



Office national  
de l'énergie

National Energy  
Board



# Adoption des sources d'énergie renouvelable au Canada

Analyse des marchés de l'énergie  
Mai 2017



Canada



## Autorisation de reproduction

Le contenu de la présente publication peut être reproduit à des fins personnelles, éducatives ou sans but lucratif, en tout ou en partie et par quelque moyen que ce soit, sans frais et sans autre permission de l'Office national de l'énergie, pourvu qu'une diligence raisonnable soit exercée afin d'assurer l'exactitude de l'information reproduite, que l'Office national de l'énergie soit mentionné comme organisme source et que la reproduction ne soit présentée ni comme une version officielle ni comme une copie ayant été faite en collaboration avec l'Office national de l'énergie ou avec son consentement. Pour demander l'autorisation de reproduire l'information contenue dans la publication à des fins commerciales, prière d'écrire un courriel à : [info@neb-one.gc.ca](mailto:info@neb-one.gc.ca).

Quiconque souhaite utiliser le présent rapport dans une instance réglementaire devant l'Office peut le soumettre à cette fin, comme c'est le cas pour tout autre document public. Une partie qui agit ainsi se trouve à s'approprier le contenu du rapport déposé et peut avoir à répondre à des questions à son sujet.

Le présent rapport ne fournit aucune indication relativement à l'approbation ou au rejet d'une demande quelconque. L'Office étudie chaque demande en se fondant sur les documents qui lui sont soumis en preuve à ce moment.

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada représentée par l'Office national de l'énergie 2017

Adoption des sources d'énergie renouvelable au Canada

ISSN : 2371-5812

NE2-17/2-2017F-PDF

978-0-660-08419-0

Ce rapport est publié séparément dans les deux langues officielles; il est disponible sur supports multiples, sur demande.

### Demands d'exemplaires :

Bureau des publications  
Office national de l'énergie  
Bureau 210, 517, Dixième Avenue S.-O.  
Calgary (Alberta) T2R 0A8

Courrier électronique : [publications@neb-one.gc.ca](mailto:publications@neb-one.gc.ca)  
Fax : 403-292-5503  
Téléphone : 1-800-292-4800  
1-800-899-1265

Des exemplaires sont également disponibles à la bibliothèque de l'Office  
Deuxième étage

Internet : [www.one-neb.gc.ca](http://www.one-neb.gc.ca)

Imprimé au Canada

## Permission to Reproduce

Materials may be reproduced for personal, educational, and/or non-profit activities, in part or in whole and by any means, without charge or further permission from the National Energy Board (NEB or Board), provided that due diligence is exercised in ensuring the accuracy of the information reproduced; that the NEB is identified as the source institution; and that the reproduction is not represented as an official version of the information reproduced, nor as having been made in affiliation with, or with the endorsement of, the NEB. For permission to reproduce the information in this publication for commercial redistribution, please email: [info@neb-one.gc.ca](mailto:info@neb-one.gc.ca)

If a party wishes to rely on material from this report in any regulatory proceeding before the NEB, it may submit the material, just as it may submit any public document. Under these circumstances, the submitting party in effect adopts the material and that party could be required to answer questions pertaining to the material.

This report does not provide any indications of whether or not any application will be approved. The NEB will decide on specific applications based on the material in evidence before it at that time.

© Her Majesty the Queen in Right of Canada as represented by the National Energy Board 2017

Canada's Adoption of Renewable Power Sources

ISSN: 2371-5804

NE2-17/2-2017E-PDF

978-0-660-08418-3

This report is published separately in both official languages and is available upon request in multiple formats.

### Copies are available on request from:

Library and Publication Services  
National Energy Board  
Suite 210, 517 Tenth Avenue SW  
Calgary, Alberta T2R 0A8

E-Mail: [publications@neb-one.gc.ca](mailto:publications@neb-one.gc.ca)  
Fax: 403-292-5503  
Phone: 1-800-292-4800  
1-800-899-1265

For pick-up at the NEB office:  
Library  
2nd floor

Internet: [www.neb-one.gc.ca](http://www.neb-one.gc.ca)

Printed in Canada

# Table des matières

À propos de l'Office national de l'énergie . . . . .	ii
Résumé . . . . .	1
Introduction. . . . .	2
Comparaisons internationales . . . . .	4
Hydroélectricité . . . . .	8
Énergie éolienne . . . . .	12
Énergie de la biomasse. . . . .	16
Énergie solaire . . . . .	20
Technologies émergentes . . . . .	24
Coûts et compromis . . . . .	26



# À propos de l'Office national de l'énergie

L'[Office national de l'énergie](#) est un organisme de réglementation national indépendant du secteur de l'énergie. Ses responsabilités comprennent notamment la réglementation de la construction, de l'exploitation et de la cessation d'exploitation des pipelines qui franchissent les frontières provinciales ou internationales, la réglementation des lignes internationales de transport d'électricité et de lignes interprovinciales désignées, la réglementation des importations de gaz naturel et des exportations de pétrole brut, de liquides de gaz naturel, de gaz naturel, de produits pétroliers raffinés et d'électricité, ainsi que la réglementation des activités d'exploration et de production dans certaines régions. Dans le cadre de son mandat, l'Office fournit aussi des renseignements et des conseils opportuns, exacts et objectifs sur les questions d'énergie.

Selon l'énoncé du résultat stratégique de l'Office, la réglementation des pipelines et des lignes de transport d'électricité, de la mise en valeur des ressources énergétiques et du commerce de l'énergie contribue à assurer la sécurité des Canadiens et Canadiennes, la protection de l'environnement et l'existence d'une infrastructure et de marchés énergétiques efficaces, le tout dans le respect des droits et des intérêts des parties touchées par les décisions et les recommandations de l'Office.

Les principales responsabilités de l'Office consistent à réglementer ce qui suit :

- La construction, l'exploitation et la cessation d'exploitation des pipelines qui franchissent des frontières internationales ou des limites provinciales ou territoriales.
- Les droits et tarifs pipeliniers.
- La construction et l'exploitation des lignes internationales de transport d'électricité et de lignes interprovinciales désignées.
- Les importations de gaz naturel et les exportations de pétrole brut, de gaz naturel, de liquides de gaz naturel, de produits pétroliers raffinés et d'électricité.
- Les activités d'exploration et de production pétrolières et gazières dans certaines zones désignées du Nord et en mer.

## À propos du présent rapport

L'Office surveille les marchés de l'énergie et évalue les besoins énergétiques et les perspectives du Canada en appui aux attributions qui lui sont conférées. Le présent rapport, *Adoption des sources d'énergie renouvelable au Canada*, fait partie d'une série de documents sur l'offre, la demande et l'infrastructure énergétiques que l'Office publie régulièrement dans le cadre de sa surveillance.

Collaborateurs à la rédaction du rapport : Natalia Lis (chef de projet), Josephine DeLeon, Ingrid Ektvedt, Ryan Quan, Alison Taylor, Sara Tsang et Cassandra Wilde.

Vous avez des questions ou des commentaires? Écrivez à [energiesrenouvelables@neb-one.gc.ca](mailto:energiesrenouvelables@neb-one.gc.ca).



# Résumé

Comparativement aux autres pays, le Canada produit une grande partie de son électricité au moyen de sources d'énergie renouvelable, y compris l'hydroélectricité. En 2015, 66 % de son électricité provenait des énergies renouvelables, tandis que ce chiffre ne représentait que 60 % en 2005. Seulement cinq pays<sup>1</sup> en produisent autant ou davantage : la Norvège, la Nouvelle-Zélande, le Brésil, l'Autriche et le Danemark.

En 2015, le Canada se classait au deuxième rang mondial des producteurs d'hydroélectricité, tout juste derrière la Chine. Le Canada est aussi un important producteur d'énergie éolienne, mais a recours plus modestement à l'énergie solaire et à la biomasse. Ce sont la Chine, les États-Unis et l'Allemagne qui enregistrent la plus grande production totale d'énergie à partir du vent, du soleil et de la biomasse.

Toujours en 2015, presque 60 % de l'électricité du Canada provenait de centrales hydroélectriques, généralement de grandes installations dotées de réservoirs. Ce type de production est un atout précieux du portefeuille énergétique du Canada, puisqu'il permet de stocker l'énergie de manière économique et d'amortir les fluctuations des sources d'énergie renouvelable intermittentes. Les projets au fil de l'eau ne nécessitent pas de réservoir et perturbent moins l'écoulement naturel de l'eau, mais fonctionnent à une échelle beaucoup plus réduite.

La capacité éolienne du Canada a été multipliée par 20 sur la période de 2005 à 2015. Toutefois, l'intermittence de la production éolienne demeure un obstacle à l'adoption généralisée de cette source d'énergie. Une façon de surmonter cette difficulté serait de vendre l'électricité aux pays voisins pour mieux gérer les fluctuations dans la production. Cette stratégie a notamment permis au Danemark de produire 50 % de son électricité à partir de sources éoliennes.

En 2015, la biomasse a comblé environ 2 % des besoins en électricité du Canada. Elle s'intègre facilement au réseau, mais ne peut être rentable qu'avec un approvisionnement convenable. Pour cette raison, les projets de bioénergie sont souvent jumelés à des activités produisant beaucoup de combustibles résiduels, comme des installations du secteur de la foresterie, de l'industrie des pâtes et papiers ou des sites d'enfouissement.

L'énergie solaire occupe une place relativement modeste dans le portefeuille énergétique du Canada. Environ 98 % de la capacité solaire du pays est installée en Ontario, où elle représentait 5 % de la capacité énergétique totale en 2015. Les principaux obstacles à l'adoption massive de l'énergie solaire sont l'intermittence et les coûts relativement élevés. La capacité solaire augmente plus rapidement dans les régions qui offrent des mesures incitatives, comme les programmes de tarifs de rachat garantis en Ontario et en Allemagne.

Les autres sources d'énergie renouvelable, comme l'énergie éolienne en mer, l'énergie marémotrice et l'énergie géothermique, ne suscitent pas beaucoup d'intérêt au Canada, mais offrent encore un bon potentiel. Par exemple, des projets d'énergie éolienne en mer ont été proposés sur la côte Ouest et la côte Est du Canada, et une centrale d'énergie marémotrice de 20 MW existe déjà en Nouvelle-Écosse. Par ailleurs, des projets d'énergie géothermique de grande envergure [pourraient voir le jour sur la côte Ouest du Canada](#) si l'on tire profit de la ceinture de feu qui entoure l'océan Pacifique. Des projets d'énergie géothermique sont aussi [à l'étude dans des collectivités isolées du Nord](#), qui auraient avantage à combiner l'énergie thermique et l'électricité.

De nombreux facteurs influencent l'adoption des différentes sources d'énergie, notamment les coûts d'installation et de production, la fiabilité et l'impact environnemental. Ensemble, les énergies renouvelables comme l'éolien et l'énergie solaire deviennent de plus en plus concurrentielles. De plus, les faibles émissions de carbone des énergies renouvelables les rendent encore plus intéressantes au regard des priorités politiques du jour. Par conséquent, il y a lieu de croire qu'elles continueront de gagner du terrain, au Canada comme à l'étranger.

---

<sup>1</sup> Les statistiques sur la capacité et la production électriques internationales sont tirées de la page [Statistical Review of World Energy de BP](#), qui présente les données de 71 pays. Certains pays utilisant des sources d'énergie renouvelable pour combler la majeure partie de leurs besoins en électricité sont très petits et ne sont donc pas pris en compte dans le tableau (p. ex., l'Islande).

# Introduction

Partout dans le monde, le secteur de l'électricité tend de plus en plus vers la production d'énergie renouvelable, notamment l'hydroélectricité, la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie solaire. Bien que ces formes de production aient aussi connu une croissance considérable au Canada, leur avenir n'est pas tracé d'avance.

Au Canada, les prix de l'électricité sont parmi les plus bas au monde. Les sources d'énergie renouvelable non-hydroélectriques relativement coûteuses peinent donc à en faire concurrence. Les projets d'énergie renouvelable doivent aussi composer avec la critique de l'opinion publique et les délais d'approbation. Comme le montre la figure 1, la demande d'électricité du Canada est restée passablement stable entre 2005 et 2015. Selon les [plus récentes perspectives d'avenir à long terme de l'Office](#), la demande d'électricité devrait croître en moyenne de 0,7 % par année sur la période de 2015 à 2040.

**TABEAU 1**

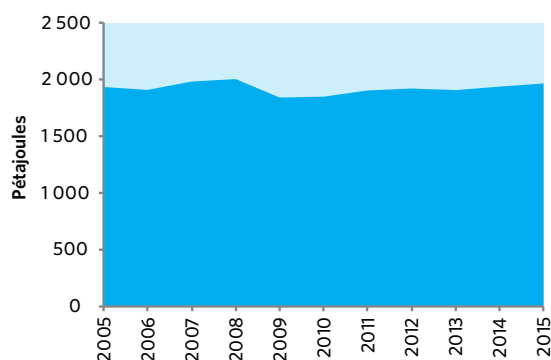
Électricité renouvelable au Canada :  
Statistiques importantes

Capacité installée	Énergies renouvelables
Part de la capacité canadienne	94 929 MW
Part de la production canadienne	65,6 %
Électricité produite	65,7 %
Taux de croissance entre 2005 et 2015	429 229 GWh
Generation growth from 2005 to 2015	17 %

Source :  
[Avenir énergétique du Canada en 2016 - Mise à jour - Offre et demande énergétiques à l'horizon 2040](#)

**FIGURE 1**

Demande d'électricité au Canada



Source :  
[Avenir énergétique du Canada en 2016 - Mise à jour - Offre et demande énergétiques à l'horizon 2040](#)

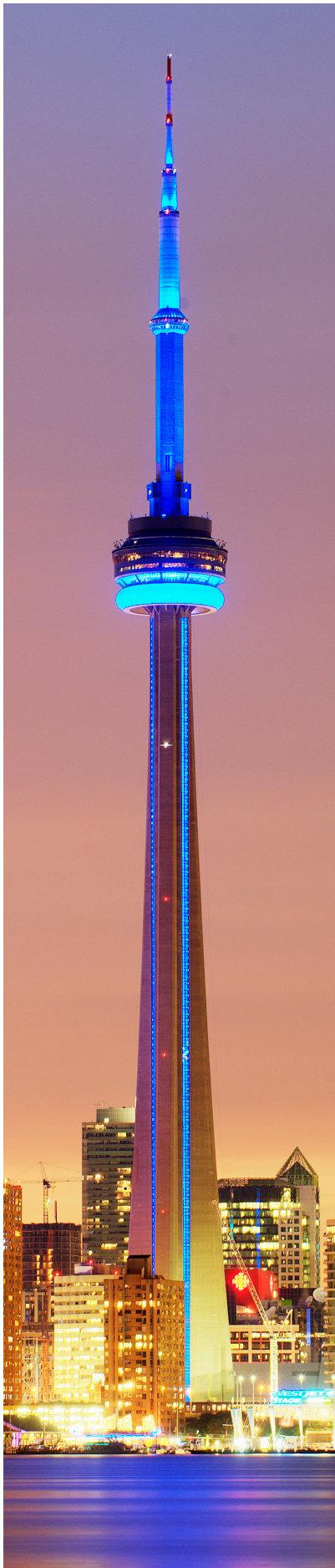
Description:  
Ce graphique illustre l'évolution de la demande d'électricité au Canada de 2005 à 2015. Durant cette période, la demande est demeurée relativement stable, tout juste sous la barre des 2 000 PJ.

Pour en savoir plus sur les taux de croissance de l'énergie renouvelable au Canada au fil des années, notamment sur les données de chaque province et territoire, consulter le [Panorama de l'électricité renouvelable au Canada](#).

Le présent rapport, *Adoption des sources d'énergie renouvelable au Canada*, aborde en détail les principales technologies renouvelables en mettant l'accent sur les facteurs qui influencent leur taux d'adoption (par exemple, les coûts, les avancées technologiques et les questions d'ordre environnemental et réglementaire). Il compare aussi la croissance de la production d'énergie renouvelable au Canada à celles des autres pays.











**TABLEAU 2**

Capacité et production d'électricité renouvelable au Canada

	Capacité en MW et en %		Production en GWh et en %	
	2005	2015	2005	2015
Hydroélectricité 	72 859	79 313	358 387	385 500
	59,7 %	54,8 %	59,0 %	59,0 %
Éolien 	557	11 072	1 453	28 561
	0,5 %	7,7 %	0,2 %	4,4 %
Biomasse 	1 789	2 408	7 875	12 161
	1,5 %	1,7 %	1,3 %	1,9 %
Solaire 	17	2 135	0	3 007
	0,0 %	1,5 %	0,0 %	0,5 %
Total pour les sources d'énergie renouvelable	75 222	94 929	367 716	429 229
	61,6 %	65,6 %	60,6 %	65,7 %
De toute source	122 065	144 608	607 007	653 183

Source:

[Avenir énergétique du Canada en 2016 - Mise à jour - Offre et demande énergétiques à l'horizon 2040](#)



L'hydroélectricité est produite par écoulement des eaux accumulées dans les réservoirs derrière les barrages ou à partir de projets au fil de l'eau.



L'énergie du vent est captée par les pales des éoliennes qui font tourner une tige reliée à un générateur.



La biomasse produit de l'électricité par combustion de déchets organiques.



Quant à l'énergie solaire, des cellules PV convertissent la lumière du soleil en électricité à l'échelle de l'atome.

## Capacité ou production d'électricité?

La capacité se définit comme la quantité maximale de puissance que peut produire, utiliser ou transférer un appareil. Elle est habituellement exprimée en mégawatts.

La production se définit comme l'action de créer de l'énergie électrique par la transformation d'une autre forme d'énergie. Dans le contexte du présent rapport, la production s'entend généralement de la quantité d'électricité réellement produite.

# Comparaisons internationales

Le Canada est un chef de file dans la production d'électricité renouvelable. En effet, les sources d'énergie renouvelable, comme l'hydroélectricité, occupent une plus grande place dans son portefeuille énergétique que dans celui de la plupart des pays développés.

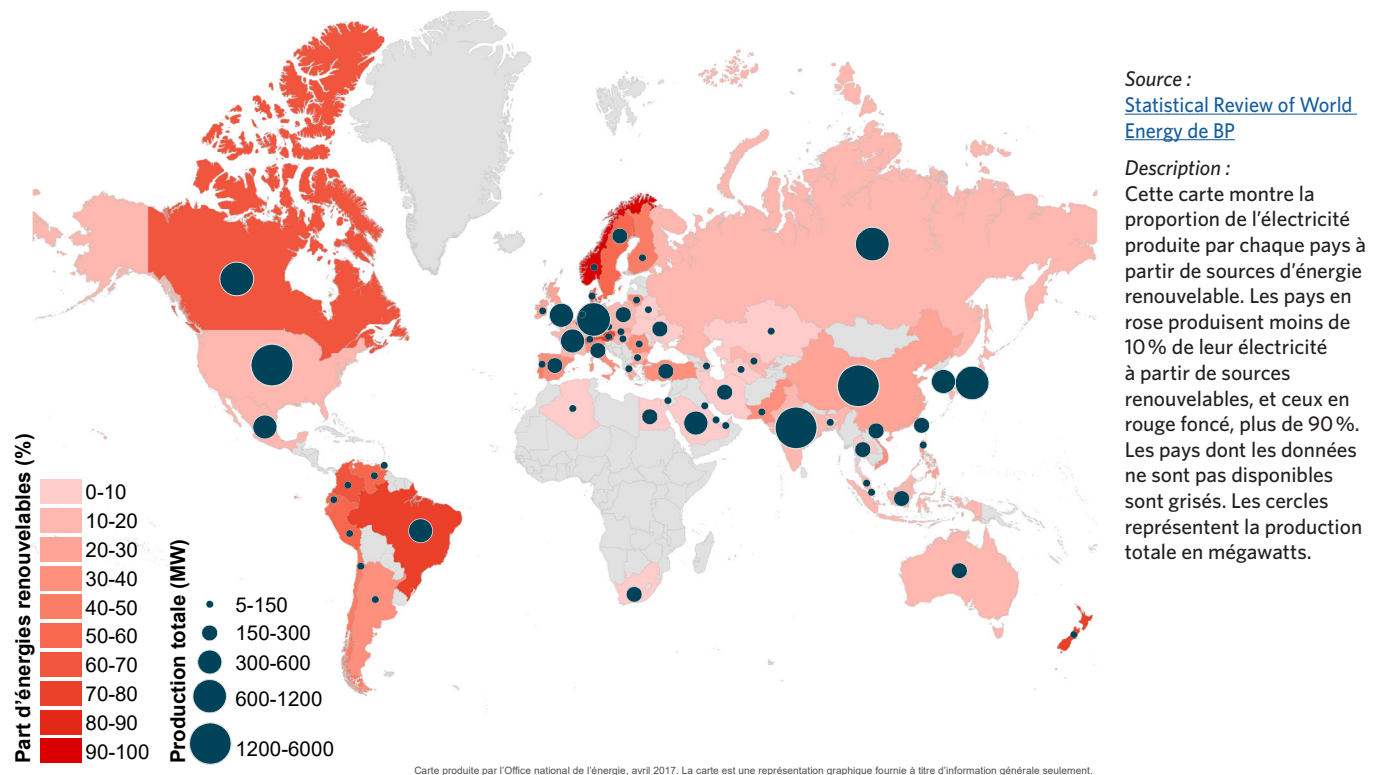
En 2015, le Canada a produit environ 66 % de son électricité à partir de sources d'énergie renouvelable. Le secteur de l'énergie renouvelable du pays repose essentiellement sur l'hydroélectricité. Les énergies éolienne et solaire, qui ont connu un essor prodigieux dans le monde, jouent un rôle beaucoup moins important au Canada que dans certains autres pays.

Seulement 12 pays produisent plus de la moitié de leur électricité à partir de sources d'énergie renouvelable. Tout comme le Canada, la plupart d'entre eux se fient grandement à l'hydroélectricité, sauf le Danemark, qui fait figure d'exception. En effet, il produit une petite quantité d'hydroélectricité et génère les deux tiers de son électricité à partir du vent, de la biomasse et du soleil.

Au Canada, la production d'électricité par habitant est relativement élevée. Enregistrant une production de plus de 600 TWh en 2015, le Canada produit autant d'électricité que des pays beaucoup plus peuplés, comme le Brésil, l'Allemagne et la France.

FIGURE 2

## Production d'électricité et part des énergies renouvelables dans le portefeuille énergétique



En 2015, le Canada représentait environ 10 % de la production mondiale d'hydroélectricité, ce qui le plaçait au deuxième rang derrière la Chine. L'hydroélectricité compte pour environ 60 % de la production d'électricité du Canada. Seulement deux pays produisent proportionnellement plus : la Norvège et le Brésil (voir la figure 2).

La même année, le Canada a produit environ 3 % de l'énergie éolienne mondiale, ce qui le plaçait au septième rang (voir la figure 11). Toutefois, la production d'énergie éolienne ne représente qu'une faible proportion (4 %) du portefeuille énergétique canadien, alors qu'elle occupe une place beaucoup plus importante dans celui d'autres pays, notamment le Danemark (50 %), l'Irlande (23 %) et le Portugal (22 %) (voir la figure 2).





**FIGURE 3**

Pays avec la plus forte proportion d'énergie renouvelable

<b>Part des sources d'énergie renouvelable en 2015</b>	
<b>Part totale des sources d'énergie renouvelable</b>	
Norvège	97 %
Nouvelle-Zélande	80 %
Brésil	75 %
Autriche	73 %
Danemark	66 %
Canada	66 %
Colombie	60 %
Suède	60 %
Vénézuéla	60 %
Suisse	57 %

<b>Hydroélectricité</b>		<b>Énergie éolienne</b>	
Norvège	95 %	Danemark	50 %
Brésil	62 %	Irlande	23 %
Canada	61 %	Portugal	22 %
Vénézuéla	60 %	Espagne	18 %
Colombie	58 %	Lituanie	16 %
Autriche	57 %	Allemagne	14 %
Nouvelle-Zélande	55 %	Royaume-Uni	12 %
Suisse	53 %	Roumanie	11 %
Équateur	50 %	Suède	10 %
Pérou	48 %	Grèce	9 %

<b>Énergie solaire</b>		<b>Biomasse et géothermie</b>	
Italie	9 %	Nouvelle-Zélande	19 %
Grèce	7 %	Finlande	16 %
Allemagne	6 %	Danemark	14 %
Espagne	5 %	Philippines	13 %
Belgique	5 %	Lituanie	10 %
Roumanie	3 %	Italie	9 %
Japon	3 %	Brésil	9 %
Bulgarie	3 %	Royaume-Uni	9 %
République tchèque	3 %	Belgique	8 %
Australie	2 %	Allemagne	8 %

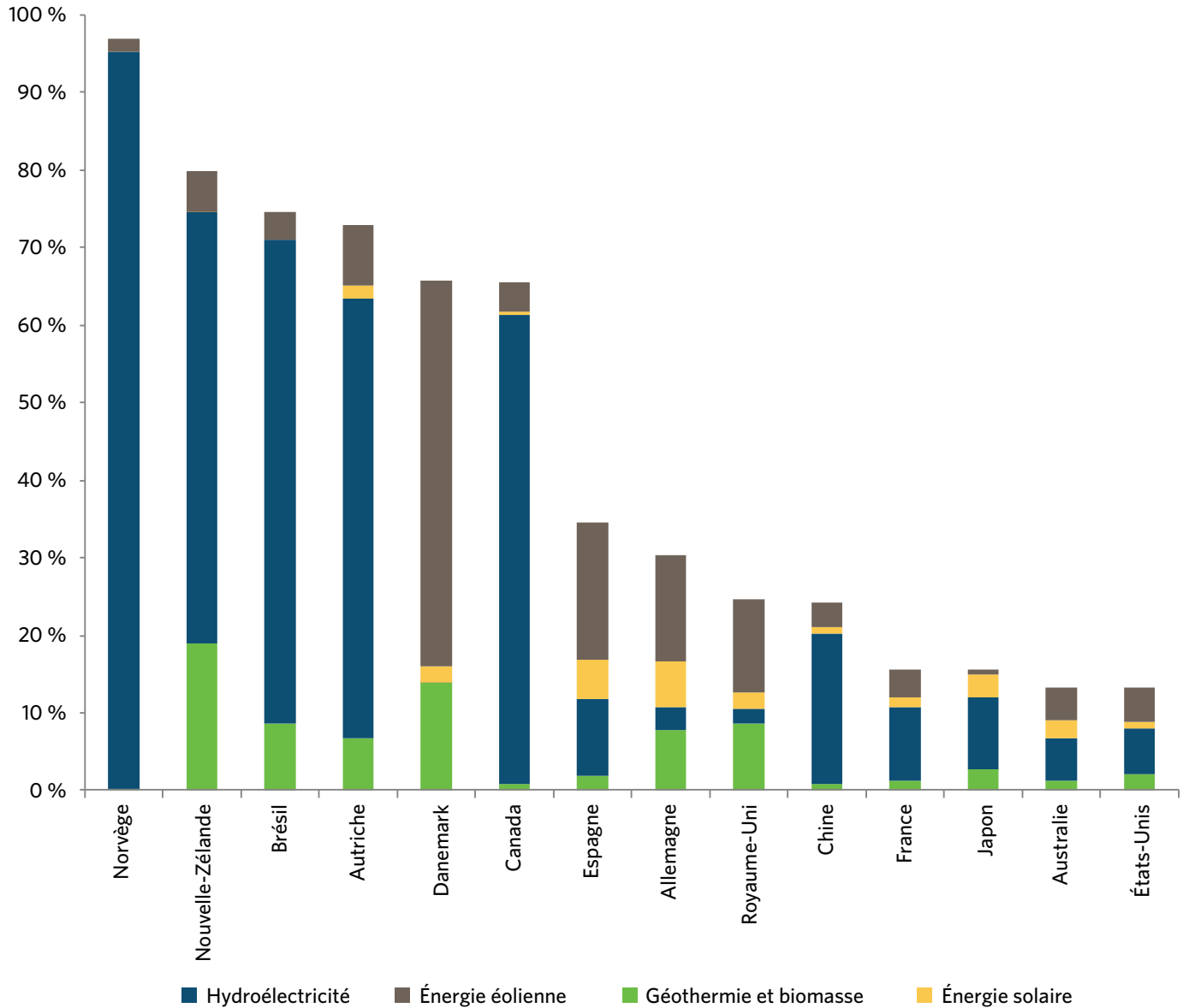
Source:  
[Statistical Review of World Energy de BP](#)

N.B. :  
 Les statistiques de BP sur le Canada diffèrent légèrement de celles de l'Office, mais sont utilisées dans les comparaisons internationales par souci d'uniformité.

L'énergie solaire joue un rôle modeste dans le portefeuille énergétique du Canada (0,5 %), mais est grandement utilisée dans d'autres pays. En 2015, quatre pays ont produit 5 % ou plus de leur électricité à partir de l'énergie solaire : l'Italie (9 %), la Grèce (7 %), l'Allemagne (6 %) et l'Espagne (5 %). De la même façon, l'énergie géothermique<sup>2</sup> et la biomasse représentent environ 2 % de la production d'électricité du Canada, mais plus de 10 % de la production d'électricité de la Nouvelle-Zélande, de la Finlande, du Danemark, des Philippines, et de la Lituanie. (voir les figures 2 et 3)

**FIGURE 4**

Part des sources d'énergie renouvelable dans le portefeuille énergétique : Pays sélectionnés



Source : [Statistical Review of World Energy de BP](#)

*Description* : Ce graphique à colonnes empilées illustre le pourcentage d'électricité produite à partir de l'énergie éolienne, de l'énergie solaire, de l'hydroélectricité et de la biomasse dans 14 pays sélectionnés, dont le Canada. Dans cet échantillon, c'est la Norvège qui utilise le plus les énergies renouvelables, et les États-Unis qui les utilise le moins. En 2015, la Norvège a produit 97 % de son électricité à partir de sources d'énergie renouvelable, comparativement à 13 % pour les États-Unis.

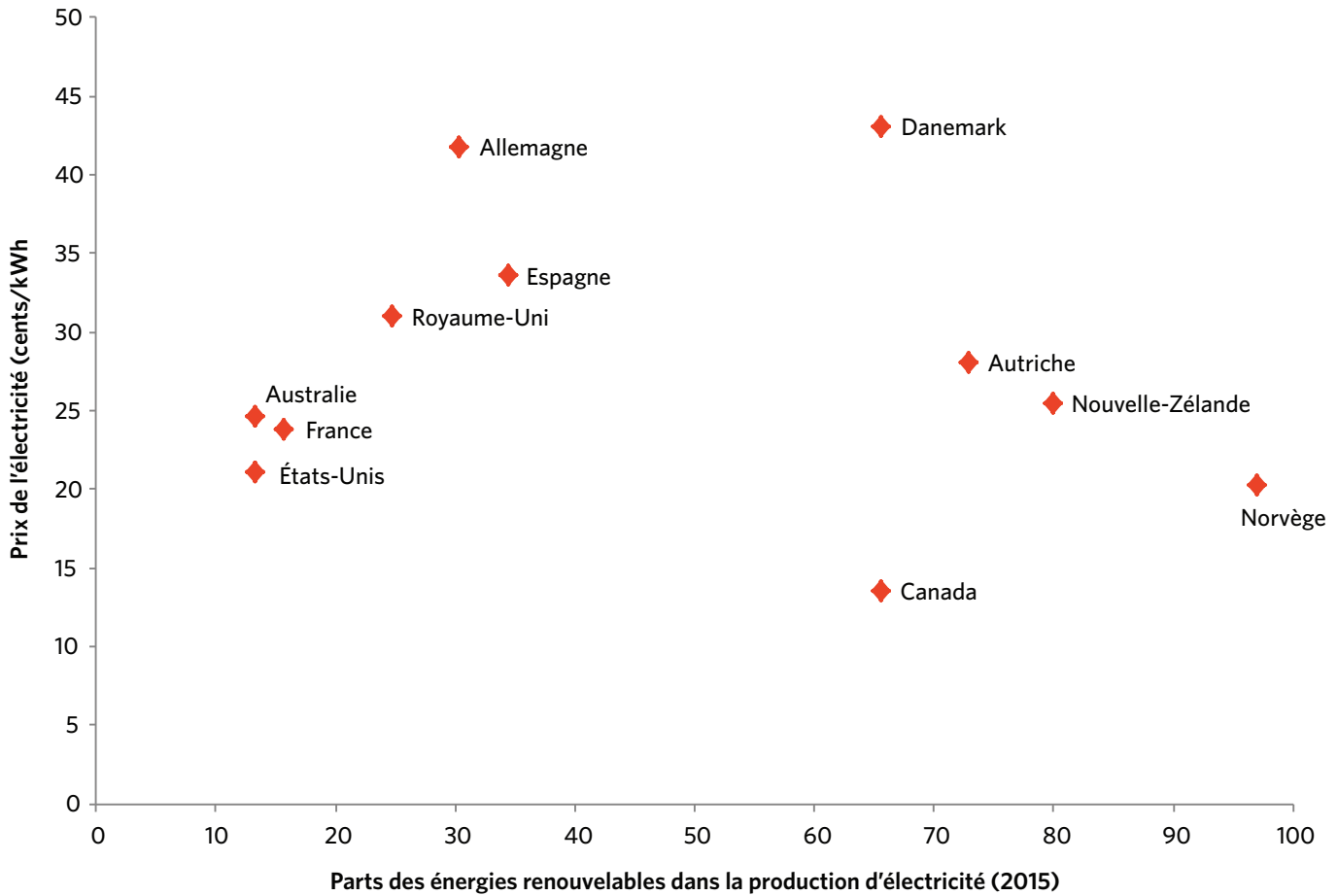
<sup>2</sup> La page [Statistical Review of World Energy de BP](#) combine les données sur la production d'électricité à partir de la biomasse et de la géothermie. Le seul pays qui utilise des sources géothermiques pour produire une part non négligeable de son électricité est la Nouvelle-Zélande.



Au Canada, les prix de l'électricité sont relativement bas comparativement à de nombreux autres pays. Les consommateurs allemands et danois paient chaque kWh d'électricité plus du double des Canadiens. Toutefois, comme leur consommation d'électricité par habitant est moindre qu'au Canada, leur facture d'électricité totale n'est pas nécessairement beaucoup plus élevée. (voir la figure 5)

**FIGURE 5**

Part des énergies renouvelables et prix de l'électricité : Pays sélectionnés



Sources (prix):

[Canada et États-Unis \(Hydro-Québec\): Comparaison des prix de l'électricité dans les grandes villes nord-américaines \(2015\)](#)

[Pays européens \(Eurostat\)](#)

[Australie \(Australian Energy Market Commission\): Tendence du prix de l'électricité résidentielle en 2015](#)

[Nouvelle-Zélande \(Ministry of Business, Innovation and Employment\): Coûts de l'électricité selon les ventes](#)

Sources (part des énergies renouvelables):

[Statistical Review of World Energy de BP](#)

*N.B.:* Les prix tiennent compte de l'énergie, de la distribution, des taxes et des autres frais. Les prix au Canada et aux États-Unis sont une moyenne simple des prix régionaux.

*Description:* Ce graphique met en parallèle la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité de 11 pays sélectionnés, sur l'axe des X, et les prix de l'électricité résidentielle, sur l'axe des Y. Dans la plupart des cas, plus la part des énergies renouvelables est élevée, plus les prix sont élevés. Le Canada et la Norvège sont des cas à part. Ils ont les prix les plus bas, mais produisent une plus grande part de leur électricité à partir de sources d'énergie renouvelable que les autres. Le Canada et la Norvège misent surtout sur l'hydroélectricité, qui représente généralement la forme de production renouvelable la plus abordable.

# Hydroélectricité

L'[hydroélectricité](#) est produite par la force de l'eau qui, en s'écoulant, active une turbine couplée à un alternateur. La quantité d'énergie générée dépend du volume et du débit de l'eau : plus l'eau est abondante et s'écoule rapidement, plus elle produira d'énergie.

Il existe des centrales hydroélectriques de taille et de type différents. Les projets sont conçus sur mesure en fonction des conditions locales, et la faisabilité technique d'un site hydroélectrique potentiel dépend de la topographie et du climat.

Dans les centrales hydroélectriques à réservoir, l'eau de la rivière est retenue par un barrage, puis stockée dans un réservoir en vue d'être relâchée au moment voulu. Les vallées profondes et étroites dotées de murs et d'un barrage capable de supporter d'importants volumes d'eau sont des sites attrayants pour ce type de production.

Les centrales hydroélectriques à réservoir ont la capacité de fournir une charge de base et une charge de pointe, puisqu'elles peuvent être arrêtées et redémarrées en peu de temps. Elles offrent aussi une capacité de stockage suffisante pour fonctionner pendant des semaines, voire des années, sans écoulement naturel des eaux. Mais en fin de compte, l'hydroélectricité dépend toujours des régimes de précipitations, parfois imprévisibles.

Les centrales hydroélectriques au fil de l'eau sont construites sur une rivière ou un cours d'eau existant. Les installations sont généralement situées là où l'eau tombe naturellement, comme au pied d'une falaise ou sur des rapides.

Grâce aux turbines mises au point récemment, il est possible de faire fonctionner un projet au fil de l'eau dans des sites à faible débit et sans dénivellation. Au Canada, la capacité des installations au fil de l'eau varie de moins de 1 MW à près de 1 900 MW.

Le [stockage d'énergie par pompage](#) consiste à déplacer l'eau entre des réservoirs situés à différentes hauteurs. Lorsque la demande d'électricité est faible, l'électricité est utilisée pour pomper l'eau dans un réservoir surélevé. Quand la demande augmente, l'eau est relâchée dans le réservoir inférieur en faisant tourner une turbine. La seule installation de stockage par pompage au Canada est la [centrale de pompage Sir Adam Beck](#) aux chutes Niagara, en Ontario.

## Adoption au Canada

L'hydroélectricité est la première source d'électricité au Canada depuis plus d'un siècle. La Colombie-Britannique, le Manitoba, le Québec, l'Ontario et Terre-Neuve-et-Labrador s'en servent pour combler la plus grande partie de leur demande d'électricité. À part le Nunavut et l'Île-du-Prince-Édouard, toutes les provinces et tous les territoires produisent de l'hydroélectricité.

Plusieurs projets hydroélectriques d'envergure sont actuellement en construction, notamment le [Site C](#) de 1 100 MW en Colombie-Britannique, le [Keeyask Project](#) de 695 MW au Manitoba, deux nouvelles unités de production d'une capacité combinée de 640 MW à [La Romaine](#) au Québec, et le projet [Muskrat Falls](#) de 824 MW au Labrador.

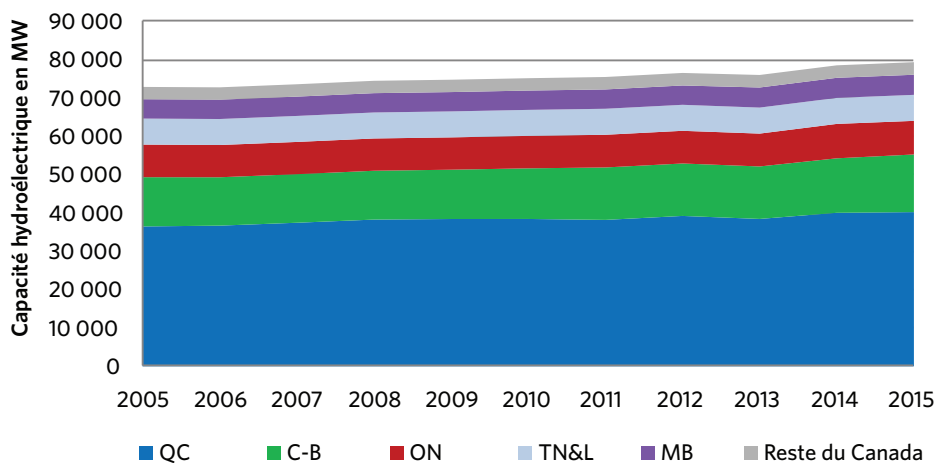
**TABEAU 3**

Hydroélectricité au Canada : Statistiques importantes

Statistiques importantes (2015)	Hydroélectricité
Capacité installée	79 313 MW
Part de la capacité canadienne	54,8 %
Part de la production canadienne	59,0 %
Électricité produite	385 500 GWh
Taux de croissance entre 2005 et 2015	8 %

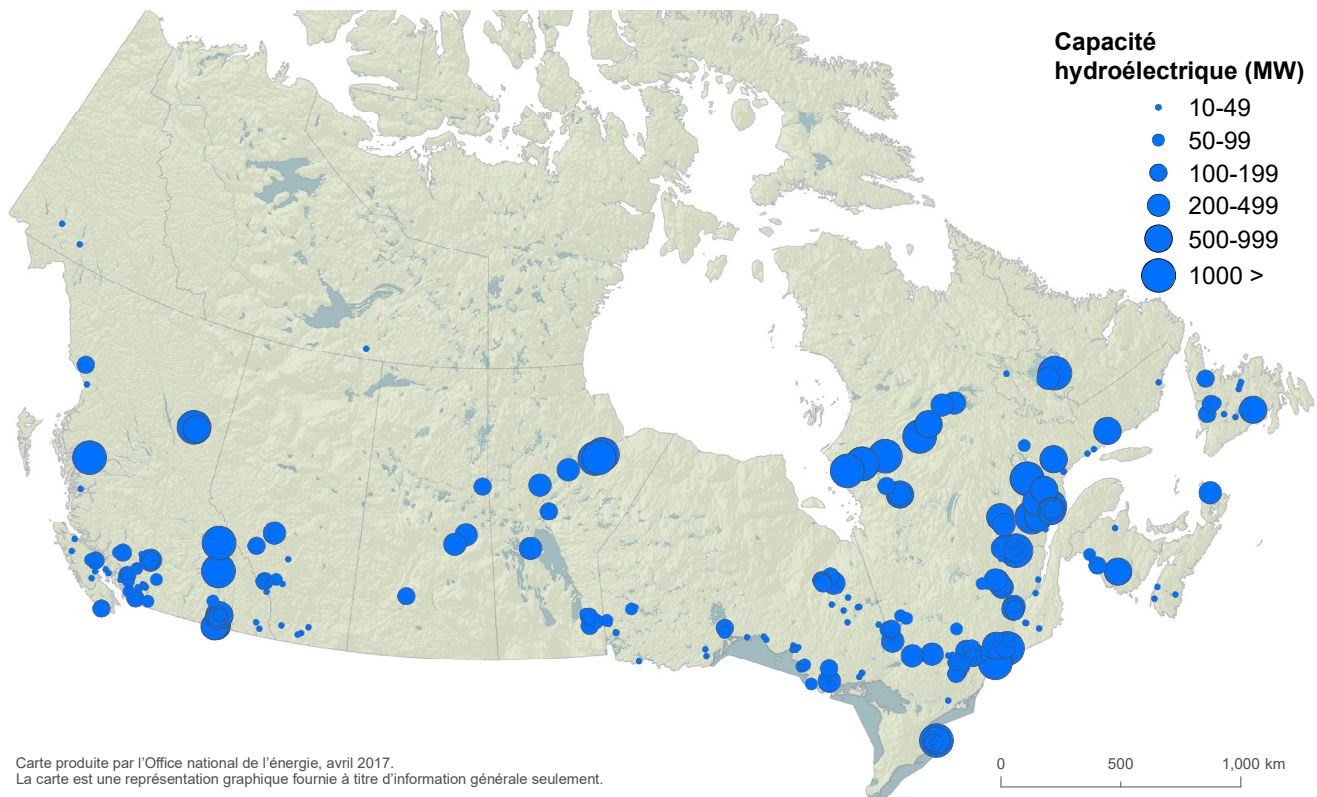
Source:

[Avenir énergétique du Canada en 2016 - Mise à jour - Offre et demande énergétiques à l'horizon 2040](#)

**FIGURE 6****Capacité hydroélectrique au Canada (en MW)**

Source : [Avenir énergétique du Canada en 2016 - Mise à jour - Offre et demande énergétiques à l'horizon 2040](#)

Description : Ce graphique à aires empilées montre l'évolution de la capacité hydroélectrique des cinq provinces canadiennes en tête et du reste du pays entre 2005 et 2015. Les cinq provinces qui disposent de la plus grande capacité hydroélectrique sont le Québec, la Colombie-Britannique, l'Ontario, Terre-Neuve-et-Labrador et le Manitoba. De 2005 à 2015, la capacité hydroélectrique est demeurée stable ou a augmenté légèrement dans toutes ces régions et dans le reste du Canada.

**FIGURE 7****Carte des centrales hydroélectriques au Canada**

Carte produite par l'Office national de l'énergie, avril 2017.  
La carte est une représentation graphique fournie à titre d'information générale seulement.

Source : [Ressources naturelles Canada : Centrales d'énergie renouvelable de 1MW ou plus - Coopération nord-américaine en matière d'information sur l'énergie](#)

Description : Cette carte montre l'emplacement et la capacité approximative des centrales hydroélectriques canadiennes d'au moins 10 MW. On trouve de telles centrales dans toutes les provinces et tous les territoires, sauf à l'Île-du-Prince-Édouard et au Nunavut. Les plus grandes centrales hydroélectriques se trouvent en Colombie-Britannique, au Manitoba, au Québec, en Ontario et au Labrador, principalement dans le nord de la province.



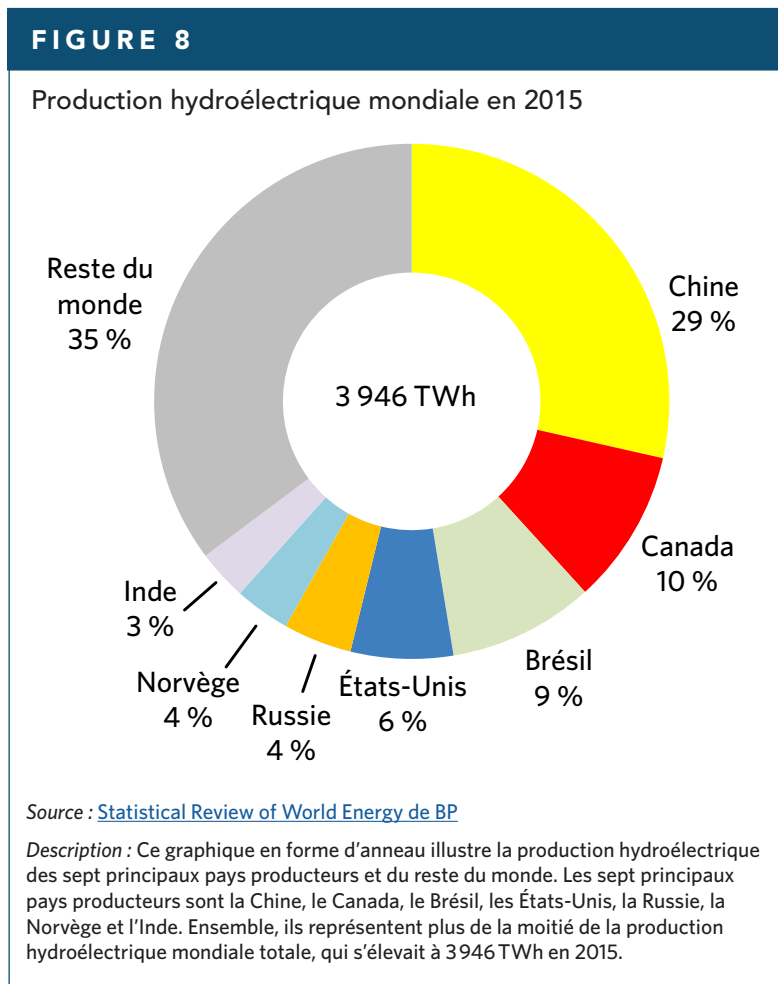
## Adoption dans le monde

L'hydroélectricité, utilisée dans plus de 150 pays, représentait 16 % de la production mondiale d'électricité en 2015. Selon l'[International Hydropower Association](#), une capacité de 33,7 GW a été installée en 2015, et une autre de 31,5 GW en 2016. Ces données comprennent le stockage par pompage de 6,4 GW, soit près du double de la quantité installée en 2015. Cette année-là, la Chine était le plus grand producteur d'hydroélectricité dans le monde, suivie par le Canada, le Brésil et les États-Unis. Ensemble, ces quatre pays sont responsables d'environ 50 % de la production hydroélectrique mondiale.

## Questions environnementales

Dans un réseau électrique, l'hydroélectricité peut aider à équilibrer les sources d'énergie renouvelable intermittentes, comme les énergies éolienne et solaire, ce qui favorise l'intégration de sources à faibles émissions de gaz à effet de serre (GES). De plus, cette méthode produit de l'électricité sans brûler de combustibles fossiles. Toutefois, les barrages ont [fragmenté près des deux tiers des plus grandes rivières du monde](#), dont un grand nombre au Canada. Ils peuvent [interférer avec la migration des poissons](#), [épuiser l'oxygène de l'eau des réservoirs](#), soulever des contaminants et retenir les sédiments importants pour le maintien des habitats en aval, notamment pour la protection des deltas contre l'érosion. Les nouveaux réservoirs créent généralement des émissions de GES. Cependant, ces émissions varient grandement selon la végétation, le type de sol et la préparation de la zone inondée.

Comme elles n'utilisent pas de barrage, [les installations au fil de l'eau perturbent moins](#) les poissons et l'écoulement naturel de l'eau lorsqu'elles sont construites et exploitées conformément aux normes.



## Questions commerciales

L'hydroélectricité, en particulier les grandes centrales, rivalise avec les autres sources d'énergie sur le plan des coûts. Ses avantages sont l'absence de coûts pour le carburant, les faibles coûts d'exploitation, une grande fiabilité et une durée de vie prolongée. En outre, l'hydroélectricité convertit plus de 90 % de l'énergie disponible en électricité, alors que la plus efficace des centrales au gaz naturel à cycle combiné dépasse rarement les 60 %.

D'un autre côté, les projets d'hydroélectricité peuvent nécessiter de longs travaux de construction et d'importantes mises de fonds initiales. Le rendement du capital investi peut aussi varier grandement d'une année à l'autre, selon les précipitations. Ce sont ces facteurs qui freinent l'investissement privé dans les grandes installations hydroélectriques. C'est d'ailleurs pourquoi, au Canada, ces installations sont généralement construites par les sociétés d'État provinciales (bien qu'il existe aussi de petites installations privées). Le gouvernement fédéral canadien fournit aussi un soutien financier aux projets hydroélectriques, comme la [garantie d'emprunt de 6,3 milliards de dollars](#) pour le projet Muskrat Falls et les lignes de transport connexes.

Un des grands avantages de l'hydroélectricité est sa fiabilité. Contrairement aux sources d'énergie renouvelable intermittentes, comme les énergies éolienne et solaire, les centrales hydroélectriques peuvent produire de l'électricité sur demande et sont reconnues comme des actifs de gestion des systèmes capables d'assurer un approvisionnement fiable.

### L'hydroélectricité comme supplément à la production éolienne mondiale

La Norvège produit environ 95 % de son électricité au moyen de centrales hydroélectriques, soit la plus forte proportion parmi tous les pays développés. Fort d'une capacité installée de 29 GW, le pays produit plus de la moitié de l'hydroélectricité européenne. Cette hydroélectricité sert en partie de « batterie » pour équilibrer la production intermittente des sources d'énergie renouvelable des autres pays européens. La [Norvège fait le commerce de l'électricité](#) avec la Suède, la Finlande, les Pays-Bas et le Danemark. Deux interconnexions additionnelles, qui en sont aux dernières étapes de développement, permettront à l'[Allemagne](#) et au [Royaume-Uni](#) d'échanger leurs surplus d'énergies éolienne et solaire contre de l'hydroélectricité de la Norvège.

Il y a d'autres exemples de combinaison hydroélectricité et énergie éolienne en Amérique du Nord. En effet, le gouvernement du Québec reconnaît la [nature complémentaire](#) de ces sources, où l'hydroélectricité peut compenser l'intermittence de l'éolien, tandis que l'éolien peut être dispersé pour préserver l'énergie emmagasinée dans les grands réservoirs hydroélectriques. La province dispose déjà d'une capacité hydroélectrique considérable et, grâce à de nouveaux projets, avait bonifié [sa capacité éolienne installée de 3 262 MW par décembre 2015](#).





# Énergie éolienne

L'énergie du vent est [captée](#) par les pales des éoliennes, qui font tourner un arbre couplé à une génératrice. Les pales des éoliennes fonctionnent comme les hélices d'un avion : le vent glisse sur la surface des pales, ce qui crée une différence de pression entre les surfaces supérieure et inférieure et fait tourner le rotor sous l'effet de la poussée.

Les éoliennes modernes sont de plus en plus rentables, fiables et puissantes. La puissance installée des éoliennes, leur hauteur et le diamètre des rotors ont tous augmenté considérablement. Les éoliennes peuvent maintenant produire de l'électricité pendant 20 à 25 ans et tourner pendant 120 000 heures.

## Adoption au Canada

En 2015, le Canada a produit 4,4 % de son électricité à partir du vent, et chaque province et territoire (à l'exception du Nunavut) a produit une certaine quantité d'énergie éolienne. Compte tenu de sa géographie diversifiée, le Canada dispose d'un grand potentiel éolien, mais son climat froid peut avoir des conséquences sur les conditions d'exploitation, l'accès routier en hiver et les technologies éoliennes.

En 2015, le Canada disposait d'une capacité éolienne installée de plus de 11 000 MW et se classait au septième rang des plus grands producteurs d'énergie éolienne au monde (voir la figure 10). Entre 2010 et 2015, sa capacité éolienne a connu une croissance annuelle de 24 %.

Cette capacité pourrait continuer à croître grâce aux initiatives provinciales et fédérales. Par exemple, en novembre 2015, le gouvernement de l'Alberta a dévoilé une nouvelle [stratégie sur le climat](#), par laquelle il s'engage à faire passer la proportion de son électricité générée à partir de [sources d'énergie renouvelables](#) comme l'éolien, l'hydroélectricité et le solaire à 30 % d'ici 2030.

**TABLEAU 4**

Électricité éolienne au Canada : Statistiques importantes

Statistiques importantes (2015)	Énergie éolienne
Capacité installée	11 072 MW
Part de la capacité canadienne	7,7 %
Part de la production canadienne	4,4 %
Électricité produite	28 561 GWh
Taux de croissance entre 2005 et 2015	1 866 %

Source :

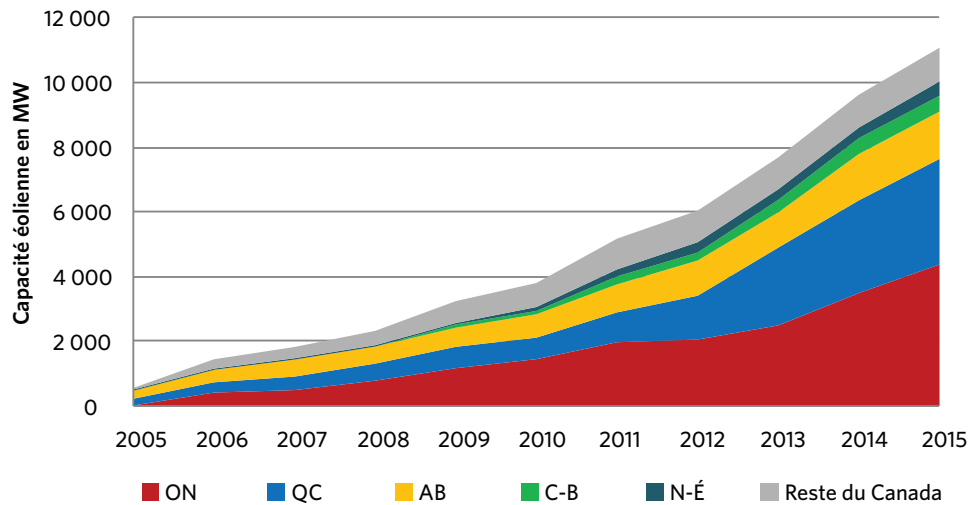
[Avenir énergétique du Canada en 2016 - Mise à jour - Offre et demande énergétiques à l'horizon 2040](#)





**FIGURE 9**

Capacité éolienne au Canada

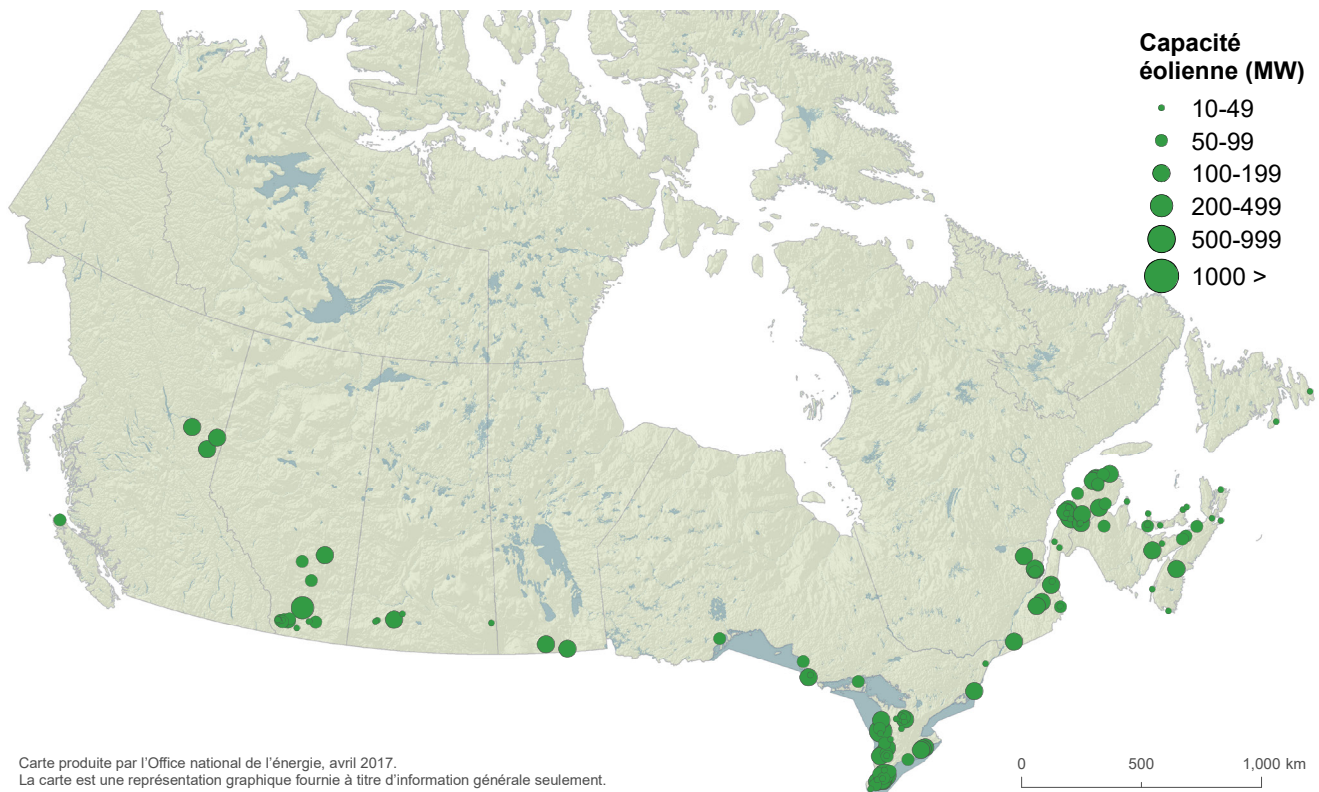


Source : [Avenir énergétique du Canada en 2016 - Mise à jour - Offre et demande énergétiques à l'horizon 2040](#)

Description : Ce graphique à aires empilées montre l'évolution de la capacité éolienne des cinq provinces canadiennes en tête et du reste du pays entre 2005 et 2015. Les cinq provinces disposant de la plus grande capacité éolienne sont l'Ontario, le Québec, l'Alberta, la Colombie-Britannique et la Nouvelle-Écosse. La capacité éolienne a connu une croissance importante entre 2005 et 2010, et une croissance encore plus forte entre 2010 et 2015.

**FIGURE 10**

Carte des centrales éoliennes au Canada



Carte produite par l'Office national de l'énergie, avril 2017. La carte est une représentation graphique fournie à titre d'information générale seulement.

Source :

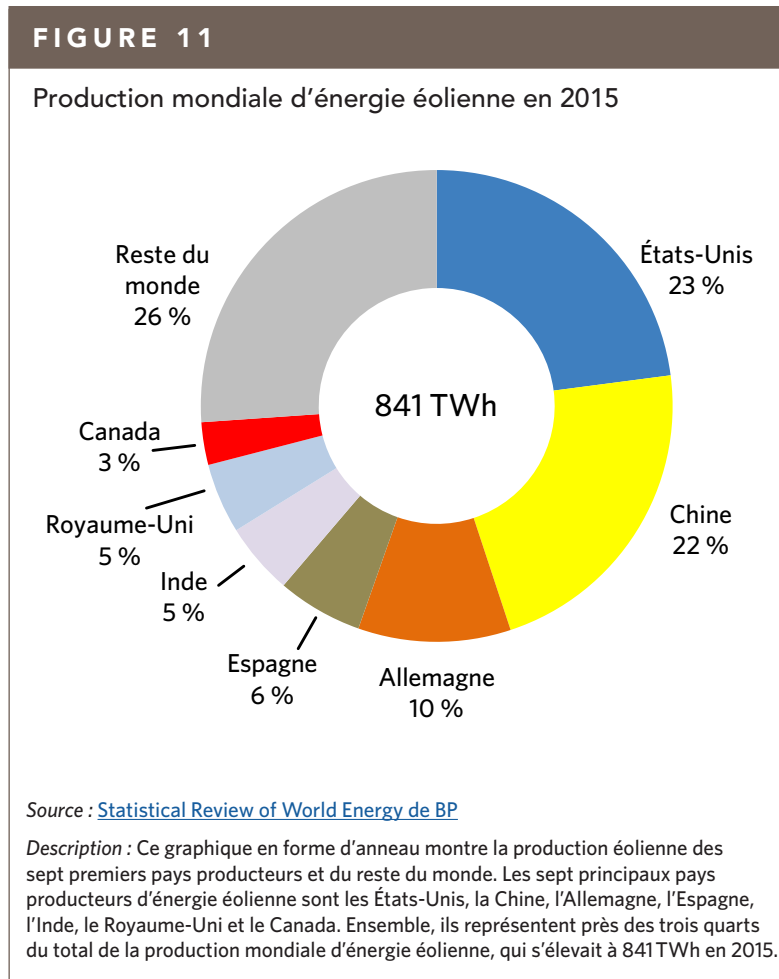
[Ressources naturelles Canada: Centrales d'énergie renouvelable de 1MW ou plus - Coopération nord-américaine en matière d'information sur l'énergie](#)

Description : Cette carte montre la capacité approximative des centrales éoliennes canadiennes d'au moins 10 MW. On trouve de tels parcs éoliens dans chaque province, mais pas dans les territoires. La plupart des parcs éoliens se trouvent en Ontario, au Québec, en Alberta, en Colombie-Britannique et dans les provinces maritimes.

## Adoption dans le monde

En 2015, la capacité éolienne mondiale a connu une poussée record de 63,7 GW, soit 17,2 %, ce qui a porté son total à 435 GW. C'est la Chine, deuxième producteur mondial d'énergie éolienne, qui a enregistré la plus forte croissance, avec une hausse de sa capacité éolienne installée de 33 GW en 2015.

Trois pays, soit les États-Unis, la Chine et l'Allemagne, ont produit à eux seuls plus de 50 % de l'énergie éolienne mondiale en 2015. Cette année-là, le Canada représentait 3 % de la production éolienne mondiale.



## Questions environnementales

L'énergie éolienne ne produit essentiellement aucune émission, et les installations éoliennes génèrent de l'électricité sans polluer l'air ni l'eau. De plus, les parcs éoliens consacrent aussi peu que 1 % de leur surface totale à l'installation d'éoliennes et à l'aménagement de routes d'accès, ce qui signifie que le reste de la superficie demeure souvent propice à l'agriculture ou à l'élevage.

Les préoccupations environnementales les plus couramment soulevées par les parcs éoliens sont [les nuisances sonores et visuelles](#), [l'impact sur les oiseaux et les chauves-souris](#) et [l'utilisation des terres](#). En outre, certains GES sont produits durant la fabrication, le transport, l'assemblage et l'entretien des éoliennes.



## Questions commerciales

L'énergie éolienne fait maintenant partie des options d'approvisionnement en nouvelle électricité les moins coûteuses dans la plupart des provinces canadiennes. Les décideurs et les services publics reconnaissent de plus en plus le caractère concurrentiel et extensible de cette méthode de production sobre en carbone, mais comme la croissance de la demande d'électricité demeure faible dans la plupart des provinces, il faudra probablement une combinaison de politiques de développement intérieures, extérieures et particulières pour remplacer les autres formes de production d'électricité par l'éolien.

Les meilleurs sites éoliens se trouvent souvent dans des zones éloignées des grands centres de population. Il faut donc construire des lignes de transport pour les connecter aux marchés. De plus, pour aménager un parc éolien dans un climat froid, il faut prendre en considération l'impact de la glace sur l'installation, l'exploitation et l'entretien. Des mesures d'adaptation peuvent être nécessaires, comme l'utilisation de différents matériaux et lubrifiants, le chauffage de certaines composantes et l'ajout de technologies de déglçage sur les pales des rotors.

Un des principaux inconvénients de l'énergie éolienne est l'intermittence. Dans les dernières années, la Société indépendante d'exploitation du réseau d'électricité (SIERE) de l'Ontario a mis sur pied une série d'initiatives pour améliorer la répartition des ressources éoliennes, ou la capacité des parcs éoliens à ajuster leur production à la demande de l'opérateur du réseau électrique. Grâce à ces initiatives, les installations éoliennes de l'Ontario contribuent maintenant à équilibrer le réseau et à prévenir la mise à l'arrêt des centrales nucléaires durant les périodes de charge de base excédentaire. [En 2015, la répartition des ressources éoliennes a permis d'éviter 19 de ces mises à l'arrêt.](#)

### Le Danemark, chef de file de l'éolien

En 2015, le Danemark a produit 50 % de son électricité à partir de l'éolien, ce qui représente la plus forte proportion au monde. Cette stratégie comporte toutefois son lot de problèmes d'intermittence, mais le Danemark a mis au point des méthodes pour les gérer.

Le Danemark a la capacité de transférer 6,4 GW d'électricité vers la Norvège, la Suède et l'Allemagne, ce qui représente une plus grande quantité que le pic de demande intérieure de 6 GW. Ainsi, le Danemark peut vendre de l'électricité durant les périodes de grande production éolienne, et en importer durant les périodes de faible production.

Le Danemark a aussi consacré beaucoup d'efforts à l'amélioration de la souplesse opérationnelle de ses centrales électriques traditionnelles. Ses centrales au charbon ont été optimisées de façon à démarrer rapidement, sans trop de préavis, et à faire fluctuer grandement leur production durant la journée. De plus, la réglementation danoise a été revue pour réduire l'utilisation des combustibles fossiles durant les périodes de grande production éolienne.





# Énergie de la biomasse

La production d'électricité à partir de la biomasse se définit comme la [création d'énergie](#) à partir de matières organiques telles que le bois massif ou les déchets de bois, les résidus de culture agricole, les plantes aquatiques et les déchets animaux ou de cultures énergétiques spécialisées, notamment les propriétés forestières de production.

Pour produire de l'électricité, on peut [brûler directement la biomasse ou la gazéifier et l'envoyer vers une chaudière](#). On peut aussi la jumeler au charbon dans une combustion mixte pour réduire les émissions de GES globales des centrales au charbon.

## Adoption au Canada

En 2014, le Canada comptait environ [70 centrales électriques alimentées à la biomasse](#) totalisant une capacité installée de 2 408 MW. La plupart de ces installations carburent au bois, aux sous-produits du bois et aux gaz d'enfouissement.

Les provinces qui utilisent beaucoup la biomasse ont tendance à avoir des industries de pâtes et papier et de foresterie dynamiques. Le Canada a accès à une grande réserve de biomasse forestière renouvelable, en plus des sous-produits et des résidus de l'industrie forestière. Ce sont la Colombie-Britannique, l'Ontario, l'Alberta, le Québec et le Nouveau-Brunswick qui ont la plus grande capacité de production d'énergie par la biomasse.

Au Canada, très peu de sites d'enfouissement récupèrent les émissions de méthane à des fins de revalorisation énergétique. Toutefois, certaines municipalités ([Edmonton](#), [Nanaimo](#) et [Vancouver/Burnaby](#)) produisent activement de l'énergie à partir de déchets, issus des sites d'enfouissement ou de digesteurs anaérobie à grande échelle. De plus en plus, les sites d'enfouissement et les installations de valorisation énergétique des déchets du Canada produisent de l'électricité destinée aux services publics et aux industries à proximité, ou [convertissent les gaz d'enfouissement en gaz naturel](#) qui sont ensuite distribués par les gazoducs.

## Adoption dans le monde

En 2015, la production d'énergie tirée de la biomasse a atteint 518 TWh, soit environ 2 % de la production d'électricité mondiale. Plus de la moitié de cette électricité a été produite par cinq pays : les États-Unis, la Chine, l'Allemagne, le Brésil et le Royaume-Uni. (voir la figure 14)

À l'échelle mondiale, la biomasse utilisée pour produire de l'énergie est en grande partie solide, se présentant sous forme de granulés et de copeaux de bois. Le biogaz, les déchets solides municipaux et les biocarburants sont aussi utilisés à moindre échelle.

TABLE 5

Production d'électricité à partir de la biomasse au Canada : Statistiques importantes

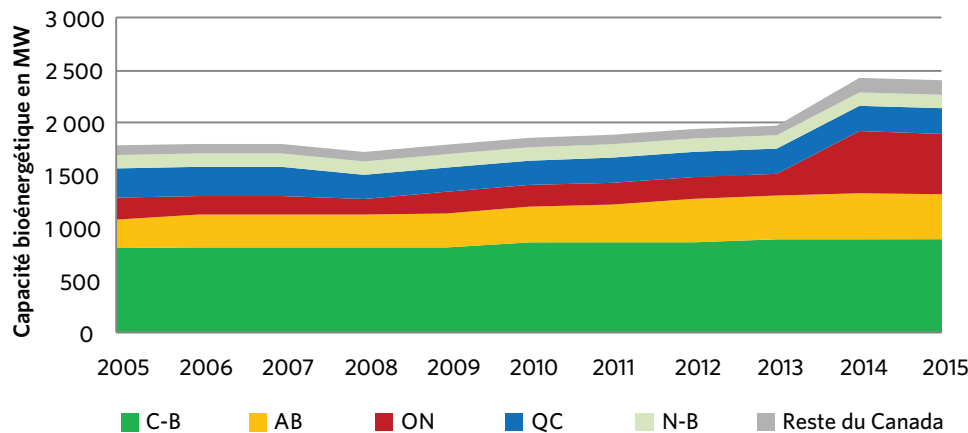
Statistiques importantes (2015)	Biomasse
Capacité installée	2 408 MW
Part de la capacité canadienne	1,7 %
Part de la production canadienne	1,9 %
Électricité produite	12 161 GWh
Taux de croissance entre 2005 et 2015	54 %

Source : [Avenir énergétique du Canada en 2016 - Mise à jour - Offre et demande énergétiques à l'horizon 2040](#)



**FIGURE 12**

**Capacité bioénergétique au Canada**

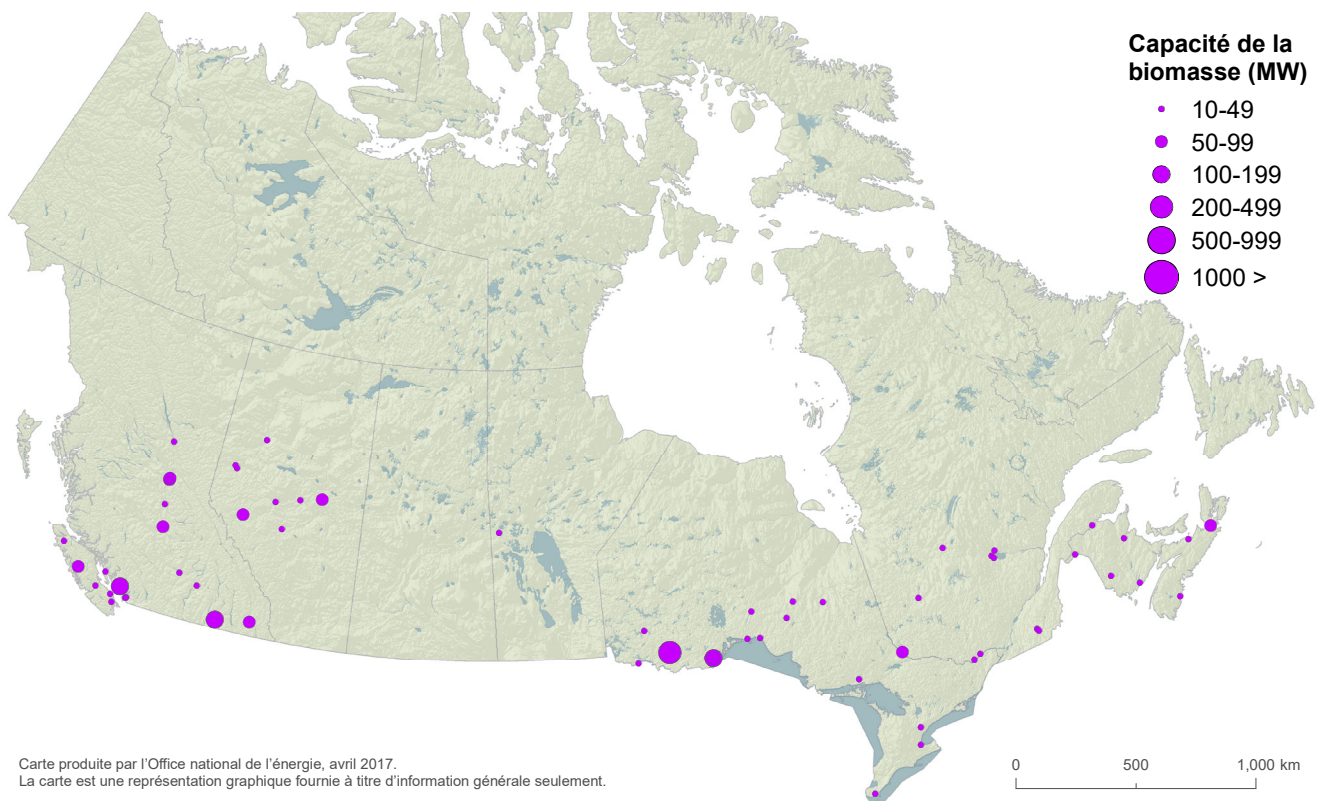


Source : [Avenir énergétique du Canada en 2016 - Mise à jour - Offre et demande énergétiques à l'horizon 2040](#)

Description : Ce graphique à aires empilées montre l'évolution de la capacité bioénergétique des cinq provinces canadiennes en tête et du reste du pays entre 2005 et 2015. Les cinq provinces disposant de la plus grande capacité bioénergétique sont la Colombie-Britannique, l'Alberta, l'Ontario, le Québec et le Nouveau-Brunswick. La capacité bioénergétique a peu fluctué entre 2005 et 2013, mais a connu une hausse marquée en 2013 en raison d'un important ajout en Ontario.

**FIGURE 13**

**Carte des centrales alimentées à la biomasse au Canada**



Carte produite par l'Office national de l'énergie, avril 2017. La carte est une représentation graphique fournie à titre d'information générale seulement.

Source :

[Ressources naturelles Canada: Centrales d'énergie renouvelable de 1MW ou plus - Coopération nord-américaine en matière d'information sur l'énergie](#)

Description : Cette carte montre l'emplacement et la capacité approximative des centrales canadiennes alimentées à la biomasse d'au moins 10 MW. La plupart de ces installations se trouvent en Colombie-Britannique, en Alberta, en Ontario, au Québec, au Nouveau-Brunswick et en Nouvelle-Écosse. On en trouve aussi une au Manitoba, mais aucune en Saskatchewan, à l'Île-du-Prince-Édouard, à Terre-Neuve-et-Labrador et dans les territoires.

## Questions environnementales

La biomasse est généralement considérée comme neutre en carbone puisque la quantité de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) relâchée durant sa combustion ou sa décomposition est à peu près égale à la quantité absorbée dans l'air par les arbres et les plantes au cours de leur vie. Si un arbre est planté pour remplacer chaque arbre brûlé comme biomasse, le nouvel arbre absorbera l'équivalent du CO<sub>2</sub> produit par la combustion ou la décomposition du second. Toutefois, [la combustion de la biomasse crée de la pollution atmosphérique](#). De plus, des émissions de carbone supplémentaires sont créées par la culture, la récolte, la transformation et le transport de la biomasse.

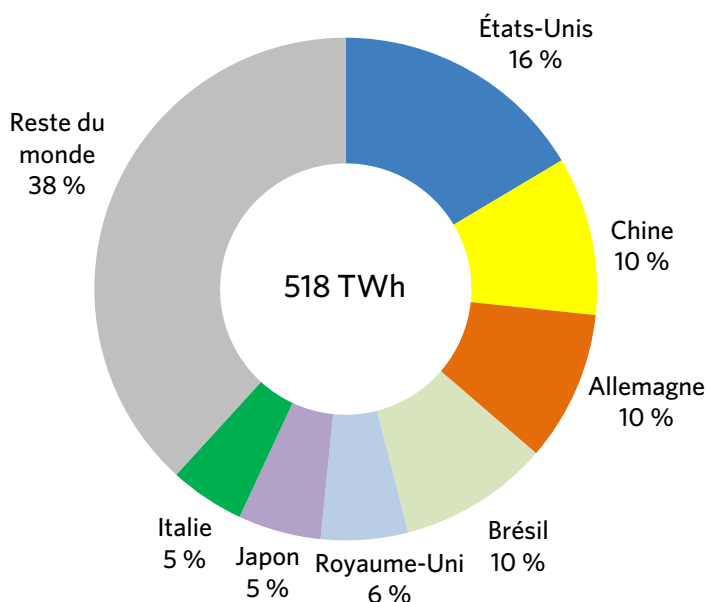
## Questions commerciales

Un des principaux avantages des centrales alimentées à la biomasse est qu'elles produisent de l'énergie sur demande et peuvent être utilisées pour l'approvisionnement de base, contrairement aux autres sources d'énergie renouvelable dont la production est intermittente. Toutefois, la disponibilité des combustibles et les coûts de transport influencent grandement la viabilité financière des centrales alimentées à la biomasse.

Les scieries typiques convertissent environ 45 % de chaque billot en bois d'œuvre. Les résidus (copeaux, rabotures et sciure de bois) peuvent être utilisés comme charge d'alimentation par les centrales alimentées à la biomasse, mais aussi être recyclés par l'industrie des pâtes et papiers ou transformés en granulés ou en panneaux de fibres. Cette concurrence entre les utilisateurs peut limiter la quantité de biomasse de bois disponible pour la production d'électricité.

FIGURE 14

Production bioénergétique et géothermique mondiale (2015)



Source : [Statistical Review of World Energy de BP](#)

Description : Ce graphique en forme d'anneau montre la production bioénergétique et géothermique des sept principaux pays producteurs et du reste du monde.

Les sept principaux pays producteurs d'électricité à partir de l'énergie géothermique et de la biomasse sont les États-Unis, la Chine, l'Allemagne, le Brésil, le Royaume-Uni, le Japon et l'Italie. Ensemble, ils représentent près des trois quarts du total de la production bioénergétique et géothermique mondiale, qui s'élevait à 518 TWh en 2015.





Les centrales alimentées à la biomasse peuvent utiliser du bois sur pied (arbres entiers qui n'ont pas encore été coupés à d'autres fins), pourvu qu'il soit coupé conformément aux permis applicables. Dans ce cas, le producteur d'électricité doit assumer tous les frais de coupe et de transport. Selon les estimations de BC Hydro, le coût de la production d'électricité à partir de déchets de bois en Colombie-Britannique varie entre 107 \$ et 134 \$ le MWh, tandis que le coût de la production d'électricité à partir de bois sur pied est de 208 \$ le MWh.

Le transport de la biomasse utilisée comme charge d'alimentation sur de longues distances est un défi. La biomasse possède une densité énergétique plus faible que le charbon ou le pétrole, ce qui signifie qu'il faut un plus grand volume de biomasse pour produire une unité d'électricité. La biomasse est généralement transportée par camions, ce qui est plus coûteux que le transport par train ou par pipeline.

En raison de ces difficultés, les centrales alimentées à la biomasse sont plus rentables lorsqu'elles sont situées à proximité des sources d'approvisionnement en combustibles. La rentabilité peut aussi être améliorée par l'utilisation d'unités de cogénération, qui produisent à la fois de la chaleur et de l'électricité.

## Collaboration avec la Finlande, experte en biomasse

La Finlande fait partie des chefs de file de la production d'énergie à partir de la biomasse. En 2015, elle a produit 11,3 TWh d'électricité à partir de la biomasse (17 % de la production totale) comparativement à 3,7 TWh en Colombie-Britannique (6 % de la production totale).

En Finlande, l'utilisation de la biomasse est fortement motivée par le manque d'options énergétiques, le climat froid et la disponibilité des sous-produits générés par ses importantes industries forestière, des produits du bois et du papier. Le bois utilisé consiste surtout en résidus issus de ces industries. Il s'agit donc de bois de faible qualité sans usages concurrents.

Le secteur bioénergétique de la Finlande bénéficie du soutien de programmes comme le financement de la recherche, d'allègements fiscaux et de subventions à la production. La Finlande est aussi une fervente promotrice

de l'efficacité énergétique. La plupart de ses centrales alimentées à la biomasse sont en fait des centrales de cogénération qui fournissent de l'énergie de chauffage en plus de l'électricité. Environ 80 d'entre elles ont une capacité de 20 MW ou plus.

La Finlande a un territoire recouvert de forêt à environ 60 %, et elle se compare à la Colombie-Britannique sur les plans de la population, du climat et de la taille de l'industrie forestière (selon le volume annuel de bois coupé). En juin 2016, FP Innovations, une société de recherche de la Colombie-Britannique, en collaboration avec le centre des sciences forestières de l'Université de la Colombie-Britannique, a proposé un [partenariat](#) avec l'industrie de la biomasse de la Finlande pour profiter de son expertise en matière de pratiques exemplaires.



# Énergie solaire

Pour convertir l'énergie solaire en électricité, la méthode la plus courante est l'utilisation de cellules photovoltaïques, qui convertissent les rayons du soleil en électricité qui peut ensuite être utilisée, emmagasinée ou intégrée au réseau.

Les panneaux photovoltaïques comprennent une multitude de cellules, composées soit de tranches de silicium cristallin, soit de fines pellicules de silicium et de métal.

La quantité d'électricité produite dépend de l'intensité du rayonnement solaire qui frappe la surface du panneau. La puissance de sortie est réduite par la couverture nuageuse, la variation saisonnière des heures d'ensoleillement, l'obstruction du panneau par la neige et la poussière et les dommages causés par la grêle. L'énergie solaire est aussi une source intermittente puisque sa disponibilité varie selon la météo et qu'elle n'est pas disponible la nuit.

Les panneaux photovoltaïques peuvent être installés sur des constructions résidentielles ou commerciales. La capacité des projets de toiture résidentielle se limite généralement à moins de 10 kW, tandis que celle des parcs solaires commerciaux peut atteindre des centaines de mégawatts.

Avec le temps, l'amélioration continue des procédés de fabrication des panneaux photovoltaïques a réduit les coûts de production, y compris pour les cellules en silicium cristallin traditionnelles, les plus répandues dans le monde. En effet, le coût des modules photovoltaïques a chuté de 6,18 \$/W en 2004 à 0,85 \$/W en 2014. Malgré tout, l'énergie solaire reste coûteuse comparativement aux sources d'électricité traditionnelles, et ces coûts demeurent un obstacle à l'adoption généralisée de la technologie.

## Adoption au Canada

L'énergie solaire est une source d'électricité modeste qui gagne rapidement en popularité auprès des Canadiens. En 2015, le Canada affichait une capacité solaire installée de 2 100 MW, produisant 3 TWh chaque année. Bien que cette capacité ne représente qu'environ 0,5 % de la production d'électricité nationale, les projets solaires se sont multipliés rapidement, cumulant une capacité installée supplémentaire de près de 2 000 MW depuis 2013. Plus de 98 % de la capacité solaire du Canada se situe en Ontario.

**TABLEAU 6**

Énergie solaire au Canada : Statistiques importantes

Statistiques importantes (2015)	Énergie solaire photovoltaïque
Capacité installée	2 135 MW
Part de la capacité canadienne	1,5 %
Part de la production canadienne	0,5 %
Électricité produite	3 007 GWh
Taux de croissance entre 2010 et 2015	2 344 %

Source :

[Avenir énergétique du Canada en 2016 - Mise à jour - Offre et demande énergétiques à l'horizon 2040](#)

N.B. :

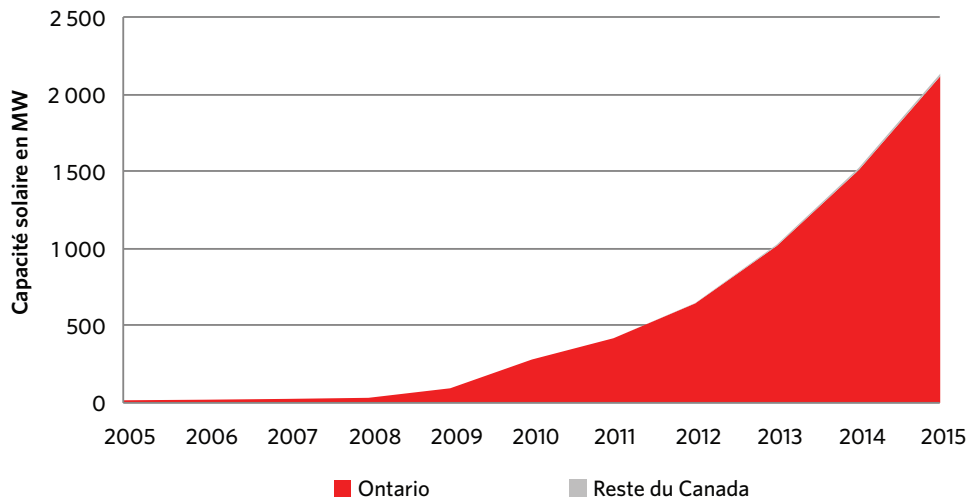
Aucune énergie solaire n'a été produite en 2005. Le taux de croissance a donc été calculé à partir de 2010. Cette année-là, le Canada a produit 123 MW d'énergie solaire.





FIGURE 15

Capacité solaire au Canada



Source : [Avenir énergétique du Canada en 2016 - Mise à jour - Offre et demande énergétiques à l'horizon 2040](#)

Description : Ce graphique à aires empilées montre l'évolution de la capacité solaire de l'Ontario et du reste du Canada entre 2005 et 2015. La capacité solaire de l'Ontario a augmenté rapidement entre 2008 et 2015. En 2015, elle représentait plus de 98 % de la capacité solaire au Canada. Dans le reste du Canada, la croissance de la capacité solaire demeure marginale en comparaison et difficile à visualiser sur le graphique.

FIGURE 16

Carte des centrales solaires au Canada



Source :

[Ressources naturelles Canada: Centrales d'énergie renouvelable de 1MW ou plus - Coopération nord-américaine en matière d'information sur l'énergie](#)

Description : Cette carte montre l'emplacement et la capacité approximative des centrales solaires canadiennes d'au moins 10 MW. Elles se trouvent toutes en Ontario.



## Adoption dans le monde

La capacité solaire mondiale a énormément augmenté dans les dernières années. En 2015, environ 50 GW de capacité solaire ont été installés partout dans le monde, portant le total à environ 227 GW. Les premiers pays producteurs d'énergie solaire sont la Chine, les États-Unis, l'Allemagne, le Japon et l'Italie qui, ensemble, représentent près de 70 % de la production mondiale.

## Questions environnementales

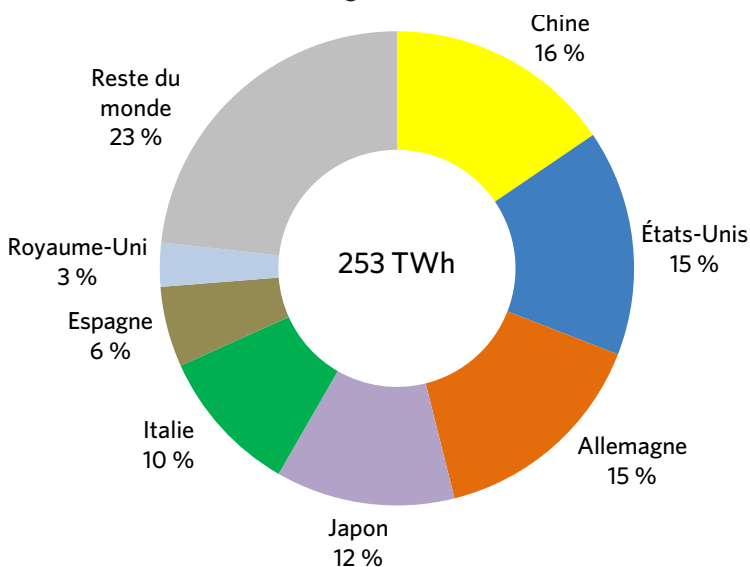
Le principal avantage de la production photovoltaïque est qu'elle n'émet aucun polluant ni GES, et contrairement aux éoliennes, elle ne perturbe pas les chauves-souris et les oiseaux migrateurs. Toutefois, comme pour les éoliennes, certains GES sont relâchés durant la fabrication, le transport et l'assemblage des cellules photovoltaïques. De plus, l'aménagement des centrales solaires soulève des inquiétudes au sujet de [la dégradation des terres et des répercussions sur les habitats](#), et combiner les centrales solaires avec l'agriculture est plus compliqué qu'avec l'énergie éolienne. Enfin, les panneaux solaires peuvent devenir des déchets à la fin de leur vie utile, puisque les installations pour les recycler sont rares.

## Questions commerciales

Le principal obstacle à l'adoption généralisée de la production photovoltaïque est le coût. Le coût moyen de l'énergie photovoltaïque au Canada, amorti sur la durée de vie des installations, était de l'ordre de 23 cents par kWh en 2016 (voir la figure 18), soit un prix nettement plus élevé que celui des autres sources d'énergie renouvelable, comme l'éolien, et généralement supérieur aux prix du marché. Pour cette raison, le développement de la production solaire dépend énormément des programmes incitatifs.

FIGURE 17

Production mondiale d'énergie solaire (2015)



Source : [Statistical Review of World Energy de BP](#)

Description : Ce graphique en forme d'anneau montre la production solaire des sept principaux pays producteurs et du reste du monde. Les sept principaux pays producteurs d'énergie solaire sont la Chine, les États-Unis, l'Allemagne, le Japon, l'Italie, l'Espagne et le Royaume-Uni. Ensemble, ils représentent environ les trois quarts du total de la production mondiale d'énergie solaire, qui s'élevait à 253 TWh en 2015.





Le programme de tarifs de rachat garantis (TRG) de l'Ontario est celui qui offre les plus importants incitatifs à la production solaire au Canada, et c'est pourquoi 98 % de la capacité photovoltaïque du Canada est située dans cette province. Depuis le mois de juin 2016, le programme de TRG paie [aux producteurs d'énergie photovoltaïque entre 22,5 et 31,3 cents](#) pour chaque kWh connecté au réseau, mais les prix peuvent varier selon la taille du projet et les délais de mise en service.

En 2015, la production photovoltaïque représentait environ 5 % de la capacité énergétique de l'Ontario, et une certaine croissance est attendue, notamment dans les [grands parcs solaires connectés au réseau](#). Toutefois, toute hausse substantielle future du taux de pénétration en Ontario et au-delà dépendra de l'évolution des prix, des incitatifs et des réductions de coûts.

Au Canada, certains distributeurs d'électricité offrent la [facturation nette](#) aux ménages dotés de projets solaires résidentiels, ce qui permet aux clients de vendre leurs surplus d'électricité au réseau

## Trouver le bon programme de promotion solaire

Comparé au reste du monde, le Canada est un petit promoteur de l'exploitation des ressources solaires. En 2015, il se [classait au 10<sup>e</sup> rang mondial](#) des installations annuelles de panneaux photovoltaïques, avec l'ajout d'une capacité de 600 MW. La même année, la Chine arrivait première en bonifiant sa capacité de 15 200 MW. En 2015, l'énergie solaire a comblé 0,5 % des besoins en électricité du Canada (voir le tableau 6). En comparaison, l'Italie, la Grèce et l'Allemagne arrivaient en tête de l'intégration photovoltaïque en comblant respectivement 8 %, 7,4 % et 7,1 % de leur demande intérieure totale avec cette forme d'énergie.

Dans le cadre de sa loi sur les sources d'énergie renouvelable, l'Allemagne a mis en œuvre un programme de tarifs de rachat garantis pour l'énergie renouvelable.

La croissance de la production photovoltaïque en Allemagne s'explique par les prix attractifs offerts par le programme, qui sont ensuite recouverts par l'augmentation des factures des consommateurs. Le programme de tarifs de rachat garantis de l'Allemagne varie selon la taille et l'année du projet, débutant entre 57 et 45 centimes (d'euro) par kWh en 2004 et diminuant avec le temps pour atteindre 9 à 13 centimes en 2014. Depuis 2014, les prix du programme de tarifs de rachat garantis sont fixés aux enchères afin d'encourager la concurrence.

L'Ontario et l'Allemagne ont toutes deux réduit les prix de leur programme avec le temps. Ces programmes ont réussi à favoriser la mise en valeur des projets photovoltaïques, mais sont maintenant progressivement revus à la baisse pour contrôler les coûts.



# Technologies émergentes

Plusieurs technologies renouvelables n'ont toujours pas réussi à percer le marché de l'énergie du Canada, mais se sont fortement imposées ailleurs et ont le potentiel de jouer un rôle beaucoup plus important dans le portefeuille énergétique du Canada. Au nombre de ces technologies figurent, l'énergie marémotrice, l'énergie éolienne en mer, et l'énergie géothermique.

## Énergie marémotrice

Le mouvement des marées peut produire de l'électricité de quatre façons : les courants de marée, les barrages marémoteurs, les lagunes à marée et l'énergie marémotrice dynamique.

Les [hydroliennes](#) utilisent des turbines sous-marines pour capter l'énergie des courants de marée. Les [systèmes de courants de marée](#) extraient l'énergie cinétique (énergie d'un corps en mouvement) de l'eau qui se déplace sous l'effet des marées sans perturber l'environnement. Cette technologie a été déployée un peu partout dans le monde, principalement dans le cadre de projets de démonstration de moins de 10 MW.

Un barrage marémoteur fonctionne de la même façon qu'un barrage hydroélectrique à réservoir, sauf qu'il est construit dans un estuaire soumis à l'influence des marées. Les écluses du barrage s'ouvrent quand la marée monte dans l'estuaire et se ferment durant la marée haute pour remplir le bassin de retenue. L'eau est ensuite relâchée à marée basse vers un alternateur à turbine pour produire de l'électricité. Le plus grand barrage marémoteur du monde, en Corée, a une capacité de 254 MW.

Une lagune à marée consiste en un mur d'enceinte qui clôture une partie de la mer, formant une lagune artificielle. Comme les barrages marémoteurs, les lagunes à marées permettent de remplir un bassin de retenue d'eau à marée haute, puis de la relâcher à travers les turbines internes de l'ouvrage à marée basse pour produire de l'électricité. La première installation proposée de ce type est la [lagune à marée de Swansea Bay](#) de 320 MW au Royaume-Uni, dont la mise en service est prévue en 2019.

L'énergie marémotrice dynamique est une technologie conceptuelle reposant sur un long barrage construit en saillie dans la mer à partir de la côte, avec de nombreuses turbines intégrées sur son long. Durant le cycle des marées, l'eau passe d'un côté à l'autre de la structure en forme de T, activant ses turbines internes. L'énergie marémotrice dynamique est toujours à l'étude et aucune installation n'a été construite à ce jour.

Les seules installations d'énergie marémotrice en Amérique du Nord se trouvent en Nouvelle-Écosse, où la [centrale Annapolis Tidal](#) a été aménagée en 1984. Elle dispose d'une capacité installée de 20 MW et produit entre 29 et 37 GWh d'électricité par année, selon les marées. [Cape Sharp Tidal](#) a mis en service la première turbine d'un projet de 4 MW dans la baie de Fundy [à la fin de 2016](#). Le projet consiste en deux turbines d'eau vive de 2 MW. Une fois en exploitation, elles devraient réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de la Nouvelle-Écosse de [6 000 tonnes par année](#). Les projets suivants sont également prévus en Nouvelle-Écosse : Black Rock Tidal Power (5 MW), Minas Tidal Limited Partnership (4 MW), Atlantis Operations Canada Limited (4,5 MW), Halagonia Tidal Energy Limited (4,5 MW) et Fundy Tidal Inc. (2,95 MW).

La Corée du Sud, la France et le Royaume-Uni ont une longueur d'avance sur le Canada en matière de capacité marémotrice installée. La plus grande partie de la capacité de la Corée du Sud provient de son projet Sihwa Lake de 254 MW, situé sur la côte ouest et relié à un lac artificiel d'une superficie de 43,8 km<sup>2</sup>. En ouvrant les écluses deux fois par jour durant la marée haute de la mer de l'ouest, la centrale électrique est capable de produire environ 552,7 GWh d'électricité chaque année.

TABLEAU 7

Palmarès des pays avec la plus forte capacité marémotrice en 2015

Pays	Capacité marémotrice (MW)
Corée du Sud	511
France	246
Royaume-Uni	139
Canada	40
Belgique	20

Source:

[Rapport annuel 2015 d'Ocean Energy Systems](#)



## Énergie éolienne en mer

Les efforts déployés pour améliorer l'efficacité des parcs éoliens ont conduit à l'installation d'éoliennes en mer, où le vent souffle généralement plus fort et où l'on peut utiliser de plus grandes éoliennes offrant un plus grand facteur de charge<sup>3</sup>. Les éoliennes en mer sont essentiellement identiques à leurs équivalents terrestres, mais sont modifiées pour pouvoir être installées dans l'eau. En eau peu profonde, les éoliennes sont fixées au plancher océanique par la base, tandis qu'en eau profonde, elles sont attachées à une station flottante amarrée au plancher océanique.

L'[énergie éolienne en mer](#) est une technologie éprouvée en usage dans plusieurs régions d'Europe depuis plus de 25 ans. En 2015, l'Europe disposait d'une capacité éolienne en mer d'environ 11 GW. L'association [Wind Europe](#) avait fixé l'objectif d'atteindre une puissance installée de 40 GW d'ici 2020, et de 150 GW d'ici 2030. Comparativement au Canada, le Vieux Continent a davantage intérêt à explorer les énergies renouvelables en mer en raison des coûts élevés de l'énergie et de l'électricité, de la forte densité de population le long des côtes et du manque de terres disponibles.

Il n'y a aucun parc éolien en mer au Canada, mais des projets totalisant plus de 3,6 GW en capacité ont été proposés. Le [projet NaiKun](#) de 400 MW dans le détroit d'Hécate, en Colombie-Britannique, est la seule proposition pour la côte Ouest. Cinq projets cumulant 3 200 MW ont été mis sur pied par [Beothuk Energy](#) pour le Canada atlantique : deux au large des côtes de Terre-Neuve-et-Labrador et trois au large des côtes de la Nouvelle-Écosse, de l'Île-du-Prince-Édouard et du Nouveau-Brunswick.

Les questions environnementales liées à l'énergie éolienne en mer sont les mêmes que pour l'énergie éolienne sur terre, à ceci près que les préoccupations concernent les écosystèmes marins plutôt que les oiseaux et les chauves-souris. Comme les parcs éoliens en mer sont souvent situés hors de la vue et de la portée de la plupart des riverains, elles ne soulèvent généralement pas beaucoup d'objections par rapport aux nuisances sonores et visuelles ou à la perturbation des activités récréatives.

Les parcs éoliens en mer sont plus coûteux que leurs pendants terrestres. La construction en eau profonde est dispendieuse, nécessite différents matériaux, prend plus de temps et est plus sensible aux conditions météorologiques. En raison des variations extrêmes de température et des problèmes de corrosion, les matériaux ont une durée de vie réduite et les installations nécessitent davantage d'interventions et d'entretien. Les collisions avec des icebergs et des embarcations motorisées peuvent être aussi des risques additionnels.

D'un autre côté, [le vent souffle avec plus de force et de constance en mer](#), ce qui permet de produire jusqu'à 50 % plus d'électricité que sur terre. De plus, le vent souffle plus fort en mer durant le jour, moment où la demande d'électricité est à son comble, tandis que [le vent souffle généralement plus fort la nuit sur terre](#), quand la demande est à son plus bas. Enfin, le facteur de charge des éoliennes en mer est d'environ 45 %, comparativement à 30 % sur terre.

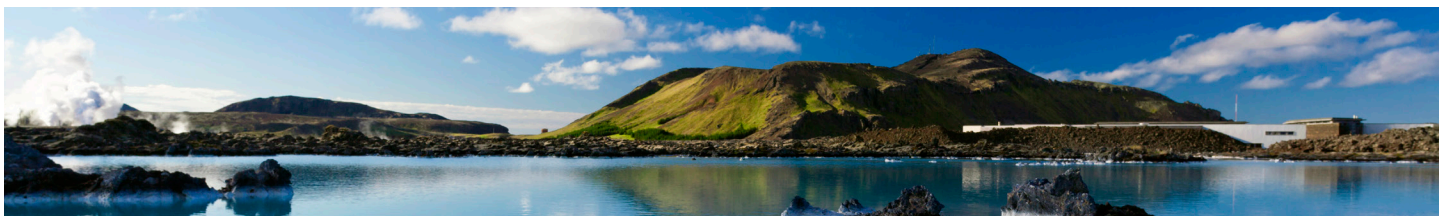
## Énergie géothermique

L'[énergie géothermique](#) est produite par la chaleur enfouie dans le sol, que ce soit le magma, des roches chaudes, de l'eau chaude ou de la vapeur. L'ajout de liquides dans les zones chaudes crée de la vapeur qui peut ensuite être utilisée pour produire de l'électricité. Bien que la technologie de production d'énergie géothermique existe depuis plus de 100 ans, il n'y a aucune centrale géothermique en service au Canada.

À la fin de 2015, la capacité géothermique installée atteignait 13,2 GW à l'échelle mondiale. Cette année-là, les pays disposant de la plus grande capacité étaient [les États-Unis, les Philippines, l'Indonésie, le Mexique et la Nouvelle-Zélande](#).

L'énergie géothermique est omniprésente au Canada. Toutefois, les régions qui offrent le plus grand potentiel sont la Colombie-Britannique, l'Alberta, le Yukon, les Territoires du Nord-Ouest et la Saskatchewan. La côte Ouest du Canada, à la périphérie orientale de la [ceinture de feu](#) qui entoure l'océan Pacifique, se prête à une production commerciale à grande échelle. Par ailleurs, des collectivités nordiques isolées étudient actuellement les synergies entre la chaleur et l'électricité géothermique qui, même à petite échelle, pourraient remplacer leurs solutions d'électricité et de chauffage très coûteuses.

Les principaux facteurs qui déterminent la viabilité économique d'un site sont la température de l'eau ou de la vapeur et la vitesse et la pression à laquelle elle atteint la surface. Il y a aussi d'autres facteurs, comme la profondeur de la ressource et sa proximité des lignes de transport et des marchés. Contrairement à la majorité des sources d'énergie renouvelable, l'énergie géothermique convient à la production de la charge de base puisque, une fois en fonction, elle offre un taux de fiabilité de 98 %. De plus, le coût des combustibles est extrêmement bas, tout comme les coûts d'exploitation et d'entretien.



<sup>3</sup> Le [National Renewable Energy Laboratory \(NREL\)](#) définit le [facteur de charge net](#) comme le ratio d'énergie réellement acheminée au point d'interconnexion durant une période donnée par rapport à l'énergie potentielle qui pourrait théoriquement être acheminée si la centrale fonctionnait sans interruption à sa capacité nominale durant la même période.

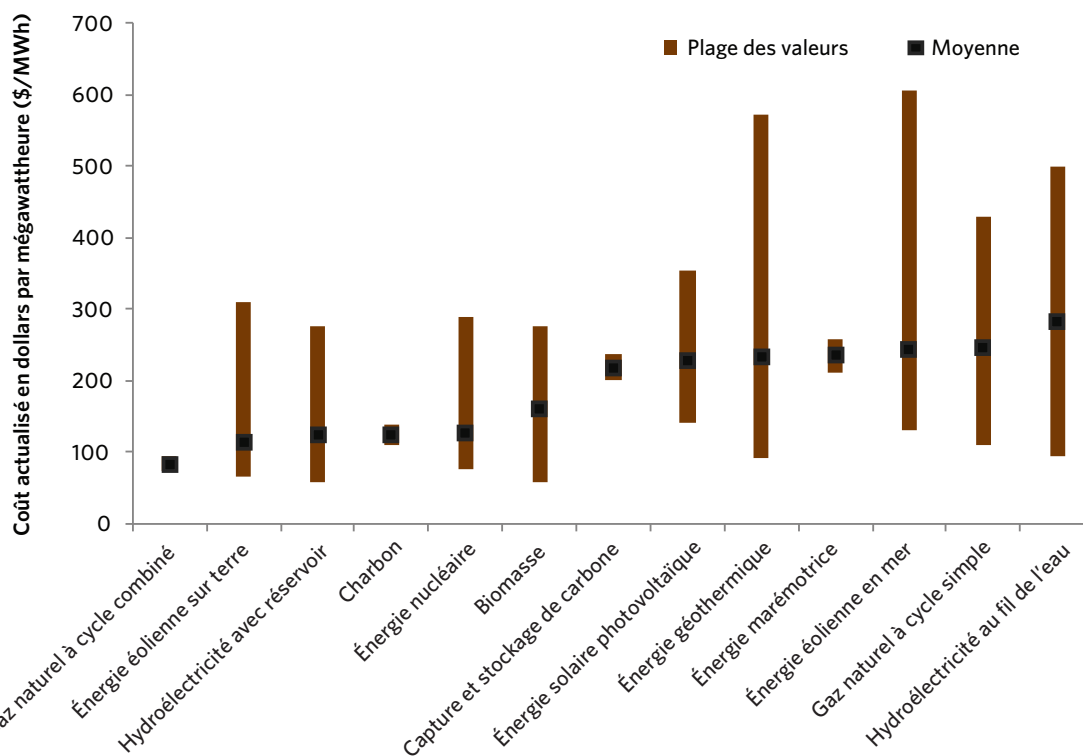
# Coûts et compromis

Le coût de la production d'électricité peut varier selon les sources d'énergie et le combustible utilisés. Par exemple, l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques tend à coûter plus cher que celle qui est produite par les centrales hydroélectriques à réservoir. De plus, les coûts varient grandement d'un projet à l'autre, qu'il s'agisse d'énergie solaire ou hydroélectrique.

La taille, la puissance de sortie, le taux d'efficacité et d'autres variables opérationnelles diffèrent aussi d'un projet à l'autre. Financièrement, le montant de l'investissement initial et les coûts d'exploitation, d'entretien et des combustibles varient beaucoup. De plus, le régime d'imposition et les subventions influencent aussi le coût des projets.

**FIGURE 18**

Coût actualisé de l'électricité



Sources:

[NB Power](#), [AESO](#), [Nova Scotia Power](#), [OPG](#), [IESO](#), [Manitoba Hydro](#), [BC Hydro](#)

Description: Ce graphique montre le coût actualisé de divers types de centrales électriques. Le coût actualisé se définit comme le coût moyen qu'une installation de production d'électricité doit obtenir pour chaque unité produite au cours de sa vie pour atteindre le seuil de la rentabilité financière. Pour chaque type de production, une colonne indique la plage des valeurs tirées des sources provinciales, et le carré indique la valeur moyenne. Ce sont les centrales de gaz naturel à cycle combiné, les parcs éoliens sur terre et les centrales hydroélectriques à réservoir qui ont le plus faible coût actualisé moyen, et les parcs éoliens en mer, les centrales au gaz naturel à cycle simple et les centrales hydroélectriques au fil de l'eau qui ont le coût actualisé moyen le plus élevé.



Pour comparer directement les coûts de technologies aussi différentes, on utilise entre autres une mesure appelée « coût actualisé de l'électricité ». Il s'agit du prix moyen qu'une installation de production d'électricité doit obtenir pour chaque unité produite au cours de sa vie pour atteindre le seuil de rentabilité financière. Le coût actualisé est souvent exprimé en cents par kWh et calculé en dollars courants.

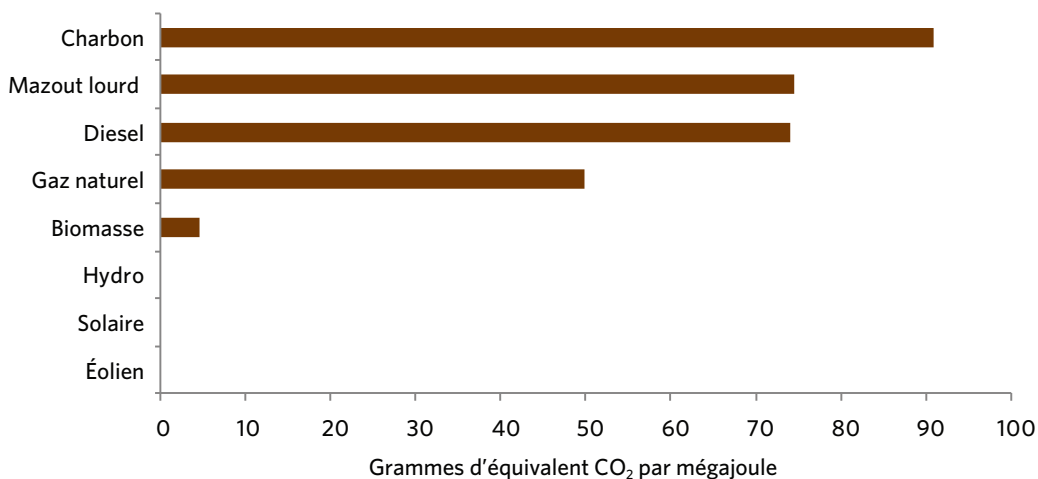
La plupart des régies de services publics se préoccupent du coût total payé par les consommateurs pour l'électricité, y compris des effets sur les ménages à faible revenu. Le prix pèse lourd dans la balance quand vient le temps de choisir les sources de production à construire ou à utiliser un jour donné, et les exploitants de réseau électrique ont tendance à privilégier les sources à faible coût.

Beaucoup d'autres facteurs doivent être soupesés avant de prendre une décision sur les sources d'énergie à utiliser pour produire de l'électricité. La fiabilité est un facteur d'importance, puisque les exploitants ont le mandat de veiller à ce que l'offre soit en tout temps suffisante pour répondre à la demande. Les sources d'énergie intermittentes, comme le vent et le soleil, doivent donc être soutenues par d'autres sources de production.

Qui dit différentes sources d'électricité dit aussi différents coûts environnementaux. Le monde a actuellement les yeux rivés sur les émissions de carbone et de GES, souvent présentés en tonnes d'équivalents CO<sub>2</sub>. L'exploitation d'installations hydroélectriques, éoliennes et solaires crée peu ou pas d'émissions, mais d'autres types de production peuvent en produire beaucoup plus.

**FIGURE 19**

### Émissions de gaz à effet de serre par type de combustible



Source: [Avenir énergétique du Canada en 2016 - Mise à jour - Offre et demande énergétiques à l'horizon 2040](#), et [Environnement et Changement climatique Canada](#)

*N.B.:* Les gaz à effet de serre considérés sont le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>), l'oxyde de diazote (N<sub>2</sub>O), l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>), les tétrafluorométhanes (CFC), les hydrurofluorocarbones (HFC) et le trifluorure d'azote (NF<sub>3</sub>).

*Description :* Ce graphique montre les émissions estimatives de CO<sub>2</sub> pour chaque type de combustible. Les émissions sont présentées en grammes d'équivalent CO<sub>2</sub> par mégajoule (g/MJ). Les émissions du charbon sont les plus importantes à 90,87 g/MJ, suivies de celles du mazout lourd à 74,58 g/MJ, du diesel à 74,08 g/MJ, du gaz naturel à 49,88 g/MJ et de la biomasse à 4,59 g/MJ. L'exploitation d'installations hydroélectriques, éoliennes et solaires crée peu ou pas d'émissions.

Chaque méthode de production d'électricité a un coût environnemental, même si elle ne génère aucune émission durant la production. Des émissions sont produites tout au long du cycle de vie des installations. Les matières premières doivent être recueillies ou extraites, transformées en différentes composantes, puis transportées au site de production et assemblées. Des émissions sont aussi produites par l'exploitation courante et l'entretien. En outre, la construction, l'exploitation et la cessation d'exploitation des installations électriques peuvent avoir de lourdes répercussions sur les terres, l'air et les écosystèmes aquatiques avoisinants.

Les politiques de production d'électricité équilibrent ces différents coûts et compromis de multiples façons. La promotion actuelle des énergies éolienne, solaire et hydroélectrique reflète la priorité accordée à la production à faibles émissions. À mesure que les technologies, les coûts et les préoccupations environnementales évoluent, les forces et les faiblesses relatives de chaque combustible peuvent être appelées à changer.





## Difficultés posées par les données

Les données présentées dans ce rapport sont tirées des sources suivantes :

- [Statistique Canada](#)
- [Gouvernement ouvert](#) (portail qui donne accès aux bases de données ouvertes interrogeables du gouvernement du Canada et à d'autres sources ouvertes)
- Organismes provinciaux
- Services publics et exploitants de réseaux dans les provinces

Il est difficile d'obtenir des données précises et détaillées sur les énergies renouvelables. Dans le cas de faibles quantités, il peut être plus facile d'en présenter le total dans les rapports produits, sinon même plus approprié de simplement les

omettre par souci d'en protéger le caractère confidentiel. Lorsqu'il n'existe qu'une ou deux installations de production dans une région, éoliennes ou de transformation de la biomasse par exemple, les données de production ne sont pas publiées.

L'Office a recueilli les meilleures données disponibles pour la production de ce rapport, mais il est probable qu'il en manque certaines. Au besoin, des calculs estimatifs ont été effectués ou des données moins récentes ont été utilisées.

L'Office collabore actuellement avec des organismes fédéraux et provinciaux pour rapprocher les données sur l'énergie renouvelable au Canada et en améliorer la qualité.

Pour toute question ou suggestion au sujet des données : [energiesrenouvelables@neb-one.gc.ca](mailto:energiesrenouvelables@neb-one.gc.ca).