

CHAPITRE 3

Les innovations qui révolutionnent notre consommation d'énergie

Dans le cadre des négociations internationales sur les changements climatiques comme celle de la Conférence de Paris, l'approche privilégiée est centralisée, ou « top-down » en anglais. De même, lorsque les gouvernements imposent une réglementation ou allouent des subventions, les décisions sont centralisées. Nous avons cependant vu au chapitre précédent que les politiques qui utilisent les mécanismes de marché sont plus efficaces parce qu'elles permettent justement de décentraliser les décisions.

Une tendance encourageante, et trop peu considérée, se dessine dans les entreprises et les institutions : celle d'innover constamment pour répondre au désir des populations de limiter les émissions de GES. Ce chapitre porte donc sur des réalités nouvelles qui pourraient bien changer le portrait des émissions de GES dans les prochaines années et les prochaines décennies¹⁴². Bien qu'il soit parfois difficile d'en mesurer la portée parce qu'elles ne sont pas déterminées par les gouvernements, les solutions émergentes et décentralisées peuvent être particulièrement efficaces.

Cette tendance s'illustre mieux lorsqu'on considère non pas le niveau des émissions globales, mais les facteurs qui déterminent ce niveau, comme l'intensité énergétique et l'intensité en carbone. Les émissions de GES par habitant des différents pays du monde peuvent se comprendre comme le résultat d'une combinaison de trois facteurs : le niveau de vie des habitants, l'intensité énergétique et l'intensité en carbone. C'est ce que présente l'identité de Kaya, une relation utilisée par le GIEC pour ses scénarios d'émissions de GES, que l'on peut représenter schématiquement ainsi :

On comprend de cette relation que la croissance des émissions de GES est dépendante de la variation de chacun de ces facteurs. Les politiques gouvernementales d'atténuation de GES adoptées et proposées pour limiter les changements climatiques imposent directement un prix sur le carbone, au moyen d'une taxe ou d'un marché d'échange de droits d'émissions, par exemple. Les règlements et normes environnementales imposés par les gouvernements affectent un facteur d'émissions de GES, soit l'intensité en carbone, tout comme les subventions aux énergies renouvelables.

Les mécanismes de marché, quant à eux, affectent les émissions de GES en permettant de créer de la richesse, c'est-à-dire en améliorant le niveau de vie, mais aussi en influençant l'intensité énergétique et l'intensité en carbone.

La réduction de l'intensité énergétique dans le monde

Les différents marchés, à l'aide des incitations fournies par les mécanismes de prix, permettent aux ressources – notamment l'énergie – d'être allouées de manière optimale selon les besoins des membres de la société. Pour répondre à la demande de leurs consommateurs, les entreprises cherchent naturellement à minimiser leurs coûts et donc à utiliser le moins de ressources et d'énergie par unité produite. Notre capacité à en faire plus avec moins d'énergie, ou la capacité d'effectuer le même travail avec une quantité moindre d'énergie, est ce que l'Agence internationale de l'énergie (AIE) appelle « l'efficacité énergétique »¹⁴³.

L'intensité énergétique, qui mesure la quantité d'énergie primaire utilisée par unité de PIB, est une bonne estimation de l'efficacité énergétique. Plus une économie est efficiente, moins elle utilise d'énergie par dollar de

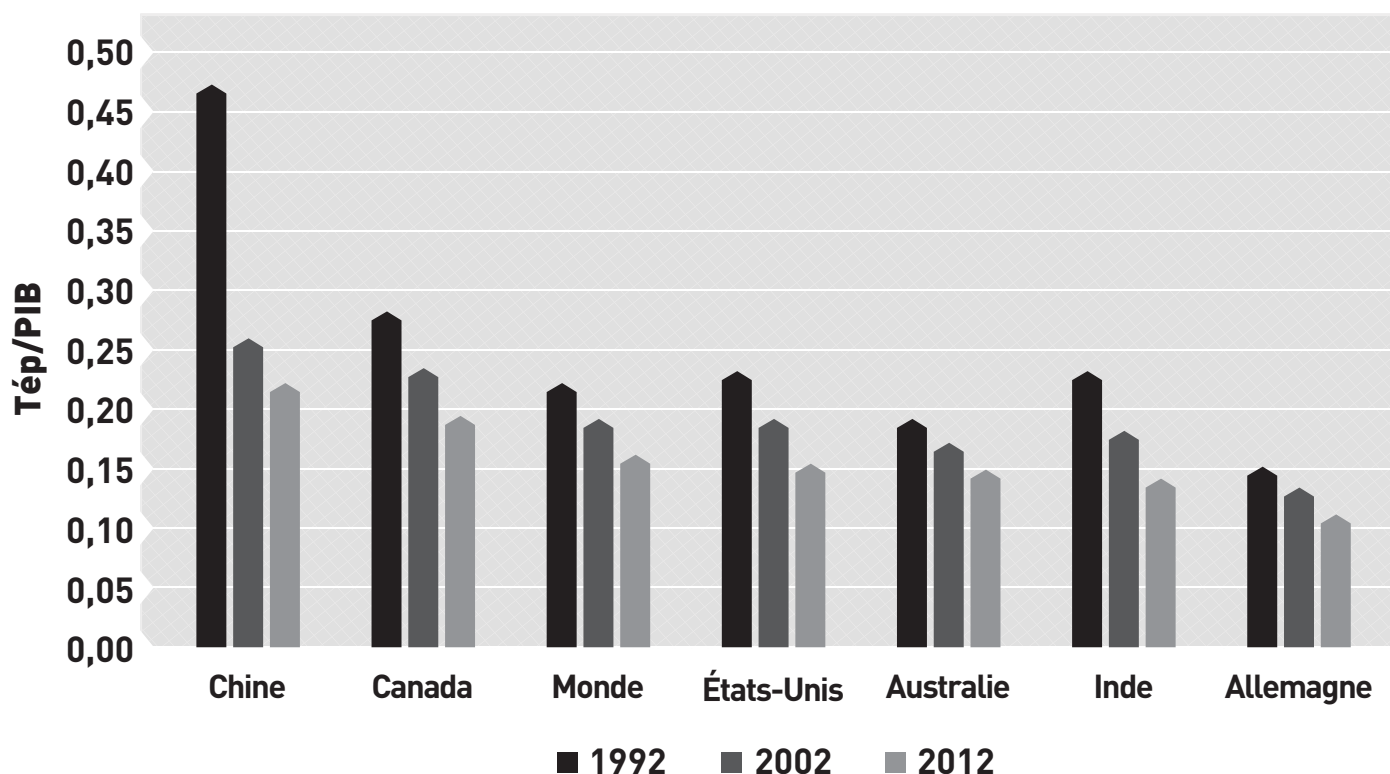
$$\text{GES/habitant} = \boxed{\text{Niveau de vie (PIB/Population)}} \times \boxed{\text{Intensité énergétique (Énergie/PIB)}} \times \boxed{\text{Intensité en carbone (Émissions/Énergie)}}$$

142. Agence France-Presse, « Dix poids lourds du pétrole et du gaz s'unissent pour le climat », *La Presse*, 16 octobre 2015.

143. Agence internationale de l'énergie, *Energy efficiency*.

Figure 3-1

Intensité énergétique en tonnes d'équivalent pétrole par millier de dollars US, 1992-2012



Note : Il s'agit de dollars US de 2005, ajustés pour la parité du pouvoir d'achat.

Sources : Agence internationale de l'énergie, Statistics, Report; Agence internationale de l'énergie, *Energy Efficiency Market Report 2014: Market Trends and Medium-Term Prospects*, 2014, p. 210.

PIB. La Figure 3-1 montre ainsi que l'intensité énergétique diminue avec le développement économique, tant chez les pays riches que chez les pays émergents. L'évolution de la Chine à cet égard a été spectaculaire, l'intensité énergétique y ayant diminué de moitié en 20 ans. À l'échelle mondiale, l'intensité énergétique a diminué à un rythme annuel de 1,25 % entre 1990 et 2013¹⁴⁴.

L'intensité énergétique n'est pas une mesure parfaite de l'efficacité énergétique puisqu'elle ne tient pas compte de la structure et de la taille de l'économie ainsi que du climat de la région. À titre d'exemple, une économie basée sur les services dans un climat doux aura une intensité énergétique plus faible qu'une économie basée sur le secteur manufacturier dans un climat froid, même s'il est possible qu'elle utilise son énergie de façon moins efficiente¹⁴⁵.

L'AIE tente d'ailleurs depuis quelques années de calculer plus précisément l'efficacité énergétique. Elle estime ainsi quelle aurait été la consommation d'énergie si la richesse et la population avaient crû au même rythme, mais sans les avancées technologiques améliorant la consommation de l'énergie dans les bâtiments, les machines, les véhicules et même les ampoules électriques¹⁴⁶.

L'énergie ainsi économisée grâce aux gains d'efficacité énergétique des nouvelles façons de faire est substantielle. L'AIE estime qu'en 2011, pour un échantillon de 11 pays, l'ensemble de la consommation d'énergie évitée grâce aux améliorations technologiques depuis 1973 s'élevait à 1337 millions de tonnes d'équivalent pétrole. Comme l'indique la Figure 3-2, cette économie est plus grande que la consommation finale de n'importe quelle forme d'énergie.

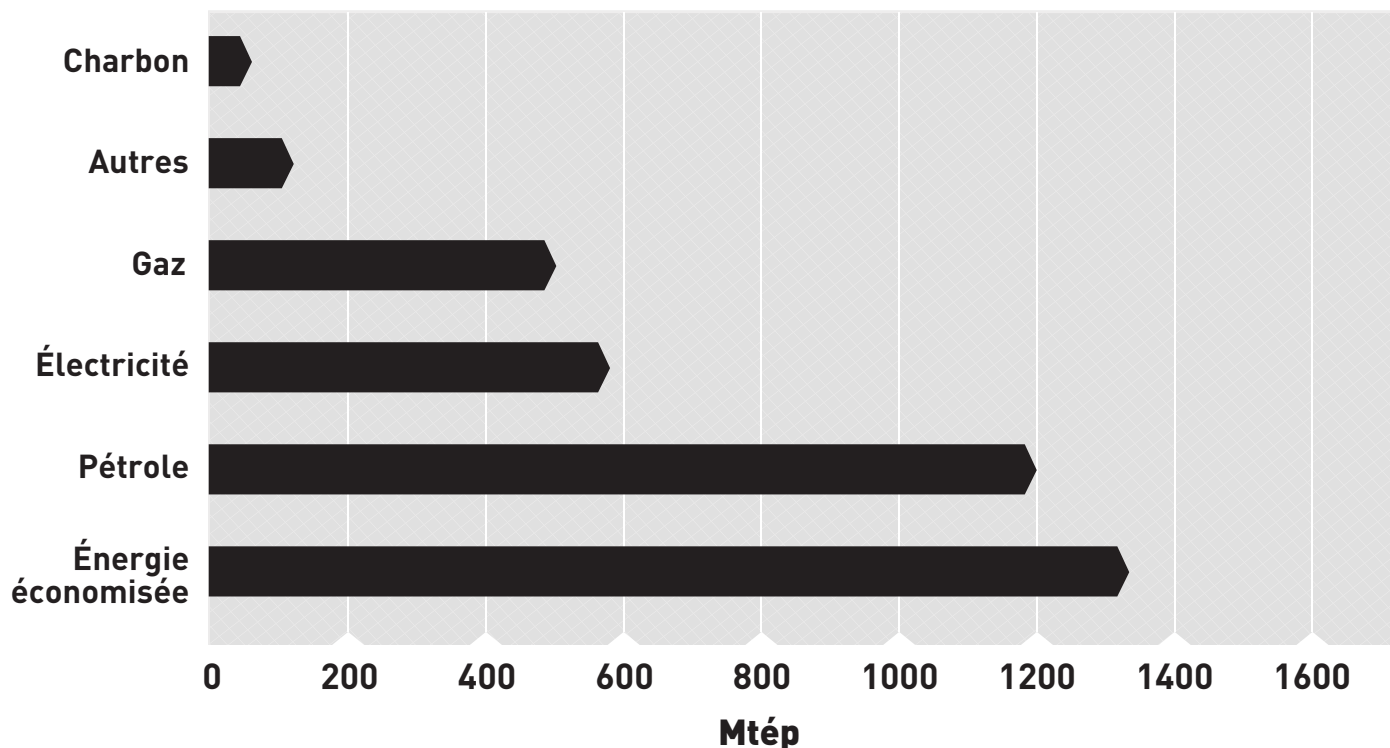
144. Ren21, *Renewables 2015 Global Status Report*, 2015, p. 114.

145. Agence internationale de l'énergie, *Energy Efficiency Indicators: Fundamentals on Statistics*, p. 19.

146. Agence internationale de l'énergie, *Energy Efficiency Market Report 2014 Market Trends and Medium-Term Prospects*, 2014, p. 26.

Figure 3-2

Énergie économisée en raison des gains d'efficacité en comparaison de la consommation de diverses formes d'énergie, en millions de tonnes d'équivalent pétrole, 2011



Note : Les onze pays évalués sont l'Australie, le Danemark, la Finlande, la France, l'Allemagne, l'Italie, le Japon, les Pays-Bas, la Suède, le Royaume-Uni et les États-Unis.
Source : Agence internationale de l'énergie, *Energy Efficiency Market Report 2014: Market Trends and Medium-Term Prospects*, 2014, p. 26-27.

Ces gains d'efficacité ont deux effets contradictoires sur les émissions de GES. Premièrement, une moins grande quantité d'énergie par unité de production se traduit évidemment, toutes choses étant égales par ailleurs, par une réduction des émissions.

Par contre, utiliser moins d'énergie par unité de production ne signifie pas nécessairement qu'on utilisera moins d'énergie. L'énergie libérée permet aussi de produire davantage avec la même quantité de ressources. Cette production accrue peut donc venir annuler en partie ou en totalité l'effet des gains d'efficacité. L'énergie épargnée et utilisée à d'autres fins est un phénomène que les économistes appellent « l'effet rebond ». Les différents rapports de l'AIE estiment que cet effet rebond serait de l'ordre de 9 à 30 %¹⁴⁷, mais il pourrait être plus élevé¹⁴⁸.

Il est aussi possible qu'on utilise davantage d'énergie puisque les gains d'efficacité la rendent plus abondante et diminuent son coût marginal d'utilisation. L'effet total sur les émissions de GES dans l'atmosphère est donc incertain.

« Une tendance encourageante, et trop peu considérée, se dessine dans les entreprises et les institutions : celle d'innover constamment pour répondre au désir des populations de limiter les émissions de GES. »

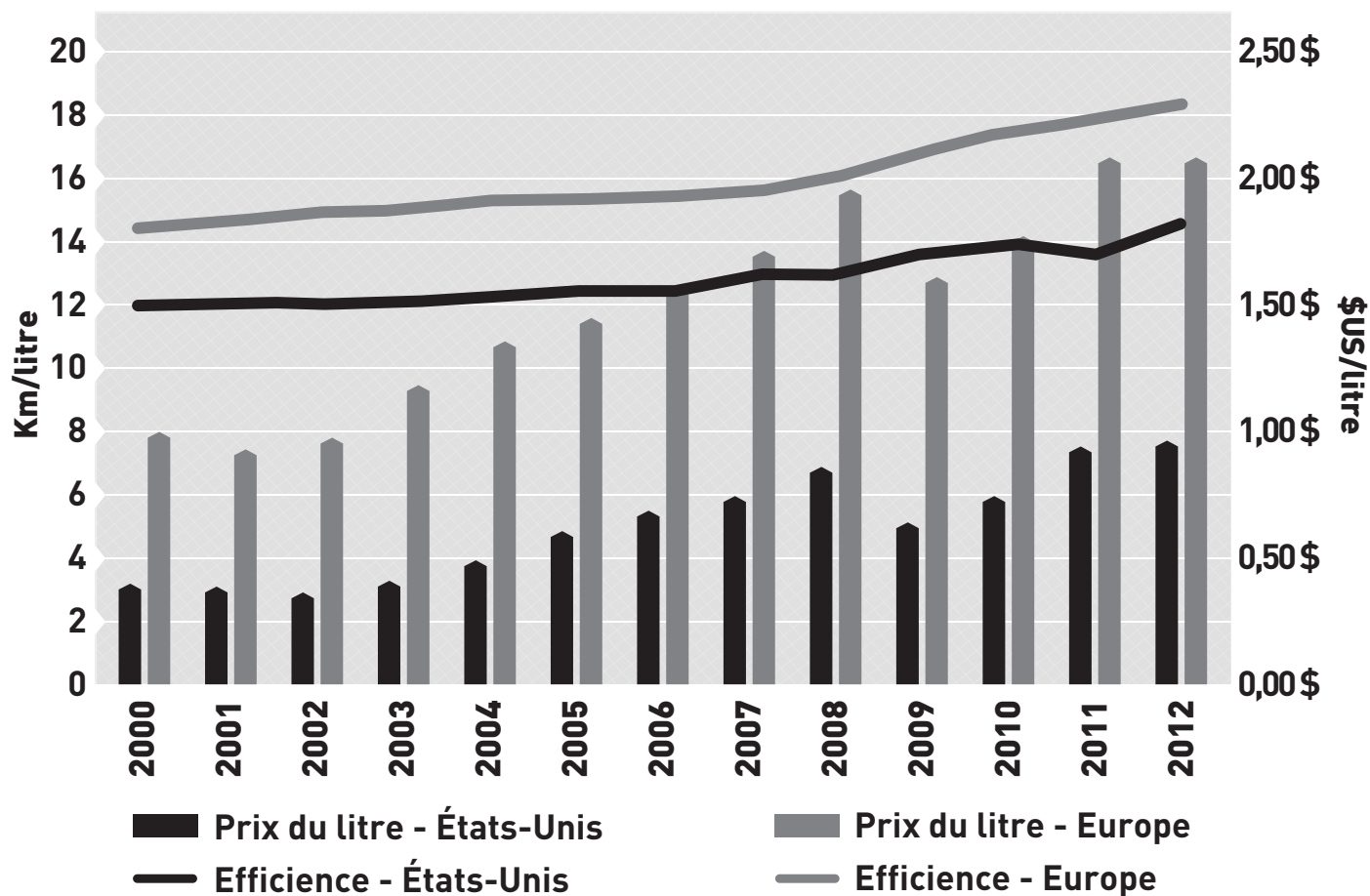
L'intensité énergétique des automobiles donne une illustration concrète d'un effet rebond élevé, qui peut même dépasser 100 %. Les avancées technologiques des dernières décennies, notamment dans le choix des matériaux utilisés, ont considérablement réduit la quan-

147. *Ibid.*, p. 27.

148. Harry D. Saunders, « Recent Evidence for Large Rebound: Elucidating the Drivers and Their Implications for Climate Change Models », *The Energy Journal*, vol. 36, no 1, 2015, p. 23-48.

Figure 3-3

Prix de l'essence et efficacité moyenne des véhicules en Europe et aux États-Unis



Sources : The International Council on Clean Transportation, Global Transportation Roadmap Model, Data Tables, August 2015; European Environment Agency, Nominal and real fuel prices, July 2015; U.S. Energy Information Administration, Petroleum and Other Liquids, Data, U.S. All Grades All Formulations Retail Gasoline Prices, 2015; CanadianForex, Yearly Average Exchange Rates for Currencies.

tité d'énergie nécessaire pour parcourir un kilométrage donné. Cependant, aux États-Unis, les économies d'énergie associées à ce gain d'efficacité ont été plus que compensées par l'achat de véhicules dont la masse et la puissance ont augmenté et par un kilométrage annuel parcouru plus élevé. Les véhicules américains consommaient ainsi 35 % plus d'énergie en 2000 qu'en 1980 malgré le gain d'efficacité¹⁴⁹.

Les gains d'efficacité sur le marché de l'automobile représentent une tendance qui se vérifie partout à travers le monde¹⁵⁰. Il est cependant difficile de déterminer avec précision quel facteur prédomine entre les normes

imposées par le gouvernement et la demande des consommateurs pour des véhicules plus efficaces, qui est influencée par l'augmentation générale du prix de l'essence.

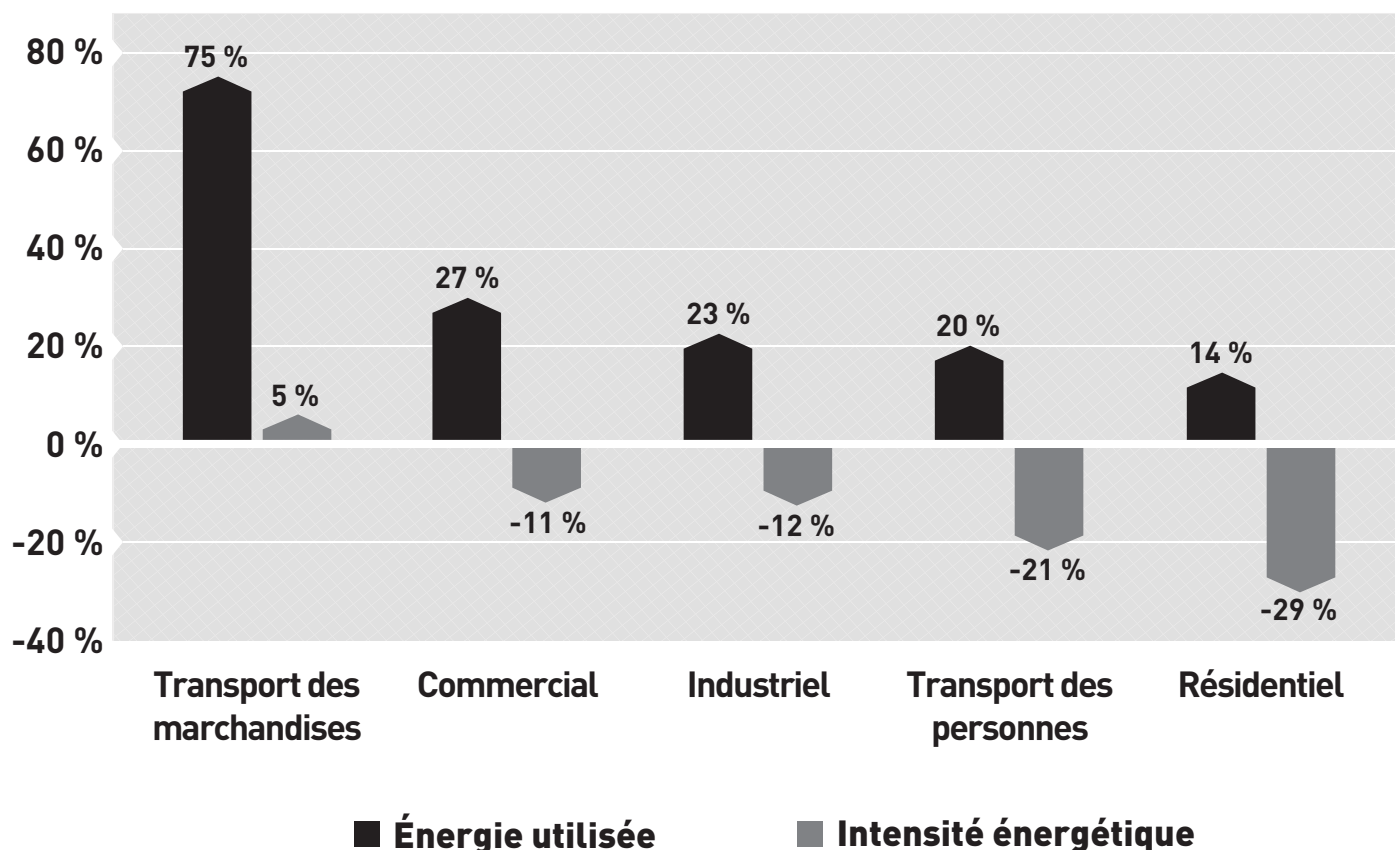
La Figure 3-3 illustre l'évolution des prix de l'essence en Europe et aux États-Unis ainsi que l'efficacité énergétique moyenne des véhicules, mesurée en kilométrage parcouru par litre d'essence. Il n'est pas étonnant que les voitures achetées en Europe parcourent en moyenne un kilométrage par litre 26 % supérieur à celui des voitures achetées aux États-Unis, étant donné que le prix de l'essence y a été en moyenne 137 % plus élevé de 2000 à 2012.

149. Vaclav Smil, *Energy at the Crossroads: Global Perspectives and Uncertainties*, The MIT Press, février 2005, p. 333.

150. Agence internationale de l'énergie, *op. cit.*, note 146, p. 72.

Figure 3-4

Variation de l'énergie utilisée et de l'intensité énergétique par secteur au Canada, 1990-2011



Source : Ressources naturelles Canada, *Cahier d'information : les marchés de l'énergie—2014-2015*, p. 88.

La tendance vers une plus grande efficacité s'applique à plusieurs secteurs au Canada. La Figure 3-4 illustre la relation entre l'énergie utilisée et l'intensité énergétique au Canada pour les secteurs industriel (foresterie, mines, manufacture, construction), résidentiel, commercial et du transport personnel et commercial. On constate que plus l'intensité énergétique diminue (à cause de gains d'efficacité), plus la croissance de l'énergie totale utilisée est faible. Cette tendance nous démontre l'importance d'être plus efficace sur le plan énergétique, quel que soit l'ampleur de l'effet rebond.

Malgré ces gains d'efficacité, l'augmentation de la richesse et de la population, et dans une moindre mesure l'effet rebond, permettent d'expliquer pourquoi la consommation d'énergie mondiale a considérablement augmenté au cours des 40 dernières années.

La comparaison de l'évolution de la consommation d'énergie primaire entre les pays développés et émergents nous permet de comprendre pourquoi un accord

international sur le climat devra nécessairement inclure ces derniers. La Chine et l'Inde ont vu leur consommation primaire d'énergie augmenter de 957 % et 736 % respectivement depuis 1974, tandis que l'augmentation a été beaucoup plus modeste dans les pays développés. En Allemagne, il y a même eu une baisse de la consommation de 6 % sur la même période (voir Figure 3-5).

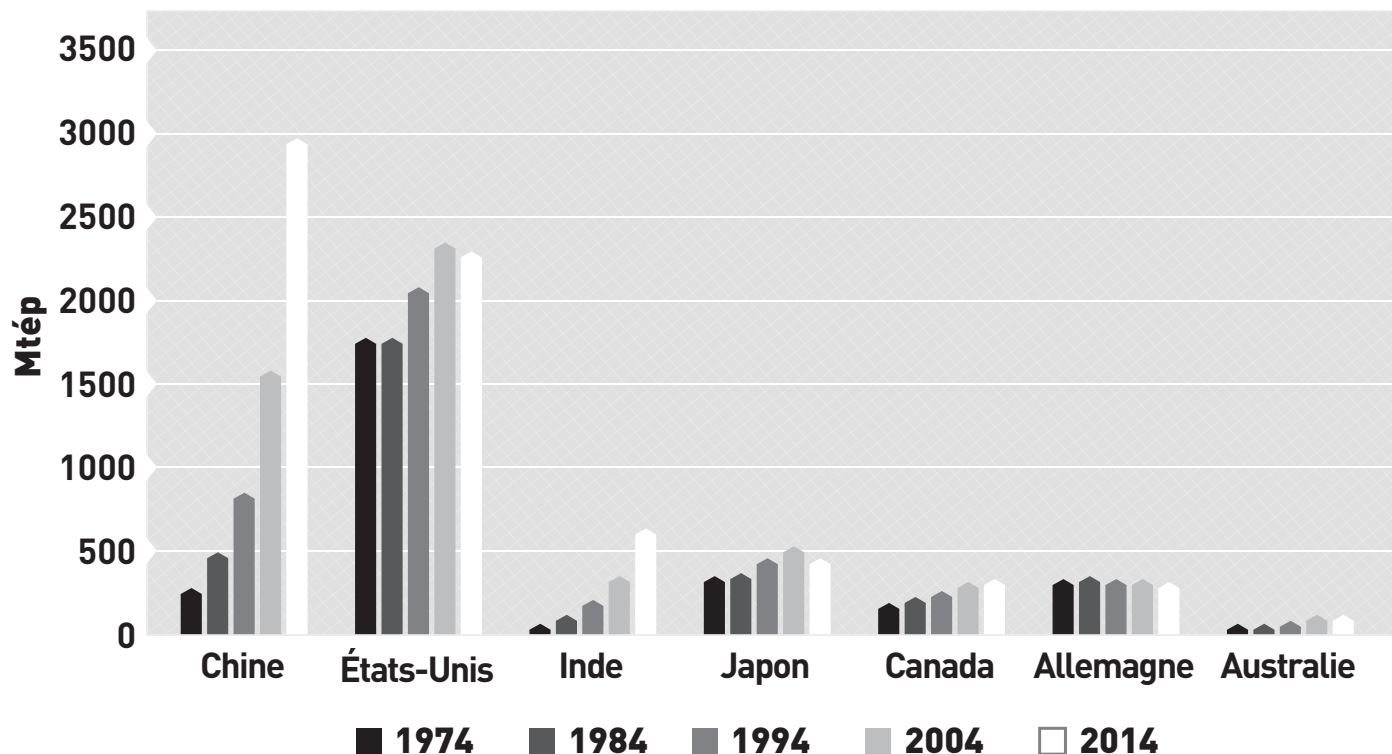
En Occident, la consommation d'énergie primaire a été relativement stable au cours des 15 dernières années (voir Figure 3-6). D'ailleurs, cette tendance devrait se poursuivre selon l'AIE, qui prévoit par exemple que « les pays développés ne consommeront pas plus de pétrole en 2020 qu'aujourd'hui »¹⁵¹.

Dans le même ordre d'idée, la consommation d'énergie primaire par habitant dans les pays développés stagne, voire même décline, depuis le début des années 1970

151. André Pratte, « Le monde change... lentement », *La Presse*, 10 février 2015.

Figure 3-5

Évolution de la consommation primaire d'énergie en millions de tonnes d'équivalent pétrole, 1974-2014



Source : BP, Data Workbook – Statistical Review 2015, Primary Energy: Consumption – Mtoe (from 1965), juin 2015.

(voir Figure 3-7). Comme le souligne l’AIE dans un constat d’un rare optimisme, « le contexte technologique et économique a changé, et cela change tout »¹⁵². Les normes environnementales exigeantes, l’effet d’Internet sur le commerce de détail et le vieillissement de la population – les personnes âgées utilisant moins les automobiles – sont trois facteurs identifiés comme des tendances lourdes et positives¹⁵³.

« Les gains d’efficience sur le marché de l’automobile représentent une tendance qui se vérifie partout à travers le monde. »

Il est donc encourageant de constater que les manières plus efficaces d’utiliser l’énergie font en sorte que l’énergie utilisée par habitant tend à se stabiliser avec la

prospérité. De plus, à partir d’un certain niveau de richesse, la taille moyenne des ménages diminue, ce qui a pour effet de freiner la croissance de la population¹⁵⁴ et donc des émissions.

La diminution de l’intensité énergétique et l’impact positif sur les émissions que cela représente ne donnent cependant pas l’ensemble du portrait. Il faut aussi mesurer les émissions produites par rapport à l’énergie utilisée.

L’intensité en carbone dépend des énergies utilisées

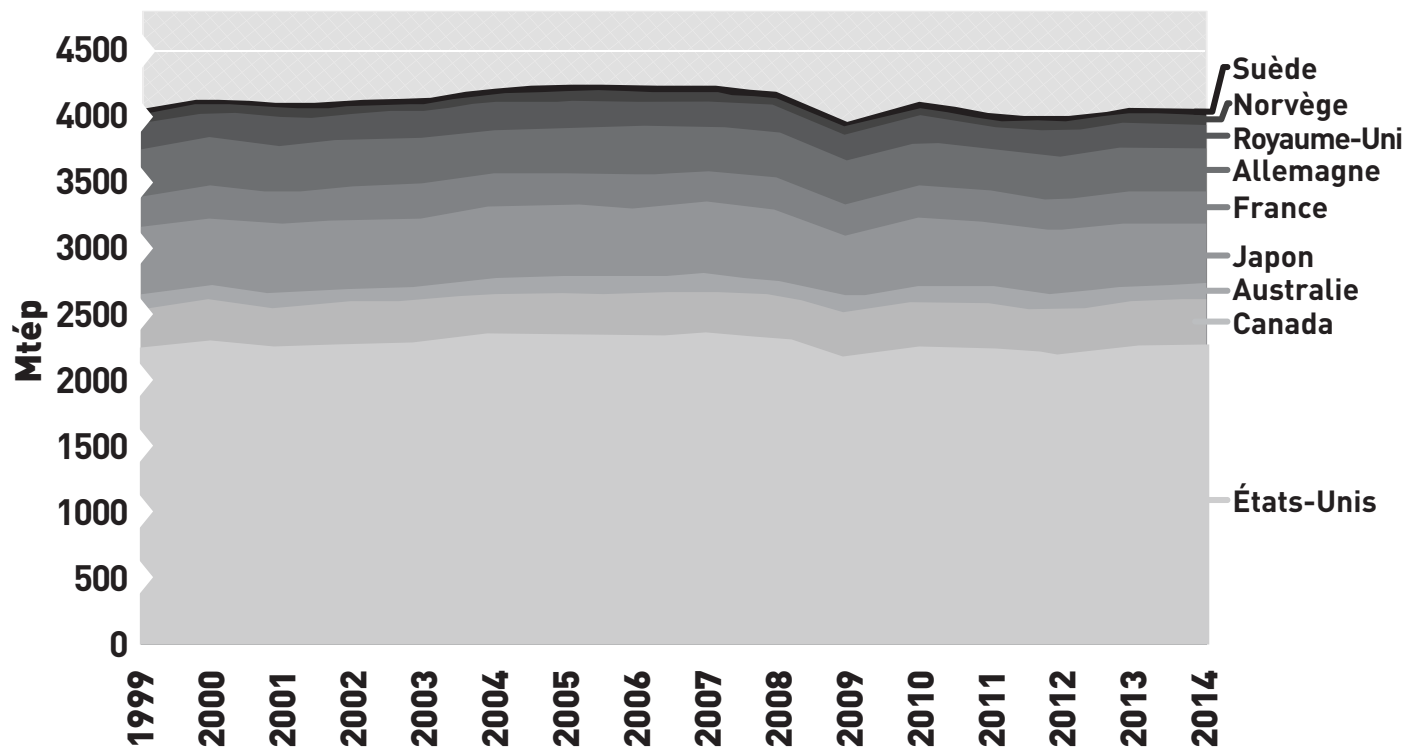
L’intensité en carbone se définit comme le ratio des émissions de dioxyde de carbone par unité d’énergie utilisée. L’évolution technologique et le prix des ressources énergétiques jouent un rôle prépondérant dans

152. *Idem.*
153. *Idem.*

154. Indur M. Goklany, *The Improving State of the World: Why We’re Living Longer, Healthier, More Comfortable Lives on a Cleaner Planet*, Cato Institute, 2007.

Figure 3-6

Évolution de la consommation primaire d'énergie des pays développés en millions de tonnes d'équivalent pétrole, 1999-2014



Source : BP, Data Workbook – Statistical Review 2015, Primary Energy: Consumption – Mtoe (from 1965), juin 2015.

le choix de l'énergie utilisée et donc dans l'intensité en carbone. Toute chose étant égale par ailleurs, on utilisera les ressources qui nous donnent une quantité donnée d'énergie à un moindre coût. Les ressources naturelles qui sont les plus avantageuses à exploiter déterminent donc le niveau d'émissions de GES lié à la consommation d'énergie.

On a commencé à utiliser le charbon à grande échelle vers le milieu du 19^e siècle, ce qui a marqué le début de l'ère actuelle où les combustibles fossiles ont presque totalement remplacé les énergies renouvelables. En effet, avant l'utilisation massive des combustibles fossiles, la plupart des sociétés dépendaient de la combustion de biomasse (brindilles de bois, résidus de récolte ou fumier), des énergies éolienne (bateaux à voile et moulins à vent) et hydraulique (moulins à eau) pour compléter le travail musculaire humain et animal¹⁵⁵.

La croissance économique associée à la révolution du charbon s'est accompagnée d'une augmentation proportionnelle des émissions de GES¹⁵⁶.

Le fait que le charbon demeure toujours la source d'électricité la moins coûteuse n'est pas étranger à la croissance faramineuse de la consommation de charbon au cours des dernières décennies. Le charbon a été partiellement remplacé par le pétrole et le gaz naturel au début du 20^e siècle, mais depuis plusieurs décennies, sa consommation augmente plus vite que celle des autres carburants fossiles¹⁵⁷. Depuis 2004, les émissions de CO₂ provenant de la combustion de charbon ont d'ailleurs surpassé celles provenant du pétrole (voir Figure 3-8).

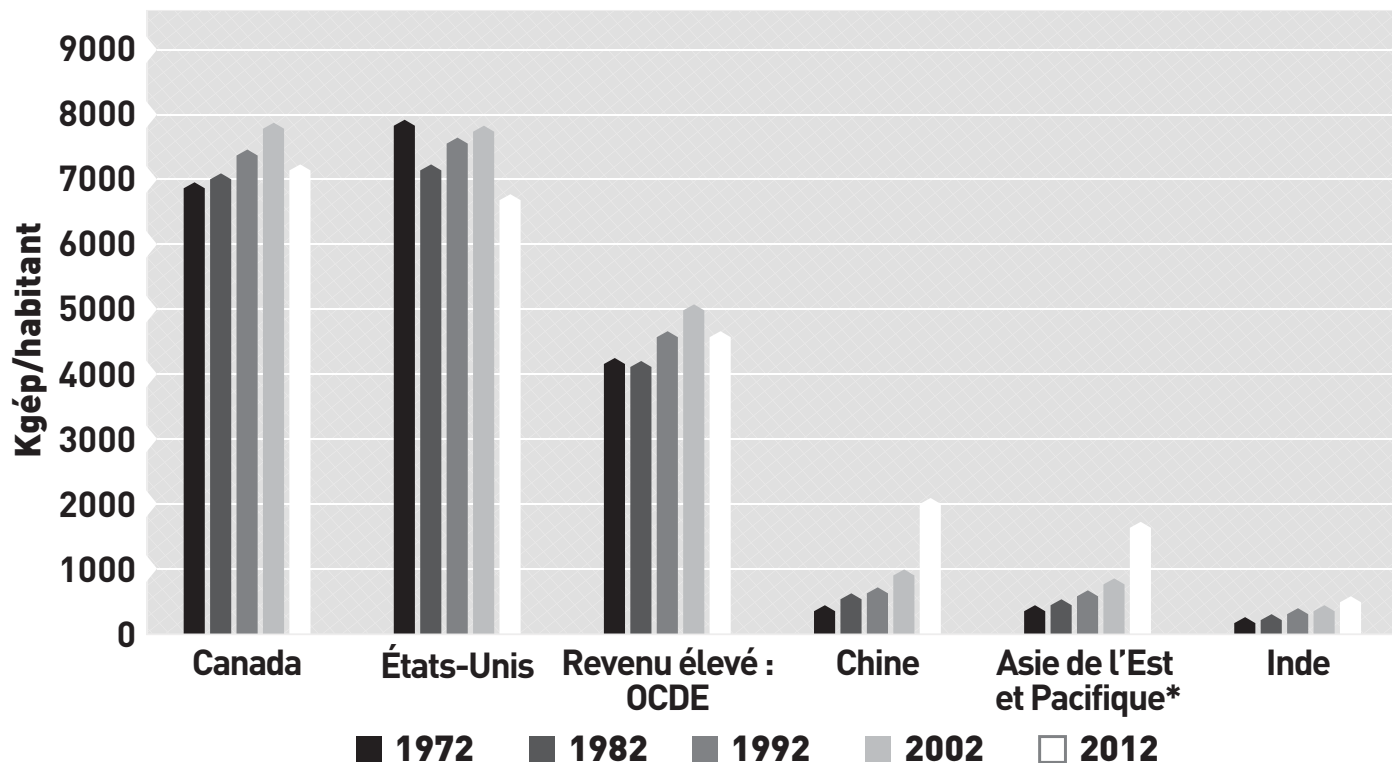
155. Pierre Desrochers et Hiroko Shimizu, *Comment l'innovation rend les sables bitumineux de l'Alberta plus verts*, Cahier de recherche, Institut économique de Montréal, octobre 2012, p. 9.

156. Indur M. Goklany, « Humanity Unbound: How Fossil Fuels Saved Humanity from Nature and Nature from Humanity », Policy Analysis no 715, Cato Institute, décembre 2012, p. 3.

157. BP, Statistical Review—Data Workbook, juin 2015.

Figure 3-7

Évolution de la consommation primaire d'énergie en kilogrammes d'équivalent pétrole par habitant, 1972-2012



* Ne comprend que les pays en développement.

Source : Banque mondiale, Indicateurs, Utilisation d'énergie (kg d'équivalent pétrole par habitant), octobre 2015.

Il n'est donc pas étonnant que les économies des pays émergents, dont la croissance dépend toujours du charbon, présentent une intensité en carbone croissante. Comme le montre la Figure 3-9, la Chine¹⁵⁸ et l'Inde émettent davantage de CO₂ par unité d'énergie utilisée qu'au début des années 1970, contrairement aux pays développés qui en émettent moins.

« Une véritable révolution énergétique est en cours et elle pourrait s'accélérer advenant une utilisation accrue d'énergies et de technologies neutres en carbone. »

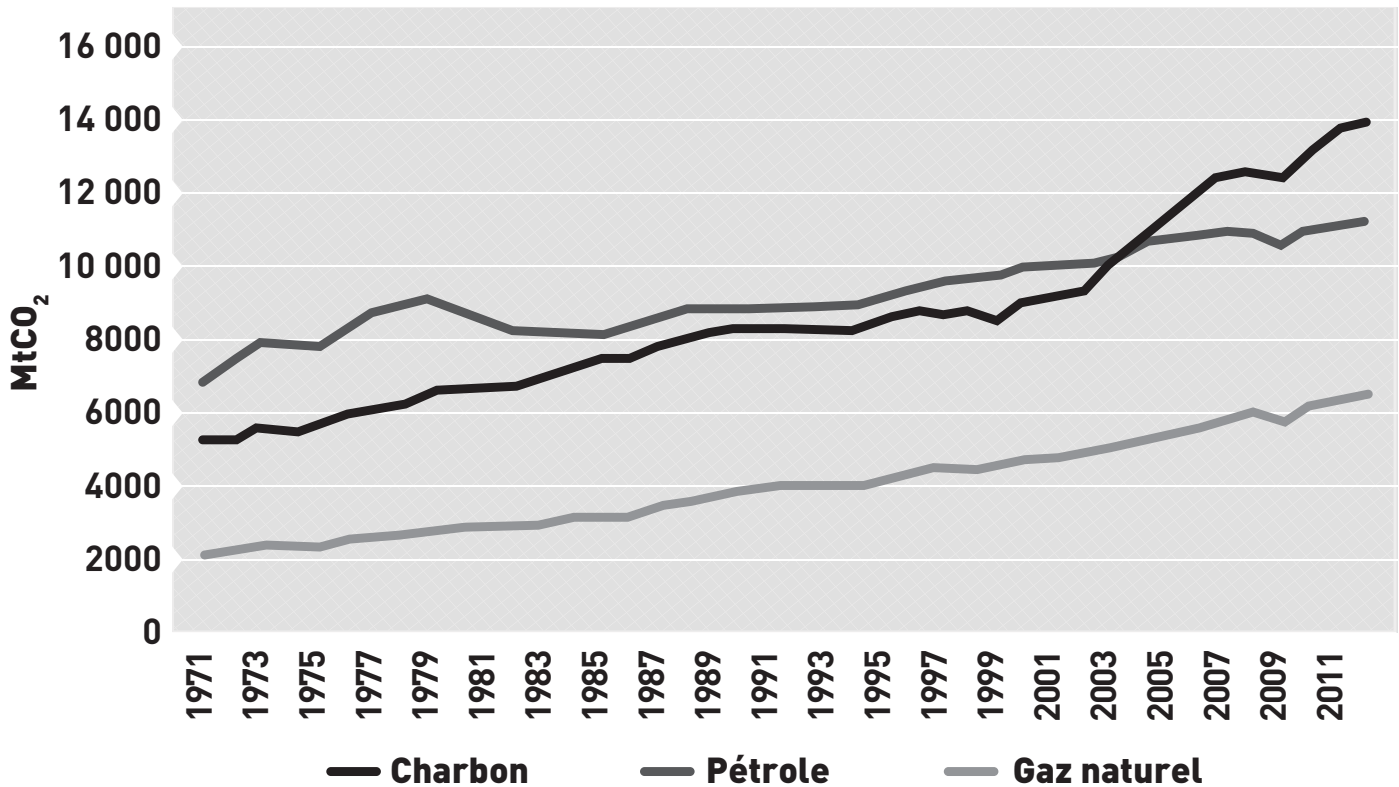
Les cinq pays ayant la plus forte croissance des émissions de CO₂ par kg d'équivalent pétrole pour la période 1971-2011 sont le Cameroun, l'Angola, le Bénin, le Vietnam et le Népal, tous des pays en développement (voir Figure 3-10). Ces cinq pays ont vu leur intensité énergétique augmenter en moyenne de 188 %, tandis que la zone euro, le Canada et les États-Unis l'ont réduite de 15 %, 6 % et 3 % respectivement, durant la même période.

L'évolution technologique et les nouvelles façons de faire peuvent aussi avoir un impact positif sur les émissions de GES. Aux États-Unis, au cours des dix dernières années, la fracturation hydraulique et le forage horizontal ont permis l'exploitation de gisements de gaz de schiste qui n'étaient pas rentables économiquement auparavant. Ces avancées technologiques ont eu un impact remarquable sur les prix du gaz naturel en Amérique du Nord. En effet, l'écart entre le prix du gaz

158. Cependant, la consommation et la production de charbon en Chine ont diminué respectivement de 2,9 % et de 2,5 % en 2014. Voir Timothy Puko et Chuin-Wei Yap, « Falling Chinese Coal Consumption and Output Undermine Global Market », *The Wall Street Journal*, 26 février 2015.

Figure 3-8

Évolution des émissions mondiales en millions de tonnes de CO₂, 1971-2012



Source : Agence internationale de l'énergie, CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights 2014, Excel tables.

naturel aux États-Unis et les prix qui prévalent en Europe et au Japon s'est considérablement creusé depuis 2008 (voir Figure 3-11).

L'utilisation du gaz naturel émet moins de CO₂ que l'utilisation du charbon pour une même quantité d'énergie¹⁵⁹. Comme ce fut le cas au début du 20^e siècle lorsque des énergies fossiles moins polluantes ont été substituées au charbon, l'abondance de gaz naturel permet une moins grande utilisation du charbon et donc une moins grande quantité d'émissions de GES et une intensité en carbone plus faible (voir Figure 3-12)¹⁶⁰. La révolution du gaz de schiste, bien qu'il s'agisse d'un combustible fossile, a donc permis une diminution des émissions de GES dans le secteur de la production d'électricité. Par ailleurs, cette réduction des émissions a été un effet secondaire de la croissance économique associée à l'éner-

gie bon marché : il est estimé que la fracturation hydraulique augmente le PIB américain de 283 milliards de dollars par année¹⁶¹.

Il y a fort à parier que la révolution du gaz de schiste se poursuivra, grâce à la « refracturation », soit la fracturation d'un puits pour une deuxième fois avec des technologies d'extraction plus efficaces. Cette innovation est maintenant considérée par les compagnies gazières pour les puits horizontaux. Une deuxième fracturation, qui est environ quatre fois moins dispendieuse que la construction d'un nouveau puits, permettrait au niveau de production de se rapprocher des niveaux initiaux, qui peuvent chuter de 70 % un an après la fracturation initiale¹⁶². Une production accrue de gaz naturel à moindre coût permettra de maintenir le prix de ce combustible

159. Kristin Suleng, « Using fossil fuels buys us time to develop alternative energies that will shape our future », *Open Mind*, 14 octobre 2014.

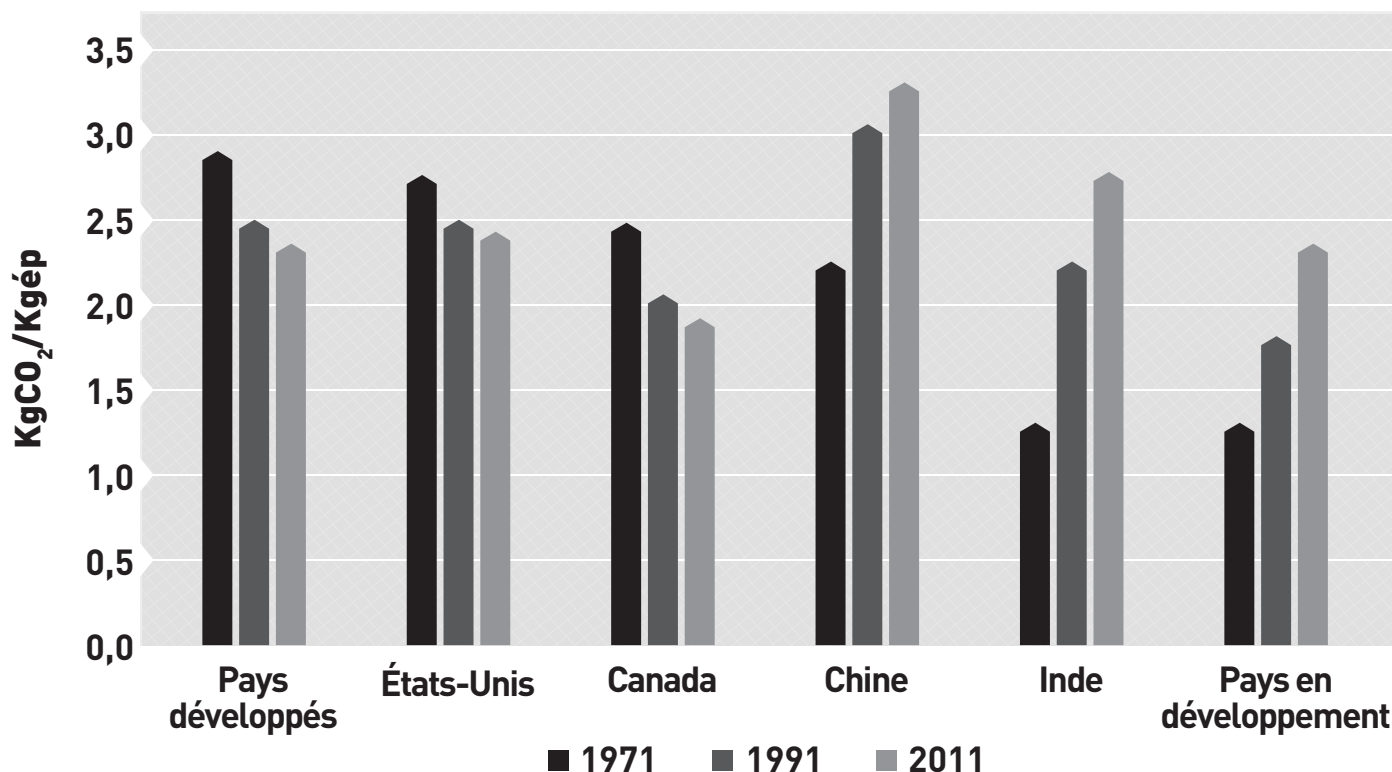
160. David G. Victor et al., « Introductory Chapter », dans Ottmar Edenhofer et al. (dir.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, GIEC, 2014, p. 119.

161. Bjørn Lomborg, « Examining the Threats Posed by Climate Change: The Effects of Unchecked Climate Change on Communities and the Economy », The Senate EPW Committee, Subcommittee on Clean Air and Nuclear Safety, 29 juillet 2014, p. 21.

162. Trefis Team, « Oilfield Services Companies Are Betting On Re-Fracking. Will It Catch On? », *Forbes*, 23 juin 2015; Dan Murtaugh et al., « Refracking Is the New Fracking », *Bloomberg Business*, 7 juillet 2015.

Figure 3-9

Intensité en carbone, 1971-2011



Note : Il s'agit des émissions de CO₂ en kilogramme qui sont émises pour chaque kilogramme d'équivalent pétrole consommé.
Source : Banque mondiale, Indicateurs, Intensité en CO₂ (kg par kg d'utilisation d'énergie en équivalent pétrole), octobre 2015.

relativement bas par rapport à d'autres ressources énergétiques et favorisera probablement la production d'électricité de centrales au gaz naturel.

« Bien que les émissions globales continuent de croître en raison de l'augmentation de la production, le portrait s'améliore par la combinaison de l'efficacité énergétique et de la diminution de l'intensité en carbone. »

L'innovation permet aussi aux centrales au charbon d'avoir une plus faible intensité en carbone. Leur capacité à transformer l'énergie thermique en énergie mécanique (efficacité thermique) est inversement proportionnelle à leurs émissions de GES. Autrement dit, en plus de permettre la génération d'une plus grande quantité d'électricité par gramme de charbon brûlé, les innovations technologiques ont aussi l'avan-

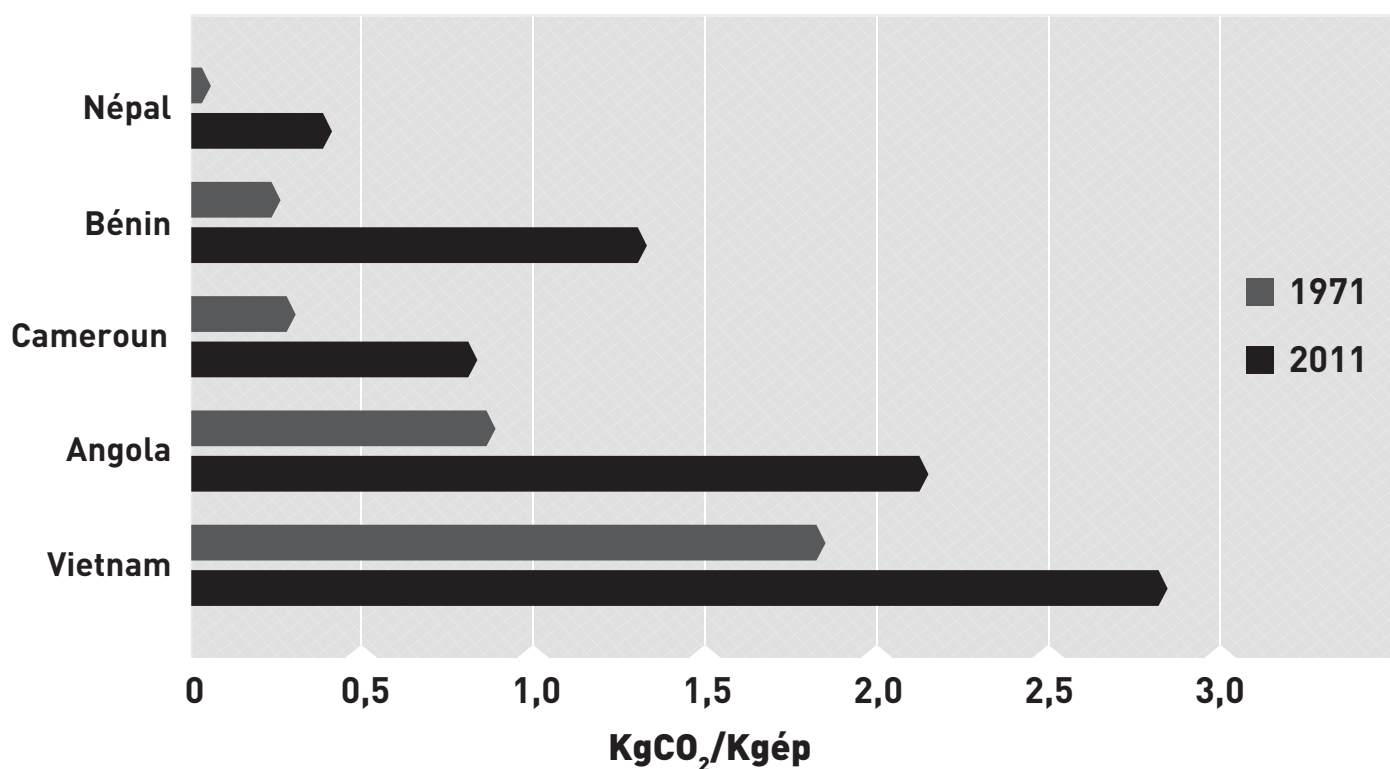
tage de permettre l'émission de moins de CO₂ par kilowattheure produit. Le Tableau 3-1 illustre ce phénomène à l'aide de l'efficacité thermique de plusieurs technologies utilisées par les centrales au charbon.

Toutes ces tendances en matière d'intensité d'émissions augurent bien. Aux États-Unis, deuxième plus grand émetteur mondial, le gaz naturel se substitue partiellement au charbon. Bien que l'utilisation mondiale du charbon soit en croissance, son exploitation peut se faire de façon plus efficace tout en diminuant son impact environnemental. C'est aussi le cas pour l'exploitation du pétrole synthétique, comme le démontre le cas des sables bitumineux en Alberta, où l'intensité énergétique a diminué de 29 % entre 1990 et 2009¹⁶³. Une véritable révolution énergétique est donc en cours et elle pourrait s'accélérer advenant une utilisation accrue d'énergies et de technologies neutres en carbone.

163. Pierre Desrochers et Hiroko Shimizu, *op. cit.*, note 155, p. 28.

Figure 3-10

Les cinq pays ayant la croissance de l'intensité en carbone la plus élevée, 1971-2011



Note : Il s'agit des émissions de CO₂ en kilogramme qui sont émises pour chaque kilogramme d'équivalent pétrole consommé.
Source : Banque mondiale, Indicateurs, Intensité en CO₂ (kg par kg d'utilisation d'énergie en équivalent pétrole), octobre 2015.

Vers une économie neutre en carbone grâce à l'innovation

La décomposition de l'identité de Kaya est très pertinente, car elle illustre que la consommation d'énergie n'est pas un problème en soi. Il serait possible que la consommation d'énergie augmente à un rythme soutenu sans pour autant que l'impact environnemental – mesuré en termes d'émissions de CO₂ – soit important. En effet, l'impact environnemental pourrait être quasi nul si un des trois éléments suivants prenait de l'importance : les énergies renouvelables, les technologies de capture et de séquestration du carbone à grande échelle, et les applications commerciales du carbone.

1. Les énergies renouvelables

La rentabilité économique de l'utilisation des énergies renouvelables a le potentiel d'accélérer la transition vers une économie neutre ou négative en carbone.

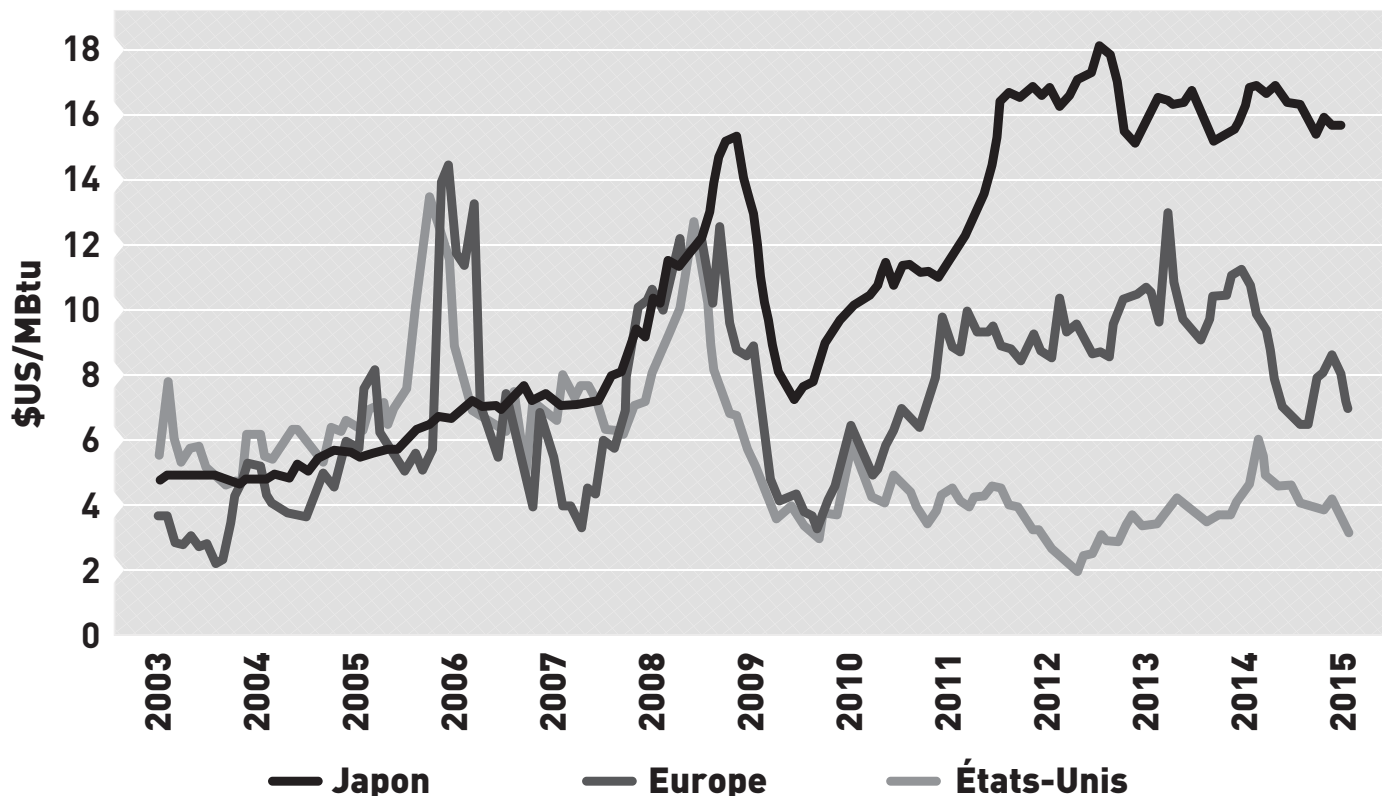
La croissance des investissements dans les énergies renouvelables peut représenter un bon indicateur de leur rentabilité future¹⁶⁴. Ces investissements ont progressé de façon fulgurante au cours des 10 dernières années. Entre 2004 et 2014, les investissements dans les industries solaire et éolienne ont bondi de 1147 % et 456 % respectivement¹⁶⁵.

Pendant la même période, la capacité mondiale du solaire et de l'éolien a progressé de 4684 % et 671 % respectivement. La capacité mondiale de l'énergie éolienne atteignait 370 gigawatts en 2014 comparativement à 177 gigawatts pour l'énergie solaire (voir Figure 3-13).

164. Les subventions peuvent toutefois altérer le calcul économique et rendre attrayant un projet qui ne serait pas rentable sans incitation financière, comme le témoigne l'expérience de certains pays où les industries des énergies renouvelables sont en difficulté suite à l'abandon des subventions. Voir Brady Yauch, « Governments rip up renewable contracts », *Financial Post*, 18 mars 2014.
 165. Sur cette période, plus de 82 % des investissements en énergie renouvelables ont été effectués dans les industries solaire et éolienne. Ren21, *op. cit.*, note 144, p. 136.

Figure 3-11

Prix du gaz naturel en Europe, au Japon et aux États-Unis, en dollars US par million de BTU, 2003-2015



Source : Agence internationale de l'énergie, Tracking Clean Energy Progress 2015, Power Generation.

Les investissements massifs ont aussi contribué à la chute du prix des panneaux solaires photovoltaïques à modules cristallins de 66 % en moyenne depuis cinq ans en Allemagne, en Chine et au Japon, les trois pays ayant la plus grande capacité solaire installée (voir Tableau 3-2)¹⁶⁶.

Cette baisse de prix se reflète dans le « levelized cost of electricity » (LCOE), une mesure largement utilisée pour évaluer la compétitivité des différentes sources d'énergie dans la génération de l'électricité. Cette mesure calcule le coût par mégawattheure d'une usine électrique sur sa durée de vie, en incluant les investissements et les coûts d'opération et de maintenance¹⁶⁷.

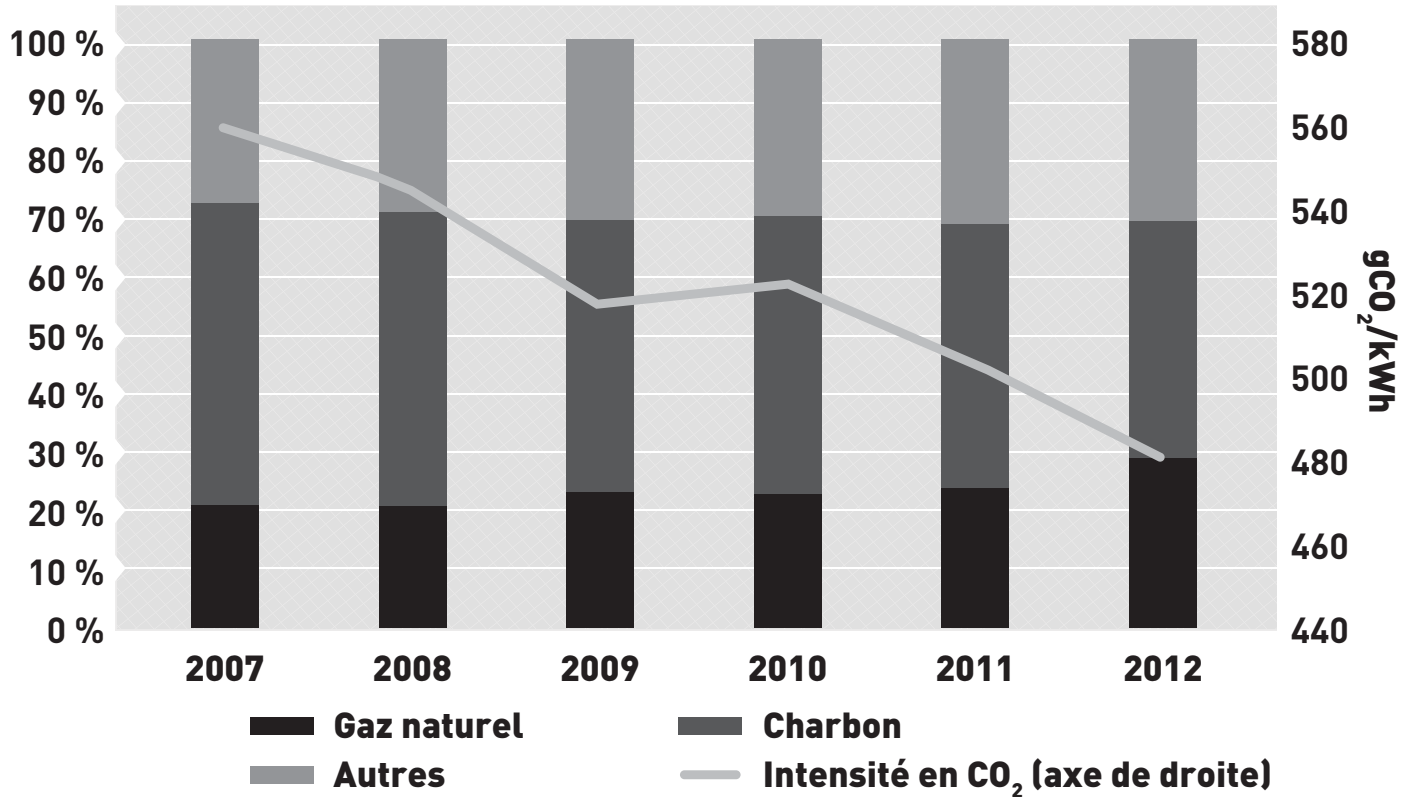
Selon Bloomberg New Energy Finance, le LCOE moyen mondial de l'énergie éolienne est resté relativement stable au cours des cinq dernières années, tandis que celui des panneaux solaires photovoltaïques en silicium cristallin a chuté de 48 %¹⁶⁸. Même constat du côté de l'AIE qui évalue que le LCOE dans une vingtaine de pays est resté relativement stable pour l'énergie éolienne tandis qu'il a été réduit considérablement pour les projets solaires¹⁶⁹. Dans certains pays, des appels d'offres sur l'énergie solaire ont même été faits à des prix compétitifs par rapport à ceux des carburants fossiles¹⁷⁰.

166. Ren21, *op. cit.*, note 144, p. 20; pvXchange, Price index.
 167. U.S. Energy Information Administration, « Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2015 », juin 2015.

168. Frankfurt School, Global Trends in Renewable Energy Investment 2015 (Datapack), mars 2015.
 169. Agence internationale de l'énergie, *Projected Cost of Generating Electricity—2010 Edition*, 2010, p. 62; Agence internationale de l'énergie, « Executive Summary: Projected Cost of Generating Electricity—2015 Edition », 2015, p. 6.
 170. Ren21, *op. cit.*, note 144, p. 62.

Figure 3-12

Proportion de gaz naturel utilisé dans la production d'électricité et intensité en carbone aux États-Unis, en grammes de CO₂ par kilowattheure, 2007-2012



Source : Agence internationale de l'énergie, Tracking Clean Energy Progress 2015, Power Generation.

Le LCOE de l'électricité produite à partir de l'énergie éolienne et solaire n'est cependant pas comparable avec le LCOE de l'énergie produite par le gaz, le charbon et le nucléaire¹⁷¹. En effet, le fait que le vent et le soleil ne soient pas disponibles sur demande et que leur énergie soit intermittente fait en sorte que la valeur économique de l'électricité produite par ces sources n'est pas la même que celle produite par une source disponible en tout temps. En d'autres termes, même si les coûts de l'électricité produite à partir du solaire et de l'éolien se rapprochent des coûts de l'énergie produite par des sources traditionnelles, ces énergies renouvelables ne peuvent pas remplacer complètement les combustibles fossiles et l'uranium. Tant qu'il n'y aura pas de solution économiquement envisageable pour emmagasiner l'électricité à grande échelle, l'énergie de base sera fournie par les combustibles fossiles et le nucléaire.

Pour assurer la fiabilité du réseau, le solaire et l'éolien complèteront les sources traditionnelles lors des périodes de pointe.

Les subventions aux énergies renouvelables ont donc un potentiel limité. En 2012, les énergies renouvelables ne généraient d'ailleurs que 5 % de l'électricité mondiale, ou 21 % en incluant l'hydro (voir Figure 3-14).

2. Les technologies de capture et de séquestration du carbone à grande échelle

La capture et la séquestration du carbone (CSC) est une technologie qui sera nécessaire selon le GIEC si l'on veut avoir de bonnes probabilités de respecter la limite du 2 °C¹⁷². Pour le respect de la limite, l'AIE estime de

171. U.S. Energy Information Administration, *op. cit.*, note 167, p. 3.

172. Ottmar Edenhofer et al., « Summary for Policymakers », dans Ottmar Edenhofer et al. (dir.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, GIEC, 2014, p. 12.

Tableau 3-1

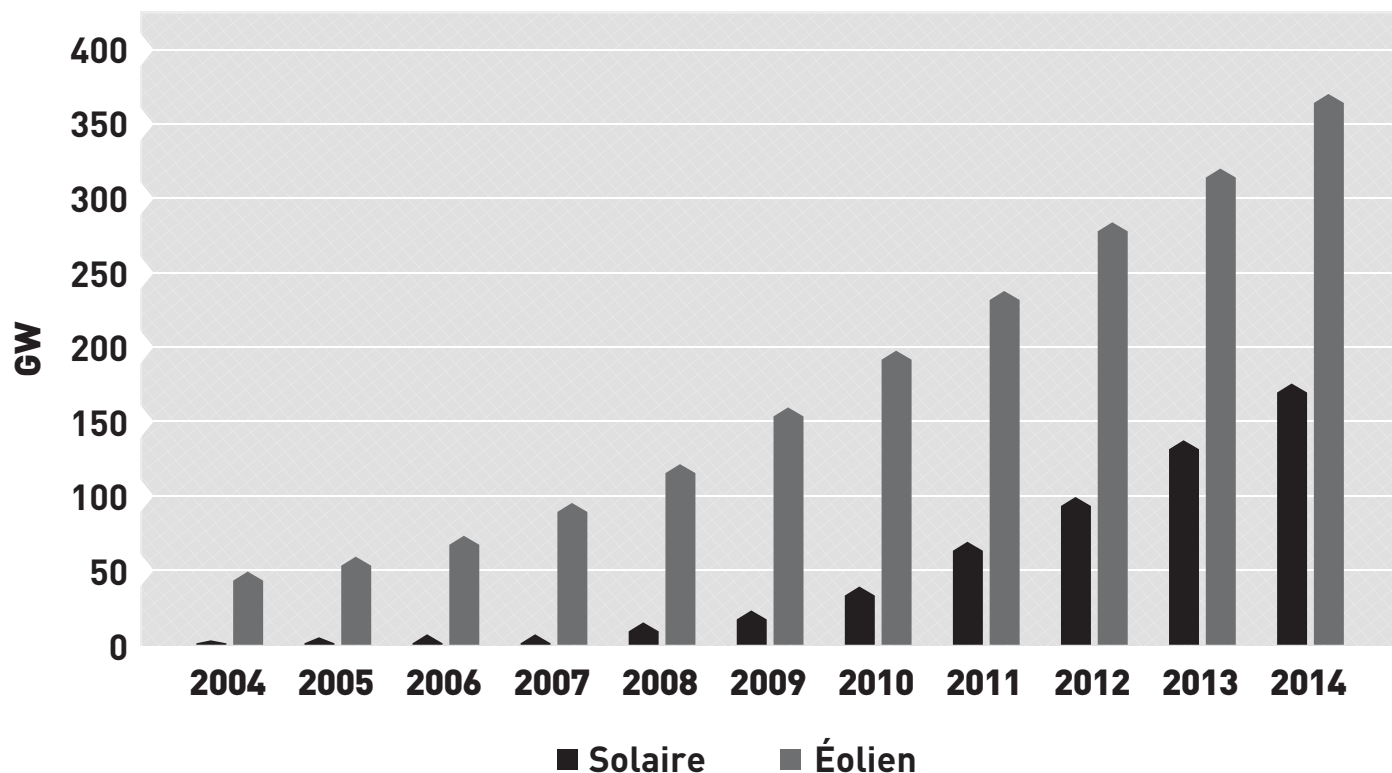
Efficacité thermique et intensité en carbone des différentes technologies pour les centrales au charbon

TECHNOLOGIE	EFFICACITÉ THERMIQUE MAXIMALE	CHARBON CONSOMMÉ PAR KWH (GRAMMES)	ÉMISSIONS DE CO ₂ PAR KWH (GRAMMES)
Sous-critique	38 %	379	881
Supercritique	42 %	343	798
Ultra-supercritique	45 %	320	743
Ultra-supercritique avancée	50 %	288	669

Source : Shoichi Itoh, « A New Era of Coal: The "Black Diamond" Revisited », 2014 Pacific Energy Forum Working Papers, avril 2014, p. 6.

Figure 3-13

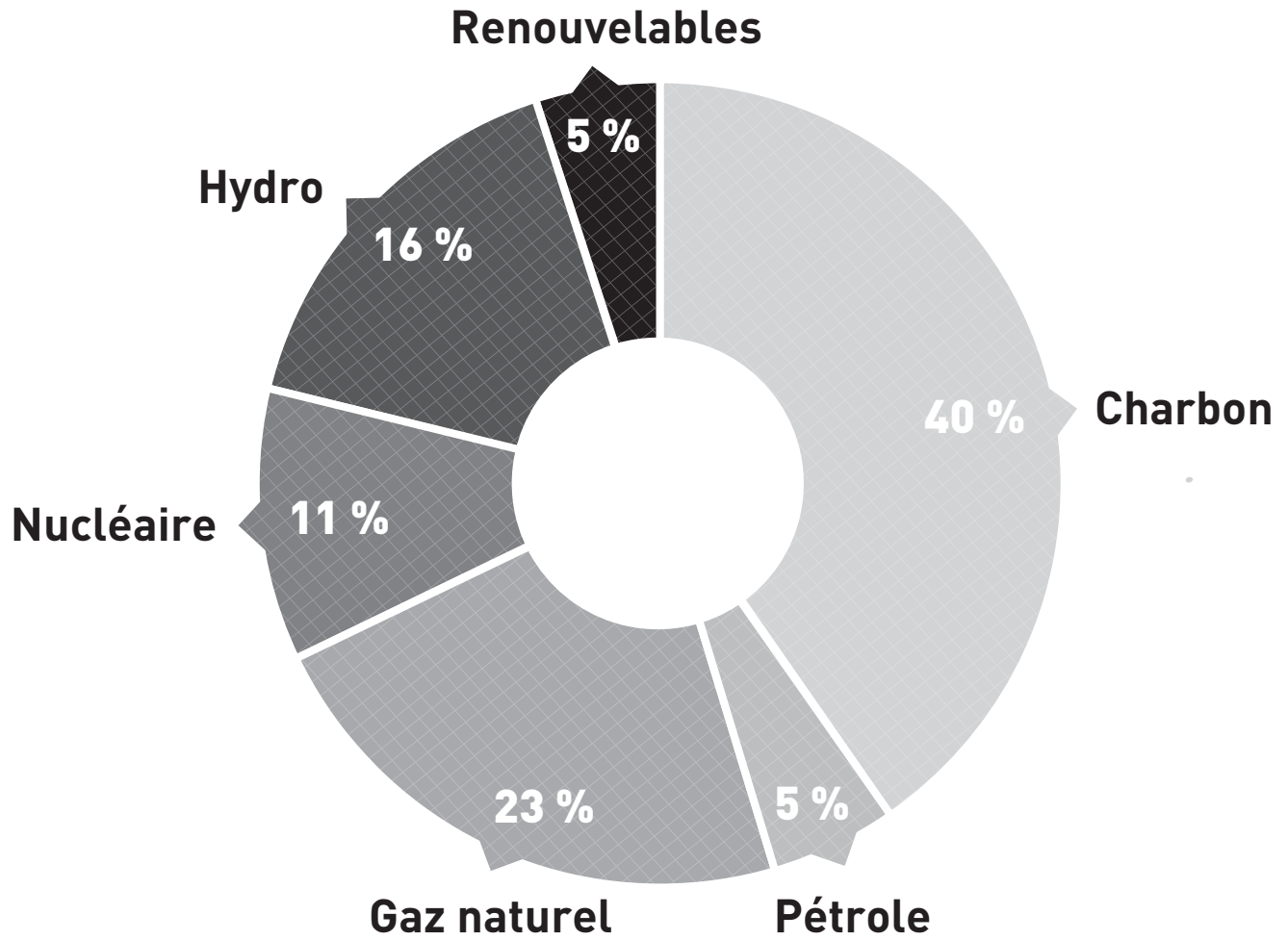
Capacité mondiale installée en énergies solaire et éolienne en gigawatt, 2004-2014



Source : Ren21, *Renewables 2015 Global Status Report*, 2015, p. 59 et 71.

Figure 3-14

Génération d'électricité par carburant, 2012



Source : Agence internationale de l'énergie, *Key World Energy Statistics 2014*, 2014, p. 24.

Tableau 3-2

Évolution du prix des panneaux solaires photovoltaïques à modules cristallins (euros par watt-crête*)

	AOÛT 2010	AOÛT 2015	VARIATION
Allemagne	1,87	0,57	-70 %
Chine	1,61	0,57	-65 %
Japon	1,82	0,65	-64 %

Source : pvXchange, Price index.

* Le watt-crête est une unité de mesure représentant la puissance maximale d'un dispositif.

son côté que la CSC devra augmenter de façon considérable par rapport aux niveaux actuels et qu'elle devra représenter 14 % des réductions d'émissions en 2050¹⁷³.

La CSC consiste à séparer sélectivement le CO₂ des effluents gazeux d'une centrale électrique ou de toute autre source industrielle d'émissions et à stocker le CO₂ profondément sous terre de façon permanente¹⁷⁴. Le stockage se fait dans des gisements épuisés de pétrole et de gaz ou dans des formations salines profondes. À la fin de 2014, seulement 13 projets de CSC à grande échelle étaient en opération, avec une capacité totale de capture de 26 mégatonnes de CO₂ par année¹⁷⁵. Ce petit nombre de projets est dû au fait que la CSC est très coûteuse à mettre en place. À titre d'exemple, le coût d'une cimenterie avec CSC serait le double de celui d'une cimenterie conventionnelle¹⁷⁶. Le coût de cette technologie restera donc prohibitif, à moins que le prix mondial du carbone soit beaucoup plus élevé ou que l'on développe des applications commerciales pour le carbone.

3. Les applications commerciales du carbone

Un élément ayant le potentiel d'améliorer de façon considérable les impacts environnementaux du système énergétique actuel est l'utilisation du carbone à des fins commerciales. En effet, s'il était économiquement rentable d'utiliser le carbone comme intrant pour différents procédés industriels, sa valeur ferait en sorte qu'il serait capturé au lieu d'être rejeté dans l'atmosphère. La recherche dans ce domaine abonde et à ce jour, plusieurs entreprises ont déjà développé des technologies prometteuses.

Carbon Recycling International est une compagnie islandaise qui utilise le carbone rejeté par une centrale électrique géothermique pour en faire du méthanol. Le méthanol peut être utilisé comme carburant pour le transport et comme matière première pour plusieurs matériaux¹⁷⁷. Au Danemark, une station d'essence offre déjà la possibilité aux voitures électriques avec une pile à combustible au méthanol de faire le plein. Le méthanol est transformé en électricité lors de la conduite, ce qui évite au conducteur d'attendre plusieurs heures que la batterie se recharge¹⁷⁸.

Les nano fibres de carbone sont utilisées dans plusieurs industries en raison de leur conductivité, leur flexibilité et leur résistance. Il est cependant très dispendieux de les fabriquer parce que cela requiert de 30 à 100 fois plus d'énergie que la production d'aluminium¹⁷⁹. Des chercheurs de l'Université George Washington ont développé une méthode pour convertir le dioxyde de carbone en oxygène et en nano fibres de carbone à l'aide d'un procédé électrochimique qui serait moins dispendieux que les autres méthodes existantes. Si les conditions économiques sont favorables, ces chercheurs estiment que leur méthode pourrait enlever suffisamment de carbone de l'atmosphère pour retourner à la concentration atmosphérique de CO₂ de l'ère préindustrielle. Cet exploit serait réalisé en dix ans et à l'aide d'une superficie représentant 10 % du désert du Sahara¹⁸⁰.

« Chaque dollar de croissance économique tend à être généré de façon de plus en plus propre. »

Il est aussi possible d'utiliser les technologies de capture de carbone pour capturer le méthane, un GES avec un potentiel de réchauffement climatique 25 fois supérieur à celui du CO₂. New Light Technologies est une compagnie capable de décomposer le carbone (C) et l'hydrogène (H) du méthane (CH₄) préalablement capturé. Le carbone et l'hydrogène sont ensuite assemblés avec de l'oxygène pour former un polymère à chaîne longue nommé AirCarbon¹⁸¹. Ce type de plastique est utilisé pour la confection d'objets au bilan carbone négatif. La compagnie Dell l'utilise comme matériel pour des sacs à ordinateurs portables tandis que l'entreprise de meubles KI l'utilise pour la fabrication de chaises. Sa production à grande échelle aura potentiellement un impact environnemental substantiel. En plus de diminuer la quantité de méthane dans l'atmosphère, elle

173. Agence internationale de l'énergie, About carbon capture and storage; Agence internationale de l'énergie, *Tracking Clean Energy Progress 2015*, 2015, p. 33.

174. CO₂ Solutions, Capture et séquestration du carbone (CSC).

175. Agence internationale de l'énergie, *Tracking Clean Energy Progress 2015*, 2015, p. 32.

176. The Energy and Climate Change Committee, *Carbon Capture and Storage Ninth Report of Session 2013–14*, Document d'information préparé à la demande de la Chambre des communes du Royaume-Uni, 21 mai 2014, p. 25.

177. Carbon Recycling International, Methanol.

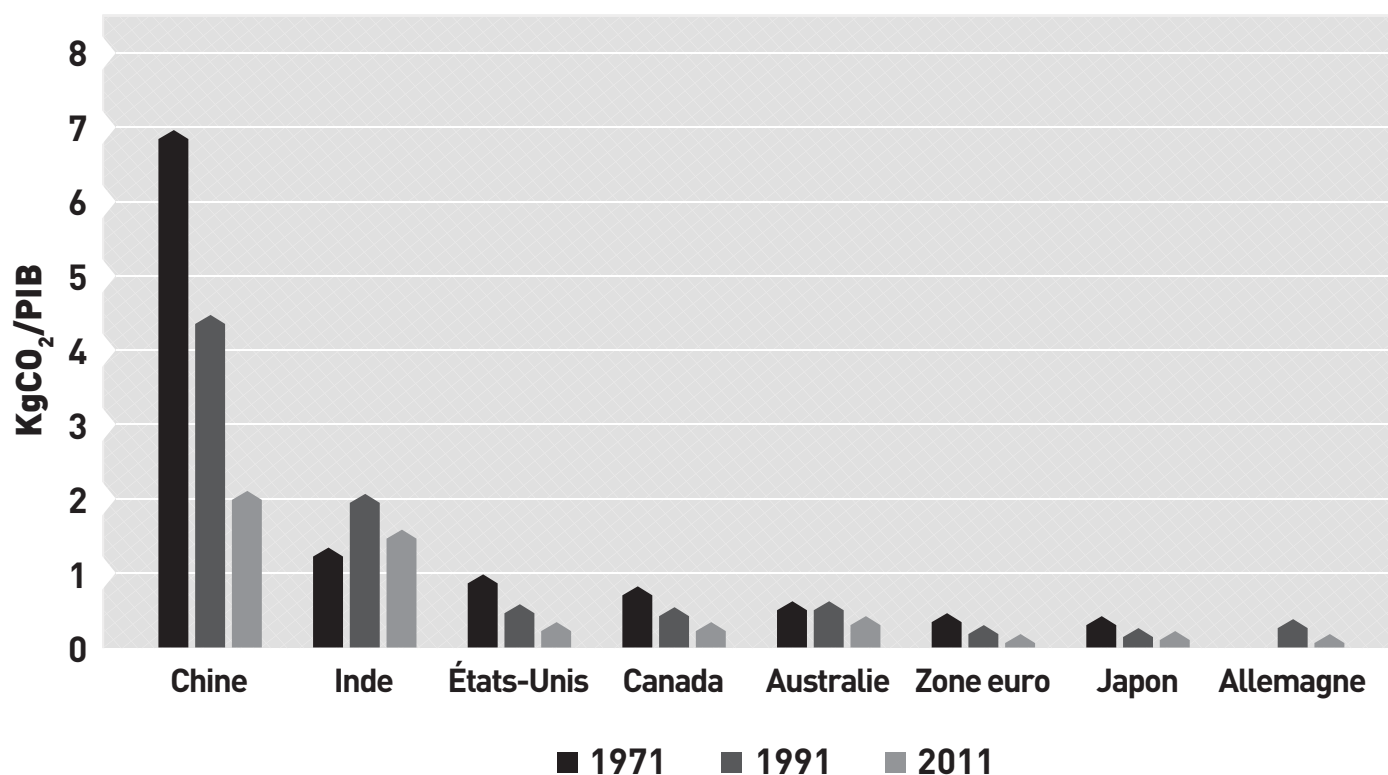
178. Carbon Recycling International, First renewable methanol fuel station in the world for electric cars, 31 août 2015.

179. Jiawen Ren et al., « One-Pot Synthesis of Carbon Nanofibers from CO₂ », *Nano Letters*, no 15, 2015, p. 6142.

180. Mike Orcutt, « Researcher Demonstrates How to Suck Carbon from the Air, Make Stuff from It », *MIT Technology Review*, 19 août 2015.

181. New Light Technologies, Our Technology: Greenhouse Gas to Plastic.

Figure 3-15

Kilogrammes d'émissions de CO₂ par unités de PIB, 1971-2011


Source : Banque mondiale, Indicateurs, Émissions de CO₂ (kg par \$US de 2005 de PIB), octobre 2015.

pourrait remplacer le pétrole pour la fabrication du plastique puisque le matériau est similaire au plastique à base de pétrole¹⁸².

Les carburants à base d'algues sont aussi prometteurs pour la réduction des GES. Les algues se nourrissent de CO₂ et de la lumière du soleil lors de leur culture. L'huile accumulée lors de leur croissance est ensuite extraite et raffinée pour fabriquer des algocarburants. La capture du CO₂ dans le procédé fait en sorte que les émissions de CO₂ peuvent être réduites de 50 à 70 % par rapport aux carburants à base de pétrole¹⁸³.

En plus d'absorber du CO₂, leur culture confère d'autres avantages environnementaux puisqu'elle peut se faire sur des terres infertiles, des bassins d'eaux usées ou salines, qui n'ont pas une valeur économique importante. Elle ne nécessite donc pas l'utilisation de ressources

rares¹⁸⁴. Selon un rapport préparé pour l'AIE, les biocarburants dérivés des algues ont le potentiel de remplacer une partie significative du diesel utilisé aujourd'hui, tout en laissant une empreinte environnementale réduite¹⁸⁵.

La richesse, facteur non négligeable

L'identité de Kaya nous permet de comprendre quels facteurs influencent la croissance des émissions de GES. Ainsi, bien que les émissions globales continuent de croître en raison de l'augmentation de la production, le portrait s'améliore par la combinaison de l'efficacité énergétique et de la diminution de l'intensité en carbone. Ces tendances positives font en sorte que les émissions de GES par unité de PIB déclinent à travers le monde et que chaque dollar généré à travers la planète est de plus en plus vert.

182. Nate Berg, « AIRCARBON : Et si le plastique était la solution au réchauffement climatique? », *El Watan*, 20 septembre 2014.

183. Xiaowei Liu et al., « Pilot-Scale Data Provide Enhanced Estimates of the Life Cycle Energy and Emissions Profile of Algae Biofuels Produced Via Hydrothermal Liquefaction », *Bioresource Technology*, vol. 148, 2013, p. 163-171.

184. Al Darzins, Philip Pienkos et Les Edye, *Current Status and Potential for Algal Biofuels Production*, Document information préparé à la demande de l'IEA Bioenergy Task 39, Report T39-T2, 6 août 2010, p. ii.

185. *Ibid.*, p. vi.

Cette tendance est d'autant plus impressionnante qu'elle se vérifie aussi chez certains pays émergents comme la Chine et l'Inde, deux pays utilisant le charbon de façon croissante pour générer l'électricité. La Chine émettait 52 % moins de dioxyde de carbone par unité de PIB en 2011 qu'en 1991, tandis que l'Inde a réussi à être 25 % plus propre sur la même période (voir Figure 3-15).

Comme le remarque l'AIE, les émissions globales de CO₂ du secteur de l'énergie n'ont pas progressé en 2014 malgré une croissance économique mondiale de 3 %. Il s'agit de la première fois en 40 ans où une stagnation des émissions n'est pas associée à un recul économique. Ce « découplage » des émissions et de la croissance est une première très encourageante selon Fatih Birol, directeur exécutif de l'AIE ¹⁸⁶.

« Ce tournant de plus en plus vert que semble prendre l'économie mondiale s'est effectué sans traité international sur le climat et sans prix global sur le carbone. »

Avec l'augmentation de la richesse, on observe une diminution de l'intensité énergétique et de la quantité d'énergie utilisée par habitant ¹⁸⁷. De plus, chaque dollar de croissance économique tend à être généré de façon de plus en plus propre. Une croissance économique soutenue permet aussi d'effectuer les investissements nécessaires pour que des technologies neutres en carbone (CSC, stockage de l'électricité) puissent être déployées à grande échelle.

L'histoire démontre que la richesse, l'énergie utilisée et l'évolution technologique sont des éléments interdépendants d'un cercle vertueux générant davantage de richesses et d'innovations technologiques ¹⁸⁸. La richesse matérielle permet non seulement de susciter des innovations technologiques qui sont nécessaires à l'amélioration des conditions environnementales, elle permet aussi aux populations les plus vulnérables de mieux s'adapter aux changements climatiques.

Ce tournant de plus en plus vert que semble prendre l'économie mondiale s'est effectué sans traité international sur le climat et sans prix global sur le carbone ¹⁸⁹. Ce n'est pas très surprenant puisque, historiquement, le choix des énergies utilisées a majoritairement été influencé par des questions d'ordre local, tels le développement économique, la sécurité nationale et la qualité de l'air ¹⁹⁰.

Bibliographie

AGENCE FRANCE-PRESSE, « Dix poids lourds du pétrole et du gaz s'unissent pour le climat », *La Presse*, 16 octobre 2015.

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, About carbon capture and storage.

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, CO₂ Emissions From Fuel Combustion Highlights 2014, Excel tables.

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, Energy efficiency.

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, *Energy Efficiency Indicators: Fundamentals on Statistics*, 2014.

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, *Energy Efficiency Market Report 2014: Market Trends and Medium-Term Prospects*, 2014.

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, « Executive Summary: Projected Cost of Generating Electricity—2015 Edition », 2015.

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, « Global energy-related emissions of carbon dioxide stalled in 2014 », Communiqué de presse, 13 mars 2015.

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, *Key World Energy Statistics 2014*, 2014.

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, *Projected Cost of Generating Electricity—2010 Edition*, 2010.

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, Statistics, Report.

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, *Tracking Clean Energy Progress 2015*, 2015.

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, *Tracking Clean Energy Progress 2015, Power Generation*.

BANQUE MONDIALE, Indicateurs, Émissions de CO₂ (kg par \$US de 2005 de PIB), octobre 2015.

BANQUE MONDIALE, Indicateurs, Intensité en CO₂ (kg par kg d'utilisation d'énergie en équivalent pétrole), octobre 2015.

BANQUE MONDIALE, Indicateurs, Utilisation d'énergie (kg d'équivalent pétrole par habitant), octobre 2015.

BP, Data workbook - Statistical Review 2015, Primary Energy: Consumption - Mtoe (from 1965), juin 2015.

186. Agence internationale de l'énergie, « Global energy-related emissions of carbon dioxide stalled in 2014 », Communiqué de presse, 13 mars 2015.

187. Jason Channell et al., *Energy Darwinism II: Why a Low Carbon Future Doesn't Have to Cost the Earth*, Citi GPS, août 2015, p. 25.

188. Pierre Desrochers et Hiroko Shimizu, *op. cit.*, note 155.

189. « Flatlining », *The Economist*, 21 mars 2015.

190. Gary Dirks et al., *High Energy Innovation: A Climate Pragmatism Project*, Consortium for Science, Policy & Outcomes et Breakthrough Institute, décembre 2014, p. 5.

BP, Statistical Review—Data Workbook, juin 2015.

BERG Nate, « AIRCARBON : Et si le plastique était la solution au réchauffement climatique? », *El Watan*, 20 septembre 2014.

CANADIANFOREX, Yearly Average Exchange Rates for Currencies.

CARBON RECYCLING INTERNATIONAL, First renewable methanol fuel station in the world for electric cars, 31 août 2015.

CARBON RECYCLING INTERNATIONAL, Methanol.

CHANNELL Jason *et al.*, *Energy Darwinism II: Why a Low Carbon Future Doesn't Have to Cost the Earth*, Citi GPS, août 2015.

CO₂ SOLUTIONS, Capture et séquestration du carbone (CSC).

Darzens Al, Philip Pienkos et Les Edye, *Current Status and Potential for Algal Biofuels Production*, Document information préparé à la demande de l'IEA Bioenergy Task 39, Report T39-T2, 6 août 2010.

DESROCHERS Pierre et SHIMIZU Hiroko, *Comment l'innovation rend les sables bitumineux de l'Alberta plus verts*, Cahier de recherche, Institut économique de Montréal, octobre 2012, p. 9.

DIRKS Gary *et al.*, *High Energy Innovation, a Climate Pragmatism Project*, Consortium for Science, Policy & Outcomes et Breakthrough Institute, décembre 2014.

EDENHOFER Ottmar *et al.*, « Summary for Policymakers », dans Ottmar Edenhofer *et al.* (dir.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, GIEC, 2014.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, Nominal and real fuel prices, juillet 2015.

FRANKFURT SCHOOL, Global Trends in Renewable Energy Investment 2015 (Datapack), mars 2015.

GOKLANY Indur M., « Humanity Unbound: How Fossil Fuels Saved Humanity from Nature and Nature from Humanity », Policy analysis no 715, Cato Institute, décembre 2012.

GOKLANY Indur M., *The Improving State of the World: Why We're Living Longer, Healthier, More Comfortable Lives on a Cleaner Planet*, Cato Institute, 2007.

ITOH Shoichi, « A New Era of Coal: The "Black Diamond" Revisited », 2014 Pacific Energy Forum Working Papers, avril 2014.

LIU Xiaowei *et al.*, « Pilot-scale data provide enhanced estimates of the life cycle energy and emissions profile of algae biofuels produced via hydrothermal liquefaction », *Bioresour. Technology*, vol. 148, 2013, p. 163-171.

LOMBORG Bjørn, « Examining the Threats Posed by Climate Change: The Effects of Unchecked Climate Change on Communities and the Economy », The Senate EPW Committee, Subcommittee on Clean Air and Nuclear Safety, 29 juillet 2014.

MURTAUGH Dan, Lynn Doan et OLSON Bradley, « Refracking Is the New Fracking », *Bloomberg Business*, 7 juillet 2015.

NEW LIGHT TECHNOLOGIES, Our Technology: Greenhouse Gas to Plastic.

ORCUTT Mike, « Researcher Demonstrates How to Suck Carbon from the Air, Make Stuff from It », *MIT Technology Review*, 19 août 2015.

PRATTE André, « Le monde change... lentement », *La Presse*, 10 février 2015.

PVXCHANGE, Price index.

PUKO Timothy et YAP Chuin-Wei, « Falling Chinese Coal Consumption and Output Undermine Global Market », *The Wall Street Journal*, 26 février 2015.

REN21, *Renewables 2015 Global Status Report*, 2015.

RESSOURCES NATURELLES CANADA, *Cahier d'information : les marchés de l'énergie—2014-2015*.

REN Jiawen *et al.*, « One-Pot Synthesis of Carbon Nanofibers from CO₂ », *Nano Letters*, no 15, 2015, p. 6142.

SAUNDERS Harry D., « Recent Evidence for Large Rebound: Elucidating the Drivers and their Implications for Climate Change Models », *The Energy Journal (in press)*, 2013.

SMIL Vaclav, *Energy at the Crossroads: Global Perspectives and Uncertainties*, The MIT Press, février 2005.

SULENG Kristin, « Using fossil fuels buys us time to develop alternative energies that will shape our future », *Open Mind*, 14 octobre 2014.

THE ECONOMIST, « Flatlining », 21 mars 2015.

THE ENERGY AND CLIMATE CHANGE COMMITTEE, Carbon capture and Storage Ninth Report of Session 2013–14, Document d'information préparé à la demande de la Chambre des communes du Royaume-Uni, 21 mai 2014.

THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION, Global Transportation Roadmap Model, Data Tables, août 2015.

TREFIS TEAM, « Oilfield Services Companies Are Betting On Re-Fracking. Will It Catch On? », *Forbes*, 23 juin 2015.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, « Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2015 », juin 2015.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, Petroleum and other liquids, data, U.S. All Grades All Formulations Retail Gasoline Prices, 2015.

VICTOR David G. *et al.*, « Introductory Chapter », dans Ottmar Edenhofer *et al.* (dir.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, GIEC, 2014.