



Le Canada dans un paysage énergétique global en évolution

Horizons de politiques Canada (Horizons) est un organisme d'étude prospective stratégique faisant partie de la fonction publique fédérale. Son travail consiste à prédire les défis et les possibilités stratégiques en émergence, à explorer de nouveaux concepts et à mettre à l'essai des méthodes et des technologies pouvant soutenir l'élaboration de politiques durables. Les opinions exprimées dans le présent document ne représentent pas forcément celles de Horizons, du gouvernement du Canada, ni celles des ministères et organismes participants.

PH4-163/2016F-PDF
978-0-660-05710-1



Government
of Canada

Policy Horizons
Canada

Gouvernement
du Canada

Horizons de politiques
Canada

Canada 

Table des matières

Résumé	1
Perspectives	2
<p>L'électricité est en train de devenir la principale source d'approvisionnement énergétique mondiale. L'électricité produite à partir de sources renouvelables devient plus rentable que l'électricité générée à partir des combustibles fossiles. Le coût du facteur externe va accélérer la transition vers les énergies renouvelables. Les énergies renouvelables peuvent permettre de réduire les coûts d'infrastructure liés à la distribution. Des solutions de stockage émergent et évoluent plus vite que prévu. La polyvalence de l'électricité permet d'éliminer les silos énergétiques et de remplacer les combustibles fossiles. La gestion des données va occuper une place centrale au sein du système d'énergie électrique. La chaleur produite par les énergies renouvelables peut réduire la demande pour les combustibles fossiles. Les énergies renouvelables améliorent la sécurité énergétique, la productivité et la stabilité économique. L'industrie des transports pourrait passer plus vite que prévu à l'électricité.</p>	
Défis et possibilités	8
<p>Un nouvel écosystème énergétique mondial émerge rapidement. La concurrence sur les marchés énergétiques émergents repose plus sur la technologie que sur les ressources. Les minerais deviennent des biens stratégiques. La demande de pétrole de l'industrie des transports diminue plus rapidement que prévu. Les combustibles fossiles pourraient perdre leur statut de biens utiles, ce qui pourrait faire éclater le marché du pétrole.</p>	
Scénarios	11
Répercussions pour le Canada	12
Conclusion	17
Annexe A : Hypothèses	18
Références	20

Résumé

Le paysage énergétique mondial se transforme rapidement à mesure que le coût de l'électricité produite à partir de sources renouvelables, en particulier l'énergie éolienne et l'énergie solaire, baisse afin de devenir compétitif ou inférieur au coût de l'électricité produite à partir de combustibles fossiles ou dans des centrales nucléaires. Les services publics et les entreprises d'électricité choisissent de plus en plus d'augmenter leur capacité de génération d'électricité à partir de sources renouvelables plutôt que de combustibles fossiles, puisque les problèmes liés à l'approvisionnement intermittent en énergie solaire et éolienne sont résolus grâce à une meilleure gestion de l'approvisionnement et de la demande, en utilisant une combinaison de réseaux électriques intelligents intégrés et de stockage dans des batteries. Le prix des batteries diminue rapidement, ce qui permet de les utiliser à l'échelle locale et à l'échelle des réseaux au sein des systèmes d'alimentation électrique, de même que pour faciliter l'électrification importante de l'industrie du transport. La transition vers un bouquet énergétique mondial dominé par l'électricité va encore s'accélérer puisque la diminution des coûts s'ajoute aux préoccupations grandissantes du gouvernement et du secteur privé à propos du changement climatique, de la sécurité énergétique et de la pollution atmosphérique, particulièrement dans les pays en voie de développement où le besoin d'augmenter la capacité énergétique est le plus important. Combinés, ces facteurs pourraient entraîner le remplacement des combustibles fossiles par l'électricité générée à partir de sources renouvelables à titre de principale forme d'énergie utilisée par l'économie mondiale dans le cadre de la plupart des activités industrielles, commerciales et personnelles.

Quel est le moteur du changement?

- **Réduction des coûts** : le coût de plusieurs éléments d'un système électrique utilisant des sources renouvelables diminue bien plus vite que prévu en raison des avancées technologiques, des économies d'échelle et des courbes d'apprentissage plus rapides à mesure que l'expérience de ces systèmes augmente.
- **Économie numérique** : les systèmes numériques utilisent l'électricité; puisque l'économie mondiale devient de plus en plus numérique, la proportion relative qu'occupe l'électricité dans le cadre de la consommation énergétique mondiale va augmenter.
- **Changement climatique et pollution atmosphérique** : les pays en voie de développement adoptent les énergies renouvelables pour répondre à leurs objectifs économiques et de développement sans avoir à sacrifier la qualité environnementale et la santé humaine.

Enjeux politiques : À mesure que nous explorons les perspectives, quels défis pourraient se présenter?

- Un nouvel écosystème industriel reposant sur l'électricité pourrait émerger beaucoup plus vite que prévu, ce qui perturberait de manière importante les marchés des combustibles fossiles.
- La concurrence sur les marchés énergétiques de l'avenir pourrait être dominée par les acteurs qui possèdent les meilleures technologies pour la production, le stockage et la gestion énergétiques, plutôt que par les acteurs qui possèdent des combustibles fossiles.
- Les minerais et les métaux, comme le lithium ou les métaux des terres rares, pourraient remplacer le pétrole, le gaz et le charbon à titre de ressources stratégiques en fonction de leur utilisation dans les batteries, les appareils électroniques et les cellules photovoltaïques de l'écosystème énergétique émergent.
- La demande mondiale de pétrole pourrait atteindre son sommet plus tôt que prévu pour ensuite diminuer plus rapidement et de manière plus importante que prévu, ce qui aurait des conséquences importantes pour les producteurs de pétrole à coût élevé.
- La production de pétrole pourrait dépasser de beaucoup la demande, ce qui aurait pour résultat une pression accrue sur les prix alors que les pays producteurs se livreraient concurrence afin de maintenir leurs parts sur des

marchés qui s'amenuisent pendant que le pétrole a encore de la valeur.

- Le pétrole pourrait perdre son statut de bien utile à mesure que les acheteurs commencent à faire la distinction entre les fournisseurs de pétrole en se basant sur des qualités non intrinsèques, comme les émissions de gaz à effet de serre grises ou d'autres critères environnementaux, politiques et sociaux.

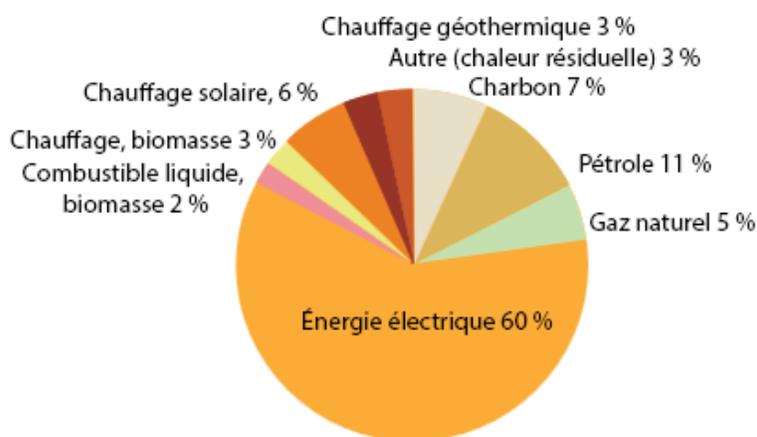
Perspectives

Les perspectives décrivent les avancées actuelles qui pourraient créer des changements supplémentaires hautement perturbateurs dans le futur si elles se renforçaient. Les perspectives sont sélectionnées en fonction de leur potentiel perturbateur et de leurs conséquences pour les politiques.

L'électricité est en train de devenir la principale source d'approvisionnement énergétique mondiale.

On prévoit que l'électricité devienne la forme d'énergie finale présentant la croissance la plus rapide au monde¹ et qu'elle représente une part croissante de l'énergie consommée au sein des différents facteurs économiques². Alors que l'on prévoit une augmentation de 37 % de la demande énergétique provenant de toutes les sources entre 2012 et 2040³, on s'attend à ce que la demande mondiale en électricité augmente de près de 80 % au cours de la même période, ce qui représente plus de la moitié de l'augmentation de la consommation d'énergie brute dans le monde⁴. On prévoit que la classe moyenne émergente dans les pays en voie de développement représente un élément moteur de l'électrification puisqu'elle vit en ville et utilise d'autres sources d'énergie que la biomasse pour la cuisine, la lumière, le chauffage et la climatisation. La figure 1 s'appuie sur une étude de la feuille de route de la Chine, la première économie mondiale, afin de démontrer qu'il est économiquement et techniquement faisable que l'électricité représente plus de 60 % de la consommation énergétique finale du pays d'ici 2050⁵. L'économie numérique émergente, ainsi que le stockage des données et les infrastructures de transport connexes nécessiteront des quantités croissantes d'électricité⁶, de même que l'utilisation en hausse des processus de fabrication additive. Des signes laissent également à penser que l'industrie des transports pourrait s'électrifier plus rapidement que prévu⁷.

Figure 1 : Part de l'électricité au sein de la consommation finale d'énergie

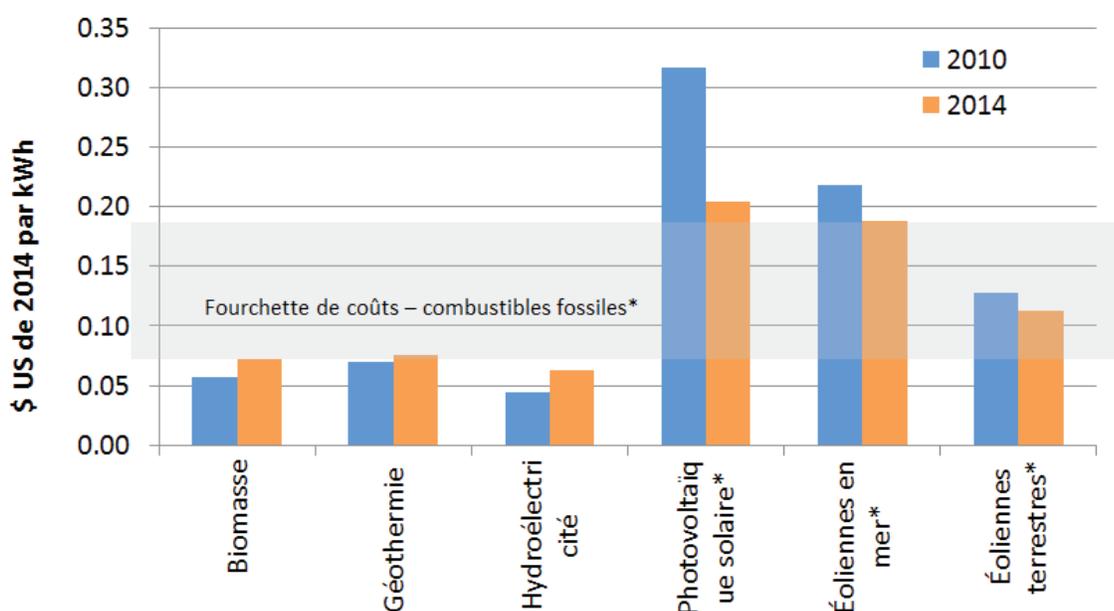


Adaptation d'après : [Scénario de pénétration élevée des énergies renouvelables en Chine d'ici 2050 et étude de la feuille de route](#)

L'électricité produite à partir de sources renouvelables devient plus rentable que l'électricité générée à partir des combustibles fossiles.

L'électricité sera de plus en plus produite à partir de sources renouvelables plutôt que de combustibles fossiles. Les avancées rapides en ce qui concerne la technologie des énergies renouvelables et les réductions des coûts permettent de produire désormais de l'électricité de manière relativement rentable à partir de nombreuses sources, y compris les énergies solaire photovoltaïque, éolienne, hydroélectrique, géothermique, à partir de la biomasse et des biocarburants⁸. Comme l'indique la figure 2, la plupart des sources renouvelables peuvent déjà produire de l'électricité à un coût inférieur à celui des combustibles fossiles⁹. Le coût des sources renouvelables telles que l'énergie solaire photovoltaïque devrait devenir inférieur à celui des combustibles fossiles au cours des deux à trois prochaines années dans la plupart des marchés¹⁰. Bien qu'un pays donné peut difficilement être en mesure de présenter des conditions optimales pour chaque source renouvelable permettant de produire de l'électricité, tous les pays sont susceptibles de disposer d'une ou de plusieurs options pour produire de l'électricité à partir de sources renouvelables à un coût comparable ou plus rentable que l'électricité produite à partir de combustibles fossiles¹¹.

Figure 2: Coût moyen actualisé de l'électricité : génération à partir de sources renouvelables et de combustibles fossiles



* Les coûts de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne comprennent les coûts estimés de l'intégration de 40 % de l'énergie intermittente produite aux réseaux électriques.

+ La fourchette des coûts des combustibles fossiles comprend les coûts environnementaux et pour la santé.

Source des données : IRENA

Le coût du facteur externe va accélérer la transition vers les énergies renouvelables.

L'électricité produite à partir de sources renouvelables présente beaucoup moins d'effets sur l'environnement que celle générée à partir des combustibles fossiles, en particulier en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre,¹² mais aussi d'autres facteurs telle que la pollution atmosphérique et la consommation d'eau¹³. Les facteurs environnementaux externes des combustibles fossiles sont de plus en plus pris en compte dans le coût d'utilisation¹⁴, et cela peut faire des sources renouvelables les technologies de premier plan pour la plupart des nouvelles capacités. Les taux de



déploiement des sources renouvelables sont déjà très élevés dans les pays qui présentent une pénurie en électricité, mais ils pourraient encore s'accroître¹⁵. Les coûts de stockage qui diminuent rapidement¹⁶ ainsi que les avancées en matière de gestion de l'offre et de la demande¹⁷ pourraient permettre aux sources renouvelables de remplacer une partie importante de la génération d'électricité à partir de combustibles fossiles à mesure que les centrales nucléaires atteignent leur fin de vie utile et ne sont pas remplacées, à la fois dans les pays en voie de développement et dans les pays développés¹⁸.

Les énergies renouvelables peuvent permettre de réduire les coûts d'infrastructure liés à la distribution.

Les systèmes d'alimentation en énergie éolienne et photovoltaïque peuvent facilement être agrandis¹⁹ et distribués. Ils peuvent servir à alimenter un logement particulier ou un réseau public, et ils peuvent être complètement autonomes ou intégrés aux réseaux électriques à l'échelle locale ou internationale. Tandis que les sources renouvelables raccordées aux réseaux vont vraisemblablement dominer dans les pays en voie de développement qui possèdent une infrastructure de réseau existante, la nature hautement distribuable de ces sources renouvelables, combinée au stockage ou au déplacement de la charge efficace, pourrait permettre aux pays qui possèdent une infrastructure sous-développée de réduire les coûts d'électrification sans suivre le modèle traditionnel d'électrification qui s'appuie sur des réseaux s'étendant à partir des centrales électriques²⁰.

Des solutions de stockage émergent et évoluent plus vite que prévu.

Un écosystème s'appuyant sur l'électricité qui comprend des sources d'alimentation électrique solaires et éoliennes devra disposer de solutions de stockage permettant de compenser l'alimentation intermittente provenant de ces sources. Des technologies reconnues, comme la centrale hydroélectrique de pompage, peuvent être utilisées là où les conditions le permettent. Bien que l'on dispose de plus en plus d'expérience avec l'alimentation provenant de sources renouvelables et la gestion de la demande à l'aide de réseaux intelligents, on s'attend à ce que des batteries de grande capacité à faible coût soient nécessaires pour permettre à l'électricité produite à partir de sources renouvelables de dominer le bouquet énergétique mondial. Les technologies dans ce domaine sont émergentes et évoluent rapidement à mesure que les chercheurs et les entreprises collaborent afin de répondre à la demande en hausse pour une grande variété d'applications de batterie, particulièrement dans les secteurs de l'énergie et des transports²¹. Dans le même temps, les coûts diminuent plus rapidement que prévu²². Tesla Motors a déclaré produire des batteries au lithium-ion pour les marchés de l'automobile et de l'énergie d'usage domestique²³ dans sa giga-usine Gigafactory²⁴ pour un coût d'environ 300 \$ US par kWh, soit un coût qui ne devait pas être atteint selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE) avant 2020²⁵. Les fabricants asiatiques de batteries construisent également des usines d'une taille similaire à la giga-usine de Tesla qui permettront de tripler la production de batteries d'ici 2020²⁶. On s'attend à ce que ces économies d'échelle permettent de réduire encore plus le coût des batteries pour atteindre 150 \$ US par kWh d'ici 2020²⁷. À ce niveau de prix, les véhicules électriques seront au même niveau de compétitivité que les véhicules propulsés par des moteurs internes à combustion. La technologie lithium-ion et l'augmentation de la capacité et des configurations des batteries qui utilisent cette technologie sont au centre de l'attention. Des recherches sont également menées sur d'autres types de batteries, comme les batteries au sodium-ion ou à aluminium-air dans le but de réduire éventuellement de manière significative le coût de fabrication par kWh²⁸ tout en améliorant la densité énergétique²⁹, le rendement de la charge et la capacité de stockage. L'utilisation des batteries pourrait être étendue à différents modes de transport, notamment les trains³⁰, les camions³¹ et même les avions.³²

Il est également vraisemblable que les batteries deviennent très largement utilisées dans les installations de production d'énergie autonome³³ ou d'énergies photovoltaïque et éolienne intégrées aux réseaux afin de permettre une alimentation continue en énergie³⁴. Les technologies de stockage de l'énergie à l'échelle des réseaux publics sont actuellement disponibles, et elles peuvent constituer une solution de rechange moins coûteuse que l'utilisation des centrales électriques pendant les heures de pointe ou que la mise en place de nouvelles lignes de transport d'énergie³⁵ en permettant aux services publics d'installer des usines de fabrication de batteries à proximité des secteurs à forte demande, comme les grandes villes ou les grandes industries, et d'améliorer l'équilibrage de la charge tout en réduisant les émissions de GES.

Événement de lancement du système [Powerwall de Tesla](#) le 30 avril 2015.

Les fabricants de batteries sont en train de mettre au point des batteries stationnaires de différentes tailles qui peuvent emmagasiner suffisamment d'énergie pour alimenter une maison ou une usine et qui peuvent être utilisées par les services publics³⁶. Il est également possible d'envisager la conversion des batteries au lithium-ion usagées des véhicules électriques à d'autres fins, comme des batteries stationnaires de stockage³⁷, dans la mesure où ces batteries présentent encore une capacité importante de stockage de l'énergie.

La polyvalence de l'électricité permet d'éliminer les silos énergétiques et de remplacer les combustibles fossiles.

L'électricité est une forme d'énergie versatile qui peut être utilisée de manière efficace pour de nombreuses applications. On prévoit le développement des systèmes intégrés de production, de stockage et d'utilisation de l'énergie, ce qui va permettre de rendre le flux d'énergie électrique plus fluide et sans interruption entre les utilisations³⁸. Les systèmes qui permettent de diriger l'énergie électrique stockée vers différents services en fonction des besoins (p. ex., transport, chauffage, éclairage, informatique) pourraient faire de l'électricité une source énergétique fongible entre les plateformes qui étaient traditionnellement associées à une source d'énergie en particulier (p. ex. pétrole pour le transport, gaz naturel pour le chauffage des bâtiments, électricité pour l'éclairage et l'informatique). Les propriétaires de maison pourraient décider de charger leurs véhicules électriques pendant les heures creuses avant de connecter les batteries de leurs véhicules à leur système d'alimentation de la maison³⁹ pour s'en servir comme source d'alimentation électrique pendant les heures de forte demande. Ce type de stockage à usage multiple pourrait augmenter de manière significative l'efficacité globale du système énergétique en limitant les besoins pendant les heures de pointe et en équilibrant la demande, ce qui aurait pour effet d'accélérer la transition vers des sources renouvelables de production d'énergie intermittente disposant de capacités de stockage.

La gestion des données va occuper une place centrale au sein du système d'énergie électrique.

L'alimentation distribuée et intermittente de certaines sources renouvelables comme l'énergie éolienne ou solaire pourrait compliquer de manière importante la recherche de l'équilibre entre l'offre et la demande au sein des systèmes d'alimentation électrique⁴⁰. Des modèles fonctionnels différents seront sans doute développés pour intégrer les sources renouvelables aux systèmes électriques en fonction de l'existence ou non d'un système de production et de distribution électrique centralisé au sein des pays. Cependant, dans tous les cas, les systèmes de gestion intelligente de l'énergie vont devenir plus présents à mesure que les dispositifs de consommation et de stockage d'énergie sont de plus en plus nombreux à être connectés à l'Internet des objets⁴¹. Cela pourrait ouvrir la voie à de grandes entreprises de gestion des données et de l'énergie intégrées qui seraient en concurrence avec les services publics centraux ou les remplaceraient en tant qu'acteurs clés des systèmes d'énergie électrique⁴².

La chaleur produite par les énergies renouvelables peut réduire la demande pour les combustibles fossiles.

Les avancées technologiques pourraient permettre aux sources renouvelables de remplacer les combustibles fossiles⁴³ en ce qui concerne la plupart de l'énergie utilisée pour le chauffage. L'énergie solaire thermique peut fournir de l'eau chaude et de la vapeur pour le secteur industriel à des températures pouvant atteindre 400 °C, une température suffisante pour répondre à la demande des industries du textile, des produits chimiques, du plastique, des aliments et des boissons et des pâtes et papiers⁴⁴. L'énergie solaire concentrée peut permettre d'atteindre des températures encore plus élevées⁴⁵. La Chine arrive en première position mondiale en ce qui concerne la capacité de chauffage solaire de l'eau avec 180,4 GWth,⁴⁶ et elle pense augmenter cette capacité à 560 GWth d'ici 2020⁴⁷.

Les technologies de chauffage solaire pourraient être utilisées pour fournir de l'eau chaude et chauffer les espaces dans le secteur des bâtiments, permettant ainsi de réduire l'empreinte carbone dans les secteurs résidentiels, commerciaux et institutionnels⁴⁸. Les investissements réalisés dans les infrastructures de transport et de distribution utilisant des combustibles fossiles pourraient être réduits ou éliminés en cas d'adoption à grande échelle de systèmes héliothermiques de distribution pour chauffer les locaux et produire de la chaleur industrielle⁴⁹. De plus, la croissance de la demande en matière de chauffage (ou de refroidissement) local pourrait être inférieure aux prévisions si les processus de robotisation, de contrôle à distance et d'automatisation suppriment la présence des hommes à de nombreux endroits dans les installations de fabrication et de traitement ou dans les mines, ce qui réduirait les coûts en capital et les coûts opérationnels liés au chauffage, à la climatisation et à la ventilation⁵⁰.

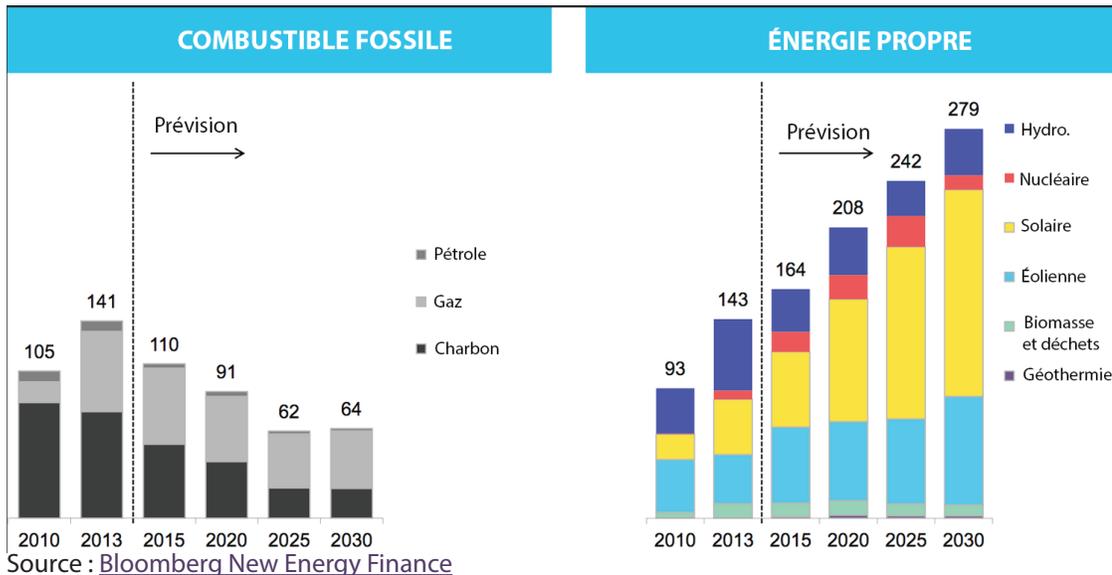
Les énergies renouvelables améliorent la sécurité énergétique, la productivité et la stabilité économique.

Les pays qui ne disposent pas de sources domestiques d'approvisionnement en combustibles fossiles peuvent améliorer leur sécurité et leur productivité énergétique tout en réduisant le risque économique en assurant la transition de leur économie vers la production d'électricité et de chaleur à partir de sources renouvelables. La plupart des sources renouvelables peuvent permettre de produire de l'électricité et de la chaleur à un coût moindre que les combustibles fossiles, ce qui rend les économies qui investissent dans les sources renouvelables plus compétitives. En réduisant les besoins d'approvisionnement en charbon, pétrole ou gaz à l'étranger, on limite également les besoins liés aux investissements géostratégiques politiques, militaires et économiques dans les régions riches en combustibles fossiles, ainsi que les risques liés aux en cas d'interruption de l'approvisionnement en ressources⁵¹.

Certaines sources d'énergie renouvelables distribuées, comme l'énergie solaire, offrent un taux d'emploi général plus important et plus d'emplois locaux que les centrales électriques centralisées⁵². En fournissant un approvisionnement en électricité rentable et fiable à proximité de l'utilisation finale, les sources renouvelables décentralisées peuvent créer une boucle de réaction permettant l'évolution de l'activité économique locale afin de tirer parti de l'électricité, ce qui stimulera une demande supplémentaire en électricité qui sera comblée par un approvisionnement supplémentaire fourni par les sources renouvelables⁵³.

La reconnaissance de plus en plus importante des nombreux avantages des sources renouvelables par rapport aux combustibles fossiles est illustrée à la figure 3 sur laquelle est présentée la transition mondiale vers les technologies choisies pour augmenter la capacité de production électrique. Tandis que des investissements importants sont réalisés par les services publics à l'échelle nationale et régionale et par les services publics privatisés dans le domaine des sources renouvelables, de nombreuses entreprises du secteur privé non liées au secteur de l'énergie investissent également directement dans les sources renouvelables à mesure que les coûts diminuent et que leurs clients attendent d'elles qu'elles agissent en ce qui concerne le changement climatique. Dans le but de tendre vers une auto-suffisance énergétique, IKEA a annoncé un investissement de 500 millions d'euros dans l'énergie éolienne et de 100 millions d'euros dans l'énergie solaire au cours des cinq prochaines années⁵⁴.

Figure 3: Augmentation de la capacité de production d'énergie électrique (GW)

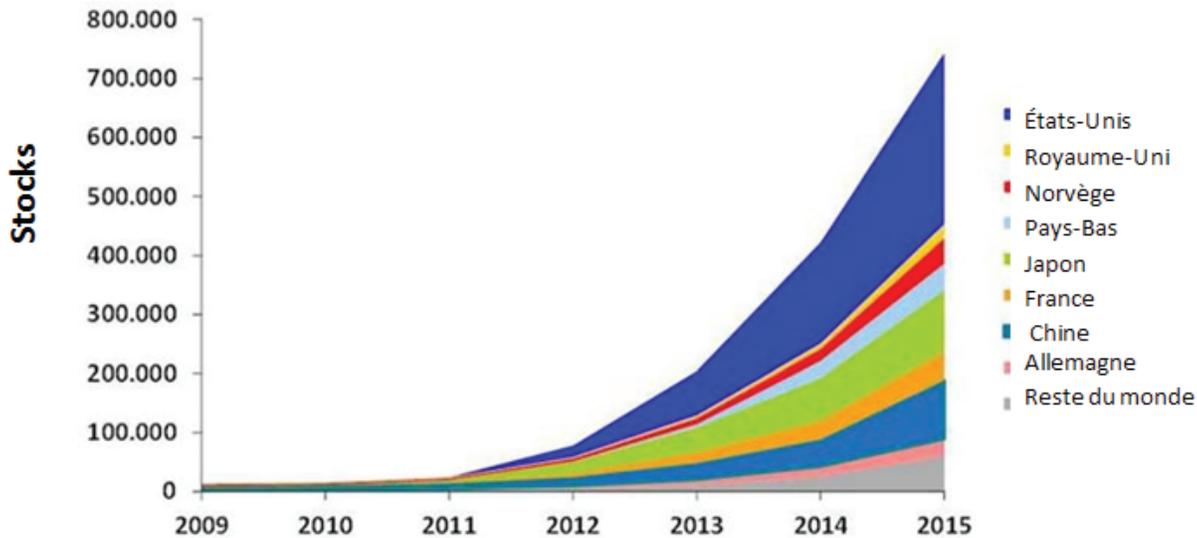


Apple a annoncé un investissement de 850 millions de \$ US pour la construction d'une centrale solaire de 280 mégawatts en Californie⁵⁵. Plusieurs entreprises appartenant à la liste Fortune 100 ont adopté des programmes d'énergie renouvelable afin d'augmenter le recours aux systèmes de production d'énergie solaire et éolienne sur place⁵⁶. Dans le but de surmonter certains obstacles posés par les systèmes de production énergétique sur place et de répondre aux objectifs en matière d'énergie, 19 grandes entreprises représentant une demande combinée de plus de 10 millions de mégawatt heures par an, soit suffisamment d'énergie pour alimenter 1 million de foyers pendant un an, ont signé l'année dernière un *engagement en matière d'énergie dans l'entreprise*, en demandant aux services publics de simplifier l'achat d'énergie solaire, éolienne et produite à partir de piles à combustible ou d'autres sources alternatives, qui sont moins sujettes aux fluctuations de prix que les combustibles fossiles⁵⁷. L'un des objectifs des entreprises concernées consiste à avoir accès à de l'énergie et à des sources renouvelables à prix fixe et à long terme.

L'industrie des transports pourrait passer plus vite que prévu à l'électricité.

Plusieurs facteurs peuvent converger pour entraîner la transition d'un pourcentage important des activités du secteur des transports vers l'électricité au cours des 15 prochaines années. L'augmentation des ventes de véhicules électriques présentée sur la figure 4 pourrait s'accélérer, particulièrement dans les marchés où l'on prévoit une augmentation des ventes de véhicules. Beaucoup des pays qui investissent le plus pour ajouter les sources d'énergie renouvelables à leur bouquet énergétique sont ceux qui sont confrontés aux pressions réglementaires les plus importantes pour réduire la pollution atmosphérique et les émissions de gaz à effet de serre, et qui présentent la demande prévue la plus élevée pour les véhicules⁵⁸. Les restrictions imposées sur les achats de véhicules⁵⁹ et les mesures incitatives visant l'achat de véhicules électriques⁶⁰ pourraient accélérer leur adoption dans les marchés émergents. La réduction éventuelle des coûts des véhicules électriques⁶¹ et l'augmentation de l'approvisionnement⁶², combinées à une demande mondiale pour les véhicules personnels potentiellement moins importante que prévue en raison des tendances émergentes telles que le service de partage de véhicules⁶³ et le télétravail⁶⁴, pourraient donner lieu à une électrification plus importante de la flotte mondiale de véhicules que la plupart des prévisions^{65 66}. Le remplacement de la flotte de véhicules pourrait se produire beaucoup plus rapidement que la moyenne historique si les consommateurs et les gouvernements adoptent les véhicules autonomes en raison de leur sécurité et de leur caractère pratique⁶⁷. Il est probable que les pays les plus grands importateurs de pétrole procèdent plus rapidement à l'électrification des transports afin de réduire les risques liés à une interruption de l'approvisionnement ou à la volatilité des prix⁶⁸.

Figure 4 : Ventes de véhicules électriques par année et par pays



Source: [Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg](#)

Défis et possibilités

Un nouvel écosystème énergétique mondial émerge rapidement.

À mesure que l'électricité devient plus abondante, elle peut concurrencer les combustibles fossiles dans des secteurs inattendus tels que le transport, la transformation, la fabrication et la métallurgie, pour lesquels les contraintes technologiques et économiques nécessitaient auparavant le recours aux combustibles fossiles⁶⁹. Bien que la capacité technique de production d'énergie éolienne ou solaire à partir de sources renouvelables existe depuis des décennies, les avancées technologiques et les réductions des coûts permettent au monde entier de « découvrir » l'électricité produite à partir de sources renouvelables comme une nouvelle source d'énergie. De la même manière que le charbon et le pétrole ont permis d'accélérer le développement des technologies utilisant ces sources d'énergie, l'émergence d'une source d'électricité bon marché, fiable, abondante et non polluante, combinée à une capacité de stockage dans des batteries haute capacité rentables pourraient permettre d'accélérer l'évolution d'un écosystème technologique et industriel s'appuyant sur l'électricité qui pourrait surpasser et remplacer en grande partie le système actuel basé sur les combustibles fossiles.

La concurrence sur les marchés énergétiques émergents repose plus sur la technologie que sur les ressources.

L'hypothèse selon laquelle les régions telles que l'Amérique latine ou l'Afrique vont suivre des schémas de développement similaires à ceux empruntés par l'Occident ou même l'Asie, ce qui en ferait les prochains marchés des combustibles fossiles, peut être remise en question. Dans un écosystème industriel et commercial axé sur l'électricité, les économies émergentes pourraient directement passer à l'électricité produite à partir de sources renouvelables en tant que principale source d'énergie pour leur développement et leur croissance économique. La concurrence pour ces marchés

énergétiques pourrait s'appuyer sur l'offre de la meilleure technologie d'énergie renouvelable et de systèmes intégrés de gestion et d'efficacité énergétique, plutôt que sur l'offre de ressources naturelles tels que les combustibles fossiles. Les pays qui développent les meilleures technologies pourraient devenir des superpuissances énergétiques, plutôt que les pays qui disposent de grandes réserves de pétrole, de gaz ou de charbon.

Les minerais deviennent des biens stratégiques.

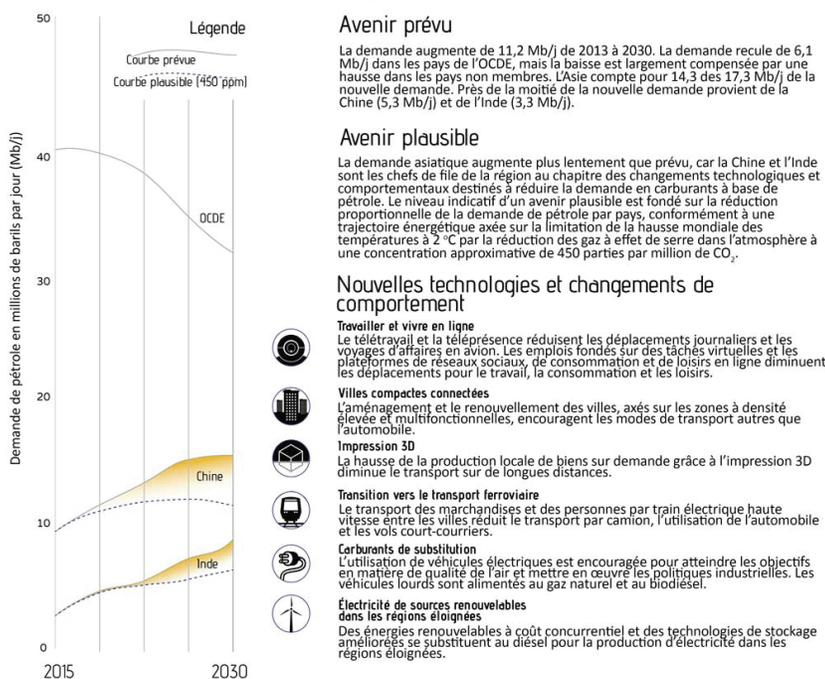
Les principaux minerais utilisés pour la fabrication de batteries, de cellules photovoltaïques et de moteurs électriques pourraient remplacer le pétrole à titre de biens stratégiques en matière d'énergie. L'Amérique latine (Bolivie, Argentine et Chili) compte les plus grandes réserves de lithium au monde⁷⁰, tandis que la Chine et le Brésil disposent de près de 60 % des réserves mondiales de métaux des terres rares⁷¹. Alors que le stockage et la mobilité occupent une part plus importante de l'écosystème axé sur l'électricité, il existe un risque de création de cartels ou de manipulation coordonnée du marché en ce qui a trait aux principaux minéraux⁷². Cette menace potentielle pourrait inciter les pays à explorer d'autres compositions chimiques pour les batteries, ce qui pourrait accélérer et étendre davantage la conversion à l'électricité en réduisant les coûts et en multipliant les options au sein des différents secteurs⁷³.

La demande de pétrole de l'industrie des transports diminue plus rapidement que prévu.

Un nombre croissant de signes subtils laissent à penser qu'on pourrait assister à une pénurie potentielle de la demande pour les combustibles fossiles plutôt que de l'offre. À mesure que l'électricité devient la principale source d'énergie mondiale et qu'elle peut être produite de plus en plus à partir de sources renouvelables peu polluantes à des prix compétitifs, le secteur du transport pourrait passer à l'énergie électrique. Ceci combiné à d'autres facteurs qui pourraient réduire la demande dans le secteur du transport (voir la figure 5), la demande pour le pétrole pourrait atteindre son pic plus tôt que prévu et diminuer plus rapidement que prévu.

Figure 5 : Évolution de la demande de pétrole en Asie

Évolution de la demande de pétrole en Asie



Basé sur les projections 2013 de BP, Exxon, Shell et l'Agence internationale de l'énergie.

Les combustibles fossiles pourraient perdre leur statut de biens utiles, ce qui pourrait faire éclater le marché du pétrole.

L'hypothèse selon laquelle les combustibles fossiles, tel que le pétrole, sont essentiels aux économies des pays pourrait commencer à être remise en question alors que la disponibilité de sources d'énergie renouvelables à des prix compétitifs augmente et que les écosystèmes économiques embrassent ce changement et évoluent afin de s'y adapter. Les types de pétrole, de gaz naturel et de charbon sont largement considérés comme des biens utiles uniformes une fois qu'ils ont pénétré les marchés mondiaux. Cependant, leur provenance peut varier de manière significative, de même que les effets géopolitiques, environnementaux ou sociaux de leurs extraction, production et transport. Si la demande dépasse de beaucoup l'offre, la discrimination entre le pétrole, le charbon et le gaz en fonction de ces effets peut être limitée; mais si l'offre dépasse la demande, des pressions pourraient être exercées afin d'obtenir des renseignements quantitatifs et qualitatifs sur la provenance des combustibles fossiles vendus. Il est possible à l'avenir que le fait que le charbon, le pétrole ou le gaz soient considérés comme des produits uniformes à l'échelle mondiale les desserve et leur fasse perdre leur statut de bien utile.

Si cela devait se produire, le marché mondial d'un combustible fossile comme le pétrole pourrait être divisé en trois : la catégorie inférieure (basée seulement sur le prix), la catégorie intermédiaire (meilleur compromis entre le prix et le respect de certains critères clés) et la catégorie supérieure/haut de gamme (l'acheteur est prêt à payer plus cher afin de s'assurer que tous les critères sont respectés). L'énergie grise liée à la production de combustibles fossiles constituerait vraisemblablement le premier facteur discriminatoire à être largement adopté. D'autres pourraient suivre, tel que la dégradation environnementale connexe, la consommation d'eau, la pollution atmosphérique, le respect des droits de l'homme, la participation des Autochtones, la liberté démocratique, la participation des femmes, la stabilité politique et économique, l'absence de conflits, etc. Si cela devait se produire, certains combustibles devraient être vendus à des prix très réduits afin de compenser certains aspects de leur production qui sont considérés comme des points négatifs par les acheteurs potentiels. Plutôt que d'accepter les prix imposés par les fournisseurs, les pays importateurs pourraient fixer les prix des différentes ressources comme le pétrole puisque les fournisseurs devront ajuster leurs tarifs afin de conserver leur place sur un marché plus réduit et plus discriminatoire.

Bien qu'aucune distinction ne soit faite actuellement pour le pétrole présent dans la chaîne d'approvisionnement, l'augmentation des données provenant de capteurs, d'analyses des mégadonnées et de l'Internet des objets pourrait fournir l'information requise par les acheteurs à tous les endroits de la chaîne d'approvisionnement pour surveiller de manière plus efficace les combustibles fossiles de différentes provenances et les discriminer. Un système permettant d'effectuer une surveillance ouverte, transparente et vérifiable du pétrole provenant de différentes sources et des produits dérivés pourrait être mis en place à l'aide d'un processus de chaîne de blocs. Des programmes similaires sont en cours de développement afin de contrôler la provenance des aliments ou d'autres produits, des matières premières aux produits finis⁷⁴. On pourrait également assister à l'émergence de fournisseurs de combustibles fossiles dont les produits répondent uniquement aux critères de la catégorie supérieure. Bien que le pétrole reçu par un acheteur pourrait provenir d'un réservoir de pétrole commun à plusieurs fournisseurs, l'acheteur qui fait affaire avec ces fournisseurs pourrait recevoir confirmation que le pétrole de catégorie supérieure est présent en plus grande quantité que le pétrole de catégorie inférieure, et que le paiement sera destiné au producteur du pétrole de catégorie supérieure. Ce système permettrait de rediriger les revenus des producteurs de pétrole de catégorie inférieure vers les producteurs de pétrole de catégorie supérieure sans perturber le système d'approvisionnement basé sur des réservoirs de pétrole. Ce système serait similaire à celui actuellement utilisé pour l'énergie verte produite par un réseau électrique provincial⁷⁵. Le prix à la livraison pourrait devenir seulement l'un des nombreux facteurs utilisés par les acheteurs d'énergie. Il pourrait être difficile de remettre en question ces décisions d'achat dans le régime commercial multilatéral actuel, puisqu'elles sont prises à l'échelle individuelle plutôt qu'à l'échelle du pays.

Scénarios

Des scénarios sont utilisés pour visualiser la façon dont le futur pourrait évoluer en fonction de différents facteurs et de différentes conditions. Les scénarios ne sont pas des tentatives de prédiction du futur, mais visent plutôt l'exploration de ce à quoi pourrait ressembler le futur, afin de mettre à l'essai les hypothèses et les approches politiques potentielles actuelles par rapport à différentes solutions de rechange.

Scénario 1 : Résister et réagir au changement

- Le Canada continue d'assumer qu'il a le statut de superpuissance énergétique en raison de ses réserves de pétrole. Il continue de réaliser des investissements en capital sur les plans économiques, sociaux et politiques en développant et en maintenant sa capacité de production à partir des sables bitumineux à titre de vecteur d'emploi, de croissance économique et de source de revenus (taxes et redevances).
- Le Canada ignore les initiatives nationales et internationales qui visent à ne plus investir dans les combustibles fossiles ou à différencier le pétrole présent sur les marchés internationaux en fonction de mesures qualitatives non intrinsèques, ou il y résiste activement.
- En défendant les règles de l'Organisation mondiale du commerce qui interdisent toute discrimination du pétrole ou des produits pétroliers en fonction de leur origine, et en ne prenant pas de mesures pour classer le pétrole en fonction de critères non intrinsèques, le Canada court le risque de passer à côté du développement d'un marché du pétrole haut de gamme et de se voir imposer les prix par les acheteurs. La nécessité de vendre au sein de la catégorie inférieure du marché mettra davantage à mal les investissements en matière de ressources pétrolières, ce qui aura une incidence sur les revenus liés aux taxes et aux redevances ainsi que sur l'emploi. Le marché traditionnel du pétrole canadien, les États-Unis, exige des réductions importantes sur le prix du pétrole produit à partir des sables bitumineux puisque le pays doit compenser les acheteurs pour les coûts en aval des crédits de pollution ou des taxes sur les émissions carboniques qui sont imposés aux États-Unis, de manière à permettre au pays d'atteindre les objectifs importants en matière de réduction des GES qu'il a convenu au terme de négociations avec la Chine.
- La perception négative liée à la position du Canada en matière de changement climatique et d'énergie s'étend aux questions non liées à l'énergie. L'image de marque du Canada à l'échelle internationale est ternie, et une large gamme de produits et services canadiens sont considérés comme « entachés » sur le marché international⁷⁶. Le pouvoir de convaincre et l'influence du Canada continuent à décroître en ce qui concerne de nombreux enjeux.
- Il pourrait être nécessaire que les importants coûts de financement des investissements dans les infrastructures de combustibles fossiles soient annulés par le secteur privé ou absorbés dans les budgets gouvernementaux aux frais des contribuables.

Scénario 2 : Embrasser le changement et le diriger

- Le Canada reconnaît l'importance croissante des sources d'énergie à faible teneur en carbone comme élément discriminant clé dans une économie mondiale sur laquelle pèsent des contraintes liées au carbone. Il est prêt à développer l'électrification déjà élevée provenant de sources renouvelables et ne produisant pas d'émissions. La promotion à l'échelle internationale du choix d'une électricité propre assure la reconnaissance des produits et services canadiens et leur basse teneur en carbone est recherchée.
- Le Canada utilise de plus en plus son électricité propre en développant et en adoptant de manière précoce les nouvelles technologies et les nouveaux processus de l'écosystème énergétique industriel et commercial axé sur l'électricité qui prend de l'ampleur. Le Canada devient un acteur de plus en plus prééminent dans plusieurs secteurs de niche clés de l'utilisation de l'énergie électrique, comme les fermes de données ou l'extraction et le raffinage de ressources minérales, en utilisant de nouveaux processus axés sur l'électricité.

- En jouant progressivement un rôle dans le développement et la codification d'une base d'information internationale émergente qui vise la démarchandisation du pétrole, le Canada se place comme un joueur important dans cette sous-catégorie de l'enjeu climatique/énergétique.
- Le fait de déplacer la composition des exportations de pétrole du Canada pour répondre aux critères des sources hautes de gamme (essentiellement conventionnelles) permet au pays de conserver ses parts de marché et même de les augmenter dans un marché mondial du pétrole en déclin. La capture et le stockage de CO2 sont rentables en raison des avancées technologiques et des crédits environnementaux obtenus en récupérant le pétrole des dépôts conventionnels existants.
- Les efforts déployés en matière de recherche se poursuivent dans le but d'utiliser le potentiel énergétique des sables bitumineux pour créer des combustibles différents grâce à la transformation biologique in situ en hydrogène, éthanol et gaz de synthèse qui sont utilisés dans les secteurs du transport, des produits chimiques, des plastiques et de la combustion propre pour produire de l'électricité destinée au marché américain.

Répercussions pour le Canada

Le Canada serait relativement bien placé pour tirer parti d'un écosystème industriel axé sur l'électricité

L'accès à l'électricité est quasiment universel au Canada⁷⁷ et approximativement 66 % de l'électricité produite provient de l'énergie hydroélectrique renouvelable et de l'énergie nucléaire ne produisant pas d'émissions de GES⁷⁸. Il s'agit d'un contraste important par rapport aux faibles taux d'électrification de nombreux pays en voie de développement⁷⁹ et à la production mondiale d'électricité qui provient à 75 % des combustibles fossiles. Tandis que certaines régions du monde doivent encore augmenter leur capacité de production et passer aux sources d'énergie renouvelables, le Canada dispose non seulement de suffisamment d'électricité pour répondre à ses besoins, mais il est en mesure d'exporter près de 10 % de sa production⁸⁰. Le Canada a également la possibilité d'augmenter sa production totale d'électricité⁸¹ et de passer encore davantage à des sources de production d'électricité à faible teneur en carbone⁸². Ces facteurs placent le Canada dans une position enviable pour exporter l'électricité faible en carbone vers des marchés aux États-Unis et au Mexique. On prévoit que ces deux économies présentent une demande en hausse pour l'électricité tout en devant réduire leurs émissions de GES. La possibilité de transporter l'électricité sur de longues distances vers de nouveaux marchés pourrait augmenter à mesure que la technologie se développe⁸³. Le Canada pourrait également exporter sa technologie, ses logiciels et son expertise en matière de production d'énergie électrique, particulièrement en ce qui concerne l'hydroélectricité, ainsi qu'en matière de distribution, de gestion, d'utilisation et de stockage de l'électricité.

Centres de données : des carrefours de l'économie numérique

Alors que les technologies numériques augmentent, les capacités d'un nombre grandissant de secteurs de l'économie mondiale, la demande en électricité associée au traitement des données, au stockage et au transport croît en valeur absolue, mais également sur le plan de la part représentée dans la consommation finale d'énergie. Bien que les exportations intercontinentales d'électricité ne soient pas rentables pour le moment, les câbles à fibres optiques haute vitesse permettent aujourd'hui de transmettre des données de manière efficiente d'un continent à l'autre. Des centres de données peuvent être installés à proximité de sources d'électricité à faible coût et sobre en carbone, où le climat réduit la consommation d'énergie nécessaire au refroidissement. Ces grands centres de données, rapides et fiables, pourraient devenir des carrefours d'innovation et de développement économique en attirant des activités pour lesquelles la vitesse et le volume computationnels sont essentiels. Dans une économie de plus en plus numérique, l'avantage ira à ceux qui pourront stocker, manipuler, transmettre et appliquer les données le plus rapidement et le plus sûrement possible, au coût le plus bas et avec le minimum de répercussions environnementales.

[L'Islande est le lieu idéal pour installer un centre de données neutre en carbone](#)



Le Canada pourrait devenir un joueur mondial au sein de l'écosystème industriel électrique émergent de plusieurs manières. En hébergeant des centres de données, le Canada pourrait fournir une part importante de la demande d'énergie électrique mondiale en forte croissance liée à l'économie numérique émergente⁸⁴. À mesure que l'économie est de plus en plus axée sur le numérique et que la fabrication additive prend de l'ampleur, de nombreux secteurs de production pourraient être relocalisés au pays. L'électricité pourrait être exportée de manière à appuyer une relocalisation similaire aux États-Unis et au Mexique. La compétitivité des coûts ou la préférence accordée aux produits et services canadiens fournis à l'aide d'une énergie électrique propre pourrait augmenter dans un monde qui subit des contraintes liées au carbone. Le Canada pourrait exporter l'énergie faible en carbone qui fait partie intégrante des produits et services⁸⁵ en attirant la production de biens et services qui requièrent une grande quantité d'électricité et qui sont actuellement produits par d'autres pays en utilisant une part relativement importante d'électricité produite à partir de combustibles fossiles.

Le Canada pourrait diriger les recherches portant sur la transition des processus industriels utilisant à l'heure actuelle des combustibles fossiles vers l'utilisation d'électricité, ou il pourrait adopter de manière précoce les technologies développées ailleurs pour produire à l'aide de l'électricité des produits présentant une faible teneur grise en carbone. Les secteurs de la transformation des minerais et de la métallurgie sont généralement considérés comme des secteurs industriels mûrs pour lesquels le Canada pourrait présenter un avantage comparatif en développant ou en adoptant des technologies de rupture à l'aide de l'électricité⁸⁶.

Le Canada pourrait disposer de réserves importantes de minerais et de métaux dans un monde numérique électrifié.

Alors qu'un nouvel écosystème industriel évolue pour tirer parti de l'électricité, les matières utilisées pour ce faire vont également changer. Les nouvelles technologies nécessiteront de grandes quantités de minerais et de métaux comme le lithium, le graphite et le cobalt pour les batteries, de même que des métaux des terres rares pour les aimants permanents des moteurs électriques⁸⁷. L'expertise bien développée du Canada en matière d'exploration et d'exploitation minière pourrait placer le pays dans une position confortable pour explorer et développer seul ou avec d'autres partenaires de nouvelles sources. Les possibilités de découvrir de nouvelles applications des matières existantes et de développer de nouvelles matières biologiques pourraient également être envisagées.

Le Canada devrait réexaminer la demande anticipée pour ses biens pétroliers.

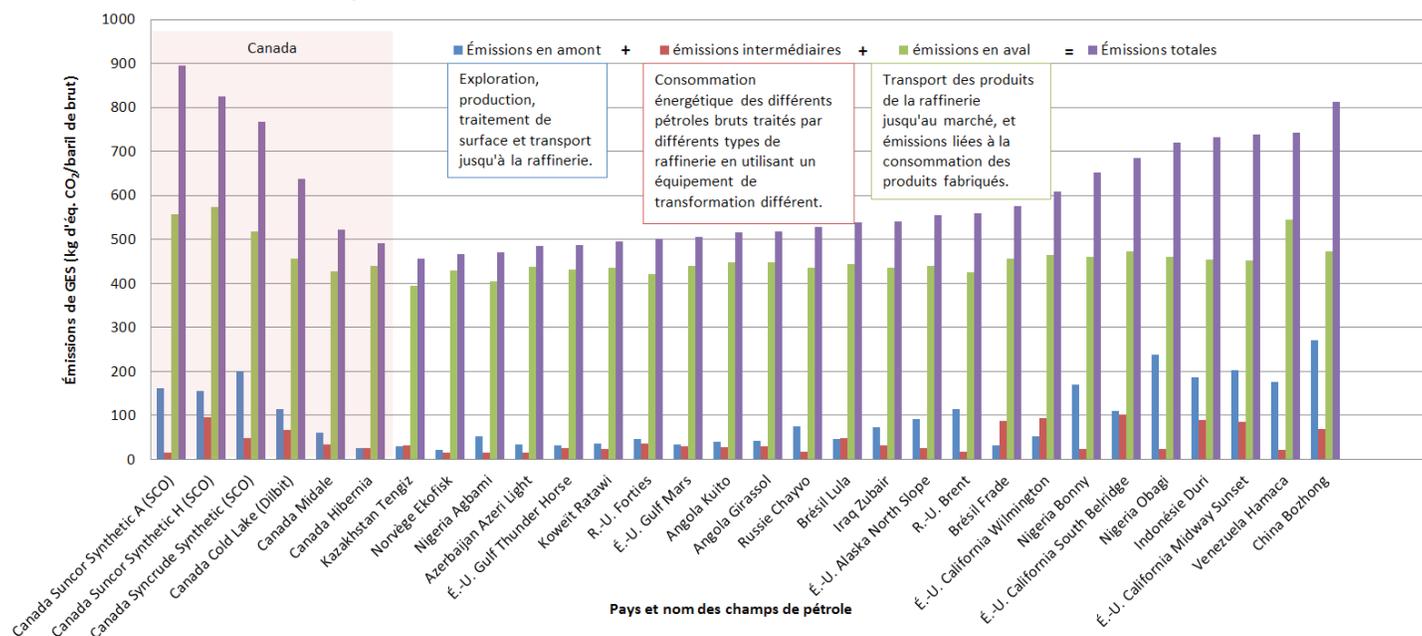
En raison d'une transition importante vers l'électrification des moyens de transport personnels, combinée à un possible ralentissement de la demande pour le transport des marchandises et des personnes, la demande pour le pétrole pourrait atteindre son pic plus tôt que prévu et diminuer plus rapidement que prévu⁸⁸. Si ces tendances se poursuivent, le Canada pourrait déterminer que tout son pétrole ne peut pas être mis sur le marché au prix courant du marché, en particulier si les producteurs de pétrole à faible coût continuent à imposer des prix en maintenant ou en augmentant l'approvisionnement afin de conserver leurs parts de marché et de maximiser les ventes de leurs biens pétroliers pendant que le pétrole présente encore une valeur économique⁸⁹.

Le Canada devrait reconsidérer la qualité marchande de différents types de réserves de pétrole.

Si les marchés mondiaux ou régionaux du pétrole canadien commencent à distinguer le pétrole en fonction de valeurs non intrinsèques comme les émissions de GES grises et à le répartir dans différentes catégories, les producteurs canadiens pourraient devenir des fixeurs de prix ou des preneurs de prix, en fonction de la catégorie attribuée à leurs réserves, à savoir un niveau haut de gamme, un niveau intermédiaire ou un niveau inférieur. Il serait important que le Canada comprenne les critères qui risquent d'être utilisés pour définir les catégories et déterminer les dépôts de combustibles fossiles qui répondent à ces critères au Canada. Comme l'indique la figure 6, les mesures des émissions de GES de certaines des sources de pétrole canadiennes sont inférieures à ce que la réputation internationale pourrait laisser à penser. Le profil du Canada en matière d'émissions de GES pourrait être amélioré en choisissant de développer des sources pétrolières choisies, même au sein des dépôts de sables bitumineux.

L'émergence d'un système de classification des dépôts en fonction de leur catégorie pourrait réduire de manière significative la valeur pour les actionnaires et l'entreprise si les dépôts sont classés comme étant de catégorie inférieure, et vice-versa. Des effets d'entraînement éventuels pourraient être observés sur les marchés boursiers comme le TSX qui sont fortement liés à des ressources comme le pétrole, et par la suite dans l'ensemble de l'économie.

Figure 6 : Comparaison des émissions de gaz à effet de serre : les champs pétroliers canadiens et ceux du reste du monde



Source adaptée de : Carnegie Endowment for International Peace, "Know Your Oil: Creating a Global Oil-Climate Index", mars 2015

Le Canada dispose d'un système de manutention en vrac pour le pétrole, le gaz et le charbon, mais il devrait considérer la ségrégation, l'identification et la certification des sources pour différentes catégories de pétrole de manière à éviter de voir ses ressources classées comme appartenant à la catégorie inférieure par un acheteur du niveau haut de gamme.



En présence d'un modèle de taxation ou de tarification visant à réduire les émissions de carbone, on peut envisager une situation dans laquelle un acheteur pourrait éviter de payer des taxes sur les émissions carboniques ou d'acheter des crédits de pollution en achetant du pétrole qui présente déjà une faible énergie grise pour sa production; la réduction des émissions serait considérée alors comme intrinsèque au pétrole. Le pétrole présentant une énergie grise importante se vendrait alors à prix réduit, car il entraînerait des taxes plus élevées ou des coûts liés à l'achat de crédits de pollution pour son utilisation.

Diriger une transition contrôlée et responsable vers un avenir au-delà du pétrole

Un réseau émergent d'acteurs opposés à la production de pétrole pourrait potentiellement perturber de manière importante le secteur pétrolier canadien. La campagne qui vise à encourager les investisseurs à se dissocier des combustibles fossiles⁹⁰ pourrait prendre de l'ampleur. En reconnaissant que le pétrole va continuer à être un élément important du bouquet énergétique mondial, au moins dans un avenir proche, mais qu'une certaine quantité de pétrole ne sera pas extraite du sol, le Canada pourrait avoir la possibilité de jouer un rôle de chef de file mondial en assurant une transition ordonnée et responsable vers un avenir au-delà du pétrole.

Si le marché peut choisir parmi les fournisseurs dans le but de répondre aux objectifs en matière de changement climatique ou à d'autres objectifs, il est probable que la demande soit plus forte pour le pétrole le moins dommageable pour l'environnement et sur le plan social. Le Canada pourrait disposer de pétrole qui répond à des critères émergents plus stricts, et en étant présent dans cet espace, il pourrait être en mesure de commercialiser ce pétrole. La création de catégories de classification sous-entend que certains dépôts pourraient ne pas pouvoir être commercialisés et devront être éliminés. Le Canada devra alors repenser les investissements dans les infrastructures ainsi que les flux de taxes et de redevances liés aux différents types de dépôts de pétrole. Il existe également des enjeux potentiels liés à la mise hors service d'infrastructures existantes abandonnées de production et de transport du pétrole. Le Canada devrait sinon mener des recherches et développer des utilisations alternatives des dépôts de pétrole abandonnés, ou des moyens de les convertir en énergie sous une autre forme, par exemple du méthane ou de l'hydrogène⁹¹. L'utilisation pour la fabrication de plastiques n'est vraisemblablement pas une option, étant donné que le pétrole n'est pas utilisé pour produire du plastique dans les principaux marchés comme les États-Unis⁹².

Repenser la stratégie de développement de l'Arctique

Des répercussions pourraient être envisagées pour l'Arctique canadien si la demande mondiale pour le pétrole et le gaz n'augmente pas comme prévu. Le pétrole de l'Arctique pourrait être moins compétitif dans le cadre d'un approvisionnement mondial en surplus en raison de son coût élevé (qui comprend la production d'énergie grise), mais aussi des risques importants pour l'environnement qui y sont associés. Les entreprises énergétiques pourraient être moins intéressées à l'idée d'obtenir les droits liés à des dépôts de gaz ou de pétrole dans l'Arctique ou à développer des ressources en leur possession, ce qui pourrait réduire les possibilités économiques et les emplois dans la région. Cependant, les matières telles que les minerais ou les métaux requis dans le cadre d'un écosystème énergétique axé sur l'électricité ou des ressources naturelles telles que les pêches pourraient devenir des biens possédant une valeur stratégique et économique. Tout nouveau moteur économique autre que le pétrole et le gaz entraînerait des modifications des décisions en matière de développement et d'investissement dans les infrastructures.

Les énergies renouvelables à faible coût bousculeront les modèles fonctionnels des services publics d'électricité canadiens.

En produisant de l'électricité au même coût (ou à un coût inférieur) que les centrales classiques sans bénéficier de subventions, les énergies renouvelables décentralisées et non subventionnées pourraient obliger les services publics canadiens à fournir de l'électricité à coût concurrentiel dans le cadre du modèle de distribution centralisé actuel. Dans les prochaines années, l'innovation, la hausse de la capacité de production de masse et l'expansion des entreprises asiatiques, européennes et américaines sur le marché continueront d'exercer une pression à la baisse sur le coût des dispositifs utilisant des énergies renouvelables, au détriment de la compétitivité des modèles centralisés des services publics canadiens.

Le Canada doit s'attendre à subir des pressions de plusieurs fronts concernant la déréglementation de ses marchés de l'électricité pour favoriser la pénétration des énergies renouvelables et l'adoption de nouveaux modèles fonctionnels de distribution.

Le développement rapide des sources renouvelables, en particulier dans les pays asiatiques, pourrait entraîner l'adoption de nouveaux modèles fonctionnels de production et de distribution d'électricité axés sur le faible coût, l'extensibilité et la décentralisation des énergies renouvelables. Les producteurs de technologies des énergies renouvelables pourraient vouloir augmenter leur part des marchés étrangers.

Dans la foulée de la libéralisation des échanges qui découlerait de l'Accord sur les biens environnementaux⁹⁴ de l'Organisation mondiale du commerce, les systèmes d'énergie photovoltaïque de toiture ou les éoliennes et les technologies de stockage fabriqués à l'étranger pourraient s'avérer une option économique intéressante pour les consommateurs canadiens d'électricité qui sont propriétaires d'immeubles dans les secteurs commercial, agricole, institutionnel, gouvernemental ou industriel. À l'échelle individuelle ou entrepreneuriale, les consommateurs pourraient également contribuer à l'utilisation accrue des énergies renouvelables, reliées ou non au réseau existant, en raison de leur faible coût et des faibles émissions de carbone.

Le coût de l'électricité provenant de centrales pourrait grimper⁹⁵.

Dans le système canadien, où l'offre des centrales provinciales suffit déjà à la demande, la production à partir d'énergies renouvelables se substituera à celle des centrales. Le coût de l'électricité provenant des services publics provinciaux risque d'augmenter parce que les grandes centrales nucléaires et thermiques sont optimisées pour fonctionner en continu. La variation ou la réduction de la production peut diminuer leur efficacité et augmenter les coûts d'exploitation. Les services publics provinciaux doivent aussi assumer le fardeau du service de la dette et des coûts considérables d'entretien de vastes réseaux de transport longue distance, ce qui ne sera sans doute pas le cas des systèmes décentralisés de production à partir d'énergies renouvelables⁹⁶. L'incertitude quant au moment où le prix des énergies renouvelables atteindra la parité avec ceux des réseaux publics augmente le risque lié aux investissements publics dans de grandes installations de production propriétés de l'État, celles-ci nécessitant d'importants investissements en capitaux pour construire de nouvelles centrales électriques de grande taille dont le rendement pourrait ne pas être suffisant pour rembourser la dette publique imputée par leur construction.



Conclusion

Il est de plus en plus plausible d'envisager un avenir dans lequel l'électricité bon marché produite à partir de sources renouvelables devienne la principale source énergétique au monde, et que les combustibles fossiles soient relégués à un statut minoritaire. Cet avenir envisageable semble favoriser les stratégies qui permettent au Canada de mettre au point ses propres systèmes de production et de distribution d'énergie afin d'adopter l'électricité bon marché produite à partir de sources renouvelables et d'en tirer parti. Cela offrirait également au Canada l'expertise requise pour participer au marché mondial en hausse de l'électrification produite à partir de sources renouvelables. Par opposition, cet avenir plausible semblerait aller à l'encontre des investissements à long terme dans les infrastructures de production, de raffinage et de distribution de gaz et de pétrole puisqu'elles risqueraient fortement de devenir non viables sur le plan économique à mesure que les prix de l'électricité produite à partir de sources renouvelables diminuent. Au minimum, cet avenir envisageable suggérerait que les gouvernements doivent transférer les risques liés à des investissements supplémentaires dans les infrastructures de gaz et pétrole au secteur privé, plutôt que de les imputer aux contribuables. Enfin, tandis que les intérêts généraux des producteurs de combustibles fossiles semblent réduits dans le cadre de ce scénario plausible à l'avenir, certains producteurs canadiens de pétrole à faible coût et produisant peu d'émissions de GES pourraient desservir un marché de niche pour un pétrole écologique et éthique. Pour conclure, la possibilité que des perturbations importantes du secteur énergétique surviennent au cours des 10 à 15 prochaines années, tel que l'illustre le scénario d'avenir plausible décrit dans le présent document, favoriserait l'idée que les gouvernements et les entreprises fassent preuve d'une grande prudence pour éviter de réaliser des investissements à long terme qui pourraient ne pas être viables si les conditions changent.

Annexe A : Hypothèses

Cette étude prospective remet en question les hypothèses actuelles sur l'avenir attendu du paysage énergétique mondial. Elle propose des hypothèses de rechange susceptibles d'être plus solides dans une série de scénarios futurs que les hypothèses actuelles.

Hypothèses	Hypothèses solides
Les combustibles fossiles continueront de dominer l'approvisionnement énergétique principal à l'échelle internationale.	La part de l'électricité en tant que principale source d'énergie va augmenter dans le monde entier, et elle pourrait remettre en question la domination des combustibles fossiles en tant que forme d'énergie utilisée par de nombreux secteurs économiques.
L'énergie renouvelable doit être subventionnée pour être compétitive au niveau des coûts par rapport à la génération d'énergie à partir du charbon ou du gaz naturel.	Plusieurs types d'électricité produite à partir de sources renouvelables sont déjà moins onéreux sans subventions que l'énergie produite à partir des combustibles fossiles; pour les autres, cela devrait se produire au cours des 10 prochaines années.
Les considérations environnementales et sociales continueront d'être placées au second rang, après les considérations économiques, en ce qui concerne les décisions en matière d'approvisionnement et de consommation énergétique.	L'augmentation de la capacité énergétique n'est pas forcément synonyme de répercussions environnementales et sociales. Les coûts en baisse de la technologie des sources d'énergie renouvelables, combinés à l'internalisation croissante des coûts pour l'environnement et la santé causés par les émissions liées aux combustibles fossiles, pourraient faire de l'ensemble des sources renouvelables la source d'électricité la moins onéreuse d'ici 10 ans.
Les services publics d'énergie électrique centralisés et nationalisés ainsi que les réseaux étendus continueront de représenter le modèle d'activités dominant pour l'approvisionnement énergétique.	L'extensibilité des sources renouvelables, en particulier l'énergie éolienne et l'énergie solaire, pourrait donner lieu à la création de grilles géantes à l'échelle régionale ou continentale qui entrecoupent plusieurs juridictions, mais aussi à des sources d'approvisionnement très locales et captives qui ne sont pas reliées au réseau électrique des services publics.
La contribution des énergies éolienne et solaire à la production d'électricité sera limitée en raison du coût élevé du stockage nécessaire pour compenser la variabilité de l'approvisionnement, ce qui signifie que des centrales seront toujours requises pour les périodes de forte demande.	L'intégration régionale de la production d'énergies solaire et éolienne combinée à la gestion avancée de la demande peut permettre de réguler de manière significative les intermittences; le stockage pourrait ne pas constituer un facteur problématique avant que les énergies solaire et éolienne ne représentent plus de 70 % de l'approvisionnement énergétique; les coûts des batteries de stockage pourraient continuer à baisser jusqu'à devenir plus compétitifs que les coûts des centrales de pointe; les batteries disséminées et reliées à l'Internet dans les bâtiments et les véhicules pourraient servir de centrales de pointe virtuelles.

Hypothèses	Hypothèses solides
<p>Les taux d'adoption des véhicules électriques vont demeurer faibles en raison des coûts initiaux élevés par rapport aux véhicules à moteur à combustion interne, des faibles autonomies de kilométrage et des infrastructures de charge limitées.</p>	<p>Les coûts des batteries vont continuer à baisser jusqu'à ce que le prix clés en main d'un véhicule électrique soit compétitif par rapport à celui d'un véhicule classique à moteur à combustion interne; l'expérience des clients avec les véhicules électriques va permettre de réduire l'anxiété liée à l'autonomie; les flottes de véhicules pourraient être modifiées plus rapidement que par le passé en raison de l'évolution des concepts liés à la possession d'un véhicule et des mesures réglementaires visant à réduire les effets de l'utilisation des combustibles fossiles sur l'environnement et la santé.</p>
<p>La demande mondiale pour le pétrole brut va augmenter de façon importante au cours des 10 à 15 prochaines années, en étant principalement entraînée par un marché des véhicules en hausse dans les pays en voie de développement et une croissance des secteurs du fret et de l'aéronautique.</p>	<p>La demande mondiale de combustibles fossiles pourrait culminer plus tôt et décliner plus rapidement que prévu, ce qui fera chuter la demande mondiale. De nouvelles technologies (les voitures électriques, par exemple) et des changements comportementaux (travail virtuel), ainsi que l'économie du partage dans l'industrie de la mobilité, pourraient entraîner une baisse de la demande de pétrole dans le secteur des transports.</p>
<p>Les principaux pays producteurs de pétrole vont rééquilibrer l'offre afin d'augmenter et de stabiliser les prix.</p>	<p>Pour maintenir leurs parts dans un marché en décroissance, les producteurs de pétrole à faible coût pourraient décider de ne pas comprimer leur offre et de maximiser plutôt l'exploitation de leurs réserves avant que le pétrole perde sa suprématie comme source énergétique.</p>
<p>Les combustibles à base de pétrole sont des biens de valeur.</p>	<p>Les acheteurs pourraient être en mesure de suivre à tous les points de la chaîne d'approvisionnement les produits provenant de différentes sources de pétrole et de faire un choix entre ces produits en s'appuyant sur les qualités intrinsèques du pétrole ainsi que sur les qualités non intrinsèques, telles que les répercussions sur les plans environnemental et social de l'extraction, du transport et de la production des produits.</p>

References

1. Agence internationale de l'énergie, [World Energy Outlook 2014, Executive Summary](#).
2. Agence internationale de l'énergie, [World Final Consumption \(2013\)](#). La part de l'électricité au sein de la consommation énergétique finale totale a presque doublé, passant de 15 % en 1973 à 27 % en 2012.
3. Agence internationale de l'énergie, [World Energy Outlook 2014 Factsheet](#).
4. Agence internationale de l'énergie, [World Energy Outlook 2014 Factsheet](#).
5. Energy Research Institute, National Development and Reform Commission, [China 2050 High Renewable Energy Penetration Scenario and Roadmap Study](#), 2015.
6. Centre for Energy-Efficient Telecommunications, Université de Melbourne, [The Power of the Wireless Cloud](#). Le modèle CEET estime la consommation énergétique du nuage sans fil de 2012 à 9,2 terawatts-heure. La consommation énergétique estimée du nuage sans fil de 2015 est comprise entre 32 et 43 terawatts-heure, soit une augmentation comprise entre 390 et 460 % en trois ans.
7. Horizons de politiques Canada, [Observations du groupe de travail sur l'énergie – L'avenir de l'Asie : implications pour le Canada](#), 2015.
8. REN21, [Renewables 2014: Global Status Report, 2014](#), p. 21; Agence internationale de l'énergie, [Renewables information](#), Paris, Éditions OCDE, 2014.
9. Agence internationale pour les énergies renouvelables, [Renewable Power generation costs in 2014](#), 2015.
10. [Deutsche Bank's 2015 solar outlook: accelerating investment and cost competitiveness](#), 13 janvier 2015.

« À l'heure actuelle, l'électricité produite à partir de panneaux solaires de toit non subventionnés coûte entre 0,13 et 0,23 \$ du kWh, ce qui est bien en deçà du prix de détail dans bien des marchés dans le monde. La rentabilité de l'énergie solaire s'est beaucoup améliorée par suite de la réduction du prix des panneaux solaires, des coûts de financement et des autres coûts liés aux systèmes. On prévoit que les coûts des systèmes à l'énergie solaire diminueront d'au moins 5 à 15 % par année dans les trois prochaines années, de sorte qu'ils pourraient atteindre la parité avec ceux du réseau dans la moitié environ des marchés cibles. En supposant une hausse de 3 % par année des prix de l'électricité dans le monde, et un recul des coûts de 5 à 15 % (TCAC), l'énergie solaire atteindra la parité avec le réseau dans un autre 30 % environ des marchés visés dans le monde. Nous estimons que la part cumulative totale du marché disponible pour le solaire est d'environ 140 GW/année, et qu'elle pourrait augmenter à 260 GW/année environ dans les cinq prochaines années si la parité avec le réseau est atteinte dans plus de marchés et si la demande en électricité augmente »;

Clean Technica, « [Solar Pv Costs to Fall Another 25% in Three Years](#) », 26 mai 2015.

MIT, [The Future of Solar Energy: An Interdisciplinary MIT Study](#), mai 2015, p. 127.

11. Agence internationale pour les énergies renouvelables, [Studies on Renewable Energy Potential](#).
12. Wikipedia, [Life-cycle greenhouse-gas emissions of energy sources](#), 2015.
13. World Resources Institute, « [Identifying the Global Coal Industry's Water Risks](#) », avril 2014.

World Resources Institute, [Water Risk Atlas](#).

World Resources Institute, [Shale Resources and Water Risks](#).

The Globe and Mail, « [High-tech environmental push needed for oil sands: Tory-requested report](#) », mai 2015.

EcoCentric, [Fracking's Water Footprint in Marcellus Shale Larger Than Previously Thought](#), 2013.

14. Banque mondiale, [State and Trends of Carbon Pricing](#), 2014.
15. John A. Mathews et Hao Tan, « Economics: Manufacture renewables to build energy security », *Nature*, vol. 513, no 7617, 10 septembre 2014; Agence internationale de l'énergie, [World energy outlook, 2014](#), p. 235; Agence internationale pour les énergies renouvelables, [Installed Renewable Power Capacity – Cumulative capacity, for China, Japan, India, Malaysia, Thailand](#).

16. Björn Nykvist et Måns Nilsson, [Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles](#), mars 2015. « Nous avons montré que les estimations des coûts à l'échelle de l'industrie ont décliné d'environ 14 % par an entre 2007 et 2014, pour passer de plus de 1 000 \$ US par kWh à environ 410 \$ US par kWh, et que le coût des blocs-batterie utilisés par les fabricants de véhicules électriques à batterie chefs de file sur le marché était encore inférieur, à 300 \$ US par kWh, et qu'il baissait de 8 % par an. Le taux d'apprentissage, la réduction des coûts après le doublage cumulatif de la production, est compris entre 6 et 9 %, ce qui correspond aux résultats des études précédentes portant sur la technologie des batteries de véhicules. Nous avons indiqué que les coûts des blocs-batterie au lithium-ion continuaient à baisser et que les coûts des chefs de file du marché étaient bien inférieurs à ce qui avait été rapporté précédemment. Cela a eu une incidence importante sur les hypothèses utilisées pour modéliser les futurs systèmes énergétiques et de transport et a révélé une perspective optimiste pour les véhicules électriques à batterie qui contribuent au transport avec de faibles émissions de carbone. »;

Tesla, [Powerwall](#) : La batterie domestique de Tesla.

17. GE, [Wind in the Cloud? How the digital Wind Farm will Make Wind Power 20% More Efficient](#), mai 2015.

IBM, [IBM Research Launches Project "Green Horizon" to Help China Deliver on Ambitious Energy and Environment Goals](#), juillet 2014.

18. Global Research, « [Replacing Fossil Fuel and Nuclear Power with Renewable Energy: Wind, Solar and Hydro Power](#) », mars 2014.

Bloomberg, « [Obama's EPA Rule is Redrawing the U.S. Coal Map](#) », avril 2015.

19. Brookings, « [Making Renewable Power Sustainable in India](#) », janvier 2015.

20. RMI, « [Learning from the Cell Phone Phenomenon: How Microgrids Can Help Developing Countries Leapfrog into a New Energy Paradigm](#) », juillet 2013.

21. S.C. Mueller, P.G. Sandner et I.M. Welpé, « Monitoring innovation in electrochemical energy storage technologies: a patent-based approach », *Applied Energy*, 2014. DOI : 10.1016/j.apenergy.2014.06.082.

22. Agence internationale de l'énergie, [Global EV Outlook: Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020](#), 2013, p. 17.

23. Tesla Motors, [Powerwall](#)

24. Tesla Motors, [Gigafactory Tesla](#).

25. Björn Nykvist et Måns Nilsson, « [Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles](#) », *Nature*, mars 2015.

26. Tesla, [Planned 2020 Gigafactory Production Exceeds 2013 Global Production](#)

Reuters, « [China's BYD takes aim at Tesla in battery factory race](#) », 13 mars 2015.

27. Morgan Stanley, « [Solar Power and Energy Storage: Policy factors vs. Improving Economics](#) », 28 juillet 2014, p. 6.

28. ECN, « [Design to improve material properties of sodium-ion batteries](#) », 26 juin 2015.

NextBigFuture, « [Sakti could mass produce next generation solid state battery for around \\$100 per kwh](#) », 26 mars 2015.

29. Fortune, « [Tesla's gigafactory could be obsolete before it even opens. Here's why](#) », 27 avril 2015.

30. The Guardian, « [Low carbon battery-powered train carries first passengers](#) », 13 janvier 2015.

31. 570News, « [Tesla Motors co-founder Ian Wright wants to electrify gas-guzzling commercial trucks](#) », 2 juin 2015.

32. L'OBS Economie, « [L'E-Fan d'Airbus, premier avion 100% électrique à traverser la Manche](#) », 10 juillet 2015.

33. Green Mountain Power, [Tesla Powerwall](#), 2015

34. Mark Chediak et Dana Hall, « [Elon Musk says utilities shouldn't fear his battery systems](#) », Bloomberg, 8 juin 2015.

35. Reneweconomy, « [Graph of the Day : Myth of cheap shale gas and cheap energy](#) », 14 janvier 2015.

36. [Tesla Energy](#)

Daimler, [Sales Launch of private energy storage plants](#), 9 juin 2015.

37. Charged, « [Nissan, GM and Toyota repurpose used EV batteries for stationary storage](#) », 17 juin 2015

Gizmag, « [Nissan to incorporate used Leaf batteries in stationary energy storage system](#) », 15 juin 2015.

38. Nissan Motor Corporation, [Vehicle to Home Electricity Supply System](#).

39. Nissan, [Leaf to Home Electricity Supply System](#).

Automobile propre, « [Smart-grid – Nissan expérimente le « leaf to home » au Japon](#) », décembre 2014.

40. Institute for Energy Research, « [Germany's Electricity Market Out of Balance](#) », août 2014.

Eric Martinot, « [How is Germany Integrating and Balancing Renewable Energy Today?](#) », janvier 2015.

41. Bloomberg, « [China out-spends the US for first time in \\$15bn smart grid market](#) », février 2014.

GSMA, « [How China is set for global M2M Leadership](#) », juin 2014.

Owen Poindexter, « [The Internet of Things with Thrive on Energy Efficiency](#) » FutureStructure, 28 juillet 2014.

Youtube, « [Smart Energy Systems: 100% Renewable Energy at a National Level](#) », novembre 2014.

YouTube, « [Smart Solar Energy Management with SMA](#) », février 2015. (Il ne s'agit pas de la meilleure vidéo, mais elle montre un point intéressant; un système intelligent à la maison qui est capable d'accéder aux prévisions météorologiques peut ensuite déterminer à quel moment il est préférable d'utiliser les appareils électroménagers; de plus, à mesure que les appareils électroménagers deviennent eux aussi intelligents, le système peut démarrer la laveuse sans vous au bon moment);

Youtube, « [What is the Smart Grid?](#) », juin 2013.

42. IBM, [Smart Grid](#).

Tesla, [Powerwall : La batterie domestique de Tesla](#).

Breaking Energy, « [New Storage Technologies Open Doors for Wind and Solar](#) », mai 2015.

43. Agence internationale pour les énergies renouvelables, [Solar Heat technology for industrial process – potential](#), 2015, p. 4, « environ 40 % de la consommation énergétique principale de l'industrie est couverte par le gaz naturel et environ 41 % par le pétrole ».

44. Agence internationale pour les énergies renouvelables, [Solar Heat technology for industrial process – potential](#), 2015.

45. American Institute of Chemical Engineering, « [Molten Salt Gives Concentrated Solar a Unique Advantage](#) »,

« [The bright future of solar thermal powered factories](#) ».

YouTube, « [Melting steel with solar power](#) », 2008.

46. Agence internationale pour les énergies renouvelables, [Solar Heat technology for industrial process – potential](#), 2015.

47. Solar Heat World Wide, [Markets and Contribution to the Energy supply 2012, 2014](#).

Agence internationale de l'énergie, [Technology roadmap: Solar Heating and Cooling](#), 2012, p. 26.

48. [Drake Landing Community](#).

« La Communauté à énergie solaire Drake Landing (DLSC) est un quartier planifié dans la ville de Okotoks, en Alberta, qui a su combiner avec succès les technologies canadiennes d'efficacité énergétique à une source d'énergie renouvelable illimitée, le soleil. Premier projet de ce type en Amérique du Nord, le DLSC est chauffé par un système local conçu pour stocker sous terre l'abondante énergie solaire pendant les mois d'été et pour distribuer l'énergie à chaque maison pour répondre aux besoins de chauffage des locaux pendant l'hiver. Le système représente une nouveauté unique au monde, en répondant à 90 % des besoins de chauffage de chaque maison grâce à l'énergie solaire, ce qui permet de moins dépendre des combustibles fossiles limités. Le gouvernement du Canada et ses partenaires de l'industrie sont fiers de présenter les technologies canadiennes héliothermiques et d'efficacité énergétique dans un quartier unique ».

49. The Economist, « [LNG: A Liquid market](#) », 2012.
50. RIA, Robotics and Energy Cost Reduction, 2006. « [Puisque les robots peuvent opérer sans supervision, ils peuvent fabriquer des produits alors que personne n'est présent. La capacité de fonctionner dans le noir ou dans des environnements non chauffés peut permettre de réaliser d'importantes économies d'énergie de la part des fabricants.](#) ».
51. Business Insider, « [China has crossed a major investment threshold that is going to change the entire world](#) », février 2015.
52. Agence internationale pour les énergies renouvelables, [Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2015](#), 2015.
- UKERC, « [Low Carbon jobs: The evidence for net job creation from policy support for energy efficiency and renewable energy](#) », novembre 2014.
53. Kenichi Imai, « [Impacts of Electrification with Renewable Energies on Local Economies: The Case of India's Rural Areas](#) », mars 2013.
54. Le Monde, « [Ikea s'engage sur les énergies renouvelables](#) », juin 2015.
55. Ecowatch, « [Tim Cook: New Solar Farm Will Be Apple's 'Biggest, Boldest and Most Ambitious Project Ever](#) », février 2015.
56. Renewable Energy World, « [Big Companies, Big Renewable Investments](#) », août 2014.
57. WWF, [Powering Businesses on Renewable Energy](#).
- GreenBiz, « [Apple, Ikea, Walmart : 12 leaders in on-site renewables](#) », décembre 2014.
58. Skolkovo, [Emerging Markets Transforming the Global Automotive Industry](#).
- « D'ici 2030, on prévoit que les ventes annuelles de la Chine 39 millions, soit 28 % des ventes mondiales. Le marché des véhicules motorisés en Inde sera alimenté à la fois par les augmentations rapides de la population et du revenu par habitant, ce qui en fera le marché présentant la plus forte croissance pour les ventes de véhicules motorisés au cours des deux prochaines décennies. »
59. World Resources Institute, « [4 Lessons from Beijing and Shanghai Show How China's Cities Can Curb Car Congestion](#) ».
60. China Business Review, « [Opportunities and Challenges in China's Electric Vehicle Market](#) », février 2015.
61. Björn Nykvist et Måns Nilsson, « [Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles](#) », mars 2015; Clean Technica, « [BYD Gigafactories to Rival Tesla and Panasonic](#) », mars 2015.
62. Pinar De Neve, [Electric Vehicles in China](#), juin 2014.
- Environment News Service, « [Electric Cars Key to India's Energy and Climate Security](#) », mai 2014.
63. Nextgov, « [Autonomous cars will destroy millions of jobs and reshape US economy by 2025](#) », 14 mai 2015.
64. Karen Hickey, « [What the world thinks of telecommuting](#) », 12 juin 2013; David Hill, « [U.S. Being Left In The Dust Of The Global Telecommuting Revolution](#) », SingularityHUB, 21 février 2012.
65. BP, [Energy outlook 2035](#), 2015, p. 34.
- ExxonMobil, [The Outlook for Energy: A View to 2040](#), 2015, p. 17 et 18.
- Agence internationale de l'énergie, [World Energy Outlook 2014](#), 2014.
66. The Globe and Mail, « [Does Stretching out a car loan make financial sense?](#) », 6 juillet 2015.
67. Brookings, « [Autonomous vehicles will have tremendous impacts on government revenue](#) », 7 juillet 2015.
- Nextgov, « [Autonomous cars will destroy millions of jobs and reshape US economy by 2025](#) », 14 mai 2015.
68. International Business Times, « [Electric Cars Would Lower UK Oil Imports By 40%, But Only with Much Wider Adoption](#) », mars 2015.
- Cambridge Econometrics, [Fuelling Britain's Future](#), mars 2015, p. 56.
69. [Solar Impulse](#). et [Wikipedia ; Solar Impulse](#).

M. Gebler, et al. « [A global sustainability perspective on 3D printing technologies](#) »,

Energy Policy, novembre 2014, p. 158-167;

M. Kreiger, et. al., « [Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Three-Dimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products](#) »,

ACS Sustainable Chem. Eng., vol. 1, no 12, p. 1511; H. Yoon, et al., « [A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study](#) », International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, juillet 2014.

70. Greentechmedia, « [Is there Enough Lithium to Maintain the Growth of the Lithium-Ion Battery Market?](#) », 2 juin 2015.

71. Statista, [Rare earth reserves worldwide as of 2014, by country](#).

72. Greentechmedia, « [The Geopolitics of Lithium Production](#) », 30 juin 2015.

73. Greentechmedia, « [The Geopolitics of Lithium Production](#) », 30 juin 2015.

« [Will Latin America Become the New Middle East?](#) », mai 2012.

Erik Bethel, [Is Lithium the 21st Century's Oil?](#), 2010.

74. Reid Williams, « [How Bitcoin's Technology Could Make Supply Chains More Transparent](#) », CoinDesk, 31 mai 2015.

75. « [Bullfrog Power: Supporting green energy the easy way](#) ».

76. TerraEco, « [Le CO2 importé plombe la facture](#) », 2015.

77. [Accès à l'électricité \(% de la population\)](#), Banque mondiale. (consulté le 2 juin 2015).

78. [Canada Balance](#), Agence internationale de l'énergie, 2012. (consulté le 2 juin 2015). Il importe de noter que d'autres sources estiment que ce chiffre est plus élevé (voir la notice Agir sur les changements climatiques ci-dessous).

79. Accès à l'électricité (% de la population), op. cit.

80. Canada Balance, 2012, op. cit.

81. [À propos de l'énergie renouvelable](#), Ressources naturelles Canada. (consulté le 2 juin 2015).

« Selon une étude commanditée par l'Association canadienne de l'hydroélectricité, il existe un potentiel technique important d'énergie hydroélectrique non exploitée dans tous les provinces et territoires : 163,173 MW, plus du double de la capacité existante. Le potentiel technique fait référence à la capacité d'énergie hydroélectrique possible, sans tenir compte des facteurs tels que la faisabilité économique, les droits des Autochtones ou les effets sur l'environnement. »

82. [Agir sur les changements climatiques : Les solutions d'universitaires canadiens et canadiennes](#), 2015. (consulté le 2 juin 2015). « Soixante-dix-sept pour cent de l'électricité du Canada est déjà produite à partir de sources présentant de faibles émissions en carbone. »

En combinant la capacité de production d'énergie hydroélectrique actuelle aux sources d'énergie renouvelables très nombreuses non utilisées et à des connexions d'un réseau intelligent est-ouest entre les provinces, le Canada pourrait décider d'adopter un objectif de production à 100 % d'électricité à faible teneur en carbone d'ici 2035. »

83. PennEnergy, [Siemens wins major HVDC order to connect British and Belgian power grid](#), juin 2015.

Power Engineering International, [China Takes HVDC to New Level](#) , juin 2013.

YouTube, « [ABB enables Europe's longest HVDC link: NordLink](#) », mars 2015.

YouTube, « [ABB Launches world's most powerful extruded HVDC cable system](#) », 2014.

YouTube, « [Shaping the power grid with HVDC solutions](#) », juin 2014.

Power-Technology, « [The World's longest power transmission lines](#) », février 2014. et [le projet de financement collectif](#).

84. Greenpeace, [Clicking Clean: How Companies are Creating the Green Internet](#), avril 2014.
85. TerraEco, [Le CO2 importé plombe la facture](#), 2015.
- Low-Tech Magazine, « [How Sustainable is stored Sunlight?](#) », mai 2015.
86. Kevin Bullis, « [New Titanium-Making Process Could Result in Lighter Aircraft](#) », MIT Technology Review, 26 février 2015.
87. Allianz, [Materials used to make a car infographic](#).
- MadeHow, [Electric Automobile](#).
- BBC, « [The Electric car's biggest threat may be its battery](#) », mars 2014.
- The market Oracle, « [Electric Cars Materials and Resources Demand](#) », février 2010.
88. Observations du groupe de travail sur l'énergie, Horizons de politiques Canada, 2015.
89. Christophe McGlade et Paul Ekins, « [The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2° C](#) », Nature, vol. 517, 2015;
- Andrew Leach, « [Are oil sands incompatible with action on climate change?](#) »,
- Maclean's, Jeff Lewis, « [Is oil sand development still worth it?](#) », 28 octobre 2014.
- The profitability and viability of liquefied natural gas projects in Canada may depend on high natural gas prices in Asia, Andrew Nikiforuk, « [Tanking Asia Gas Prices Makes BC LNG Not Viable, expert says](#) », The Tyee, 15 janvier 2015.
90. Fossil Free, « [Divest from Fossil Fuels](#) ».
91. Université de Calgary, [The Optimized System for Carboxylic Acid Remediation \(OSCAR\)](#), IGEM 2012.
92. U.S. Energy Information Administration, [Frequently Asked Questions, How much oil is used to make plastic?](#)
93. John A. Mathews et Hao Tan. « [Economics: Manufacture renewables to build energy security](#) », Nature, vol. 513, no 7617, 10 septembre 2014.
94. OMC, [Déclaration commune relative au lancement des négociations en vue de la conclusion d'un accord sur les biens environnementaux](#), juillet 2014.
95. Rocky Mountain Institute, « [The Economics of Load Defection: How grid-connected solar-plus- battery systems will compete with traditional electric service, why it matters, and possible paths forward](#) », 2015.
96. CleanTechnica, « [This Graph Dispells The Myth That Cheap Gas Means Cheap Energy](#) », janvier 2015.