

Impact des changements climatiques sur le potentiel éolien en Amérique du Nord



ENERGICA

 Ouranos

 Hydro
Québec

Impact des changements climatiques sur le potentiel éolien en Amérique du Nord

Coordonatrice de l'étude

Marilys Clément, Nergica

Auteurs principaux de l'étude

Nigel Swytink-Binnema, anciennement de Nergica
Marilys Clément, Nergica

Auteurs collaborateurs de l'étude

Hélène Côté, Ouranos
Dominique Paquin, Ouranos
Éric Desrosiers, Hydro-Québec
Guillem Candille, Hydro-Québec

Citation suggérée :

Swytink-Binnema, N., M. Clément, H. Côté, D. Paquin, E. Desrosiers et G. Candille (2023). Impact des changements climatiques sur le potentiel éolien en Amérique du Nord. Rapport public, disponible sur nergica.com/publications

Avis de non-responsabilité

Ce rapport a été préparé par Nergica, avec la collaboration d'Ouranos et d'Hydro-Québec (le « Rapport »). Ni les personnes, ni les entreprises énumérées dans la liste indiquée à la page II, ni leur employeur, ni leur personnel ne garantissent, expressément ou implicitement, ou n'assument une obligation ou une responsabilité quelconque quant à l'exactitude, l'exhaustivité ou l'utilité de toute information, conclusion et analyse ou résultat contenu au Rapport ou quant à l'utilisation qu'une personne peut en faire. Toute mention dans le Rapport d'un produit, d'un processus, d'un service, d'un nom ou d'un fabricant ne constitue ni n'implique une approbation, une recommandation ou une préférence de la part de Nergica, Ouranos ou Hydro-Québec. Par conséquent, Nergica, Ouranos et Hydro-Québec n'assument aucune responsabilité pour tout dommage découlant des ou relié aux informations, résultats, conclusions ou analyses contenus dans le Rapport.

© 2023 Nergica – Tous droits réservés

Ce rapport est disponible gratuitement sur le site web de Nergica :

www.nergica.com/publications/

Remerciements

COLLABORATEURS

Jacinthe Clavet-Gaumont, anciennement d'Ouranos

Kossivi Tete, anciennement de Nergica

Patrick Grenier, anciennement d'Ouranos

CONTRIBUTIONS

David Émond, Delta Statistique

Michael Vieira, Manitoba Hydro

Jeff Blais, Manitoba Hydro

Simon-Philippe Breton, Environnement et Changement climatique Canada

Cédric Arbez, anciennement de Nergica

Jessica Thérout, anciennement de Nergica

Ferial Amira Slim, Nergica

RÉVISION LINGUISTIQUE

Benoit Brière

PARTENAIRES FINANCIERS ET ORGANISMES SUBVENTIONNAIRES

La réalisation de cette étude a été rendue possible grâce au soutien financier du gouvernement du Québec, du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie (CRSNG) et d'InnovÉÉ. Cette étude répond aux objectifs du Plan pour une économie verte 2030.



Sommaire

Les énergies renouvelables en soutien à la lutte contre les changements climatiques

Le nouveau rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) de l'ONU est catégorique : les émissions de gaz à effet de serre n'ont jamais été aussi élevées dans l'histoire de l'humanité. Pour espérer limiter le réchauffement à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels, soit la limite fixée par l'accord de Paris en 2015, l'utilisation du charbon doit être réduite de 95 %, et les consommations de pétrole et de gaz de 60 % et 45 % respectivement, d'ici à 2050.

L'une des principales pistes proposées par le GIEC pour atteindre ces cibles de réduction réside dans l'exploitation des énergies renouvelables en remplacement des énergies fossiles.

Entre 2010 et 2019, le coût de l'énergie solaire et des batteries lithium-ion a diminué de 85 %, et celui de l'énergie éolienne a diminué de 55 %. Selon l'Agence internationale pour les énergies renouvelables, le coût des énergies éolienne et solaire est désormais inférieur à celui des énergies fossiles.

Parallèlement, selon le rapport *Avenir énergétique du Canada en 2021* de la Régie de l'énergie du Canada, la demande en électricité du pays est appelée à augmenter de 47 % entre 2021 et 2050.

L'énergie éolienne, l'énergie solaire et le stockage par batteries représenteront entre 82 et 85 % de ces capacités additionnelles. Bien que ces technologies soient appelées à être déployées pour réduire les impacts des changements climatiques anticipés, elles sont elles-mêmes à risque d'être affectées par les changements climatiques au niveau de la température, du vent et des précipitations, entre autres. Il est donc essentiel de considérer l'impact des changements climatiques sur le potentiel de production énergétique de ces technologies.

Une filière éolienne en mouvement

Au Canada, la filière éolienne a connu son essor au début des années 1990 avec l'installation de quelques éoliennes en Alberta, en Ontario et au Yukon. Depuis 1999, des centaines d'éoliennes sont installées chaque année dans des parcs éoliens, dont le nombre s'élevait, en 2021, à 317. L'industrie continue de croître rapidement avec de nouveaux projets éoliens d'envergure et une multiplication de petits projets en réseaux isolés, tout en maintenant l'apport des parcs éoliens existants.

Toutefois, pour assurer le succès de ces projets, une planification rigoureuse, éclairée et sécuritaire est indispensable. Les acteurs de l'industrie doivent prendre leurs décisions en considérant un climat changeant pouvant affecter la ressource énergétique, et une augmentation significative du besoin en énergie.

Il est donc essentiel d'estimer la ressource éolienne future en tenant compte de l'impact des changements climatiques. Cette évaluation est d'autant plus cruciale dans un contexte de climat froid canadien, où les changements climatiques ont le potentiel d'influer sur la ressource en vent, bien entendu, mais également sur l'occurrence et sur l'intensité des événements de givre, qui sont le premier facteur de perte de production énergétique au pays.

Une étude pancanadienne pour informer l'industrie

Le présent rapport présente les résultats d'une étude portant sur l'impact des changements climatiques sur le potentiel éolien en Amérique du Nord, réalisée conjointement par Nergica, Ouranos et Hydro-Québec. L'impact des changements climatiques a été analysé pour les vents, le givre et la production énergétique en comparant une période future (2031-2060) à une période historique (1981-2010).

Sommaire

La vitesse du vent reste stable au Canada

Les simulations climatiques ne montrent aucun changement significatif pour la période future, ni de la vitesse moyenne du vent ni de la durée annuelle d'opération des éoliennes installées pendant la période historique.

Du changement pour le givre au Canada

Dans certaines régions du nord du Canada, une augmentation de la présence de givre est détectable pour la période future. Cette augmentation est due à des températures en moyenne plus chaudes, passant de «trop froides pour la formation de givre» à «propices à la formation de givre». En contrepartie, avec la hausse des températures, la durée de la saison de givre va raccourcir dans certaines régions près de la mer : autour de la baie d'Hudson, sur la côte Ouest (Colombie-Britannique, nord-ouest des États-Unis) et sur la côte Est (de Terre-Neuve au New Jersey).

Une augmentation de la durée de la présence annuelle de givre pourrait réduire l'accès aux éoliennes pendant l'hiver pour des raisons de sécurité. Au contraire, avec une saison de givre plus courte, la saison de maintenances planifiées pourrait durer plus longtemps.

Quelques précisions sur l'étude

Deux limitations associées à l'étude et à l'interprétation de ses résultats doivent être mentionnées :

- Pour étudier le climat froid, l'effet du givre sur la production a été ajouté, ce qui a nécessité la production de simulations climatiques sur mesure. Le nombre de simulations disponibles pour l'étude était donc limité, ce qui a eu pour effet d'augmenter l'incertitude des analyses et de leurs résultats.
- Toutes les régions en haute altitude sont exclues de l'étude pour des raisons techniques liées à la modélisation. Ces régions masquées pourraient être impactées différemment par les changements climatiques.

Peu de changements pour la production énergétique éolienne canadienne

Aucun changement significatif de la production énergétique éolienne n'est prévu pour la période future. Le seul changement détectable est une légère augmentation des pertes énergétiques dues au givre dans le nord du Canada, aux endroits où la durée de la présence de givre augmente.

Cela suggère que les données de vent et de production obtenues lors de l'opération d'un parc éolien demeurent valides pour les prochaines décennies.

Perspectives finales

De façon générale, le fait de ne détecter aucun changement significatif pour ce qui est des vitesses moyennes de vent et de la production est une très bonne nouvelle pour l'industrie éolienne. Cela confirme que l'éolien demeurera une technologie clé de l'avenir énergétique du Canada pour aider à la réduction des émissions de gaz à effet de serre tout en répondant à la demande énergétique grandissante. Les éoliennes font donc partie de la solution pour pallier la crise climatique si les décideurs et l'industrie travaillent de concert pour les mettre à profit.

Table des matières

Sommaire	IV
Table des matières	VI
1. Introduction	1
2. Définitions et concepts	3
2.1. Changements climatiques	4
2.1.1. Modélisation climatique	4
2.1.2. Incertitudes	5
2.2. Éolien en climat froid	7
2.2.1. La production éolienne	7
2.2.2. Sources et classification du givre	8
3. Approche	9
3.1. Modèles et simulations climatiques	9
3.1.1. Cinquième version du modèle régional canadien du climat (MRCC5)	9
3.1.2. Modèle de givre et de pertes énergétiques opérationnelles	10
3.1.3. Contraintes relatives aux modèles et à l'évaluation des incertitudes	11
3.2. Périodes et régions d'analyse	13
3.3. Indicateurs relatifs à la production énergétique	14
3.4. Signification des résultats	15
4. Résultats : Impacts des changements climatiques sur le potentiel éolien	17
4.1. Changement de vent	18
4.2. Changement de givre	19
4.3. Changement de production énergétique	23
5. Conclusions et perspectives	24
6. Références bibliographiques	26

1. Introduction

Le nouveau rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) estime que les activités humaines ont provoqué un réchauffement de la planète d'environ 1 °C au-dessus des niveaux préindustriels et que ce réchauffement continuera de grimper dans les prochaines décennies. Pour espérer limiter le réchauffement à 1,5 °C, soit la limite fixée par l'accord de Paris, des transitions radicales seront nécessaires dans les domaines de l'énergie, de l'aménagement des terres, de l'urbanisme, des infrastructures, du transport et des bâtiments, et des systèmes industriels. Ces transitions visent à entraîner des réductions considérables des émissions d'ici à 2050 : l'utilisation du charbon doit être réduite de 95 %, et la consommation de pétrole et de gaz de 60 % et 45 % respectivement. L'une des principales pistes proposées par le GIEC pour atteindre ces cibles de réduction réside dans l'exploitation des énergies renouvelables en remplacement des énergies fossiles [1].

En tant que membre du GIEC, le gouvernement du Canada vise une réduction des émissions canadiennes de 40 à 45 % sous les niveaux de 2005 d'ici 2030 et l'atteinte de la carboneutralité d'ici 2050 [2]. Pour accomplir cet objectif et sachant que la demande en électricité du pays est appelée à augmenter de 47 % entre 2021 et 2050 [3], le Canada prévoit investir des centaines de millions de dollars dans le développement de projets d'énergie renouvelable [2].



1. Introduction

La croissance accélérée des énergies renouvelables

Au cœur des solutions à la crise climatique, les énergies renouvelables connaissent une forte croissance. Celle-ci est favorisée par une baisse des coûts de production des énergies solaire et éolienne, qui sont désormais inférieurs à ceux des énergies fossiles. En effet, ces coûts ont diminué de 85 % pour le solaire et de 56 % pour l'éolien entre 2010 et 2020 [3]. On estime que ces technologies combleront autour de 60 % de la demande mondiale en électricité d'ici 2050. Au Canada, l'énergie éolienne est désormais la source de production d'électricité la moins coûteuse [4].

Au Canada, la filière éolienne a connu son essor à compter de 1993, date de l'installation d'une éolienne à Pincher Creek, en Alberta, et d'une autre près de Whitehorse, au Yukon. Au cours des cinq années suivantes, une éolienne a été installée près de Tiverton, en Ontario, et quatre autres au sud de l'Alberta. Depuis la construction du parc de 132 éoliennes près de Matane, au Québec, en 1999, de nombreux parcs éoliens se sont ajoutés, jusqu'à un total de 317 parcs éoliens en service au pays en décembre 2021 [4]. Au cours de la dernière décennie, c'est d'ailleurs la forme de puissance installée la plus importante au pays. L'ensemble de ces parcs est en mesure de produire jusqu'à 14 304 MW, ce qui place le Canada au neuvième rang mondial en ce qui a trait à la capacité de production éolienne.

Cette grande capacité de production au Canada vient tout de même avec son lot de défis. Pour l'ensemble du pays, le givre cause des pertes de production engendrant des pertes financières annuelles qui se chiffrent autour des 113 M\$ [5]. Il s'agit d'une source d'inquiétude pour les opérateurs de réseaux électriques, qui peuvent subir des chutes de production significatives lors de gros événements de givre. Au niveau de l'opération des parcs, la présence de givre complique la maintenance des éoliennes et la possibilité d'interventions humaines, ce qui peut engendrer des pertes financières additionnelles.

La ressource éolienne des prochaines décennies

Malgré les enjeux de climat froid, la filière éolienne canadienne est bien implantée, est de plus en plus rentable et est appelée à continuer de se développer dans les prochaines décennies pour répondre aux besoins énergétiques croissants du pays.

Tout de même, pour prendre des décisions éclairées sur le développement de la filière, l'ensemble des acteurs de l'industrie doit savoir à quoi la ressource éolienne des prochaines décennies ressemblera. Bien que l'énergie éolienne soit appelée à être de plus en plus utilisée au Canada pour réduire les impacts des changements climatiques, cette technologie est elle-même à risque d'être affectée par les changements climatiques. Des changements en matière de température, de vent et de précipitations, entre autres, auront un impact sur la formation de givre, sur l'efficacité de production et sur l'entretien des éoliennes. Il est donc essentiel de considérer l'impact des changements climatiques sur le potentiel énergétique des parcs éoliens pour assurer de façon efficace leur intégration au portefeuille énergétique canadien.

Pour ce faire, une analyse des changements en matière de vent, de givre et de production énergétique a été réalisée pour l'ensemble de l'Amérique du Nord dans la période couvrant les années 2030-2060. Cette analyse permet de voir l'impact que les changements climatiques auront sur les éoliennes et leur production.

Les résultats de cette étude devraient ainsi permettre de faire avancer les connaissances de la ressource éolienne dans les prochaines décennies au Canada et en Amérique du Nord.

2. Définitions et concepts

Cette section présente plusieurs concepts de base essentiels à la compréhension de l'analyse présentée dans cette étude. Les changements climatiques, leur interprétation et les limites de celle-ci sont détaillés à la section 2.1. Les particularités de l'exploitation des éoliennes en climat froid sont présentées à la section 2.2.

2. Définitions et concepts

2.1. Changements climatiques

2.1.1. Modélisation climatique

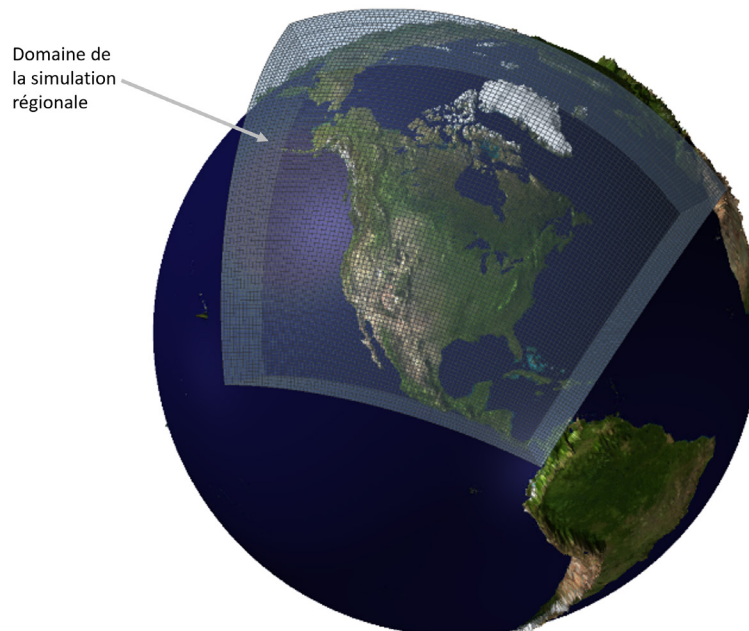
Le climat est la distribution statistique à long terme des conditions météorologiques dans une région, telle que mesurée entre autres par la moyenne et la variabilité. Bien que plusieurs effets puissent provoquer des variations du climat, l'activité humaine est responsable du changement du climat le plus rapide des derniers millénaires [1]. Les changements climatiques anthropiques (c'est-à-dire découlant de l'activité humaine) touchent assurément toutes les composantes du système climatique. Si certains changements prévus depuis des années sont maintenant bien mesurables (p. ex. l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe et le rehaussement marin), d'autres sont plus difficilement quantifiables en raison de leur grande variabilité ou encore parce qu'ils découlent de l'influence de plusieurs phénomènes plus complexes. Il est ainsi difficile d'anticiper l'évolution de certaines variables particulièrement importantes pour la production éolienne en climat froid, soit le vent et le givre. Seule la modélisation numérique climatique permet de le faire en tenant compte de l'ensemble des composantes du système climatique.

La modélisation climatique consiste à représenter les composantes du système climatique (atmosphère, hydrosphère, cryosphère, biosphère) par des équations mathématiques qui sont résolues numériquement afin de simuler l'évolution spatiale et temporelle du système. Les modèles utilisés permettent l'étude des facteurs susceptibles d'influer sur le comportement du climat sur de longues périodes pouvant aller à plusieurs centaines d'années.

Les modèles climatiques globaux résolvent les équations sur des points de grille qui découpent toute la surface du globe, y compris l'atmosphère, et ce, sur plusieurs niveaux d'altitude, tandis que les modèles climatiques régionaux limitent les domaines simulés à une région choisie, ce qui permet de diminuer la dimension des points de grille (et donc d'augmenter la résolution). Les modèles régionaux sont alimentés au pourtour de leur domaine (c'est-à-dire « pilotés ») par des données provenant de modèles climatiques globaux afin qu'ils demeurent connectés à ce qui se passe sur le reste du globe (Figure 1).

Figure 1

Domaine nord-américain
du modèle régional
(Image : Ouranos)



2. Définitions et concepts

2.1.2. Incertitudes

Trois principales sources d'incertitude sont associées aux simulations climatiques : les futures émissions de gaz à effet de serre, les modèles climatiques en tant que tels, et la variabilité du climat lui-même. Les contributions respectives des diverses sources à la marge totale d'incertitude peuvent différer selon les variables climatiques étudiées et évoluer au fil du temps. Ces trois principales sources sont détaillées dans les paragraphes qui suivent, puis résumées au Tableau 1.

Incertitude n° 1 : Les trajectoires socioéconomiques de l'évolution de l'humanité (type d'énergie utilisée, démographie, technologie, etc.) influencent directement les futures émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols (fines particules) ainsi que l'utilisation des sols, et perturbent le bilan radiatif terrestre. Les trajectoires représentatives des différents futurs possibles s'appellent des *Representative Concentration Pathways* (RCP). Plusieurs trajectoires standards existent, mais les deux trajectoires les plus communément utilisées sont :

RCP8.5 : trajectoire dite de base, à émissions de gaz à effet de serre élevées ;

RCP4.5 : trajectoire tenant compte d'importantes mesures d'atténuation et d'une augmentation modérée des émissions de gaz à effet de serre.

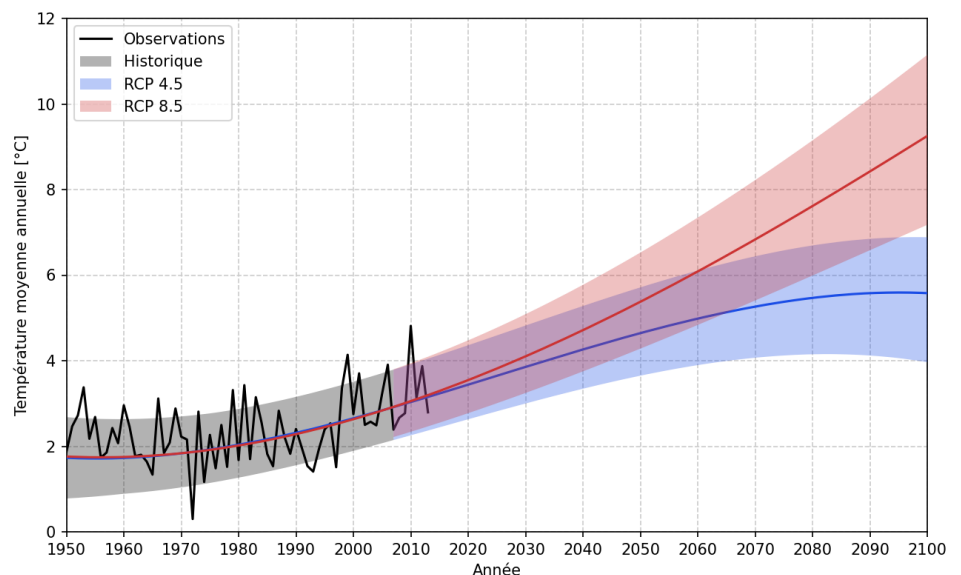
Il est typique de s'attendre à ce que les changements futurs se situent dans l'éventail entre ces deux RCP [7].

La manifestation la plus perceptible de la hausse de la concentration des gaz à effet de serre est l'augmentation des températures. Lorsque l'on s'intéresse au futur proche jusqu'en 2050, le choix de la trajectoire de concentration influe peu sur l'amplitude du réchauffement. Comme l'illustre la Figure 2, il y a peu de différence entre les températures simulées provenant de l'une ou l'autre des trajectoires jusqu'au milieu du siècle. Toutefois, les différences dans la réponse du climat aux différentes trajectoires RCP s'accroissent avec le temps, comme le montrent les plages de température rouge et bleue de la Figure 2, qui s'éloignent l'une de l'autre à la fin du siècle. Il est à noter que l'effet de la trajectoire de concentration sur d'autres variables climatiques (par exemple le vent, les précipitations, etc.) peut différer de son effet sur la température.

Figure 2

Moyenne des températures de surface quotidiennes en Gaspésie. Tracés des RCP : médianes; enveloppes : 10^e et 90^e centiles

Données provenant du site Portraits climatiques, d'Ouranos [8].



2. Définitions et concepts

Incertitude n° 2 : Les bonnes pratiques dans l'étude des changements climatiques recommandent l'utilisation du plus grand nombre de simulations produites avec le plus grand nombre de modèles. Ces modèles sont développés par divers centres de modélisation climatique et, même si la base physique est la même, ils diffèrent notamment dans les représentations des phénomènes à petite échelle spatiale et temporelle et par certains paramètres des équations modélisées. Pour avoir confiance dans un résultat de changement climatique, il faut que le plus grand nombre de simulations provenant de différents modèles concordent sur la nature du changement.

Incertitude n° 3 : La dernière source notable d'incertitude est la variabilité naturelle du climat. Celle-ci est liée à la nature chaotique du système climatique et est responsable de certaines fluctuations saisonnières, interannuelles et même décennales du climat. Contrairement aux sources évoquées précédemment, les progrès scientifiques ne pourront jamais contribuer à réduire l'incertitude liée à la variabilité naturelle, car elle est intrinsèque au système climatique.

Afin de circonscrire les incertitudes, les bonnes pratiques recommandent l'utilisation de plusieurs modèles et de différentes trajectoires RCP, et la prise en compte de la variabilité naturelle du climat (voir Tableau 1) [9]. En pratique, la prise en compte adéquate des incertitudes se trouve confrontée à la disponibilité parfois restreinte des données et à la capacité de traitement de celles-ci.

Tableau 1

Sources d'incertitude liées aux simulations climatiques

Source	Solution optimale	Cas de l'étude*	Contrainte de l'étude
1. Trajectoire socioéconomique pour les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols	Inclure quatre différentes trajectoires	Les deux trajectoires les plus fréquemment utilisées	Aucune ; c'est le minimum accepté
2. Modèles et simulations	Avoir le plus grand nombre de simulations produites par une variété de modèles climatiques	Un modèle régional avec seulement deux pilotes	Importante ; évaluation très rudimentaire et limitée de cette source d'incertitude
3. Variabilité naturelle du climat	Simuler une longue période	Simulations sur 150 ans et analyses sur des fenêtres de 30 ans	Aucune, période adéquate pour les moyennes climatiques et la variabilité interannuelle

*Voir la section 3 pour les détails.

2. Définitions et concepts

2.2. Éolien en climat froid

En 2021, plus de 6 % de l'électricité produite par les fournisseurs d'électricité du Canada provenait des éoliennes [10]. En hiver, le potentiel éolien est plus fort en raison des vents importants et des basses températures. En effet, lorsque les températures sont basses, la densité de l'air augmente, ce qui améliore la production éolienne pour certaines vitesses de vent. Les caractéristiques du vent en hiver sont donc idéales pour la production éolienne. Cependant, le climat froid caractéristique du Canada expose les éoliennes à des conditions particulièrement rigoureuses : températures froides extrêmes (en dessous de -30 °C) et présence de givre atmosphérique. Bien que les manufacturiers soient aujourd'hui aptes à proposer des solutions aux contraintes induites par les températures extrêmes, l'accumulation de givre sur les éoliennes demeure un défi d'exploitation. C'est pourquoi l'accumulation de givre doit être considérée dans l'évaluation du potentiel éolien.

2.2.1. La production éolienne

La production énergétique annuelle (AEP – *Annual Energy Production*) d'une éolienne est l'un des plus importants indicateurs pour un opérateur de parc éolien. L'AEP se calcule en sommant toute l'énergie éolienne produite au cours d'une année. Cette mesure permet donc de caractériser la performance d'un parc, car elle représente les revenus associés à la vente d'électricité pour l'opérateur. L'AEP permet de considérer l'impact des pertes énergétiques et non seulement la production théorique issue des vents.

Le givre est l'une des sources de pertes les plus communes pour des éoliennes installées en climat froid. Lors d'un épisode de givre, la présence de glace sur les pales d'une éolienne en diminue l'efficacité aérodynamique et peut engendrer davantage de vibrations. Ces vibrations menacent la durée de vie de l'éolienne et entraînent parfois son arrêt total pour des questions de sécurité (p. ex. si les vibrations excèdent les limites de conception). La perte de production énergétique causée par une diminution de l'efficacité ou par un arrêt total engendre la perte directe de revenus pour l'opérateur du parc.

L'éolien en climat froid : du positif et du négatif

- Positif : à vitesse de vent égale, les basses températures augmentent la densité de l'air et, par conséquent, la quantité d'énergie produite.
- Négatif : les basses températures et le givre atmosphérique posent un danger pour les composantes des éoliennes et pour les interventions humaines.

2. Définitions et concepts

2.2.2. Sources et classification du givre

Dans le cadre de cette étude, le givre correspond aux accumulations totales provenant de deux sources distinctes :

Les précipitations givrantes : la pluie verglaçante s'accumule en une fine couche de givre transparent, tandis que la neige collante forme une couche de givre blanc plus épaisse et rugueuse.

Les nuages givrants : les gouttelettes d'eau surfondues dans un nuage gèlent instantanément en une couche de givre blanc lorsqu'elles entrent en contact avec une structure.

Les événements de givre en contexte éolien peuvent être séparés en trois principales phases (Figure 3) :

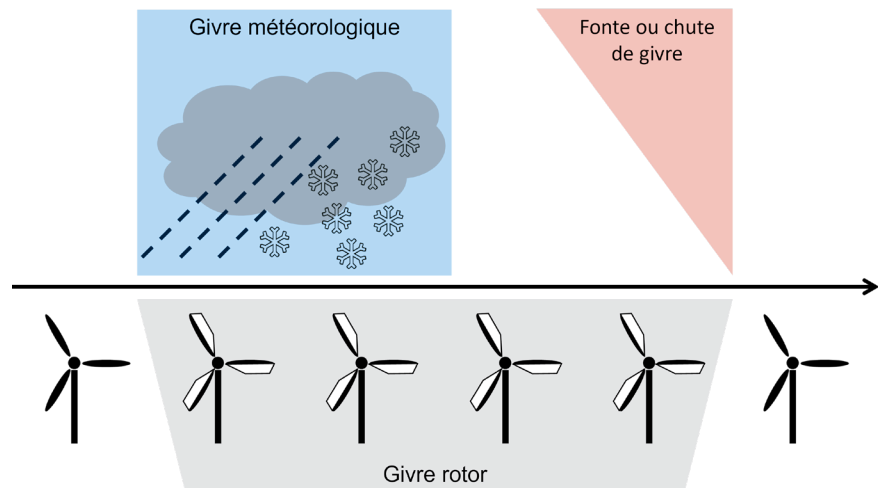
Le givre météorologique : les conditions atmosphériques sont favorables à l'accumulation de givre sur une pale d'éolienne.

La fonte ou chute du givre : le givre fond ou chute de la pale de l'éolienne.

Le givre rotor¹ : le givre est présent sur les pales de l'éolienne et en perturbe le fonctionnement normal. Cette phase englobe les deux autres.

Figure 3

Définition de périodes de givre météorologique et de givre rotor



L'accumulation de givre affecte directement le fonctionnement des pales en réduisant leur efficacité aérodynamique et en augmentant leur vibration. La modélisation de l'accumulation du givre sur le rotor permet d'évaluer la perte de production due au givre.

Un événement de givre est caractérisé selon trois paramètres :

Le début : un événement de givre commence dès qu'il y a présence détectable de givre sur le rotor. Il s'agit du début du givre rotor et du givre météorologique.

La fin : un événement de givre se termine lorsqu'il n'y a plus de givre sur le rotor (à la fin de la fonte ou lorsque le givre chute). C'est la fin du givre rotor.

La durée : la durée entre le début et la fin de l'événement est définie en nombre d'heures ou de jours.

1. Le rotor de l'éolienne comprend le moyeu et les trois pales.

3. Approche

Cette section détaille l'approche adoptée pour la réalisation de l'étude. Les modèles climatiques, les périodes considérées et les régions analysées sont présentés aux sections 3.1 et 3.2. Les indicateurs relatifs à la production éolienne sont explicités à la section 3.3. Finalement, la section 3.4 décrit l'analyse de signification applicable à l'ensemble des analyses.

3.1. Modèles et simulations climatiques

L'évaluation de l'impact des changements climatiques sur la production d'énergie éolienne nécessite que l'on s'intéresse aux changements de la ressource en vent et aux changements des événements de givre. Pour ce faire, l'approche adoptée repose sur l'utilisation conjointe de deux modèles, soit un pour la simulation du climat et l'autre pour la modélisation du givre et de la production énergétique.

3.1.1. Cinquième version du modèle régional canadien du climat (MRCC5)

Pour l'étude, quatre simulations climatiques du modèle régional canadien du climat (MRCC5) [11], [12] version 5 (CRCM5, conformes au protocole NA-CORDEX², ont été produites sur un domaine couvrant l'Amérique du Nord à 0,22° de résolution et utilisant 56 niveaux verticaux. Les données ont été archivées toutes les trois heures, et les variables en altitude sont disponibles pour 27 niveaux de pression. Pour produire ces simulations, le MRCC5 a été piloté par deux modèles globaux, soit le CNRM-CM5 et le GFDL-ESM2M [13], [14].

Pour chaque pilote, les concentrations de gaz à effet de serre utilisées suivent les observations historiques et deux trajectoires RCP futures (Tableau 2). Les variables atmosphériques nécessaires à la modélisation du givre, des pertes énergétiques et de la production énergétique éolienne ont été archivées, certaines spécifiquement pour les besoins de l'étude (voir aussi la section 3.1.2).

Tableau 2

Simulations utilisées

Modèle régional du climat	Modèle global (pilote)	Période	Gaz à effet de serre et aérosols
MRCC5	CNRM-CM5	1950-2005	observés
		2006-2100	RCP4.5 RCP8.5
	GFDL-ESM2M	1950-2005	observés
		2006-2100	RCP4.5 RCP8.5

2. <https://na-cordex.org/>

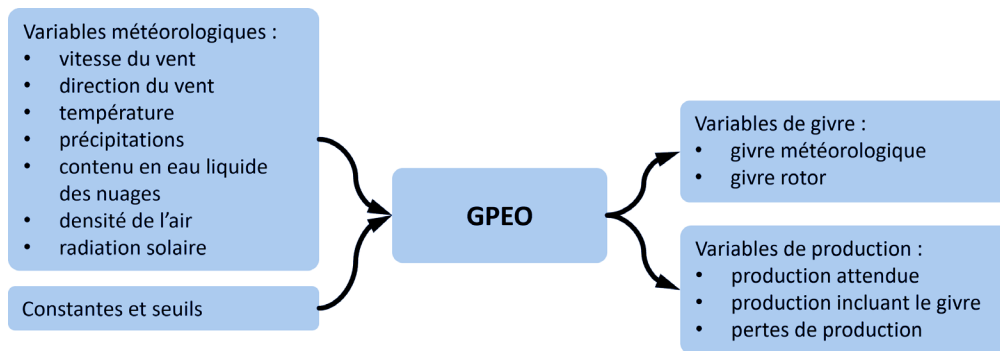
3. Approche

3.1.2. Modèle de givre et de pertes énergétiques opérationnelles

Le modèle de givre et de pertes énergétiques opérationnelles (GPEO) modélise le givre météorologique, le givre rotor, la fonte et la chute de givre, les pertes que l'accumulation de givre engendre et la production finale d'une éolienne en fonction du vent et des pertes attribuables au givre (Figure 4). Pour ce faire, il requiert comme intrants plusieurs variables provenant de modèles météorologiques ou climatiques : le vent, la température, les précipitations de différents types, dont la neige et le verglas, le contenu en eau liquide des nuages, la densité de l'air et la radiation solaire.

Figure 4

Schéma des entrées et sorties du modèle GPEO



Les simulations GPEO se font en deux temps. La production énergétique de l'éolienne est d'abord modélisée à partir de l'hypothèse selon laquelle il n'y a aucun givre (production attendue). Puis, l'effet du givre est considéré, ce qui permet de calculer des pertes de production. On obtient la production réelle en soustrayant les pertes attribuables au givre de la production attendue. Des parcs éoliens de 100 MW constitués d'éoliennes GE de 1,5 MW sont modélisés. Ces éoliennes n'ont pas de système de protection contre le givre, ce qui permet de modéliser l'effet direct du givre sur la production énergétique.

Certains intrants spécifiques de GPEO nécessaires à la modélisation du givre, notamment le verglas et le contenu en eau liquide des nuages, ne font pas partie des données disponibles issues des projets internationaux de modélisation climatique ou des simulations standards produites par Ouranos. Ces variables non standards ont été archivées dans les quatre simulations du MRCC5 produites spécifiquement pour l'étude.

Deux faits doivent être signalés à propos du recours à ces variables non standards pour l'étude :

1. Elles sont nécessaires pour la particularité de l'étude et lui confèrent un aspect innovant et unique : la modélisation du givre et des pertes énergétiques.
2. Puisqu'elles ne sont pas archivées dans la grande majorité des simulations NA-CORDEX (voir section 3.1.1), il n'y a pas un nombre suffisant de modèles et de simulations utilisables pour caractériser l'incertitude des changements évalués dans l'étude pour ces variables (voir le Tableau 1).

- **MRCC5 :** Modèle régional canadien du climat utilisé pour produire les simulations sur le domaine de l'Amérique du Nord.
- **CNRM-CM5 et GFDL-ESM2M :** Modèles climatiques globaux servant de pilotes aux simulations du MRCC5.
- **GPEO :** Modèle de givre et pertes énergétiques utilisé avec les données du MRCC5 pour simuler l'effet du givre sur le potentiel éolien.

3. Approche

3.1.3. Contraintes relatives aux modèles et à l'évaluation des incertitudes

Les sources d'incertitude liées aux simulations climatiques et les conditions idéales pour les pallier ont été présentées au Tableau 1, à la section 2.1.2. Or, ces conditions idéales ne sont pas toutes réunies dans le cadre de l'étude. Cette section présente les contraintes rencontrées et propose des compromis raisonnables tirant le meilleur profit des données et des modèles disponibles. Les contraintes présentées doivent être considérées dans l'interprétation des résultats de l'étude.

Contrainte n° 1 : Nombre insuffisant de modèles climatiques et de simulations

L'une des contraintes de l'étude réside dans le fait que le nombre de simulations et de modèles utilisés est restreint (voir le Tableau 1). Le petit ensemble de quatre simulations issues du seul modèle régional de climat utilisé est en effet insuffisant pour une quantification optimale des incertitudes liées aux simulations climatiques. Ce petit nombre découle des besoins non standards pour la modélisation du givre avec GPEO, notamment en ce qui concerne le verglas et le contenu en eau liquide des nuages, qui ne sont pas disponibles dans les projets internationaux de modélisation climatique. Ainsi, dans le contexte de cette étude, la diversité des modèles climatiques utilisables comporte des lacunes.

Contrainte n° 2 : Hauteur de modélisation en niveau de pression

Le fait de ne pas disposer de données recueillies à des hauteurs correspondant à celles des éoliennes pose une deuxième contrainte. Idéalement, la modélisation se ferait à une hauteur constante au-dessus du sol, entre 80 m et 150 m pour des éoliennes. Cependant, les modèles climatiques simulent les variables pour différents niveaux de pression, un repère standard en climatologie. Un niveau de pression correspond à une pression constante, donc à une altitude qui varie au fil du temps et dans l'espace. Pour obtenir une donnée représentative d'une hauteur précise au-dessus du sol, une interpolation doit être faite entre les niveaux de pression à chaque pas de temps et à chaque point de grille. Cela nécessite un volume d'espace disque de stockage inaccessible dans le cadre de l'étude. Conséquemment, un seul niveau de pression a été sélectionné et les résultats ne sont pas modélisés à une hauteur constante au-dessus du sol.

Des tests de sensibilité ont été menés pour garantir que les résultats ne dépendent pas du niveau de pression sélectionné et qu'ils s'appliquent bien pour la portion de l'atmosphère où se trouvent les éoliennes. Ces tests ont permis de conclure que la différence entre les moyennes climatiques de la période future et de la période historique est sensiblement la même à chaque niveau de pression de la couche limite (voir la section 3.2 pour la description de la période future et de la période historique). Ainsi, pour l'étude, les analyses se basent sur un niveau de pression de 950 hPa, qui se situe au-dessus de la topographie sur la majorité du domaine sans toutefois trop s'éloigner de la hauteur des éoliennes. L'altitude associée à cette pression fluctue, bien qu'elle soit en moyenne à 330 m au-dessus du niveau de la mer.

Un niveau de pression de 950 hPa ne peut être utilisé dans des zones de relief élevé (les Rocheuses, par exemple), car la pression au sol y est inférieure. Pour l'analyse, un masque a été appliqué pour que les points de grille sous la topographie soient exclus :

- Pression évaluée sur une base temporelle : les données d'un pas de temps avec une pression atmosphérique inférieure à 950 hPa sont exclues pour ce pas de temps.
- Pression évaluée sur une base climatologique : chaque point de grille pour lequel plus de 20 % des données sont exclues est complètement exclu (les zones grises de la Figure 5).

3. Approche

Contrainte n° 3 : Modélisation du givre et de la production énergétique

La troisième contrainte découle de la nature de la modélisation du givre et de la production énergétique. L'idéal aurait été de disposer de plusieurs modèles de givre et de production énergétique. Cependant, GPEO était le seul modèle disponible qui incluait une modélisation du givre et de la production énergétique à partir de variables météorologiques. Pour pallier cette contrainte, GPEO a été validé pour l'est du Québec en utilisant des données de givre et de pertes énergétiques disponibles dans le cadre de l'étude.

Contrainte n° 4 : Biais

Il n'a pas été possible d'évaluer et de corriger au besoin les biais associés à toutes les variables étudiées (vent, précipitations, givre, pertes énergétiques). Certaines variables, telles que la température et le vent, auraient pu être corrigées à partir des observations disponibles. Cependant, pour d'autres variables, comme les précipitations ou le givre, aucune donnée d'observation ne permettait de le faire. Pour que la cohérence physique entre les variables du modèle soit respectée, il faut corriger tous les biais ou n'en corriger aucun.

Par conséquent, seuls les changements entre des périodes peuvent être présentés. La valeur absolue d'un résultat n'est pas présentée dans l'étude, car elle pourrait contenir un biais. Des tests de validation ont confirmé que les biais s'annulent lorsque l'on compare deux périodes.

3. Approche

3.2. Périodes et régions d'analyse

Deux périodes climatiques de 30 ans ont été sélectionnées pour l'analyse en fonction de leur pertinence pour l'industrie éolienne (Tableau 3). La période historique a été choisie pour représenter le climat typique dans lequel les parcs éoliens des dernières décennies ont opéré. La période future a été choisie pour représenter le climat lors de possibles initiatives telles que le développement de nouveaux projets éoliens, le rééquipement de parcs existants ou la prolongation de leur durée de vie.

Tableau 3

Périodes climatiques de 30 ans analysées

Nom	Années	Description	Simulations
Période historique	1981–2010	Période de référence pour les changements futurs	2 (2 pilotes)
Période future	2031–2060	Période potentielle de nouveaux projets, rééquipement ou prolongation	4 (2 pilotes, 2 RCP)

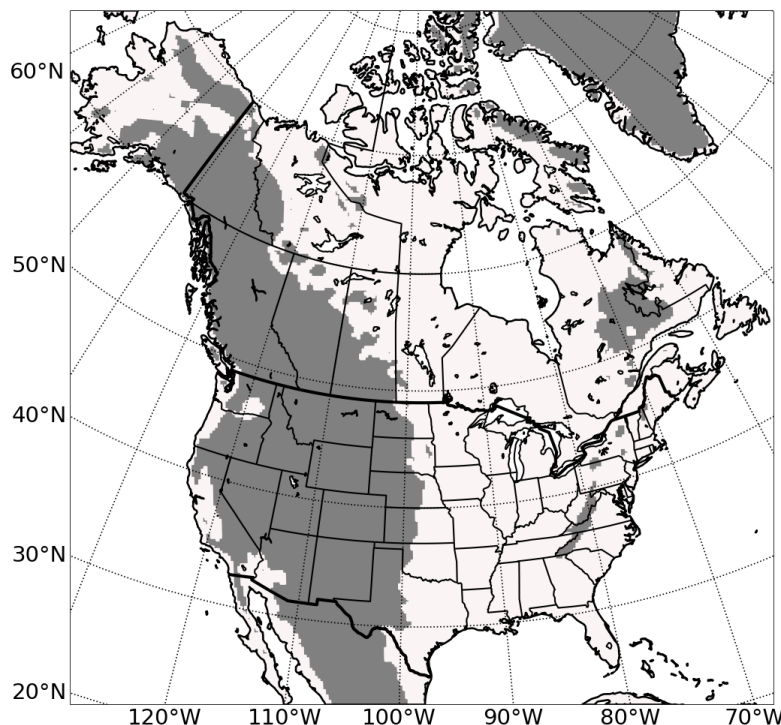
L'étude porte strictement sur les différences entre la période future et la période historique (voir contrainte n° 4, section 3.1.3). Autrement dit, on s'intéresse au changement climatique, et non à la moyenne climatique. Par exemple, ce ne sont pas les vitesses moyennes du vent sur une des périodes climatiques qui y sont analysées et interprétées, mais bien la différence entre les vitesses du vent de la période future et celles de la période historique. Il en va de même pour le givre et la production énergétique.

Les analyses ont été effectuées à l'échelle du domaine de l'Amérique du Nord (Figure 5), ce qui permet d'obtenir une vue continentale des changements projetés en matière de vents productibles, de givre et de production éolienne.

3. Approche

Figure 5

Domaine Amérique du Nord.
Les points exclus de l'analyse
(plus de 20 % de données sous
le niveau de pression à 950 hPa)
sont en gris



3.3. Indicateurs relatifs à la production énergétique

Trois principales variables qui permettent d'obtenir une vue d'ensemble de l'impact des changements climatiques sur le potentiel éolien sont considérées dans l'étude :

Le vent productible : le vent productible correspond à la plage de vitesses du vent pour laquelle une éolienne produit de l'énergie. Les éoliennes typiques commencent à opérer autour de 3 m/s (11 km/h) et s'arrêtent à 25 m/s (90 km/h). La durée de vent productible annuelle représente le nombre d'heures pendant lesquelles l'éolienne peut produire de l'électricité.

Le givre : le givre correspond à la présence de givre sur le rotor de l'éolienne. En général, plus il y a de givre sur le rotor, plus les pertes de production sont importantes. La durée de présence de givre pendant une année correspond au nombre d'heures ou de jours pendant lesquelles l'éolienne subit une perte de production. La saison de givre s'étend du début du premier événement après le 1^{er} août jusqu'à la fin du dernier événement avant le 31 juillet.

3. Approche

La production énergétique : la production énergétique est modélisée³ pour des parcs théoriques de 100 MW avec les caractéristiques d'éoliennes de type General Electric (GE) de 1,5 MW. La puissance installée de 100 MW permet de représenter un parc éolien typique de la période historique. Les turbines GE ont été choisies et utilisées comme référence parce qu'elles ne sont dotées d'aucune technologie d'adaptation aux conditions givrantes, par exemple des systèmes de dégivrage. Autrement dit, leur production sera directement affectée par l'accumulation de givre. L'impact du givre sur la production énergétique d'éoliennes peut être évalué plus simplement et plus directement avec ces turbines. La production énergétique est quantifiée avec l'AEP (voir section 2.2.1) et les pertes annuelles de production, typiquement exprimées en pourcentage de la production annuelle.

- **Le vent productible :** vent entre 3 m/s et 25 m/s, qui permet la production d'énergie.
- **Le givre rotor :** givre accumulé sur le rotor d'une éolienne.
- **La production énergétique :** production d'électricité d'un parc éolien de 100 MW composé d'éoliennes GE de 1,5 MW, incluant pertes dues au givre.

3.4. Signification des résultats

L'analyse de signification des résultats est une étape essentielle d'une analyse de changement, car elle permet d'établir une confiance dans les résultats obtenus : elle permet de confirmer que les résultats interprétés sont fiables statistiquement et représentent un réel changement. Tout résultat non significatif doit être exclu des figures, des tableaux et surtout de l'interprétation.

Dans cette étude, le but est d'évaluer si le changement entre la période historique et la période future est significatif. Pour qu'il soit considéré comme significatif, trois tests sont appliqués et doivent être réussis :

- au moins 75 % des résultats ont le même signe de changement ;
- la valeur absolue du rapport signal-bruit est supérieure à 1 ;
- au moins 75 % des résultats passent le test *t* de Welch à un niveau de confiance de 95 %.

Ces trois tests sont détaillés à la page suivante.

3. Approche

Signe du changement : Ce test consiste à vérifier si les simulations climatiques concordent en ce qui concerne le signe du changement, c'est-à-dire si la différence entre la période historique et la période future est positive ou négative. Le test est défini en fonction des moyennes globales des changements pour les quatre simulations. Il y a donc un total d'une donnée par simulation.

Pour que ce test soit réussi, il faut que le signe du changement soit le même pour au moins trois des simulations.

Rapport signal-bruit : Le test du rapport signal-bruit (RSB) vise à vérifier si les simulations concordent en ce qui a trait à la valeur numérique du changement ou si elles sont trop dispersées. Le RSB est défini en fonction des moyennes des changements modélisés dans le cadre des quatre simulations. Il y a donc un total d'une donnée par simulation.

Pour que ce test soit réussi, la valeur absolue du RSB doit être strictement supérieure à 1.

Test t de Welch : Le test t de Welch consiste à vérifier si la période future a une distribution annuelle statistiquement différente de celle de la période historique. Le test t est défini en fonction des moyennes annuelles des changements modélisés dans le cadre des quatre simulations. Il y a donc un total de 30 données par simulation. Une distribution non normale des données a été prise en compte⁵.

Pour que ce test soit réussi, il faut que son résultat (la valeur « p ») soit inférieur à 0,05 pour au moins trois des simulations⁶.

Interprétation de l'analyse de signification : Pour qu'il soit possible d'affirmer que la différence entre les périodes pour une variable est statistiquement significative, les trois tests doivent être réussis. Pour qu'on puisse affirmer que les simulations suggèrent un changement climatique, il faut que les résultats de changement soient statistiquement significatifs.

L'analyse de signification permet de confirmer que les résultats représentent un réel changement entre les deux périodes analysées. Tout résultat non significatif doit être exclu des figures, des tableaux et de l'interprétation.

5. Utilisation des rangs des données au lieu des données elles-mêmes.

6. Avec une limite de 0,05, seuls 5 % des résultats seraient faussement identifiés comme étant statistiquement différents, ce qui constitue un risque d'erreur acceptable dans le contexte.

4. Résultats : Impacts des changements climatiques sur le potentiel éolien

Cette section présente les changements entre la période future et la période historique pour la vitesse du vent, le givre et la production d'énergie éolienne. Les figures présentent les changements des quatre simulations moyennées. Tout changement non significatif est masqué en gris pâle (voir section 3.4) et tout point sous la topographie est masqué en gris foncé (voir section 3.2).



4. Résultats : Impacts des changements climatiques sur le potentiel éolien

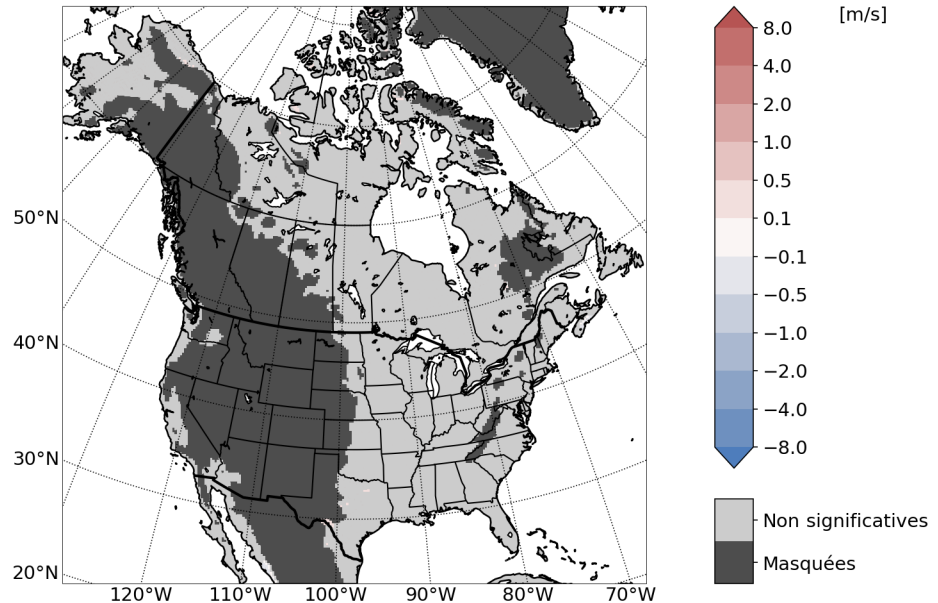
4.1. Changement de vent

Cette section présente les résultats de changement en ce qui concerne la vitesse moyenne du vent et la durée de vent productible.

Les quatre simulations ne suggèrent aucun changement significatif de la vitesse du vent (Figure 6). Les résultats sont similaires pour chaque mois : ni la moyenne annuelle ni les moyennes mensuelles ne changent. Ces résultats sont conformes à ceux d'autres études scientifiques, qui ne détectent pas d'impact significatif des changements climatiques sur les régimes de vent en Amérique du Nord [15], [16].

Figure 6

Changement de la vitesse moyenne annuelle du vent

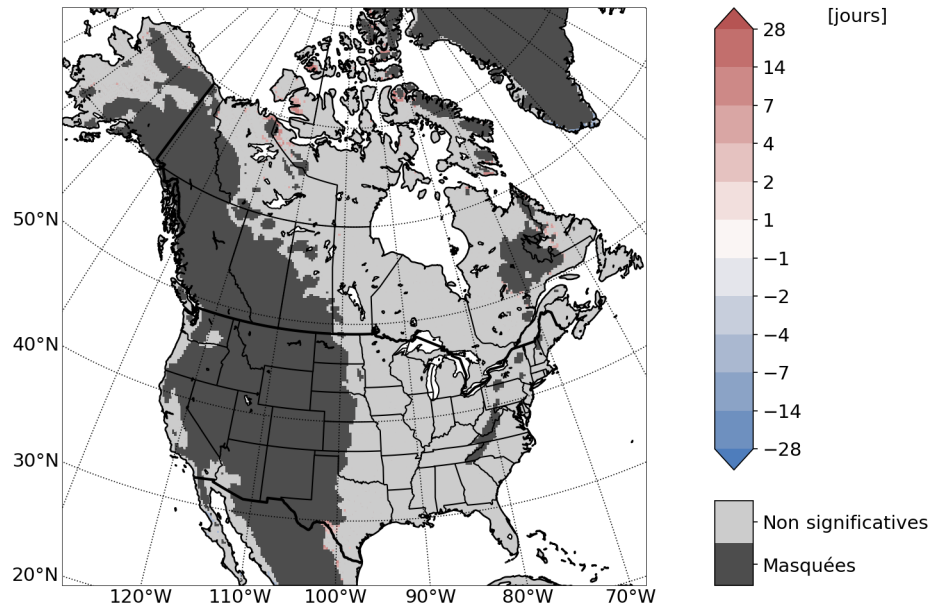


Les résultats suggèrent que la durée annuelle de vent productible n'est pas appelée à changer non plus (Figure 7). Quelques endroits, notamment le Nunavut, le Labrador et le Mexique, enregistrent une augmentation de la durée de vent productible de 14 à 28 jours. Il n'est pas clairement établi pour quelles raisons ces quelques points feraient face à des changements aussi importants alors qu'il n'y a aucun changement significatif attendu ailleurs en Amérique du Nord.

4. Résultats : Impacts des changements climatiques sur le potentiel éolien

Figure 7

Changement de la durée de vent productible



4.2. Changement de givre

Cette section présente les résultats de changement en matière de givre rotor relativement à la durée annuelle et à la longueur de la saison.

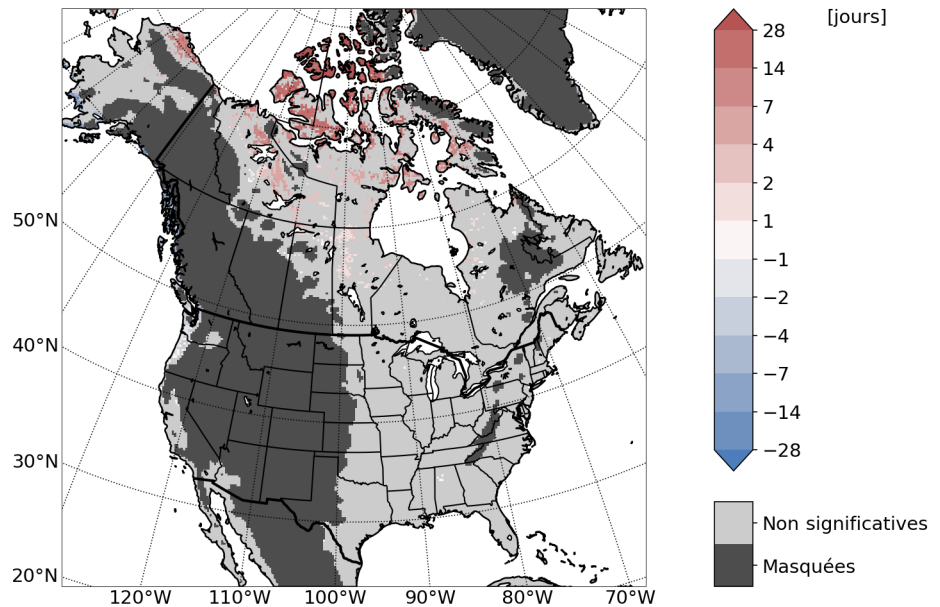
Les quatre simulations suggèrent une augmentation de la durée de la présence de givre rotor dans quelques zones très localisées du nord du Canada (Figure 8). Cette augmentation est supérieure à 28 jours par année. L'augmentation de la durée de la présence de givre rotor s'explique par les changements des températures nordiques : normalement, le givre se forme à des températures se situant entre -15 °C et 0 °C. Avec la hausse des températures dans le Nord, les conditions atmosphériques passeront plus souvent de «trop froides pour la formation de givre» à «propices à la formation de givre». Dans le modèle GPEO, un seuil de -15 °C délimite la condition de formation de givre.

Parallèlement, les simulations suggèrent une diminution de la durée du givre sur la côte ouest de l'Amérique du Nord. Cela est attribuable à la diminution significative des précipitations givrantes, l'une des deux principales causes de formation et d'accrétion du givre dans le modèle GPEO.

4. Résultats : Impacts des changements climatiques sur le potentiel éolien

Figure 8

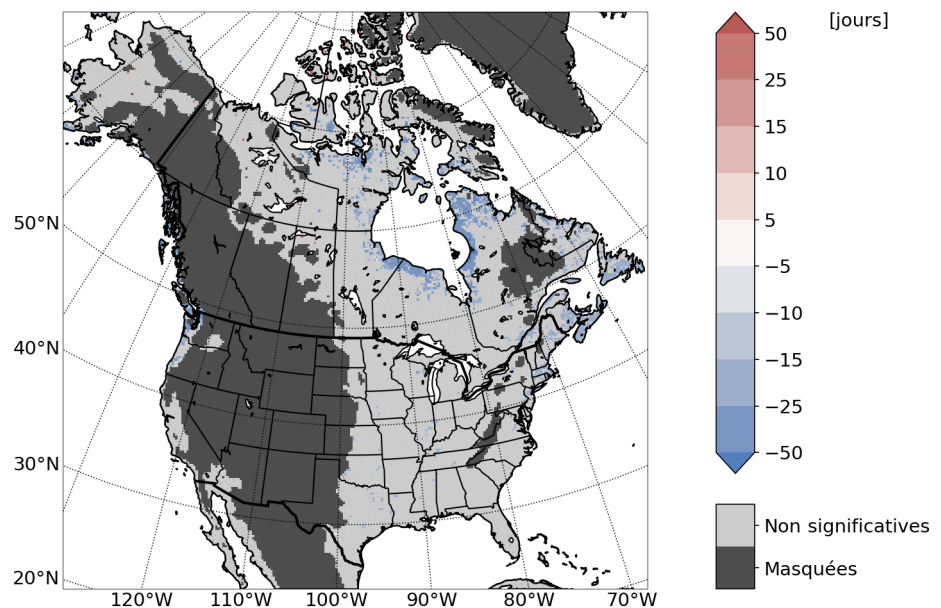
Changement de la durée annuelle de présence de givre rotor



Selon les quatre simulations, la saison de givre rotor, quant à elle, raccourcira à certains endroits près des océans Atlantique et Pacifique (Figure 9). Pour la majorité des points avec changement significatif, la diminution prévue est de 15 à 50 jours. Le début de la saison explique la majeure partie de la variation : la saison commencera plus tard, mais se terminera autour du même moment que lors de la période historique.

Figure 9

Changement de la durée de la saison de givre rotor



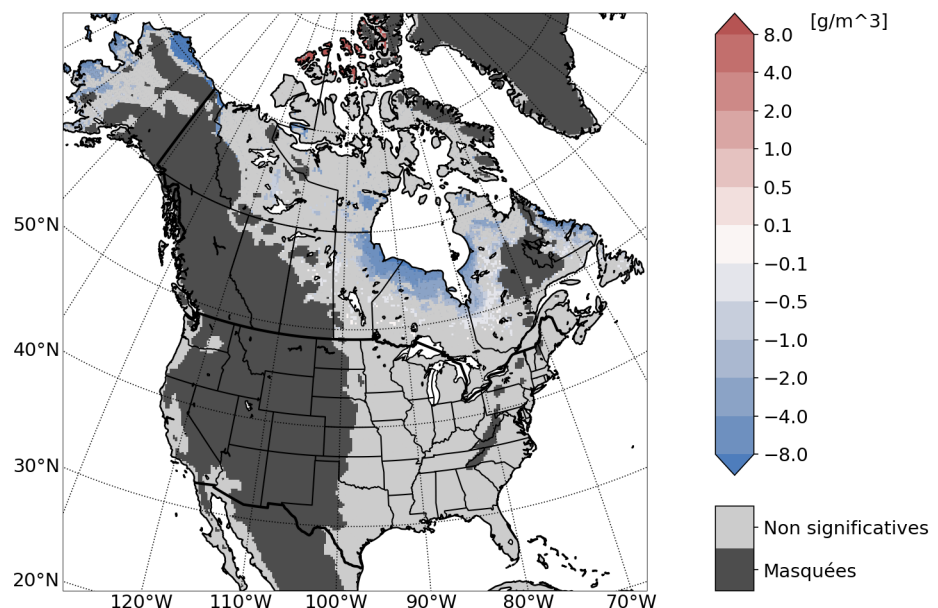
4. Résultats : Impacts des changements climatiques sur le potentiel éolien

Le patron de changement de la saison de givre est différent de celui de la durée annuelle de givre (Figure 8). Par exemple, autour du golfe du Saint-Laurent, il n'y aura aucun changement de la durée annuelle (Figure 8), même si la saison raccourcira de plus de deux semaines (Figure 9). Cette différence découle du fait que la saison dépend du moment du premier événement de givre, tandis que la durée annuelle fait le total des heures où il y a présence de givre dans l'année, quel que soit le moment du premier événement.

La différence entre la durée annuelle et la longueur de la saison s'explique par des changements à l'échelle mensuelle des variables responsables de l'accrétion de givre. Considérons l'exemple du raccourcissement de la saison autour de la baie d'Hudson. En automne, on observe une diminution significative du contenu en eau liquide en conditions givrantes (voir le mois de septembre à la Figure 10) : il y aura moins de nuages givrants, donc moins de givre. Parallèlement, la même région enregistrera une augmentation des précipitations givrantes en hiver (voir le mois de janvier à la Figure 11). Conjugués, ces deux changements auront pour effet d'écourter la saison, mais s'équilibreront sur le plan de la durée annuelle de givre rotor.

Figure 10

Changement du contenu en eau liquide en conditions givrantes au mois de septembre



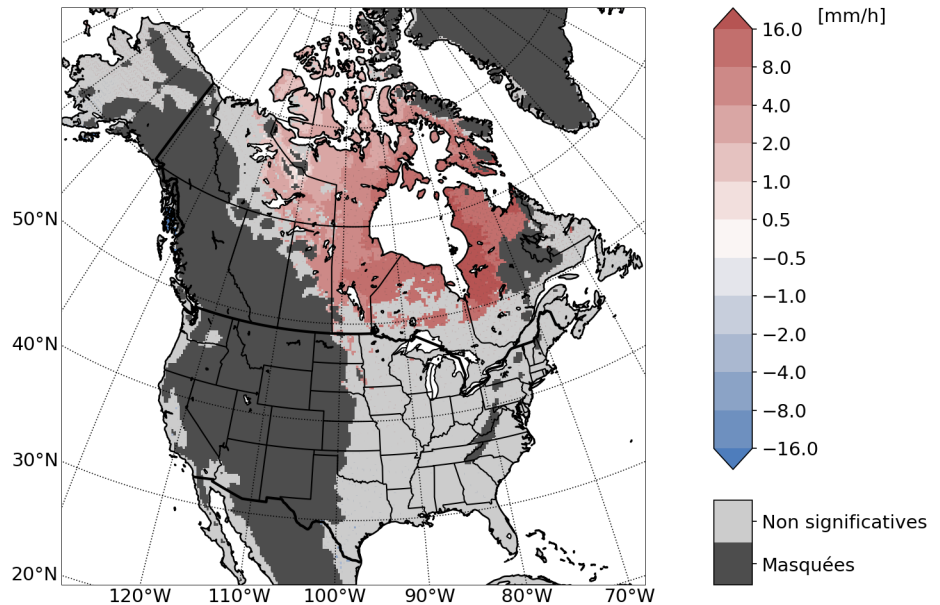
Résultats pour l'Amérique du Nord

- **Les vents :**
Aucun changement significatif dans la période future
- **Le givre :**
Augmentation de la présence de givre dans le nord du Canada. Diminution de la durée de la saison de givre près de la mer.
- **La production :**
Augmentation des pertes de production dues au givre dans le nord du Canada, mais pas de changement significatif dans la production totale.

4. Résultats : Impacts des changements climatiques sur le potentiel éolien

Figure 11

Changement des précipitations givrantes au mois de janvier



En résumé, les résultats suggèrent qu'à certains endroits près de l'océan, il y aura moins de givre à l'automne (début de saison retardé), mais que cette diminution sera équilibrée par une augmentation de la présence de givre en hiver (pas de changement de durée annuelle). En revanche, dans le nord du Canada, les résultats suggèrent qu'il y aura une augmentation de la durée annuelle de givre, mais la longueur de la saison n'est pas appelée à changer de façon significative. Ces résultats sont cohérents avec les changements attendus des températures de l'air et de la mer, ainsi que des précipitations pour ces régions.

4. Résultats : Impacts des changements climatiques sur le potentiel éolien

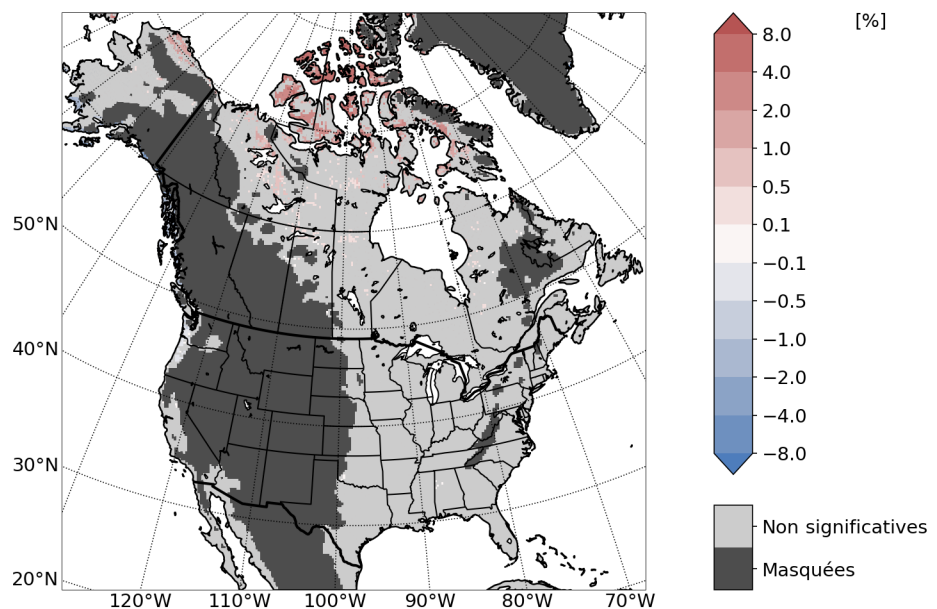
4.3. Changement de production énergétique

Cette section présente les résultats de changement en ce qui concerne la production énergétique et les pertes de production énergétique dues au givre.

Les quatre simulations suggèrent une augmentation des pertes dues au givre dans le nord du Canada et une diminution sur la côte ouest de l'Amérique du Nord (Figure 12). Tel qu'attendu, les pertes dues au givre suivent la tendance du givre rotor dans la période future (voir la Figure 8) : plus il y a de givre, plus il y a de pertes. Cependant, une différence notable est que les changements en ce qui concerne les pertes sont moins significatifs que les changements en matière de givre rotor. Concrètement, il y a moins de points significatifs pour les pertes dues au givre que pour la durée de la présence de givre rotor. Cet effet est probablement causé par la relation non linéaire entre la durée de la présence de givre annuelle et l'ampleur des pertes engendrées. Une faible accumulation de givre ne cause presque aucune perte, quelle qu'en soit la durée.

Figure 12

Changement du pourcentage de pertes annuelles dues au givre



Malgré l'augmentation du pourcentage de pertes, aucun signe de changement n'est détectable dans la production annuelle. Autrement dit, les changements dans la production sont trop subtils par rapport à leur variabilité. Au bout du compte, cela indique que des études plus pointues seront nécessaires pour déceler et caractériser l'effet du givre sur la production dans le nord du Canada.

5. Conclusions et perspectives

Ce rapport présente une analyse détaillée de l'impact des changements climatiques sur le potentiel éolien en Amérique du Nord. Pour caractériser la ressource éolienne des prochaines décennies, l'effet des changements climatiques a été analysé sur les vents, le givre et la production énergétique au moyen d'une comparaison entre une période future (2031-2060) et une période historique (1981-2010). Les conclusions présentées doivent être interprétées en gardant en tête les diverses limitations de l'étude.

Les changements climatiques

Le climat a été modélisé en Amérique du Nord pour deux scénarios de trajectoires socioéconomiques : une trajectoire correspondant à un futur avec des émissions de gaz à effet de serre élevées (RCP8.5), et une autre correspondant à un futur avec d'importantes mesures d'atténuation et une augmentation modérée des gaz à effet de serre (RCP4.5). Les changements à venir se situeront vraisemblablement entre ces deux scénarios. À partir des simulations climatiques modélisées par le MRCC5, l'accumulation de givre et la production énergétique ont été modélisées par le modèle GPEO.

Les résultats de vitesse moyenne du vent et de régimes de vent productibles suggèrent tous deux qu'il n'y aura aucun changement significatif pour la période future.

Dans certaines régions du nord du Canada, il y aura une augmentation du nombre de jours de givre, causée par la hausse des températures. Parallèlement, la saison de givre raccourcira dans les régions situées près de la mer : autour de la baie d'Hudson, sur la côte Ouest (Colombie-Britannique, nord-ouest des États-Unis) et sur la côte Est (de Terre-Neuve au New Jersey).

L'absence de changement dans les vitesses du vent est une bonne nouvelle pour l'industrie : les éoliennes continueront d'opérer tel qu'attendu dans la période future. Pour les régions avec un raccourcissement de la saison de givre, l'opérateur pourra compter sur une saison d'entretien et de maintenance allongée. Au contraire, pour les régions avec une augmentation du nombre de jours de givre, la saison d'entretien risque d'être écourtée, avec un accès réduit aux éoliennes pendant l'hiver pour des raisons de santé et de sécurité [28].

5. Conclusion

Les changements dans la production énergétique éolienne

Le modèle GPEO a également été utilisé pour modéliser la production énergétique éolienne et représenter la production d'un parc éolien de 100 MW composé d'éoliennes GE de 1,5 MW sans mesure d'adaptation au givre.

Aucun changement significatif en ce qui concerne la production énergétique éolienne n'a été détecté pour la période future. Le seul changement détectable est une légère augmentation des pertes énergétiques dues au givre dans le nord du Canada, à certains endroits où la durée de la présence givre augmente.

L'absence de changement dans la production énergétique est également une bonne nouvelle pour l'industrie : la ressource énergétique future pourra être estimée avec les données récoltées pendant l'opération des parcs actuels. Cependant, l'effet du givre sur l'entretien des éoliennes pourrait changer et avoir un impact indirect sur la production des parcs. Des analyses plus poussées devront être faites pour bien quantifier cet impact.

Perspectives

Avec les cibles ambitieuses de réduction de gaz à effet de serre et l'importante augmentation de la demande en électricité à venir, les conclusions obtenues dans cette étude sont très rassurantes et encourageantes pour l'avenir de l'éolien au Canada.

Que ce soit pour les projets existants, les nouveaux projets d'envergure ou les petits projets en réseaux isolés, l'éolien demeurera une technologie mature, rentable et bien adaptée pour jouer un rôle central dans la transition énergétique du Canada.

6. Références bibliographiques

- [1] GIEC, « Résumé à l'intention des décideurs », dans *Changement climatique 2021 : les bases scientifiques physiques*. Contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] Environnement et Changement climatique Canada, « Plan de réduction des émissions pour 2030 : Prochaines étapes du Canada pour un air pur et une économie forte », 29 mars 2022. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/nouvelles/2022/03/plan-de-reduction-des-emissions-pour-2030--prochaines-etapes-du-canada-pour-un-air-pur-et-une-economie-forte.html> (consulté le 22 novembre 2022).
- [3] IRENA, « Global Trends », *IRENA*. <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Costs/Global-Trends> (consulté le 22 novembre 2022).
- [4] CANREA, « Énergie éolienne - Association canadienne de l'énergie renouvelable », 12 février 2021. <https://renewablesassociation.ca/fr/energie-eolienne/> (consulté le 22 novembre 2022).
- [5] R. Kilpatrick, « Effect of Cold Climate on Wind Energy Production in Canada (2010-2016) », Ressources naturelles Canada, Ottawa, M154-110/2017E-PDF, 2017.
- [6] CanmetÉNERGIE et Centre for Applied Business Research in Energy and the Environment, « Base de données canadienne sur les éoliennes », 2021. <https://open.canada.ca/data/fr/dataset/79fdad93-9025-49ad-ba16-c26d718cc070> (consulté le 13 septembre 2022).
- [7] D. Huard, J. G. Fyke, I. Capellán-Pérez, H. D. Matthews, et A.-I. Partanen, « Estimating the Likelihood of GHG Concentration Scenarios from Probabilistic IAM Simulations », *Earth and Space Science Open Archive*, p. 1-40, 2022, doi: 10.1002/essoar.10510494.1.
- [8] Ouranos, « Portrait climatique - Gaspésie », *Portraits climatiques 1.2.1*, 2021. <https://portclim.ouranos.ca/#/regions/8> (consulté le 9 mars 2022).
- [9] I. Charron, *Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation*, Éd. 2016.
- [10] Statistique Canada, « Tableau 25-10-0015-01 : Production de l'énergie électrique, production mensuelle selon le type d'électricité », 2022. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=2510001501> (consulté le 12 septembre 2022).
- [11] A. Martynov, R. Laprise, L. Sushama, K. Winger, L. Šeparović, et B. Dugas, « Reanalysis-Driven Climate Simulation over CORDEX North America Domain Using the Canadian Regional Climate Model, Version 5: Model Performance Evaluation », *Climate Dynamics*, vol. 41, n° 11-12, p. 2973-3005, 2013, doi: 10.1007/s00382-013-1778-9.

6. Références bibliographiques

- [12] L. Šeparović, A. Alexandru, R. Laprise *et al.*, « Present Climate and Climate Change over North America as Simulated by the Fifth-Generation Canadian Regional Climate Model », *Climate Dynamics*, vol. 41, n° 11-12, p. 3167-3201, 2013, doi: 10.1007/s00382-013-1737-5.
- [13] A. Voldoire, E. Sanchez-Gomez, D. Slas y Méliá *et al.*, « The CNRM-CM5.1 Global Climate Model: Description and Basic Evaluation », *Climate Dynamics*, vol. 40, n° 9-10, p. 2091-2121, mai 2012, doi: 10.1007/s00382-011-1259-y.
- [14] J. P. Dunne, J. G. John, A. J. Adcroft *et al.*, « GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part I: Physical Formulation and Baseline Simulation Characteristics », *Journal of Climate*, vol. 25, n° 19, p. 6646-6665, oct. 2012, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00560.1.
- [15] S. Kulkarni et H.-P. Huang, « Changes in Surface Wind Speed over North America from CMIP5 Model Projections and Implications for Wind Energy », *Advances in Meteorology*, vol. 2014, p. 1-10, 2014, doi: 10.1155/2014/292768.
- [16] P. A. Arias *et al.*, « Technical Summary », dans *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan *et al.*, Éd. Cambridge University Press, 2021, p. 150.

LN