, en définitive, sur le coût de l'énergie (ou d'autres activités) dans la mesure où la production et l'utilisation de l'énergie exigent l'acquisition de permis d'émissions. Ainsi, le prix de l'essence, du mazout domestique, du gaz naturel, voire de l'électricité (si elle est produite à partir de sources d'énergie émettant des GES) pourrait augmenter en fonction du coût d'acquisition des permis et/ou des changements technologiques, suscitant des problèmes de distribution et de compétitivité.

Il serait possible de recourir à une conception originale de la politique afin d'éviter ces répercussions sur les prix, comme une réglementation sectorielle axée sur le marché, qui peut réduire les hausses moyennes de prix parce que seul un faible pourcentage du marché est consacré aux technologies plus récentes et plus coûteuses, et les fabricants établiront la moyenne de ces coûts par rapport à leur technologie classique moins coûteuse afin d'établir les prix. Ainsi, les producteurs auront reçu le signal à long terme qui provoquera un changement technologique sans cette mesure, politiquement inacceptable, qui consisterait à relever substantiellement les prix de l'énergie en un court laps de temps. Dans le cas des subventions et des crédits d'impôt pour appuyer des technologies privilégiées, il est difficile d'évaluer les répercussions en matière de distribution et de compétitivité. Les programmes de soutien pourraient faire en sorte que les taxes indésirables et/ou régressives soient plus élevées qu'elles ne devraient l'être pour compenser la perte de recettes fiscales. Puisque le pourcentage de resquilleurs est élevé dans les programmes de subventions, celles-ci peuvent avoir des répercussions importantes en matière de redistribution en transférant l'argent des contribuables aux participants du programme.

Innovation technologique

Le niveau d'innovation technique dans les technologies liées à l'environnement sera inférieur au taux social optimal théorique, en présence d'externalités comme les dommages à l'environnement. Cela favorise les taxes environnementales et instruments fondés sur le marché, une méthode qui internalise cette externalité et imprime un « stimulus » en faveur de l'innovation et du déploiement. D'autres politiques qui appuient directement l'innovation en augmentant les rendements privés prévus par une baisse des coûts de R-D — subventions aux dépenses de RD, appui aux co-entreprises, etc. — pourraient être plus utiles au premier stade du déploiement⁵⁴. Toutefois, en subventionnant, on risque d'appuyer la R-D privée qui aurait été faite de toute façon, et de favoriser des technologies non appropriées.

54 T. Foxon, *Inducing Innovation for a Low-Carbon Future: Drivers, Barriers and Policies* (Londres, R.-U. : The Carbon Trust, 2003).

5 Conclusions et recommandations

La possibilité que des mesures d'efficacité énergétique industrielles puissent contribuer à la décarbonisation du système énergétique est complexe. Cela dépend de la mesure dans laquelle on peut pousser plus avant le potentiel technique dans l'innovation, jusqu'à quel point la technologie et les habitudes écoénergétiques peuvent être adoptées, dans quelle mesure cette adoption aboutit à une réduction de l'utilisation globale de l'énergie, de même que de l'intensité de carbone de l'énergie ainsi économisée. L'adoption de l'efficacité énergétique comme moyen de réduire les émissions de carbone d'origine énergétique dans l'industrie est d'autant plus compliquée que l'efficacité énergétique n'est que l'une des nombreuses options offertes à l'industrie pour réduire ses émissions de carbone. Il existe d'autres possibilités, notamment se départir des combustibles fossiles, passer des combustibles fossiles à haute teneur en carbone à d'autres à faible teneur et capturer et emprisonner les émissions de carbone. En raison de cette complexité, nous avons choisi, dans notre étude de cas, d'étudier le rôle de l'efficacité énergétique et son influence dans la décarbonisation du système énergétique parallèlement à d'autres options possibles.

Dans la présentation des recommandations de politique découlant de cette étude de cas, il est important de tenir compte de la mesure dans laquelle la politique d'EF doit se concentrer expressément sur la promotion de l'efficacité énergétique dans l'industrie ou viser plus largement la décarbonisation. Les simulations des scénarios de rechange montrent que l'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie est étroitement liée au remplacement du combustible et à d'autres moyens de réduire les émissions de carbone, ce qui laisse supposer qu'il faudrait notamment envisager le passage à un système énergétique décarbonisé. Le fait de se concentrer uniquement sur l'efficacité énergétique pour parvenir à la décarbonisation dans l'industrie pourrait orienter les moyens incitatifs et les efforts dans une voie non rentable⁵⁵.

Nous avons décrit certains instruments de politique dans le contexte des résultats de la modélisation et signalé un certain nombre de facteurs conceptuels pour chaque instrument, mais aucun instrument de politique ne donne un rendement optimal en fonction des critères (efficacité environnementale, efficacité énergétique, efficacité économique, faisabilité administrative et acceptabilité politique). C'est par un ensemble, un portefeuille d'instruments de politiques, qu'un gouvernement peut allier les points forts, tout en compensant les faiblesses de chaque instrument. Dans un programme de ce genre, il faut se concentrer sur les mesures qui seraient politiquement acceptables à présent, tout en favorisant quand même l'innovation technologique. Il existe des possibilités considérables de créer, par l'écologisation de la fiscalité, les conditions permettant à des « technologies gagnantes » d'émerger et d'attirer suffisamment d'investissements pour se développer et être largement adoptées.

Ceci posé, voici nos recommandations en matière de conception de la politique :

- *Pour amorcer des changements fondamentaux, il faut privilégier les permis négociables s'inscrivant dans une réglementation axée sur le marché.* Pour progresser, à long terme, vers un système énergétique décarbonisé, il faut que des changements clés interviennent au niveau des incitatifs financiers pour les entreprises. Le meilleur moyen d'y parvenir est une réglementation axée sur le marché, qui peut amorcer de profonds changements techniques, notamment réduire le coût des technologies naissantes. Les principes d'un système de plafonnement des émissions et de permis négociables

⁵⁵ Jaffe, Newel et Stavins, *Energy Efficient Technologies and Climate Change Policies*, 13.

(PEPN) peut s'appliquer au niveau sectoriel pour établir des cibles concernant les émissions, les formes d'énergie ou les technologies.

- *Les subventions peuvent jouer un rôle complémentaire pour appuyer les technologies éconergiques.* Les subventions obtiennent une bonne cote en matière d'acceptabilité politique et pourraient être efficaces si elles sont bien conçues et si elles tiennent compte des coûts relatifs selon les secteurs et les activités de l'économie. Néanmoins, les répercussions et les coûts (notamment les coûts du resquillage) commandent une évaluation réaliste dans la conception de tout programme. En raison de l'effort financier relativement modeste qu'il suppose, un programme de fonds pour prêts renouvelables pourrait être un bon candidat. Les crédits d'impôt et les subventions doivent aussi être conçus de façon à réduire le plus possible le rôle du gouvernement dans le choix des technologies et donc reposer davantage sur le rendement.

Nos recommandations doivent donner suite aux programmes actuels d'efficacité énergétique et à la politique sur le changement climatique (comme nous l'avons mentionné dans la partie contextuelle de l'étude de base). Plus particulièrement, nous proposons que l'on maintienne le développement au Canada d'un PEPN, actuellement en préparation, pour les grands émetteurs finals. Néanmoins, une approche fixe de réduction des émissions serait plus efficace qu'une autre fondée sur l'intensité pour promouvoir l'innovation technologique et parvenir à des réductions globales des émissions. Pour stimuler le développement technologique, il serait également utile de prévoir un plafonnement de permis à la hausse.

Il faut également signaler les antécédents d'appui à la politique pour la promotion de l'efficacité énergétique au moyen de programmes d'information et de sensibilisation et de subventions à la recherche-développement. Les programmes volontaires ont jeté les bases des politiques d'EF en favorisant une meilleure connaissance des possibilités de décarbonisation et constituent également un complément fort nécessaire à toute nouvelle initiative de politique d'EF. À titre d'exemple, le PEEIC, soit le programme-cadre fédéral centralisé de coordination pour l'élaboration d'objectifs d'efficacité énergétique dans l'industrie, est une institution capable d'offrir aux groupes cibles son savoir-faire sur la façon la plus rentable de répondre aux programmes d'EF favorisant la décarbonisation par de meilleurs signaux au niveau des prix. De la même façon, les subventions s'inscrivent mieux dans un régime plus global de réseaux et de soutien. Enfin, il ne faudrait pas négliger la possibilité que l'EF soit rattachée à la politique classique du pouvoir hiérarchique. Même si la politique d'EF peut entraîner des gains technologiques, des normes permettant d'éliminer progressivement la vente de matériel inefficace peuvent permettre d'intensifier le changement. Les normes peuvent s'avérer efficaces et efficaces sur le plan économique, lorsque les sources des émissions sont relativement analogues et où il est difficile et coûteux de mettre en place des mécanismes de surveillance et d'application⁵⁶.

56 Voir : R. Newell et R. Stavins, « Cost Heterogeneity and the Potential Savings of Market Based Policies », *Journal of Regulatory Economics* 23, 1 (2003): 43-59; D. Cole et P. Grossman, « When is Command and Control Efficient? Institutions, Technology, and the Comparative Efficiency of Alternative Regulatory Regimes for Environmental Protection ». *Wisconsin Law Review*, 5 (1999): 887-938.

**Étude de cas
sur la politique fiscale et
l'efficacité énergétique**

Étude de base

**Annexe A :
Détails du modèle du SCMI**

1	Introduction	A1
2	Intrants clés	A1
3	Modèles de cheminement industriel dans le SCMI	A4
4	Algorithme sur la concurrence des technologies	A7
5	Questions d'incertitude	A8

1 Introduction

Dans cette annexe, nous décrivons les paramètres d'intrants clés et les hypothèses de l'analyse de modélisation (section 2), et nous présentons une description plus détaillée de la structure sous-jacente du SCMI, notamment un exemple de modèle de flux d'un sous-secteur de l'industrie (section 3), ainsi que l'algorithme sur la concurrence des technologies (section 4). Nous fournissons également une analyse qualitative de l'incertitude (section 5).

2 Intrants clés

Les intrants clés sont les facteurs matériels d'émissions et de conversion d'énergie utilisés dans le modèle du SCMI, ainsi que les prévisions concernant la croissance macro-économique et les prix de l'énergie. Nous donnons les prévisions de croissance matérielle et économique de la production dans les tableaux sommaires des résultats de l'étude de base, dans le corps principal du rapport (tableaux 3-2 à 3-12). Nous résumons, dans les tableaux qui suivent, les intrants qui restent.

Tableau A-1 : Hypothèses sur les facteurs de conversion énergétique matérielle et d'émissions des combustibles

Type de combustible	Unité matérielle	Facteur de conversion matérielle (TJ / unité)	CO ₂ (t / unité)	CH ₄ (g / unité)	N ₂ O (g / unité)
Charbon bitumineux canadien	tonne	26	1,85	0,03	0,02
Charbon de lignite canadien	tonne	15	1,49	0,03	0,02
Charbon bitumineux étranger	tonne	29,82	2,4	0,03	0,02
Charbon d'antracite étranger	tonne	27,7	2,39	0,03	0,02
Coke de houille	tonne	28,83	2,48	0,03	0,02
Gaz de four à coke	000 m ³	19,14	1,6	0,037	0,035
Coke de pétrole	m ³	38,65	3,8	0,1	0,053
Gaz de distillation	m ³ equiv. mazout lourd	42,5	2	0,037	0,002
Mazout lourd	m ³	42,5	3,09	0,12	0,064
Propane	m ³	25,31	1,5	0,024	0,108
GPL	m ³	27,12	1,5	0,024	0,108
Gaz naturel	000 m ³	37,99	1,89	0,037	0,033
Bois	tonne	18	0,95	0,05	0,02
Lessive de pâte épuisée	tonne	14	1,43	0,05	0,02

Remarques :

- Les facteurs sont présumés constants sur la période prévisionnelle.
- La biomasse (bois et lessive de pâte épuisée) est présumée neutre sur le plan du CO₂.
- Sources du tableau : Facteurs de conversion physique – Statistique Canada, *Bulletin trimestriel – Disponibilité et écoulement d'énergie au Canada, 2000*, no au catalogue : 57-003 XIB (Ottawa : 2001). Facteurs d'émissions – Environnement Canada, *Inventaire canadien des gaz à effet de serre, 1990-2001* (Ottawa, 2003), Annexe 6.

Tableau A-2 : Facteurs moyens d'émissions indirectes de GES (tonnes de CO₂e / TJ)

	2000	2010	2020	2030
Alberta	240,33	216,58	183,10	161,06
Région de l'Atlantique	77,25	76,07	76,71	76,89
Colombie-Britannique	15,37	18,02	30,17	40,16
Manitoba	4,16	18,28	27,25	31,98
Ontario	72,82	61,22	61,12	69,86
Québec	0,67	5,85	12,47	18,86
Saskatchewan	244,64	199,22	177,98	160,86

Remarques :

- Les émissions de GES comprennent le CO₂, le CH₄ et le N₂O.
- Les facteurs d'émissions pour l'année de base (2000) proviennent de Ressources naturelles Canada et reposent sur les données de Statistique Canada, *Production, transport et distribution d'électricité*, n° au catalogue : 57-202-XPB. Pour les autres années, les calculs proviennent des prévisions de base du modèle du SCMI sur l'électricité.

Tableau A-3 : Prix réels du combustible dans les modèles secondaires du SCMI pour l'industrie (dollars de 1995/GJ)

	Charbon et coke	Diesel	Gaz naturel	Mazout lourd	Électricité	GPL
Alberta						
2000-2005	2,85	12,59	1,40	4,21	14,56	9,05
2005-2010	2,80	12,40	1,47	4,09	14,34	8,89
2010-2015	2,79	12,28	1,47	4,08	14,11	8,84
2015-2020	2,79	12,08	1,47	4,03	13,81	8,84
2020-2025	2,79	11,74	1,40	3,99	13,76	8,84
2025-2030	2,79	11,54	1,38	3,95	13,59	8,84
Région de l'Atlantique						
2000-2005	2,86	15,68	4,05	3,62	14,65	9,05
2005-2010	2,82	15,46	4,06	3,50	14,42	8,89
2010-2015	2,80	15,28	4,01	3,47	14,19	8,84
2015-2020	2,77	15,01	3,96	3,42	13,89	8,84
2020-2025	2,77	14,46	3,73	3,37	13,53	8,84
2025-2030	2,77	14,17	3,64	3,32	13,28	8,84
Colombie-Britannique						
2000-2005	2,40	14,33	1,67	3,45	10,67	9,05
2005-2010	2,36	14,13	1,73	3,34	10,50	8,89
2010-2015	2,34	13,99	1,72	3,33	10,34	8,84
2015-2020	2,32	13,76	1,71	3,29	10,12	8,84
2020-2025	2,32	13,39	1,53	3,27	9,94	8,84
2025-2030	2,32	13,16	1,48	3,24	9,78	8,84

Tableau A-3 : suite

	Charbon et coke	Diesel	Gaz naturel	Mazout lourd	Électricité	GPL
Manitoba						
2000-2005	1,44	13,07	3,36	3,61	10,52	9,05
2005-2010	1,42	12,88	3,41	3,50	10,36	8,89
2010-2015	1,41	12,74	3,38	3,48	10,20	8,84
2015-2020	1,40	12,54	3,36	3,44	9,98	8,84
2020-2025	1,40	12,12	3,25	3,40	9,68	8,84
2025-2030	1,40	11,89	3,20	3,35	9,49	8,84
Ontario						
2000-2005	2,11	13,69	3,30	3,89	12,42	9,05
2005-2010	2,08	13,47	3,32	3,77	12,23	8,89
2010-2015	2,07	13,31	3,27	3,74	12,04	8,84
2015-2020	2,05	13,08	3,22	3,69	11,78	8,84
2020-2025	2,05	12,62	3,07	3,67	9,63	8,84
2025-2030	2,05	12,37	3,00	3,63	8,81	8,84
Québec						
2000-2005	3,71	15,21	4,05	4,18	10,18	9,05
2005-2010	3,65	14,96	4,06	4,04	10,02	8,89
2010-2015	3,62	14,79	4,01	4,01	9,86	8,84
2015-2020	3,59	14,54	3,96	3,96	9,65	8,84
2020-2025	3,59	14,07	3,73	4,08	9,35	8,84
2025-2030	3,59	13,80	3,64	4,07	9,16	8,84
Saskatchewan						
2000-2005	2,81	13,89	2,21	4,00	14,27	9,05
2005-2010	2,77	13,69	2,26	4,00	3,89	8,89
2010-2015	2,75	13,53	2,24	3,87	13,83	8,84
2015-2020	2,72	13,31	2,22	3,82	13,54	8,84
2020-2025	2,72	12,90	1,98	3,76	13,26	8,84
2025-2030	2,72	12,66	1,91	3,71	13,03	8,84

Remarques :

- D'après les données tirées du : Groupe de l'analyse et de la modélisation, *Perspective des émissions du Canada : une mise à jour* (Ottawa : Processus national sur le changement climatique, 2000). Les prévisions s'appliquaient à 2020. À compter de 2020, nous avons extrapolé les prix en fonction d'hypothèses linéaires.
- Même si les prix du gaz naturel sont inférieurs à ce qu'ils sont actuellement, nous avons conservé la prévision sur le gaz naturel aux fins d'une cohérence avec les autres analyses nationales reposant sur les hypothèses macro-économiques établies dans *Perspective des émissions du Canada : une mise à jour*.

3 Modèles de flux de l'industrie au SCMI

Dans le SCMI, la demande de produits et la demande de services énergétiques dans un sous-secteur sont liées dans un modèle de flux qui décrit la séquence des activités nécessaires pour générer ce produit. En raison de l'hétérogénéité de l'équipement et des procédés, les principaux sous-secteurs industriels ont leurs propres modèles de flux¹. Nous donnons à la figure A-1 de la page qui suit un exemple de modèle de flux d'un sous-secteur de l'industrie. Un modèle de flux du SCMI est axé de façon à représenter l'évolution de la technologie et la consommation d'énergie, plutôt que les critères économiques (comme dans un modèle économétrique, où les unités sont habituellement monétaires) ou les procédés mécaniques réels (par exemple, les plans d'exécution ou les diagrammes de flux de procédés utilisés par les ingénieurs). Puisque l'on insiste sur la consommation d'énergie et non sur le flux du matériel, les nœuds dans le modèle de flux représentent des étapes du processus où on peut évaluer de façon distincte la consommation d'énergie.

On décrit au modèle de flux les nœuds hiérarchiques, liés par des ratios techniques traduits dans le format informatique du SCMI. Les cases non grisées indiquent les services énergétiques où les technologies se font concurrence. Les nœuds ne s'appliquent pas tous à chaque région, et le stock technologique n'est pas nécessairement représenté dans certains nœuds.

1 Même si le secteur industriel du SCMI est très détaillé sur le plan technologique, son niveau de désagrégation sectorielle est bien inférieur à celui qu'on retrouve dans un modèle macro-économique type. Cela est attribuable au fait qu'un petit nombre de secteurs énergivores est représenté en détail, alors que le reste de l'économie, notamment tout le secteur des services, regroupé en un seul secteur agrégé.

Figure A-1 : Modèle du flux d'énergie de l'industrie du fer et de l'acier

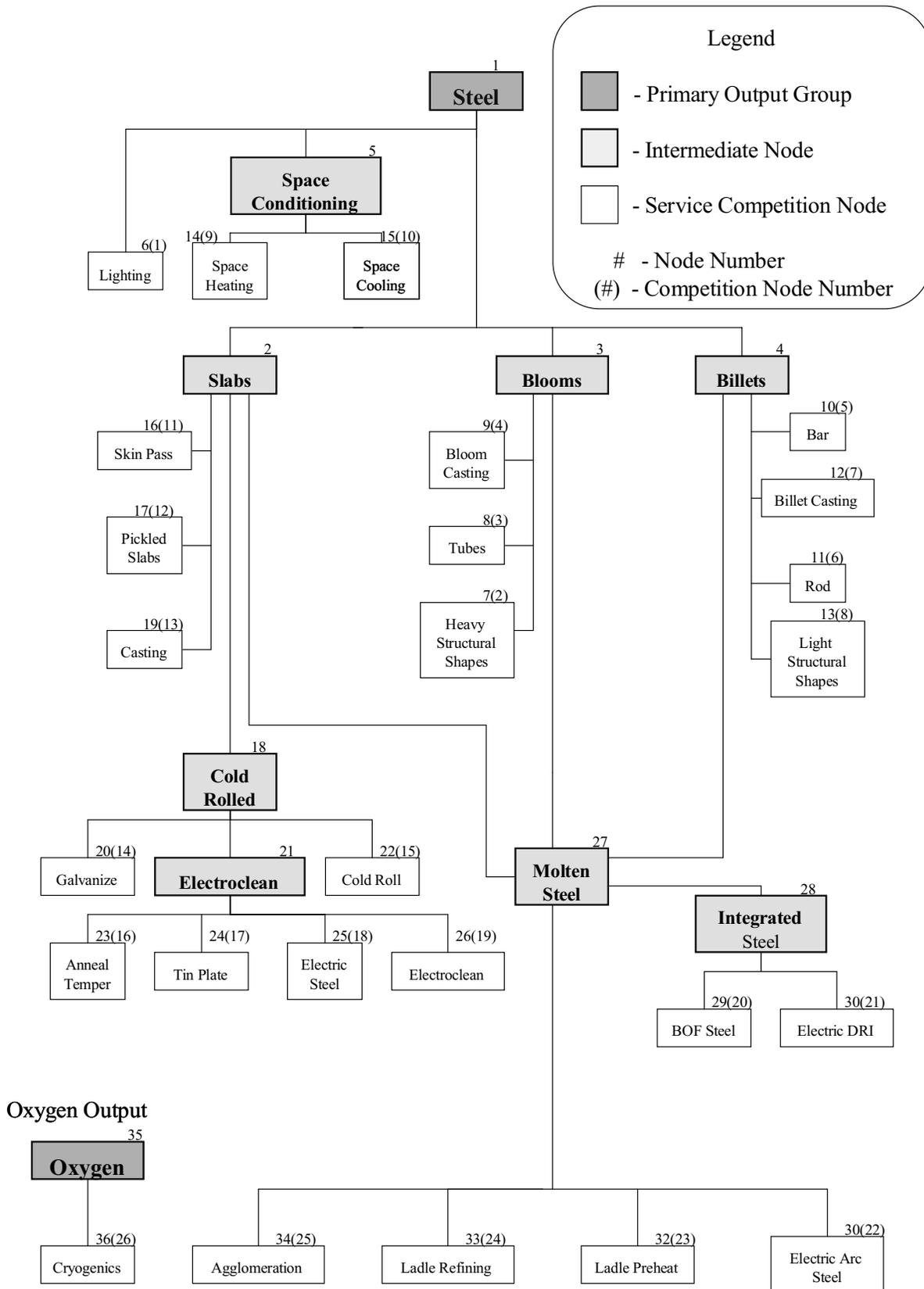
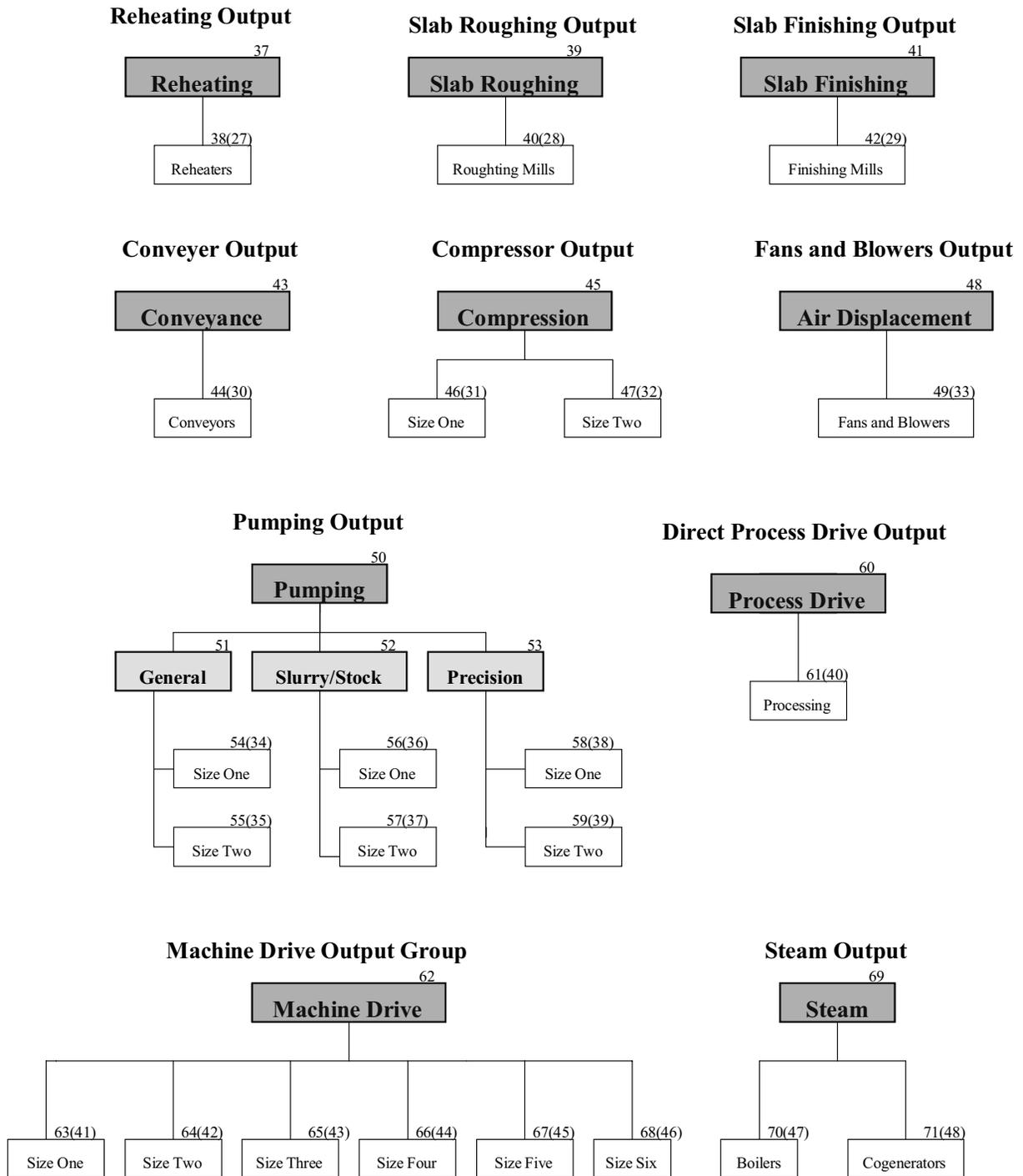


Figure A-1 : Modèle du flux d'énergie de l'industrie du fer et de l'acier (suite)



4 Algorithme de concurrence technologique

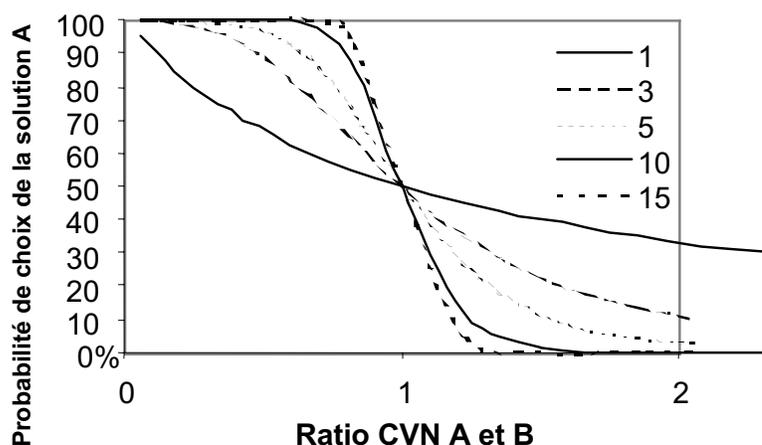
Les nouvelles parts de marché des technologies concurrentes, dans le SCMI, font l'objet d'une simulation à chaque nœud de concurrence d'après leur cycle utile, selon la formule suivante² :

$$MS_j = \frac{\left[CC_j * \frac{r}{1-(1+r)^{-n}} + MC_j + EC_j + i_j \right]^{-v}}{\sum_{k=1}^K \left\{ \left[CC_k * \frac{r}{1-(1+r)^{-n}} + MC_k + EC_k + i_k \right]^{-v} \right\}}$$

Où MS_j = part de marché de la technologie j, CC = coût d'immobilisation, MC = coût d'entretien et d'exploitation, EC = coût de l'énergie, i = coût intangible, r = taux d'actualisation privé et v = mesure de l'hétérogénéité du marché.

La principale partie de la formule (celle entre crochets) est, pour l'essentiel, simplement le coût nivelé sur le cycle de vie de chaque technologie. Dans cette formulation, la fonction à puissance inverse sert à répartir la pénétration de cette technologie particulière « j », comparativement à toutes les autres technologies « k ». Si « v » à une valeur plus élevée, cela signifie que la technologie ayant le cycle de vie nivelé le plus bas accapare la presque totalité de la nouvelle part de marché. Si « v » prend une valeur faible, cela signifie que la part de marché des nouveaux équipements est assez également répartie, même si leurs cycles de vie nivelés diffèrent considérablement. La figure 3-2 est une illustration graphique du cas simple où deux technologies dont les coûts sur le cycle de vie sont différents se font concurrence pour une nouvelle part de marché avec des valeurs « v » différentes.

Figure A-2 Courbe logistique du SCMI



² Le SCMI peut avoir recours à un certain nombre de contrôles matériels pour limiter la pénétration des technologies à certains niveaux (p. ex., un maximum d'un seul lave-linge par ménage), de même qu'une fonction de coût d'immobilisation régressif pour simuler l'apprentissage par la pratique et les économies d'échelle obtenues, particulièrement dans le cas des nouvelles technologies.

Les paramètres de préférences « v », « i » et « r » du SCMI sont établis par estimation à partir d'études empiriques des décisions prises par les consommateurs et les entreprises, dans certains cas d'après des profils de la consommation antérieure et dans d'autres (particulièrement dans le cas des nouvelles technologies) d'après les préférences exprimées par sondage à l'égard de caractéristiques technologiques particulières³. La valeur implicite de « v » au SCMI est de 10, ce qui signifie que lorsqu'une technologie a un avantage CVN d'au moins 15 % par rapport aux technologies concurrentes, elle prendrait au moins 80 % du nouveau stock. Les valeurs implicites de « r » se situent entre 20 et 50 % pour les technologies de procédés industriels et sont de 50 % pour les technologies auxiliaires⁴. La valeur implicite de « i » est zéro. Toutefois, il existe de nombreux cas pour lesquels la recherche laisse présumer une valeur spécifique pour « i ». De plus, « i » sert de paramètre d'étalonnage lorsque les valeurs de « v » et « r » ne conviennent pas à la simulation du taux de pénétration historique de certaines technologies.

5 Questions d'incertitude

Les sources d'incertitude de la modélisation dans l'analyse de la politique incluent la capacité du modèle d'illustrer la complexité des rapports des systèmes en cause, la variabilité naturelle du système décrit, les erreurs systématiques comme les gauchissements et l'imprécision dans l'estimation des paramètres du modèle, ainsi qu'un manque d'information sur la situation future et les changements dans les valeurs des paramètres⁵. Le SCMI, comme tout modèle, est la simplification d'un système; la plupart des variables comportent divers degrés d'incertitude qui se répercuteront sur les prévisions de base⁶. Cet effet s'intensifiera d'autant plus à l'avenir, même si les cycles économiques, à court terme, peuvent également aboutir à de larges divergences à très courte échéance.

Les incertitudes en matière de modélisation peuvent être qualifiées d'exogènes ou d'endogènes au SCMI. Parmi les incertitudes exogènes, il faut mentionner celles qui ont trait aux prix de l'énergie, à la croissance économique et aux changements structurels. Les incertitudes endogènes, quant à elles, ont trait soit à la façon dont le modèle illustre la réalité actuelle (incertitudes technico-économiques) soit à des facteurs dynamiques (incertitudes comportementales). Voici quelques observations sur les incertitudes endogènes⁷.

3 The Energy and Materials Research Group mène actuellement des recherches sur les préférences manifestées de façon à établir une estimation empirique de ces paramètres. Pour une étude récente du secteur industriel, voir : N. Rivers, M. Jaccard, J. Nyboer, K. Tiedemann, « Confronting the Challenge of Hybrid Modelling: Using Discrete Choice Models to Inform the Behavioural Parameters of a Hybrid Model ». Dans : *Sustainability in Industry: Increasing Energy Efficiency, Reducing Emissions. 6th Biennial American Council for an Energy Efficient Economy*, Rye Brook, New York, 29 juillet au 1er août 2003, 182-193.

4 Pour plus de précisions sur l'établissement des paramètres, voir : J. Nyboer, *Simulating Evolution of Technology: An Aid to Energy Policy Analysis, thèse de doctorat*, Université Simon Fraser, Burnaby, 1997.

5 M. Morgon et M. Henrion, *Uncertainty* (Cambridge, U.-K.: Cambridge University Press, 1990).

6 Certains analystes soutiennent qu'il ne faudrait jamais préparer un seul cas de référence parce que cela donne faussement l'impression d'avoir atténué l'incertitude.

7 Il existe une incertitude considérable dans la prévision de la croissance économique et des prix de l'énergie, notamment sur un échéancier de 25 ans, mais nous ne sommes pas en mesure de faire des observations sur les prévisions utilisées précisément dans le document PEC-MJ. Nous avons constaté que le SCMI est sensible aux prix relatifs de l'énergie sur la période prévisionnelle.

Incertitudes technico-économiques

Le SCMI illustre expressément les modèles spécifiques de flux de procédés pour divers secteurs industriels, afin d'atténuer l'incertitude dans la modélisation énergie-économie, lorsque les procédés sont illustrés en agrégé. D'après la recherche sur l'utilisation de l'énergie dans l'industrie, on constate que a) les sous-secteurs réagissent assez différemment aux changements de prix de l'énergie, b) les changements structurels au niveau de la production ont joué un rôle important dans le niveau de consommation d'énergie et c) l'analyse sera meilleure si l'on prévoit des variables pour chaque combustible que si l'on utilise une seule variable pour toutes les énergies⁸.

Les principales incertitudes technico-économiques du SCMI sont les suivantes :

- la structure des grands procédés actuels;
- les parts de marché des technologies actuelles;
- les efficacités énergétiques et parts de combustible des technologies actuelles;
- les coûts de la technologie (immobilisation et exploitation au regard de la concurrence future);
- les efficacités énergétiques dues à la technologie (pour la concurrence future).

Le principal obstacle à une analyse énergétique désagrégée est l'existence de données, de niveau approprié, dans une industrie ou un secteur. Malgré cette contrainte, l'analyse de l'utilisation finale et la modélisation ont effectué des percées importantes. Les données sur les stocks et les caractéristiques de la technologie proviennent de nombreuses sources, notamment : bases de données actuelles établies pour d'autres études; publications comme le *Lockwood & Post Directory* (pâtes et papiers), le *Oil and Gas Journal*; sociétés de services publics, consultants et spécialistes du secteur. Malgré l'augmentation du nombre de bases de données qui précisent les caractéristiques de la technologie, nous ne disposons pas de données systématiques confirmant les estimations sur les stocks d'équipements et les caractéristiques de la technologie. Pour relever ce défi, nous avons étalonné les données sur le stock actuel en données de consommation énergétique désagrégées propres à une industrie, et nous ajoutons des estimations de l'affectation de la technologie aux utilisateurs finaux.

Sur un horizon de 25 ans, il est possible que des changements technologiques importants interviennent, qui auraient des répercussions tout aussi considérables en matière de décarbonisation. Nous essayons de préciser les technologies naissantes dans le modèle, mais nous ne pouvons prévoir pleinement l'orientation que prendra l'innovation. De plus, les coûts financiers de ces technologies sont loin d'être indépendants de la politique publique, même si le rapport est des plus incertains.

Incertitudes dynamiques

L'incertitude dynamique critique des modèles simulant le changement technologique, à long terme, est le comportement en matière d'acquisition de la technologie (« incertitudes de préférence »). Par contre, il existe d'autres incertitudes dynamiques, à savoir a) les taux de retrait des stocks d'équipements, b) les taux d'utilisation des stocks d'équipements et c) la modernisation du stock

8 Nyboer, *Simulating Evolution of Technology: An Aid to Energy Policy Analysis*, 40.

d'équipements. L'incertitude concernant le retrait de la technologie n'est pas très grande parce que, même si les taux de retrait peuvent fluctuer considérablement avec le cycle opérationnel à court terme, ils finissent par établir une moyenne sur des périodes plus longues, correspondant généralement, à peu près, à la durée de vie prévue des divers types d'équipements. De la même façon, les périodes de modernisation accélérée des stocks d'immobilisations existants ne sont pas un facteur essentiel à l'illustration précise de l'évolution des stocks à long terme⁹.

Nous ne possédons pas beaucoup de données empiriques sur les comportements d'acquisition technologique des entreprises et des ménages, et il existe une incertitude considérable relativement aux paramètres « v », « i » et « r » de l'algorithme d'acquisition de la technologie décrit à la section 4. Tout récemment, on a noté des efforts visant à illustrer l'incertitude liée à chaque paramètre en basant ces estimations sur la fonction de service des modèles de choix discrets élaborés à la partir de la recherche sur le marché¹⁰.

Il est impossible de vérifier, hors de tout doute, les paramètres d'achat non financiers d'un modèle dont l'objet est de simuler la façon dont les entreprises et les ménages se comporteront devant des choix technologiques futurs qui pourraient être différents des choix technologiques passés¹¹. À mesure que la technologie est mieux connue sur le marché, les entreprises sont de plus en plus disposées à l'adopter, car nombre de préoccupations intangibles peuvent diminuer considérablement. Les préférences peuvent s'ajuster ou non en fonction des politiques futures ou des préoccupations publiques¹².

C'est là un domaine de recherche permanent pour l'*Energy and Material Research Group* de l'Université Simon Fraser.

9 Ibid., 44.

10 Voir M. Horne, « Incorporating Preferences for Personal Urban Transportation Technologies into a Hybrid Energy-Economy Model » Master of Natural Resources Management Research Project, Report No. 339, School of Resource and Environmental Management, Université Simon Fraser, Burnaby, C.-B., 2003; N. Rivers, « Behavioural Realism in a Technology Explicit Energy-Economy Model: The Adoption of Industrial Cogeneration in Canada », Projet de recherche de maîtrise en gestion des ressources naturelles, Rapport no 341, Faculté de gestion des ressources et de l'environnement, Université Simon Fraser, Burnaby, C.-B., 2003; M. Sadler, « Home Energy Preferences and Policy: Applying Stated Choice Modelling to a Hybrid Energy-Economy Model », Projet de recherche de maîtrise en gestion des ressources naturelles, Rapport no 342, Faculté de gestion des ressources et de l'environnement, Université Simon Fraser, Burnaby, C.-B., 2003.

11 Ceci se complique du fait que les données d'achat prouvent que les préférences déclarées par les consommateurs à l'égard des caractéristiques du matériel consommateur d'énergie diffèrent souvent de leurs préférences réelles.

12 M. Jaccard, J. Nyboer, C. Bataille, B. Sadownik, « Modelling the Cost of Climate Policy: Distinguishing Between Alternative Cost Definitions and Long-Run Cost Dynamics », *The Energy Journal* 21, 1 (2003): 49-73.

**Étude de cas
sur la politique fiscale et
l'efficacité énergétique**

Étude économique

**Annexe B :
Possibilités d'efficacité énergétique**

1	Introduction	B1
2	Services génériques/auxiliaires	B1
2.1	Génération de vapeur	B1
2.2	Systèmes électriques auxiliaires	B2
3	Services propres à un procédé	B3
3.1	Raffinage du pétrole	B3
3.2	Pâtes et papiers	B4
3.3	Exploitation minière	B7
3.4	Fer et acier	B8
3.5	Fusion et raffinage des métaux non ferreux	B12
3.6	Minéraux industriels	B14
3.7	Produits chimiques	B16

1 Introduction

Dans la présente annexe, nous effectuons le recensement des principaux systèmes énergétiques et des possibilités technologiques d'efficacité dans le secteur industriel. Nous nous sommes efforcés de parvenir à une assez grande exhaustivité en incluant, à la fois, les technologies commercialisées et les nouvelles technologies naissantes, mais la liste n'est pas complète. Ainsi, dans cette annexe, nous nous concentrons sur les possibilités technologiques; nous ne procédons pas à une description des concepts des systèmes industriels (écologie industrielle, recyclage de l'énergie), bien que certaines technologies mentionnées ici (p. ex., la cogénération) soient pertinentes à ces approches de systèmes.

Nous avons classé les possibilités selon deux catégories, soit les services génériques (auxiliaires, interpénétrants) et les procédés uniques. Les services énergétiques génériques sont ceux qui ne sont pas propres à une industrie en particulier, mais qui se concentrent sur les systèmes auxiliaires fournissant des services énergétiques aux principaux équipements de procédés pendant leur fonctionnement. Dans le recensement des possibilités propres aux procédés, nous nous concentrons sur les industries canadiennes les plus énergivores sans décrire, par exemple, les mesures qui ne se retrouvent que dans des secteurs moins importants sur le plan énergétique (c.à.d. transformation des aliments, travail du cuir, etc.).

Pour la plupart, les technologies décrites ci-après figurent au modèle du SCMI. Toutefois, les mesures d'efficacité décrites ci-après ne peuvent pas toutes être représentées dans les paramètres et la structure du modèle du SCMI.

2 Services génériques/auxiliaires

2.1 Génération de vapeur

L'efficacité des chaudières à vapeur varie grandement selon la conception et l'âge de la chaudière et le combustible utilisé. Dans le cas des chaudières modernes fonctionnant au pétrole et au gaz, l'efficacité thermique peut atteindre 85 % ou plus. On peut optimiser le rendement des centrales thermiques à vapeur par l'entretien périodique et par des améliorations modestes, comme le réglage de la pression de fonctionnement, l'ajout d'isolant et la réduction des pertes thermiques à la distribution. On peut augmenter l'efficacité des chaudières par l'ajout de systèmes de récupération thermique à condensation et sans condensation et l'installation de brûleurs de réutilisation informatisés réglant les mélanges de combustible et d'air afin de maximiser l'efficacité du combustible. L'objet de la recherche actuelle est de réduire la quantité d'azote en contact avec l'oxygène à haute température de flamme (brûleurs haute efficacité/faible teneur en NO_x).

On peut améliorer de façon considérable l'efficacité énergétique des systèmes par la cogénération (alliant énergie thermique et électricité), produisant, à la fois, de l'électricité et de l'énergie thermique utile à partir du ou des mêmes combustibles, en utilisant moins de combustible que les solutions autonomes. De plus, la cogénération permet une plus grande efficacité énergétique en réduisant ou en éliminant les pertes de transmission et de distribution liées au transport de l'électricité. Les économies d'énergie par cogénération varient selon le type de système et le pourcentage d'électricité qu'il produit. Habituellement, la cogénération permet d'économiser de 20 % à 40 % par rapport aux systèmes autonomes. C'est le type de force motrice principale servant à entraîner la génératrice qui permet de

classer les systèmes de cogénération. Quatre principaux types sont actuellement en usage : turbines à vapeur, turbines à gaz, moteurs à pistons et turbines à gaz à cycle mixte. Certains nouveaux systèmes en développement sont les piles à combustible et les micro-turbines. Même si, par cette technologie, on parvient à réduire les émissions globales (directes et indirectes), le passage à la cogénération entraîne habituellement une augmentation des émissions directes d'une industrie en raison de l'utilisation accrue de combustibles fossiles pour produire de l'électricité.

2.2 Systèmes électriques auxiliaires

La plus grande partie de l'électricité que consomme l'industrie est utilisée par des systèmes à moteurs électriques. Le moteur électrique est le cœur d'un ensemble beaucoup plus vaste d'appareils électriques et mécaniques fournissant divers services, notamment l'énergie hydraulique, l'air comprimé, la force motrice et la circulation d'air. Les possibilités d'accroissement de l'efficacité se situent, à la fois, dans le moteur lui-même et dans ses systèmes périphériques — pompage, déplacement d'air, compression, transport et autres types d'entraînement mécanique propres à un procédé de production.

Moteurs électriques

Le moteur à induction à courant alternatif (CA) est actuellement la technologie motrice dominante. Les moteurs à induction constituent une technologie bien maîtrisée. Les fabricants continuent d'apporter lentement des améliorations sur les plans de l'efficacité et du rendement, mais aucune modification majeure de la technologie n'est prévue. Actuellement, les moteurs électriques haute efficacité utilisent de 1 % à 4 % moins d'électricité que les moteurs électriques standard.

Il existe d'autres types de moteurs électriques :

- Les moteurs CC (à courant continu) utilisés dans nombre d'applications industrielles à moteurs de grande taille (> 200 HP) parce qu'ils peuvent fonctionner en continu à bas régime et à couple élevé et qu'ils possèdent naturellement une capacité de régulation de vitesse¹. Les systèmes à moteur électrique CC plus récents utilisent des redresseurs transistorisés à une efficacité de 85 %.
- Les moteurs synchrones CA, conçus pour des applications exigeant des vitesses constantes. Les possibilités d'économie d'électricité dans les moteurs synchrones sont limitées, car ceux-ci sont déjà hautement efficaces et destinés à des applications industrielles spéciales.

Il est possible d'obtenir des économies d'énergie considérables en optimisant le système moteur par un dimensionnement approprié des moteurs électriques et le recours à des entraînements à vitesse variable. Comme les moteurs fonctionnent à leur efficacité maximale aux environs de 60 % à 100 % de leur charge nominale totale, on peut parvenir à de fortes améliorations d'efficacité en installant un moteur plus petit, si le moteur en place fonctionne en deçà de sa plage optimale. Les entraînements à vitesse variable (EVV) régulent la vitesse du moteur de façon précise en fonction des fluctuations de charge requises. Ces systèmes permettent de réaliser des économies d'énergie importantes, d'améliorer le facteur de puissance et la précision du procédé et offrent d'autres avantages en matière de rendement, comme le démarrage en douceur et la capacité de survitesse. Pour certains types de charges, la technologie EVV serait plus appropriée.

¹ Cette domination est en régression, car la technologie de régulation de vitesse des moteurs à induction s'améliore.

Pompes – L’efficacité des pompes n’a pas posé de problème majeur depuis que l’industrie les utilise. La technologie est bien maîtrisée : les meilleures des nouvelles pompes disponibles sur le marché offrent un rendement de 3 % à 10 % supérieur à la moyenne des nouvelles pompes. En remplaçant la commande de soupape par un entraînement à vitesse variable, on peut augmenter l’efficacité du système de 20 % à 30 %; toutefois, la plupart des systèmes à pompes ont déjà été convertis puisque les entraînements à vitesse variable permettent de réguler de façon précise les procédés et facilitent l’entretien.

Systèmes de déplacement d’air – Dans le secteur industriel, les systèmes comme les ventilateurs et soufflantes consomment une énorme quantité d’électricité, habituellement 20 % de la demande d’électricité. Les systèmes de ventilateurs se composent habituellement d’un appareil régulateur de vitesse, d’un moteur électrique, d’un ventilateur, d’une soupape ou d’un registre de réglage et d’un réseau de conduites. Il est habituellement possible de relever l’efficacité dans chacun de ces éléments et d’optimiser l’ensemble du système. Même si les technologies de ventilation sont bien maîtrisées, aucun changement de conception majeur n’est survenu depuis 20 ans : des améliorations techniques de l’efficacité seraient donc possibles. Par une meilleure conception des turbines et l’utilisation de meilleurs matériaux de construction, on pourrait accroître l’efficacité de 10 % au cours des 20 prochaines années.

Systèmes de convoyeurs – On appelle système de convoyeur un appareil horizontal ou incliné déplaçant des matériaux en vrac. De par leur nature, les systèmes de convoyeurs ne se prêtent guère à une augmentation d’efficacité, comparativement aux autres systèmes. De plus, ils ne sont responsables que d’une faible partie de la demande d’électricité industrielle, habituellement moins de 5 %.

Systèmes compresseurs – Il s’agit de systèmes conçus pour augmenter la pression d’un gaz à un niveau utile. Ce sont là les systèmes auxiliaires les moins efficaces : l’efficacité totale se situe, en moyenne, entre 15 % et 20 %, en raison de la nature compressible du gaz, qui absorbe l’énergie quand il est comprimé, et de la perte de pression par fuite d’air. Il existe donc d’énormes possibilités d’économie d’énergie. Parmi les nouveaux développements, il faut mentionner la gestion des réseaux d’air comprimé (économies d’énergie de 25 %) et la régulation améliorée des compresseurs (économies d’énergie de 3,5 %).

3 Services propres à un procédé

3.1 Raffinage du pétrole

La capacité des raffineries canadiennes diminue constamment et, comme on n’en construit pas de nouvelles, il est peu probable que de nouvelles technologies de procédés aient des répercussions majeures sur l’intensité énergétique dans ce secteur. Toutefois, voici une liste de technologies qui, même si elles ne sont pas nouvelles, pourraient être appliquées davantage dans la plupart des raffineries canadiennes pour réduire les frais d’exploitation en accroissant l’efficacité énergétique. Nous donnons aussi une brève description de chacune des technologies.

Disposition en tours séparées – Il s’agit d’un type de distillation atmosphérique où l’on exploite en parallèle une tour hyperbare et une tour à basse pression. La tour de condensation hyperbare sert de source de chaleur pour les autres processus de l’appareillage, par exemple le rebouilleur de la tour à basse pression, réduisant ainsi la consommation globale d’énergie du procédé de distillation.

Recompression de la vapeur – Les vapeurs de distillat de tête de la tour de distillation peuvent être comprimées, recondensées dans un rebouilleur et retournées à la tour comme reflux. C'est là un procédé de thermopompe qui peut considérablement réduire la consommation d'énergie, mais à un coût d'immobilisation appréciable. Il est le plus avantageux si la différence de température entre les colonnes du système de fractionnement est faible. Il convient de remarquer que le premier objectif de la recompression est la récupération du produit, et non pas l'augmentation de l'efficacité énergétique.

Raffinage du brut réduit/Valorisation du pétrole lourd – On a mis au point des procédés de valorisation permettant de réduire la durée de distillation sous vide et de thermocraquage. Dans ces procédés, on convertit le brut réduit issu de la distillation en tour atmosphérique que l'on transforme directement en produits commerciaux plus légers par d'autres procédés. Parmi ces procédés, mentionnons le craquage du brut réduit (CBR) et le procédé RESID-fining.

Turbines de dépressurisation – Le procédé de craquage catalytique peut émettre des gaz de carneau sous une pression suffisamment élevée pour générer de l'énergie électrique ou mécanique au moyen de turbines de dépressurisation ou de dilatateurs. Règle générale, on ne peut ajouter ces turbines à une installation de craquage, car elles doivent être intégrées dès la conception du système.

Commandes de procédé améliorées – On a accompli des progrès considérables d'optimisation des procédés en augmentant l'informatisation au niveau des commandes et de la surveillance. Le procédé de raffinage est très interactif; des changements dynamiques à une étape se répercutent sur l'efficacité à d'autres étapes. L'ordinateur peut permettre aux opérateurs d'optimiser le procédé à mesure que ces changements se produisent.

Technologie « Pinch » – Les divers procédés de raffinage du pétrole exigent des niveaux et qualités de chaleur différents. Dans certains cas, la chaleur résiduaire d'un procédé peut être suffisamment élevée et d'une qualité suffisante pour être utilisée dans un autre procédé. La technologie « Pinch » n'est pas véritablement une technologie à matériel; elle comporte l'analyse de tous les besoins en chauffage et refroidissement dans un procédé industriel pour optimiser la récupération thermique et l'utilisation de la chaleur résiduaire. Cette technologie a été utilisée dans une certaine mesure dans de nombreuses raffineries, mais il existe encore d'autres possibilités d'utiliser pleinement cette approche, et elles sont plus faciles à évaluer au stade des plans de construction de l'installation.

3.2 Pâtes et papiers

Nous décrivons, ci-après, les technologies nouvelles et naissantes qui peuvent avoir un effet direct ou indirect important sur la demande énergétique dans l'industrie des pâtes et papiers.

Transport des boues à consistance moyenne – Depuis longtemps, pour transporter la pâte des citernes de pâte épaisse ou tours de blanchiment, il faut d'abord diluer les boues et ensuite les pomper et les réépaissir pour le stade suivant du procédé. Ces systèmes de transport dotés de citernes de filtrats auxiliaires, pompes de dilution et mécanismes de commande nécessitent beaucoup de capital et consomment de grandes quantités d'énergie. On a mis au point des pompes et mélangeurs pour boues de consistance moyenne pour transporter la pâte épaisse, éliminant la dilution et le réépaississement subséquent. Par cette technologie, on réduit également le volume d'eau nécessaire et donc, les coûts d'épuration des eaux.

Pâte mécanique chimiquement modifiée (procédés PCTM) – Le traitement chimique des copeaux avant le raffinage et/ou l'ajout de produits chimiques pendant le raffinage ont d'abord fait l'objet d'études dans le but de réduire les besoins en énergie. Toutefois, en peu de temps, il est devenu évident que malgré certaines possibilités d'économie d'énergie, l'effet principal consistait à altérer la qualité des pâtes. Un certain nombre de procédés PCTM différents ont été utilisés en fonction des exigences spécifiques en matière de qualité du produit (c.à.d. brillance, opacité, résistance, etc.).

Gazéification de la liqueur noire – Au lieu de brûler directement la liqueur noire dans des chaudières de récupération, on la gazéifie et on la brûle ensuite dans une chaudière de récupération ou encore mieux, dans des turbines à gaz spéciales à cycle mixte. Si l'on remplaçait totalement les procédés combinés chaudière-de-récupération-et-turbine-à-vapeur par la gazéification de la liqueur noire jumelée à des systèmes de cogénération à turbines à gaz, on obtiendrait une bien plus grande efficacité énergétique globale et des ratios électricité-chaleur plus élevés, de même qu'une réduction des émissions. Cette technologie pourrait être rentable d'ici quelques années et l'un de ses grands atouts serait sa capacité d'augmenter les rendements de pâte.

Formage en feuilles sèches – Cette possibilité peut s'appliquer à la fabrication de produits de papier sanitaires et spécialisés, par exemple les couches, produits d'hygiène féminine, etc. Le formage en feuilles sèches comprend la superposition de couches de fibres formant une toile sans utilisation d'eau. Les fibres sont maintenues ensemble par une résine ou un latex polymère nébulisé sur la forme. On peut ainsi parvenir à d'importantes économies d'énergie, jusqu'à 50 %, parce qu'il n'est plus nécessaire d'évaporer l'eau de la feuille. Toutefois, l'utilisation d'air pour la formation des couches augmente la consommation d'électricité, et cette technologie est un peu plus coûteuse que celle des machines à papier classiques utilisées à cette fin. Un autre avantage : le procédé ne produit pas d'eaux usées. La technologie est offerte sur le marché.

Désencrage – Le désencrage du papier de rebut ne peut que gagner en importance, notamment dans les régions où existent des réserves de matières brutes (papier recyclé) et au fur et à mesure que l'industrie utilisera davantage de pâte recyclée. Le désencrage se fait par lavage ou par flottaison; c'est ce dernier procédé que les usines canadiennes ont adopté (p. ex., l'usine de Kruger à Bromptonville, au Québec). Dans ce procédé, les rebuts de papier sont réduits en pâte et les gros débris sont éliminés par des filtres. On ajoute à la pâte des produits chimiques, et elle est acheminée vers les cellules de flottation. Les particules d'encre sont éliminées avec l'écume produite par l'injection d'air. La technique de désencrage la plus récente est le désencrage par explosion, procédé dans lequel la pâte de papier de rebut est soumise à diverses pressions et périodes de rétention pour être ensuite ramenée à la pression atmosphérique. L'humidité se vaporisant instantanément en vapeur entraîne le fractionnement de l'encre, qui est ensuite éliminée par des méthodes classiques de filtrage et de lavage.

Raffinage haute intensité – Le raffinage haute intensité est l'optimisation de l'énergie de raffinage dans la fabrication de la pâte mécanique. L'intensité du raffinage dépend de la vitesse de rotation des raffineurs monodisques ou à disques en tandem. En modifiant la vitesse de rotation et la configuration de la plaque de raffinage, on peut réduire la consommation d'énergie. Pour modifier l'intensité de raffinage, il faut apporter des changements et des modifications aux moteurs d'entraînement. Il faudra aussi recourir à de nouveaux appareils de commande. Ces changements permettront d'économiser environ 25 % de l'électricité consommée dans les raffineurs à disques en tandem et 10 % dans les raffineurs monodisques.

Pressage à chaud – Le pressage à chaud allie les procédés de pressage et de séchage. Dans un pressage à chaud, les rouleaux de pressage sont chauffés à la vapeur à basse pression. Le degré de sécheresse de la feuille de papier qui quitte la presse chaude est habituellement de 4 % à 10 % plus élevé que dans une presse classique. Le pressage à chaud augmente la force du papier fini et lui confère un meilleur lissage de surface. Puisque la feuille de papier est plus sèche, cela réduit l'énergie nécessaire lors du procédé de séchage; toutefois, on n'a pas établi la quantité d'énergie économisée.

Pressage forcé à température élevée – Le pressage forcé à température élevée allie pressions et températures élevées avant le stade du séchage pour éliminer l'excès d'eau de la pâte. On installe ces types de séchoirs entre les parties séchoir et presse. La toile de papier sort de la presse à pâte et est acheminée dans un « dispositif de pinçage » qui se compose d'un gros rouleau métallique chauffé à haute température par induction électrique (120°C) et d'un rouleau recouvert de feutre. Au contact du rouleau métallique surchauffé, l'eau de la toile se vaporise et est ensuite captée par le feutre du second rouleau, ce qui réduit jusqu'à 38 % ou moins la teneur en humidité de la « toile ». Ces séchoirs peuvent être intégrés aux machines existantes ou intégrés à une nouvelle installation. Le recours à ce type de séchage peut réduire la longueur de la section de séchage ou accroître la vitesse du procédé de séchage et ainsi, la force du papier.

Séchage par tapis de condensation (Condebelt) – Cette technologie, contrairement au procédé classique de séchage où le papier traité mécaniquement passe par une série de rouleaux chauffés à la vapeur, sèche le papier par contact avec une longue bande d'acier portée à chaud, dans une chambre de séchage. À l'opposé de la bande d'acier chauffée se trouvent des couches de maillage d'acier et une bande d'acier refroidie sur laquelle se condense la vapeur qui sort du papier en cours de séchage, pour être éliminée. Le rythme de séchage du procédé Condebelt est de 5 à 15 fois plus rapide que celui des méthodes classiques. On trouve, jusqu'à maintenant, des installations commerciales en Corée du Sud (1999) et en Finlande (1996) où le procédé Condebelt a été utilisé comme technologie supplémentaire, plutôt qu'en remplacement de la machinerie existante.

Récupération de chaleur sous hottes enveloppantes (fabrication du papier) – Dans la fabrication du papier, le séchage est l'étape la plus énergivore. La vapeur d'eau libérée est une vapeur saturée, à basse pression. Les systèmes actuels de récupération de chaleur reposent sur un transfert thermique air-air sous des hottes enveloppantes, où l'on récupère environ 15 % de l'énergie résiduelle (sous forme de vapeur). Les systèmes plus récents visent à augmenter la quantité de chaleur récupérée de la vapeur résiduaire à l'aide de capteurs et de hottes enveloppantes. On peut également utiliser des thermopompes et recourir à la recompression mécanique de la vapeur (RMV) comme moyens supplémentaires d'augmenter la teneur énergétique de la chaleur résiduaire. Si on utilise seulement des hottes enveloppantes, les estimations des économies d'énergie primaire et des économies d'électricité sont de 41 % et 35 %, respectivement. On peut utiliser ces technologies pour produire toutes les qualités de papier, mais les principales installations se retrouveront probablement dans les grandes machines à papier de fabrication récente.

Formage haute consistance (FHC) – Dans le procédé de formage, la pâte de boues est formée en une toile uniforme. Dans le formage haute consistance, les boues entrent à l'étape du formage en consistance plus élevée, ce qui nécessite moins de temps aux étapes de formage et permet des économies d'énergie à l'étape du pompage puisque le procédé nécessite moins d'extraction d'eau et moins de vide. En outre, le procédé augmente la force du papier et réduit les besoins de matériel d'intrant, mais ne s'applique qu'aux grades de papiers plus lourds, par exemple les cartonnages et les contenants de liquide. Cette technologie, offerte sur le marché comme installation spécifique ou ajout, a été lente à s'établir. On ne connaît que quelques grandes installations.

3.3 Mines

Nous avons signalé bon nombre de possibilités d'efficacité énergétique dans les procédés de broyage, d'élimination et de séparation des minéraux. Le broyage est très énergivore et des plus inefficaces. Ainsi, en général, à peine 3 % de l'énergie de broyage sert à rompre les liens intercrystallins. Résultat : il existe à ce stade un fort potentiel d'économie d'énergie. On utilise aussi beaucoup d'énergie pour se débarrasser des résidus stériles. D'un autre côté, les techniques habituelles de séparation des minéraux, comme la flottation par écume ou la séparation par gravité, ne consomment pas une grande partie de l'énergie utilisée dans la transformation des minéraux (moins de 10 %, comparativement à 60 % pour le broyage), mais cette étape offre aussi des possibilités d'économie d'énergie. De plus, les techniques utilisées à ce stade peuvent se répercuter sur les besoins énergétiques du stade antérieur, le broyage, et les stades subséquents, à savoir la fusion et le raffinage.

Automatisation du circuit de broyage – Dans le procédé de broyage, des perturbations se produisent (à cause de certains facteurs comme les variations de caractéristiques du minerai, l'ajout non régulé d'eau et les écarts dans le débit d'alimentation) à une telle fréquence qu'il est difficile pour l'opérateur de les déceler et d'y réagir de façon efficace. Ainsi, l'efficacité énergétique du broyage pourrait être améliorée par des commandes automatiques. On met au point des modèles de plus en plus perfectionnés de circuits de broyage intégrant un grand nombre de variables qui influent sur cette étape. À titre d'exemple, on utilise des jauges nucléaires ou à ultrasons pour préciser le débit des particules, et les automates programmables, combinés à l'introduction de puissants micro-ordinateurs, ont permis de recourir à des séquences logiques de commande complexes.

Conception des cornières élévatrices/bandes de garnissage dans les broyeurs semi-autogènes (BSA) – On a observé beaucoup de travaux de mise au point et d'essais pour préciser l'effet des divers concepts de bandes de matériaux de garnissage et de cornières élévatrices sur la consommation d'énergie². Dans les grands BSA, on utilise des bandes de garnissage pour éviter l'usure du tambour rotatif et réduire le glissement entre celui-ci et le corps broyant. Les cornières élévatrices sont des barres fixées à la bande de garnissage; elles captent le minerai et le soulèvent au cours de la rotation du tambour. Puisque les bandes de garnissage sont le lien mécanique entre la machine et le minerai, la manière dont les cornières élévatrices et ces bandes transfèrent l'énergie au corps broyant et au minerai établit le rythme de production, le taux d'usure des bandes de garnissage, les frais d'entretien, la consommation d'énergie, la disponibilité du broyeur et son efficacité. Nul doute que l'efficacité de nombre de broyeurs, voire tous, pourrait être améliorée par l'optimisation de la conception des bandes de garnissages et cornières élévatrices.

Broyage aux ultrasons – En raison des possibilités d'économie d'énergie énormes au stade du broyage, sur un horizon de planification de 20 ans, des techniques de broyage entièrement nouvelles pourraient avoir des répercussions majeures sur la consommation d'énergie. L'un des exemples de ces techniques est le broyage aux ultrasons. Ce procédé utilise un entraînement électromagnétique capable de générer une puissance élevée à de hautes fréquences et qui, immergé dans un milieu liquide ou de boues, crée une cavitation intense et une pulsation de pression à haute énergie. Le broyeur aux ultrasons a été mis au point par ARC Sonics Inc. Cette technologie pourrait s'appliquer au broyage du charbon, de la magnétite et du calcaire. Nous ne possédons pas suffisamment de renseignements pour préciser l'ampleur des économies d'énergie qui pourraient découler de l'application de cette technologie.

2. Même si, le plus souvent, la bande de garnissage est faite d'acier coulé et laminé, on a aussi introduit divers matériaux de caoutchouc. Sur le plan technique, les cornières élévatrices peuvent varier selon l'espacement, la hauteur et la forme des barres.

Flottation en colonne – Les procédés de broyage visent à réduire le minerai à une plage granulométrique qui favorisera la récupération maximale des minéraux précieux. Souvent, les grandes particules continuent à être broyées même si elles ne renferment pas de roche stérile. On peut réduire le surbroyage si le minerai est broyé par étapes, avec une étape intermédiaire pour récupérer les particules de minerai qui ont déjà été débarrassées de la roche stérile. Une nouvelle façon d’aborder le problème est de recourir à une étape intermédiaire de flottation, soit une colonne de flottation conçue spécialement pour le flottage des grandes particules minérales débarrassées de leur gangue. De cette façon, on réduit les besoins en broyage tout en améliorant le taux de récupération, puisque les pertes en roches stériles augmentent à mesure que diminue la taille des particules. Ces deux améliorations permettront d’économiser l’énergie.

Épaississement en pâte et chauffage avant flottation – Dans certains circuits de flottation, il devient nécessaire de chauffer le minerai pour favoriser la flottation et de nettoyer les surfaces du minerai avant de passer à l’étape suivante. Le procédé de chauffage peut consommer de grandes quantités d’énergie. Il serait plus efficace de retirer l’eau par épaississement avant le chauffage, et de l’ajouter à nouveau après l’étape du chauffage. Nous avons recensé certains travaux visant à justifier les économies d’énergie, mais il faudrait un projet de démonstration à grande échelle pour vérifier les résultats.

Élimination de l’eau – Habituellement, on repompe l’eau des bassins de résidus miniers pour répondre aux besoins en eau dans de nombreuses usines de transformation des minerais métalliques de base. Il n’est pas nécessaire d’épurer l’eau à recycler dans la même mesure, et on peut même ne pas l’épurer. Le recyclage présente des avantages et des inconvénients dans différents procédés; dans certains cas, il augmente la productivité et accroît l’efficacité énergétique en réduisant les besoins en pompage et chauffage. À titre d’exemple, dans les usines fonctionnant par gravité, le recyclage de l’eau augmente la température des boues, réduit la viscosité apparente et accroît le rendement global.

Utilisation des déchets de charbon – On pourrait utiliser de grandes quantités de cendres de houille des lavoirs et déblais de minerais pour préparer un produit final pulvérisé ou une boue eau/charbon pour alimenter les génératrices de vapeur. L’installation sur place de centrales électriques utilisant les rejets de charbon pourrait permettre d’obtenir des quantités appréciables d’énergie.

Élimination des résidus par gravité ou pompage – Dans bon nombre de mines, la solution la moins coûteuse en investissement, pour l’élimination des résidus, est de les pomper sous forme de boues dans des bassins de décantation. Il est souvent possible, même si cela exige un surcroît de frais d’immobilisation, de remplacer les systèmes de pompage par des systèmes à gravité.

3.4 Fer et acier

Voici une description des technologies nouvelles et naissantes qui pourraient avoir un effet direct ou indirect important sur la demande énergétique dans l’industrie du fer et de l’acier.

Refroidissement à sec du coke – Dans les procédés classiques, la production de coke comporte le chauffage du charbon à environ 1 000° C pendant 12 à 18 heures. À la fin du procédé, l’eau opère un refroidissement rapide du charbon brûlant qui sort des fours à coke, dégageant d’énormes nuages de vapeur au-dessus de l’aciérie. Dans le procédé de refroidissement à sec du coke (CDQ), un godet de conception spéciale reçoit le coke rejeté par le four et le verse dans un récipient spécial contenant un milieu à gaz inerte qui opère un refroidissement rapide du coke. La vapeur récupérée du procédé est utilisée comme source d’énergie pour produire de l’électricité et pour le réchauffage. Le procédé CDQ

réduit la consommation d'énergie d'environ 14 %, tout en produisant un coke de meilleure qualité. Même si le CDQ est commercialisé depuis quelques années, aucune aciérie canadienne n'utilise actuellement cette technologie.

Turbine de récupération du gaz de gueulard (TRG) – Les hauts fourneaux fonctionnent à des pressions verticales élevées pouvant atteindre 250 kPa. Pour récupérer et utiliser le gaz de gueulard, il faut réduire la pression de 5 à 8 kPa, pression acceptable pour les chambres de stockage et conduites de gaz. On a mis au point les turbines TRG pour récupérer l'énergie de compression latente du gaz de gueulard selon son expansion aux pressions moins élevées, et l'énergie peut être utilisée ailleurs dans l'usine. Aucun haut fourneau canadien n'est doté d'une capacité de pression verticale, car il faudrait reconstruire totalement les hauts fourneaux à cette fin.

Fer de réduction directe (DRI), procédé Midrex – Le Midrex convertit l'oxyde de fer en boulettes ou briquettes pour obtenir un « fer spongieux » poreux qui peut concurrencer la ferraille. Habituellement, ces produits serviraient de charge d'alimentation d'un four à arc, plutôt que d'un convertisseur basique. (L'utilisation d'un convertisseur basique nécessite une opération qui consiste à verser du fer fondu sur la ferraille; les procédés par réduction directe ne génèrent pas de métal fondu.)

Le procédé Midrex a trois grandes composantes : four à cuve, reformeur et récupérateur de chaleur. L'oxyde de fer est introduit par le sommet du four à cuve, il descend dans la cuve par gravité et ressort sous forme réduite au bas de l'installation, formant un produit qu'on appelle fer de réduction directe. Deux procédés interviennent dans le four à cuve : la réduction et le refroidissement. Dans la zone de réduction, l'oxyde de fer entre en contact avec un gaz chaud dirigé à contre-courant composé d'hydrogène et de monoxyde de carbone, de sorte qu'il y a une réduction en fer, H₂O et CO₂. Dans la zone de refroidissement, le fer réduit est carbonisé et refroidi par un gaz de refroidissement à contre-courant.

Un four réfractaire au gaz étanche qui contient des tubes d'alliage remplis de catalyseurs génère le gaz réducteur par reformage d'un mélange préchauffé de gaz naturel et du gaz de gueulard recyclé provenant du four à cuve. Le gaz réducteur, chauffé à 950° C, contient de 90 % à 92 % d'hydrogène et de monoxyde de carbone lorsqu'il quitte le reformeur.

Le récupérateur de chaleur récupère l'énergie thermique du gaz de carneau du reformeur, pour réchauffer l'air de combustion (pour les brûleurs du reformeur) à 675° C et réchauffe le gaz d'alimentation (mélange de gaz de gueulard et de gaz naturel alimentant le reformeur) à 540° C.

Dans un autre procédé, on produit des briquettes de fer réduit. Les briquetteuses reçoivent le fer chaud de réduction directe et le préparent pour les fours à arc électrique, ce qui élimine la nécessité d'une zone de refroidissement dans le four à cuve.

Fer de fusion directe, procédé Corex – Le procédé Corex de fusion directe diffère du procédé de réduction directe du fer car la fusion directe génère un produit de fusion analogue à la gueuse de fonte. Le procédé Corex comporte deux principales composantes : un four à fusion gazéifieur et un four à cuve. Le charbon entre par gravité dans le four de fusion gazéifieur, traverse un milieu de gaz réducteurs à une température d'environ 1 000° C à 1 200° C et est instantanément séché et débarrassé des matières volatiles. (c.à.d. cokéfié). Le procédé entraîne le craquage de la totalité des hydrocarbures supérieurs en CO et H₂, sauf une faible quantité de méthane; par conséquent, il ne génère aucun sous-produit (bitumes, benzènes, ammoniaque, etc.). Le gaz de réduction, généré sur le lit fluidifié du

four à fusion-gazéifieur, par oxydation partielle du charbon par l'oxygène (pureté de 98 %), est injecté par des tuyères en disposition radiale; le charbon oxydé (CO_2) réagit avec le carbone libre pour former du monoxyde de carbone (CO).

La température du gaz sur le lit fluidisé varie de 1 600° C à 1 700° C. Le gaz qui sort du lit fluidisé contient de 65 % à 70 % de CO, de 20 % à 25 % de H_2 et de 2 % à 4 % de CO_2 , avec de faibles quantités de méthane, d'azote et de vapeur. Lorsqu'ils quittent le four à fusion-gazéifieur, les gaz brûlants sont refroidis à environ 900° C, épurés et acheminés vers le four à cuve comme gaz de réduction. Le minerai de fer, chargé dans le four à cuve, descend par gravité et est réduit en métal dont la teneur en carbone est de 3 % à 6 %. Le four à fusion-gazéifieur est alimenté constamment en fer chaud de réduction directe (de 800° C à 900° C). En réduisant la vitesse de chute du fer réduit dans l'appareil de fusion-gazéification, on parvient à une réduction complète du fer, en le chauffant jusqu'à ce qu'il fonde. Le métal en fusion et les scories tombent au bas du four à fusion-gazéifieur pour être retirés à intervalles.

Accroissements de l'efficacité des convertisseurs basiques (CB) – Il n'existe pas de nouvelle solution de rechange aux CB. Certaines technologies permettent de récupérer et d'utiliser le gaz de gueulard des CB, dont la teneur en énergie est assez élevée (jusqu'à 1 GJ/tonne d'acier produit). Une jupe amovible construite autour de la hotte et de la cuve permet de récupérer le gaz du convertisseur; il s'agit d'une option qui suppose un gros investissement et, souvent, elle ne peut concurrencer les technologies qui consomment du combustible relativement bon marché. Les chaudières peuvent utiliser ce gaz acheminé par l'entremise du réseau de la chaudière pour chauffer l'eau, mais le gaz sale suppose une augmentation des coûts d'entretien. Une variante « demi-chaudière » n'ayant qu'une section radiante serait utilisable. Même si ce genre de chaudière n'offre qu'un taux de récupération thermique moindre par rapport à un véritable système de chaudière, il permet d'éliminer les problèmes de nettoyage et les frais d'entretien élevés.

Selon leur conception habituelle, la plupart des convertisseurs basiques sont dotés de lances à jets descendants. L'introduction de lances à jets descendants et à jets ascendants offre deux avantages, soit une plus grande utilisation de l'énergie chimique du gaz dégagé par post-combustion grâce aux lances à jets descendants, et un meilleur équilibre chimique dans le bain parce qu'il est agité par les lances à jets ascendants.

Le procédé augmente le rendement en fer et réduit l'oxydation des scories. Dans le procédé LD-KGC, on injecte de l'argon et de l'azote par un certain nombre de petits ensembles tubulaires, ce qui permet une plus grande variation des débits gazeux. L'injection d'oxygène crée un brassage plus vigoureux comparativement au brassage par gaz inerte et donne un acier à moindre teneur en carbone. Il est possible d'améliorer le procédé pour obtenir de l'acier à teneur en carbone de faible à élevée, en faisant varier le taux de brassage par un gaz inerte. Dans le procédé LD-KGC, on injecte l'argon et l'azote au moyen de nombreux ensembles de canalisations pour faire varier le taux de brassage. Au Canada, Dofasco et Algoma utilisent le procédé LBE, qui est analogue au précédent.

Améliorations d'efficacité des fours à arc (FEA) – Les FEA sont moins énergivores que les hauts fourneaux ou les convertisseurs basiques parce que la ferraille ou le fer spongieux utilisés comme charge d'alimentation sont déjà réduits. Tous les fours à arc installés au Canada fonctionnent grâce à trois électrodes CA, surtout de type à ultra haute puissance (UHP). Ces technologies, jumelées à l'injection d'oxygène et de carbone, permettent non seulement de réduire le délai de soutirage, mais de plus, utilisent jusqu'à 20 % moins d'énergie que les installations plus anciennes.

Parmi les autres technologies et changements de procédés possibles, il faut mentionner celles qui suivent.

- L'installation d'un couvercle de poche pour maximiser la rétention de chaleur, ce qui élimine la nécessité de réchauffer la poche entre les chauffages.
- Le procédé Consteel utilise le gaz de dégagement pour réchauffer la ferraille. Le réchauffeur, qui est un tunnel recouvert de matériaux réfractaires, utilise les gaz de contre-courant pour chauffer les charges de ferrailles. L'air est amené dans le réchauffeur par des fentes latérales afin de brûler le CO. On peut, au besoin, installer un appareil de post-combustion à la suite du procédé de réchauffage pour brûler le CO résiduel.
- Favoriser un taux plus rapide de transfert de masse et de chaleur par brassage au gaz dans les fours à arc. Le transfert de liquide-masse liquide augmente en proportion de l'énergie de brassage; les meilleurs résultats ont été obtenus avec des lances d'injection. Cette méthode améliore également le procédé de raffinage.
- Dans la plupart des aciéries, on a ajouté un procédé de raffinage secondaire, le traitement en poche, qui intervient dans un récipient extérieur au four à arc. À cet endroit, on corrige de façon précise la température de l'acier et la composition chimique finale. Ce procédé réduit le temps de coulée à très haute température et augmente la productivité.
- Dans un four à arc classique, on utilise de grandes quantités d'énergie électrique et de ferraille. On a effectué des expériences pour remplacer l'énergie électrique par l'énergie des combustibles fossiles. On peut modifier les caractéristiques de la ferraille en fonction du combustible fossile utilisé³.

Coulée en continu – Depuis 1980, l'industrie s'est entièrement tournée vers le procédé de coulée en continu, éliminant ainsi la nécessité de verser de l'acier liquide dans des moules pour former des lingots et ensuite de désoxyder et de réchauffer les lingots aux fins du laminage. La coulée en continu convertit l'acier fondu en une forme semi-finie (planches, billettes, blooms) et permet une réduction d'énergie d'environ 50 % par rapport au procédé de coulée en lingots.

Coulée en brames minces – Le procédé de coulée en brames ou en bandes minces récupère la chaleur du métal de la couleuse et permet la transformation en continu en bandes ou brames minces ne nécessitant qu'un apport minime de chaleur. La couleuse est modifiée pour produire une brame d'une épaisseur de 30 à 60 mm à l'aide d'un moule « tunnel ». De la même façon, dans la méthode de coulée en bandes minces, on obtient une épaisseur de brame de 40 mm à 60 mm. Dans le procédé de coulée en brames ou en bandes minces, on évite le stade du produit semi-fini, ce qui réduit le réchauffage et élimine un certain nombre d'étapes de laminage. Il en résulte des économies d'énergie considérables et une hausse importante de la productivité.

Les recherches visant à réduire à 15 mm ou moins l'épaisseur de la brame se poursuivent. Jusqu'à maintenant, il y a eu des problèmes touchant la géométrie de la bande, la qualité superficielle et les propriétés physiques. Une solution de rechange à la coulée en bandes, appelée coulée par pulvérisation, fait également l'objet de recherches. Dans ce procédé, l'acier liquide est nébulisé en fines gouttelettes qui se déposent sur un substrat large de 1 m, long de 2 m et épais de 3 mm. On a pu produire par cette méthode des bandes de 12 mm à 20 mm d'épaisseur.

3 Les conséquences sur les émissions totales de GES découlant du passage direct aux combustibles fossiles dépendront de l'intensité de carbone de l'utilisation d'électricité évitée.

Récupération de la chaleur des fours de réchauffage – La température des gaz de sortie du récupérateur d'un four de réchauffage peut atteindre jusqu'à 600°C. Dans certains cas, on a recours à un ventilateur auxiliaire à haute température qui envoie un jet à haute vitesse de gaz surchauffés à la surface de la braise de charge pour la réchauffer.

Les gaz de carneau résiduels atteignent généralement des températures d'environ 700° C. La chaleur récupérée par l'installation d'un récupérateur permet de réchauffer l'air de combustion.

Laminage continu à froid – On a mis au point des procédés de laminage à froid en continu où le décapage et le laminage à froid ou le décapage, le laminage à froid et la recuisson sont intégrés dans un seul procédé en continu. Le décapage et la recuisson sont des procédés de produits finals appliqués à une partie des produits d'acier.

Combustion à gaz oxygéné à faible teneur en NO_x dans les fours de réchauffage – Dans les fours de réchauffage, l'acier est porté à des températures très élevées (de 1 100° C à 1 300° C) et est ensuite refaçonné/laminé. Malheureusement, les températures élevées de la flamme entraînent de fortes émissions de NO_x. En essayant d'augmenter l'efficacité énergétique des combusteurs et de récupérer la chaleur résiduelle, on a souvent abouti à davantage d'émissions de NO_x. Il existe une méthode de rechange pour augmenter l'efficacité énergétique, soit l'utilisation de fours à gaz oxygéné. Les nouvelles versions de ces fours autorisent un équilibrage précis de la quantité d'oxygène dans le combustible, ce qui limite la formation de NO_x. De plus, les gaz entrent dans le four à haute vitesse, ce qui favorise une combustion plus complète à température moins élevée et une meilleure répartition de la chaleur dans le four. Dans les installations d'essai dont l'objet était d'augmenter l'efficacité énergétique, les économies d'énergie atteignaient jusqu'à 50 %. Cette technologie est offerte sur le marché depuis 1998 et peut être installée dans les fours actuels sans qu'il soit nécessaire de les reconstruire.

3.5 Fusion et raffinage des métaux non ferreux

Nous décrivons ci-après les technologies nouvelles et naissantes qui peuvent avoir un effet direct ou indirect important sur la demande énergétique dans la fusion et le raffinage des métaux non ferreux.

Efficacité des électrodes (production de l'aluminium) – La séparation de l'aluminium métallique de l'oxygène se fait par électrolyse, procédé dans lequel on dissout l'aluminium dans un bain de cryolite en fusion. En théorie, il ne faut que 5,64 kWh/kg pour séparer l'aluminium de l'oxygène selon ce procédé, mais dans les usines anciennes, on utilise jusqu'à 17,6 kWh/kg. Dans les usines plus récentes, l'énergie consommée est de 14,3 kWh/kg et dans une version Alcoa moderne du procédé, on dit n'utiliser que 11 kWh/kg. L'efficacité maximale pourrait se situer aux environs de 8,8 kWh/kg. Il existe un certain nombre de possibilités de modernisation qui augmenteraient l'efficacité des électrodes, notamment une meilleure conductivité des matériaux constituant l'anode, la récupération de la chaleur de fond, l'isolation accrue du four, une meilleure chimie électrolytique, de même que l'exploitation avec un ratio AlF₃ moins élevé. Selon la configuration de l'exploitation existante, les économies d'énergie pourraient aller jusqu'à 20 %, et les travaux de modernisation débouchent souvent sur une baisse des coûts de production.

Anodes passives et cathodes humides (production de l'aluminium) – Les anodes passives et les cathodes humides sont des technologies au stade de la précommercialisation qui, ensemble, pourraient éliminer du processus d'électrolyse les anodes au carbone et réduire les besoins en énergie. Les anodes

passives sont des conducteurs électriques cermet (céramique/métal) qui se détériorent très lentement et ne contiennent pas de carbone. Par cathodes humides, on entend les nouveaux types de cellules où les cathodes sont faites de nouveaux matériaux et où la distance anode-cathode est moindre. Cette innovation permet une meilleure évacuation de l'aluminium de même qu'un meilleur fonctionnement des cellules. La combinaison d'anodes passives et de cathodes humides a été étudiée au Lawrence Berkeley Laboratory et, d'après les projections, devrait réduire de 25 % au moins les besoins en énergie par rapport aux niveaux actuels.

Coulée en forme quasi-finale / bandes minces (aluminium) – Actuellement, les étapes de fonte et de laminage de la production d'aluminium sont un procédé multi-étapes où l'on coule les lingots, pour ensuite les transporter et les réchauffer avant de les laminier à la forme désirée. La coulée en bandes minces élimine la nécessité de réchauffer les lingots avant le laminage car le métal est immédiatement coulé en bandes très minces (1 mm à 10 mm; l'épaisseur actuelle du lingot est d'environ 120 mm à 300 mm). On parvient à réduire grandement la consommation d'énergie, car l'étape du réchauffage est éliminée.

Recyclage amélioré (aluminium) – Produire de l'aluminium avec des rebuts de recyclage et des produits d'aluminium usagés est à la fois moins énergivore et moins coûteux sur le plan de l'exploitation que la production d'aluminium primaire. Les procédés actuels de recyclage de l'aluminium commencent par le tri du métal de rebut, qu'on charge ensuite dans un four à fusion. On peut éliminer les contaminants du métal par pyrométallurgie, hydrométallurgie ou catalyse. Le métal de rebut, une fois traité, est chargé dans un four dont le type dépend de la qualité des rebuts : il existe divers types de fours.

Fusion en continu – La technique classique de traitement du cuivre, du nickel et des concentrés de sulfure de cuivre/nickel fondée sur des étapes distinctes de grillage, de fusion et de conversion ou sur le procédé de fusion au four à réverbère et de conversion est inefficace sur le plan de l'utilisation de l'énergie et de la fixation et de l'élimination du soufre. La combinaison de ces étapes en un procédé continu est depuis longtemps l'un des objectifs des ingénieurs en métallurgie. Nombre de technologies de fusion en continu sont relativement bien maîtrisées et sont utilisées dans certaines installations au Canada.

Fusion directe – La production de plomb primaire à partir de concentrés de plomb commence habituellement par le rôtissage du concentré dans une chaîne d'agglomération, qui donne de l'oxyde à réduire au coke dans un haut fourneau et qui passe ensuite par toute une série d'étapes de raffinage en creusets. Au cours des 20 dernières années, on a mis au point plusieurs procédés éconergiques, écologiques et nouveaux de fusion du plomb pyrométallurgique (c.à.d. les procédés Kivcet et QSL).

Hydrométallurgie – Dans les procédés hydrométallurgiques, on se sert d'une solution chimique acide qui dissout les minéraux et on extrait ensuite les métaux de la solution par lixiviation ou sous pression. Ce procédé est grandement utilisé pour l'extraction du zinc des minerais sous forme d'oxydes. On a souvent vu dans l'hydrométallurgie, pour traiter les sulfures métalliques, la réponse aux problèmes environnementaux propres à la pyrométallurgie (notamment les émissions atmosphériques d'anhydride sulfureux) et on pense que son rôle augmentera. Il existe de nombreux procédés commerciaux. L'hydrométallurgie du plomb suscite en outre un intérêt considérable depuis des années mais, jusqu'à maintenant, aucun procédé n'a été commercialisé.

3.6 Minéraux industriels

Analyseurs en direct (préparation préliminaire) – Les analyseurs en direct font appel à la technologie des microprocesseurs pour la lecture instantanée de la granulométrie, de la finesse et du débit massique. L'analyseur facilite la surveillance et le maintien de compositions uniformes de la farine crue, réduisant la nécessité de dispositifs mélangeurs énergivores et augmentant l'efficacité de combustion du four.

Systèmes mélangeurs de farine (préparation préliminaire) – La farine crue sèche peut être mélangée par gravité lorsqu'elle sort des silos de stockage par de multiples orifices. On peut ainsi économiser jusqu'à 2 kWh par tonne de farine crue mélangée, comparativement aux systèmes à air fluidisé.

Broyeurs à paliers élastiques (broyeurs) – Les broyeurs à paliers élastiques consomment de 10% à 15 % moins d'énergie que les broyeurs à boulets. Dans un broyeur à boulets, le broyage des matières premières se fait par impact et friction entre les corps broyants. Dans un broyeur à paliers élastiques, le broyage se fait par compression des matières premières entre les cylindres et une table. Dans les nouvelles installations des cimenteries, on utilise ce type de broyeurs.

Réchauffeurs (systèmes de four) – Les réchauffeurs à six étages cycloniques sont plus efficaces que les appareils à quatre étages cycloniques habituellement utilisés au Canada. Ces nouveaux systèmes réutilisent la chaleur des gaz de carneau et réduisent de 0,12 GJ/t la consommation totale de combustible. On mène d'autres recherches afin de réduire la chute de pression entre les cyclones tout en maintenant l'efficacité de séparation, ce qui devrait réduire la consommation d'électricité.

Précalcinateurs – Les précalcinateurs consomment jusqu'à 60 % du combustible brûlé dans un four. Les recherches pour parvenir à une combustion totale des combustibles à faible réactivité promettent de meilleurs rendements des futurs précalcinateurs.

Conception des fours – Voici des exemples d'améliorations globales de la conception des fours :

- a) Réduction du volume du four par un meilleur chauffage dans le précalcinateur. Les fours récemment installés ont des ratios longueur/diamètre réduits de 20 à 10, ce qui diminue énormément les pertes thermiques par rayonnement dans le corps du four (c.à.d. séchoirs courts).
- b) Le réchauffage de l'air primaire à l'aide des gaz résiduels au moyen de flammes de la forme appropriée et par la réduction des émissions d'oxydes d'azote augmente l'efficacité du brûleur du four.

Procédé sur lit fluidisé – Dans ce procédé, l'air surchauffé suspend les boulettes de matières premières au cours de leur passage sur la couche chaude du réacteur. Le mâchefer sortant du réacteur est refroidi à l'air. Le procédé sur lit fluidisé n'a pas connu un grand succès commercial (surtout parce qu'il consomme plus de combustible que les fours de réchauffage modernes).

Four à ciment perfectionné (FCP) – Dans ce four, on fait appel à un puits de réchauffage par lequel on achemine les matières premières à une chambre de combustion sur lit fluidisé. Dans leur ascension, les gaz de combustion réchauffent la matière première qui entre par le haut du puits, le long de son parcours vers le lit fluidisé. La matière première est suspendue dans la flamme sur le lit fluidisé et les boulettes de mâchefer sont acheminées par une chute vers un refroidisseur situé sous la chambre.

Refroidisseurs alternatifs à grilles (refroidissement du mâchefer) – Dans les cimenteries, on utilise habituellement des refroidisseurs planétaires ou des refroidisseurs alternatifs à grilles pour refroidir le

mâchefer. On préfère les refroidisseurs alternatifs à grilles parce qu'ils sont plus fiables et plus efficaces. Ces appareils ont été récemment améliorés par des grilles dotées de petits orifices. Ces grilles à petits orifices offrent plus de résistance aux matériaux et, par conséquent, permettent une répartition plus uniforme de l'air de refroidissement sur l'ensemble de la surface de la grille. De cette façon, l'air de combustion secondaire est plus chaud, et on obtient une plus grande efficacité du combustible. Parmi les autres perfectionnements apportés aux refroidisseurs à grilles, il faut mentionner le recours à des refroidisseurs à air pulsant et à des broyeurs à cylindres intermédiaires au lieu d'un broyeur au point de déversement.

Broyeurs à paliers élastiques (broyage de finition) – Les broyeurs à paliers élastiques pourraient à l'avenir remplacer les broyeurs à boulets comme principale technique de broyage de finition. Les presses à cylindres, déjà utilisées dans certaines usines avec des broyeurs à boulets, accomplissent le broyage préalable du mâchefer avant son entrée dans le broyeur à boulets. On fait actuellement l'essai de presses à cylindres pour remplacer les broyeurs à boulets; il reste à régler certains problèmes techniques liés à la qualité du ciment. Le mâchefer broyé uniquement à la presse à cylindres exige plus d'eau, a un temps de prise plus court et est moins maniable. Les spécialistes de l'industrie pensent qu'en poursuivant les recherches, on surmontera ces problèmes. Les possibilités d'économies en énergie électrique sont considérables.

Séparateurs haute efficacité (broyage de finition) – Ces techniques réduisent la consommation énergétique en abrégant le temps de recyclage de la matière broyée et en évitant le sur-broyage. Dans un système de broyeurs en circuit fermé, le séparateur classique de seconde génération recycle jusqu'à 60 % du produit pour broyage supplémentaire, procédé qui gaspille de l'énergie et nuit à la qualité du produit. Un perfectionnement récent : le flux d'air de la zone de séparation d'un séparateur haute efficacité est horizontal plutôt que vertical, contrairement à un séparateur classique. Cela donne un plus grand délai de rétention pour la zone de séparation et donc, une séparation plus efficace des particules. Le procédé peut réduire la consommation d'énergie de 8 % et augmenter la production de 15 % dans les grandes installations, après modernisation par intégration de cette technologie.

Broyeurs verticaux à paliers élastiques (broyage de finition) – Il s'agit de broyeurs mis au point par la société Pfeiffer (Allemagne) et installés à son usine de Teutonia, en Allemagne. Comme le ciment produit par la cimenterie pose des problèmes de qualité en raison de besoins d'eau plus élevés pour le ciment fini, ce qui affecte la dureté du béton, les progrès de cette technologie ont été lents. La recherche-développement sur la technologie des broyeurs à paliers élastiques pourrait surpasser les progrès accomplis dans cette technologie.

Systèmes intelligents – On a recours à des systèmes informatiques peu coûteux pour mettre en place des systèmes de commande de haut niveau permettant des délais de réaction plus rapides des fours en fonction des conditions d'exploitation. Ces appareils sont appelés « systèmes intelligents ». Actuellement, 8 usines sur 10 au Canada en sont dotés. Voici quelques-uns de leurs avantages :

- moindre consommation de combustible spécifique (2 à 3 %) en raison d'un meilleur contrôle de la combustion;
- traitement réagissant aux fluctuations dans le four;
- meilleure stabilité thermique du four en régime, d'où une plus grande durée du matériau réfractaire et une granulométrie cristalline plus uniforme des composés du mâchefer;

- meilleurs taux de production par régulation adéquate du procédé;
- réduction de 2 % à 4 % de la consommation d'énergie électrique.

3.7 Produits chimiques

Bon nombre des technologies actuelles de l'industrie peuvent être considérées comme « bien maîtrisées »; on peut dire que les possibilités d'amélioration majeure de l'efficacité énergétique sont minimales. On a déjà grandement recours à la cogénération pour satisfaire à la demande de chaleur et d'électricité dans cette industrie. La plus grande part du temps et des fonds disponibles pour la recherche et le développement est consacrée à la mise au point de produits chimiques nouveaux ou de remplacement.

Voici une liste de technologies ou procédés nouveaux et naissants qui offrent des possibilités de réduction appréciable de la consommation énergétique. Il est difficile d'obtenir des renseignements détaillés sur des technologies nouvelles ou plus efficaces car, souvent, les entreprises qui les mettent au point souhaitent garder l'information confidentielle.

Procédé ALCET – Dans la production de l'éthylène, le naphte, habituellement utilisé en charge d'alimentation départ, est d'abord craqué à 1 590° C sous une pression de 200 kPa et l'éthylène est récupéré à basse température (29,4° C) sous une pression de 3 792 kPa. Le procédé ALCET élimine le système de réfrigération de l'éthylène et du méthane et le remplace par un système moins coûteux d'absorption par solvant. Ce procédé réduit de 25 % les coûts d'immobilisation en équipement et de 10 % les besoins en énergie.

Méthanol – Dans une nouvelle méthode de production du méthanol, on utilise un gaz de synthèse composé de dioxyde de carbone, de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Le dioxyde de carbone, qui provient surtout des gaz résiduels issus du brûlage des combustibles fossiles, fournit le carbone. Le méthane se forme lorsque les gaz entrent en contact avec un catalyseur spécifique Cu/ZnO, catalyseur breveté mis au point par Lurgi. La formation du méthane est favorisée à faible température et à pression élevée. Le catalyseur choisi est actif à des températures inférieures à 200° C, puis il produit de la vapeur haute pression qui rend possible la production d'électricité par cogénération. Cette activité de cogénération, nécessité économique dans la plupart des cas, permet de réduire la consommation d'énergie d'environ 20 % par rapport au procédé conventionnel.

Nouveaux catalyseurs – Les catalyseurs réduisent l'énergie d'activation nécessaire à une réaction; on les utilise dans la production de la plupart des produits chimiques. D'énormes progrès ont été accomplis dans la compréhension des mécanismes moléculaires sous-jacents, ce qui a eu un effet exponentiel sur la mise au point de nouveaux systèmes catalytiques susceptibles de permettre une plus grande efficacité énergétique des processus chimiques.