



# Renforcer la résilience des réseaux électriques canadiens pour un avenir carboneutre

Dylan Clark et Anna Kanduth, avec l'aide de Jason Dion, Caroline Lee, Ryan Ness et Roger Street

## Introduction

Il est essentiel d'avoir des réseaux électriques fiables et résilients pour assurer la prospérité et la carboneutralité du Canada. Si leur fiabilité est généralement chose établie, ils subissent tout de même une pression grandissante en raison des répercussions climatiques qui s'aggravent et de la consommation d'électricité qui augmente vu la décarbonisation. Dans ce document de cadrage, nous examinons les risques climatiques qui guettent les réseaux électriques canadiens ainsi que les occasions de renforcer la résilience de ces réseaux dans le parcours vers la carboneutralité.

Lorsqu'il est question des réseaux électriques, le terme « fiabilité » correspond à la capacité d'un réseau à continuer d'offrir son service malgré les interruptions normales, locales et de courte durée. La notion de « résilience » en est une plus large; elle correspond à la capacité d'un réseau à résister aux événements occasionnels majeurs, mais aussi à en atténuer au maximum les répercussions, à se rétablir rapidement et à intégrer des mesures permettant de prévoir et de réduire l'incidence d'événements semblables à l'avenir (Espinoza et coll., 2016; NREL, 2019).

Au Canada, les réseaux électriques alimentent non seulement les résidences et les immeubles, mais aussi pratiquement tous les services essentiels, notamment les hôpitaux, les centres d'urgence 911, les usines de traitement des eaux, les épiceries, les aéroports et les centres communautaires. Les entreprises et les installations industrielles dépendent aussi d'un apport fiable en électricité pour assurer leurs activités. En cas de panne de courant, d'autres systèmes infrastructureux et économiques critiques en souffrent. Cet effet domino, c'est ce qu'on appelle des répercussions en cascade. Par exemple, les importantes pannes de courant causées par la tempête hivernale en février 2021 au Texas ont privé des millions de foyers de chauffage et d'éclairage, mais ont aussi freiné les efforts de vaccination contre la COVID-19, endommagé les infrastructures d'alimentation en eau et de communication de l'État, et perturbé les chaînes d'approvisionnement alimentaires (Lee, 2021). Au Québec, la tempête de verglas de 1998, qui a laissé près de cinq millions de personnes sans électricité, a aussi entraîné la fermeture prolongée de commerces et la perte de revenus, des retards ou des annulations dans le transport, l'émission d'avis d'ébullition, des problèmes de télécommunication et des interruptions dans la prestation des soins de santé (Chang et coll., 2007). Ces perturbations de services essentiels ont des conséquences encore plus graves sur certains

groupes et certaines personnes vulnérables, comme les communautés nordiques et éloignées (voir encadré 1). Étant donné le nombre impressionnant de services dépendants de l'électricité, il est primordial d'assurer la fiabilité et la résilience des réseaux électriques actuels et futurs.



# Les répercussions en cascade des pannes de courant au Nunavut

Le hameau de Pangnirtung au Nunavut a vécu les répercussions néfastes d'une interruption de l'approvisionnement en électricité. En 2015, sa seule et unique centrale au diesel, déjà vieillissante, a été détruite par un incendie. Résultat : une panne de courant pour toute la collectivité et un état d'urgence d'un mois (CBC News, 2017). De cette situation ont découlé d'autres répercussions, comme la perturbation des télécommunications, du chauffage et des soins de santé pour toute la population.

Quelques mois plus tard, au milieu de décembre, un problème électrique a plongé la piste de l'aéroport de Pangnirtung dans le noir, compliquant l'atterrissage d'avions offrant des services essentiels comme l'évacuation médicale et la livraison de vivres (CBC News, 2015). Il a fallu éclairer la piste avec des lanternes. Même chose à Grise Fiord l'année suivante lorsqu'une tempête de vent a causé une panne : les membres de la communauté ont éclairé la piste d'atterrissage avec les phares de leurs motoneiges et leurs camions pour aider un avion transportant une équipe de monteurs de ligne de la Société d'énergie Qulliq, qui venait travailler à rétablir le courant, à se poser (CBC News, 2016).

Les pannes de courant à Pangnirtung et Grise Fiord montrent à quel point l'approvisionnement en électricité est critique à la prestation de services essentiels dans les communautés éloignées. Les répercussions en cascade des pannes de courant sur d'autres infrastructures centrales confirment l'importance de prioriser l'apport fiable et sûr en électricité aux communautés nordiques et éloignées, surtout que le Nord du Canada se réchauffe près de deux fois plus vite que le Sud.

La transition du Canada vers la carboneutralité représente autant un risque à la résilience des réseaux électriques qu'une occasion de la renforcer. D'une part, l'électrification des transports, des bâtiments et des secteurs industriels qui s'accélère pourrait exercer une pression de demande accrue sur les réseaux. D'autre part, la dépendance grandissante à l'électricité signifie que toute panne d'un réseau aura des répercussions d'une ampleur et d'une gravité encore plus grandes. C'est sans compter que si les réseaux ne sont pas conçus pour une polyvalence élargie et une intégration de différentes ressources renouvelables, l'augmentation des parts du solaire et de l'éolien dans le bouquet de production électrique pourrait exacerber l'incertitude dans l'approvisionnement et les interruptions de service.

D'un autre côté, la transition énergétique du Canada s'accompagne d'occasions évidentes d'améliorer la résilience des réseaux électriques. C'est d'autant plus vrai dans le cas du parcours vers la carboneutralité, qui nécessitera des investissements massifs pour la construction et la rénovation d'infrastructures, que ce soit la modernisation de réseaux électriques, l'instauration de réseaux de bornes pour la recharge de véhicules électriques, l'électrification des transports en commun ou l'amélioration d'immeubles. C'est là une occasion de propulser la trajectoire vers la carboneutralité, mais aussi d'assurer la résilience des réseaux électriques actuels et futurs du pays face à un climat qui se réchauffe et devient de plus en plus imprévisible.

Une inaction à ce chapitre ne ferait qu'augmenter la vulnérabilité des infrastructures électriques, le coût global des réseaux et le nombre d'interruptions pour les ménages et les entreprises, et au bout du compte, mettrait en péril la transition du Canada vers la carboneutralité.





# Risques climatiques attendus pour les réseaux électriques canadiens

Il faudra absolument neutraliser les émissions planétaires d'ici 2050 pour éviter les pires répercussions des changements climatiques. Mais même si nous atteignons collectivement cette cible, les répercussions des émissions passées exacerberont les dangers climatiques dans les prochaines décennies, menaçant les réseaux électriques du pays. Les changements climatiques posent des risques pour chaque composante des réseaux électriques canadiens – production, transport, distribution et utilisation finale –, et nous en examinerons certains dans la présente section.

## Répercussions sur la production d'électricité

L'atteinte des cibles de carboneutralité ira de pair avec une dépendance considérablement accrue du Canada à l'électricité étant donné l'électrification de ses usages : l'électricité propre pourrait répondre à 55 % de toute la demande énergétique en 2050 (Dion et coll., 2021; EPRI, 2021; IET, 2021). Cette électricité pourrait provenir de différentes sources : l'hydroélectrique, le nucléaire, l'éolien, le solaire, les biocarburants, la géothermie et, possiblement, des systèmes à combustibles fossiles assortis de technologies de captation et de stockage du carbone. Bon nombre de ces types de production s'accompagneront de défis, mais aussi d'occasions, découlant des effets des changements climatiques au Canada.

Par exemple, les changements induits par le climat sur les températures, les précipitations et la fonte des neiges et des glaces toucheront la production d'hydroélectricité au pays. Les répercussions systémiques se feront le plus sentir dans les provinces et territoires ayant d'importantes ressources hydroélectriques, soit la Colombie-Britannique, le Manitoba, Terre-Neuve-et-Labrador, le Québec et le Yukon. Une analyse révèle que d'ici 2050, les changements climatiques pourraient bénéficier à la production d'hydroélectricité en Colombie-Britannique, car la hausse des précipitations augmenterait le potentiel de production. Par contre, la majorité de la hausse aurait lieu au printemps, et non à l'été, là où la demande est la plus forte (Parkinson et Dijali, 2015).

Ailleurs cependant, l'évaporation causée par la hausse des températures ne sera peut-être pas compensée par l'augmentation des précipitations, ce qui risque de réduire les débits d'eau et donc la capacité de production d'hydroélectricité. Par exemple, une étude des répercussions économiques des changements climatiques sur la production d'hydroélectricité au Québec a montré que la perte de production due à la baisse du débit et du niveau d'eau pourrait avoir de graves conséquences pécuniaires (Larrivée et coll., 2016). Là où les surplus saisonniers d'hydroélectricité sont exportés vers d'autres marchés, que ce soit au Canada ou aux États-Unis, la modification du débit et du niveau d'eau pourrait retrancher les revenus provenant des exportations si celles-ci diminuent ou deviennent imprévisibles.

Les changements dans la disponibilité, la température et la qualité de l'eau dus aux répercussions climatiques pourraient aussi nuire à la production d'énergie thermique – qu'elle se fasse avec du gaz naturel, du charbon, de la biomasse, de l'hydrogène, de l'uranium ou un autre combustible –, puisqu'elle exige un approvisionnement important en eau de refroidissement. La hausse de la température des étendues d'eau avoisinantes pourrait réduire l'efficacité des processus de refroidissement; la prolifération accrue d'algues pourrait boucher les filtres et les prises d'eau; et la sécheresse pourrait limiter l'approvisionnement global en eau (Braun et Fournier, 2016). Pensons aux vagues de chaleur de 2019 en Europe, lors desquelles il a fallu arrêter ou déconnecter des réacteurs nucléaires en France et en Allemagne en raison de la température élevée de l'eau (Reuters, 2019).

Les changements climatiques poseront fort probablement d'autres défis à la production d'électricité. Les inondations plus fréquentes, tant intérieures que côtières, pourraient toucher les centrales électriques et les voies d'accès. Les tempêtes encore plus fortes, comme les ouragans, pourraient endommager les infrastructures de production en mer comme les éoliennes. Dans certaines régions, les changements climatiques pourraient se traduire par une baisse de la vitesse et une reconfiguration des vents réduisant possiblement la production d'énergie éolienne (Breslow et Sailor, 2002; GIEC, 2021; Yao et coll., 2012). Enfin, la hausse des températures et de la couverture nuageuse pourrait amoindrir la production d'énergie solaire dans les régions à fort potentiel pour ce type d'énergie (Yin et coll., 2020), quoique les conséquences sur le potentiel solaire du Canada n'aient pas encore été bien étudiées.

## Répercussions sur les infrastructures de transport et de distribution

Les changements climatiques pourraient nuire au transport et à la distribution de l'électricité en affaiblissant l'efficacité et la fiabilité des infrastructures, notamment les lignes et les postes électriques. Les températures plus élevées en été diminueront la capacité de transport des lignes, ce qui ajoutera de la pression sur les réseaux lors des journées les plus chaudes, où la demande est déjà à son maximum en raison du recours à la climatisation. Sans modernisation des infrastructures de transport ni mesures pour réduire ou déplacer la demande (comme l'efficacité énergétique, la gestion de la demande<sup>1</sup> ou les réseaux intelligents), la charge de pointe accrue doublée de la capacité de transport réduite pourrait mettre en péril la capacité des réseaux à continuer de répondre à la demande (Bartos et coll., 2015). Il en découlerait un nombre accru de pannes de courant involontaires ainsi que d'interruptions planifiées, soit des réductions de tension prévues par le fournisseur pour réduire la charge en cas d'urgence.

Les lignes, les poteaux et les pylônes électriques risquent aussi de tomber ou de se briser lors de phénomènes météorologiques extrêmes, qui deviendront possiblement plus fréquents en raison des changements climatiques (feux incontrôlés, tornades, tempêtes de verglas, etc.) et des modifications de la stabilité et du niveau du sol, ce qu'on appelle la subsidence (Johnson, 2014). L'ouragan Ida, qui a touché terre en Louisiane en août 2021, est un exemple récent des répercussions dévastatrices que le temps violent peut avoir sur les infrastructures de transport et de distribution. La tempête a ravagé le réseau électrique de l'État, détruisant des lignes de transport et laissant sans courant plus d'un million de foyers et d'entreprises le long de la côte du golfe du Mexique (Kelly, 2021). Plus courantes au Canada, les tempêtes de verglas peuvent elles aussi endommager ou briser des lignes électriques : effondrement sous le poids de la glace accumulée ou des branches d'arbres tombés, balancement ou bris dus aux vents violents (ACÉ, 2016). De plus, à mesure que les températures hausseront et que les régimes des précipitations changeront, la vitesse de croissance et l'ampleur de la flore augmenteront dans de nombreuses régions, ce qui pourrait exacerber le risque de pannes de courant et de feux incontrôlés ainsi que leur gravité. Enfin, les endroits au pays où la

---

<sup>1</sup> On entend par « gestion de la demande » l'ensemble de stratégies mises en œuvre pour encourager les consommateurs à modifier leur consommation d'énergie, souvent en leur demandant de consommer en basse période plutôt qu'en période de pointe. Il peut s'agir de sensibilisation, d'incitatifs, de programmes ou de solutions technologiques comme des systèmes de recharge intelligents qui programment les électroménagers pour qu'ils n'utilisent de l'énergie qu'en dehors des périodes de pointe.

foudre frappe plus souvent pourraient faire face à davantage d'interruptions causées par des défaillances des lignes de transport et de distribution (Fant, 2020).

En plus des répercussions potentielles sur la fiabilité des lignes électriques, les changements climatiques pourraient entraîner plus de défaillances des postes électriques et des transformateurs, causées par toutes sortes d'effets comme la hausse du niveau de la mer, les inondations et les vagues de chaleur (ACÉ, 2016; AIE, 2021).

## Répercussions de la demande énergétique accrue

Comme décrit précédemment, l'électrification finale croissante dans la trajectoire vers la carboneutralité pèsera sur les réseaux électriques. C'est sans compter l'effet du réchauffement climatique sur la demande en électricité. Même si les hivers moins froids pourraient faire diminuer la demande en chauffage d'ici le milieu du siècle et par la suite, cela ne suffira pas à compenser la hausse découlant de la climatisation en été (en plus de la hausse sur toute l'année attribuable à l'électrification). Nous voyons déjà des signes de mouvement dans les tendances de demande. À l'été 2021, BC Hydro a enregistré un nouveau record de pointe de demande horaire estivale, alors que les résidents tentaient de rester au frais durant la vague de chaleur historique qui a frappé la province (BC Hydro, 2021). Selon un récent rapport de l'Institut canadien pour des choix climatiques (l'Institut), on estime que la demande de pointe continuera d'augmenter dans toutes les provinces. Le résultat sera une augmentation nationale de 9 % d'ici le milieu du siècle, et de 13 % à 17 % d'ici 2100 (Ness et coll., 2021). La hausse des températures pourrait aussi se traduire par une multiplication des variations abruptes de la demande énergétique au cours d'une même journée, exigeant aux réseaux électriques de s'y ajuster (Rivers et Shaffer, 2020).

La fiabilité et la résilience du réseau électrique pourraient aussi être menacées par la discordance entre les changements dans la demande et ceux dans la production en raison du climat. Par exemple, la hausse de demande en été vu la climatisation parallèlement à la baisse potentielle de la production d'hydroélectricité étant donné les changements hydrologiques dus au climat (comme évoqué plus tôt) mettra le réseau sous une pression accrue (Hamlet et coll., 2010). Autre cas de figure : la production éolienne est habituellement plus grande la nuit et en hiver, ce qui va dans le sens inverse de l'augmentation prévue de la demande en été par la climatisation.

À mesure que le Canada accélérera sa transition vers l'énergie propre et qu'il augmentera sa dépendance à l'électricité pour assurer ses services essentiels, les conséquences d'un approvisionnement et d'une demande incompatibles, notamment la récurrence accrue de pannes de courant, se multiplieront.



# Atténuer les risques dus au climat pour les réseaux électriques canadiens

Les investissements massifs dans les infrastructures qui sont nécessaires à l'atteinte de la carboneutralité constituent une occasion de renforcer la résilience du réseau électrique : en cherchant ainsi à le préparer aux répercussions des changements climatiques, nous pourrions réduire considérablement les conséquences et les coûts des bris d'infrastructure ainsi que les risques d'interruption de service. Par exemple, dans son rapport *Submergés* où il quantifie le coût des grands dangers climatiques pour les réseaux électriques canadiens, l'Institut conclut qu'en agissant tôt pour améliorer la résilience, nous pourrions réduire les coûts attribuables aux dommages de 80 % d'ici la fin du siècle, soit des économies pouvant atteindre 3,1 milliards de dollars par année (Ness et coll., 2021).

Le public et le privé disposent de plusieurs occasions pour s'attaquer aux risques susmentionnés et améliorer la résilience et la fiabilité des réseaux électriques, dont certaines abordées dans la présente section : renforcer l'infrastructure électrique, augmenter la flexibilité des réseaux, améliorer l'efficacité énergétique et assurer la réactivité des réseaux aux interruptions de service et une reprise rapide.

## Renforcer l'infrastructure

Au cours du virage national vers la carboneutralité, il faudra injecter des sommes considérables dans les infrastructures de transport et de distribution électriques, autant pour leur construction que pour leur modernisation, notamment le remplacement des infrastructures vétustes par des composants et des matériaux plus résistants et souvent plus économiques. Voilà qui pourrait sabrer les coûts associés aux dommages qui seraient survenus sans l'application de telles mesures d'adaptation. Plus précisément, la conception, la construction, l'entretien et le remplacement des lignes électriques et autres infrastructures de transport et de distribution (comme les transformateurs) doivent se faire en cohérence avec les vulnérabilités connues des réseaux et les lacunes actuelles dans le service, mais aussi en prévision des risques climatiques éventuels selon une gestion proactive du cycle de vie de ces actifs. Parmi les mesures possibles, notons : le recours à des matériaux neufs et plus durables; l'enfouissement des lignes électriques; l'élagage ou le retrait de végétation pour dégager les lignes électriques et atténuer les risques de pannes et de feux incontrôlés; la relocalisation d'infrastructures existantes pour réduire le plus possible l'exposition à des dangers comme les inondations et les branches cassées; et la création de systèmes de protection contre les inondations pour les infrastructures, nouvelles et existantes, au niveau du sol comme les postes électriques.

Le renforcement de l'infrastructure électrique devrait aussi passer par la réduction des vulnérabilités d'autres infrastructures pour éviter les répercussions en cascade et réduire l'incidence et les coûts globaux des

défaillances électriques. Il pourrait s'agir de construire des levées ou de protéger les milieux humides pour épargner le plus possible les résidences, les entreprises et les infrastructures essentielles des inondations.

## Augmenter la flexibilité des réseaux

Plus les réseaux électriques sont flexibles, plus ils seront résilients aux répercussions des changements climatiques, ce qui réduira les interruptions de service. Par flexibilité, on entend la capacité des réseaux à ajuster leurs mécanismes de production, de transport et de distribution selon des variations imprévisibles de l'approvisionnement et de la demande de sorte à maintenir un service fiable et rentable (AIE, 2019). Cette flexibilité accrue sera cruciale pour compenser l'intermittence de sources d'énergie renouvelable, comme l'éolien et le solaire, dont la part dans l'approvisionnement en électricité devrait augmenter considérablement au fil de la transition vers la carboneutralité. À mesure que les répercussions climatiques s'aggraveront, elle sera aussi vitale au maintien de la capacité des réseaux à réagir rapidement aux interruptions dans la production, le transport et la distribution et à offrir un service fiable.

Différentes technologies peuvent aider à la flexibilité des réseaux :

- ▶ Grâce à des programmes de gestion de la demande, on peut mieux harmoniser la demande et l'approvisionnement au profit de la stabilité, la flexibilité et la fiabilité du réseau (Cox et coll., 2017).
- ▶ Le stockage d'énergie peut servir de réserve de secours en cas d'interruption de service. On peut par exemple utiliser des technologies de stockage à court terme, comme des batteries aux ions lithium, ou à long terme, comme le stockage par pompage hydraulique, le stockage par air comprimé, les batteries rédox et l'hydrogène.
- ▶ Les ressources énergétiques décentralisées, comme les panneaux solaires de toiture, combinées au stockage peuvent réduire la susceptibilité aux pannes de courant individuelles et aux interruptions dans l'approvisionnement étant donné la répartition de la production entre un grand nombre de sources et de sites (NARUC, 2019). Il serait également plus rapide de les déployer que de bâtir des réseaux d'envergure pour répondre à la vive évolution de la demande. Généralement, la diversification des sources de production, notamment une hausse des parts du solaire et de l'éolien, peut aider à réduire la vulnérabilité aux interruptions d'une source à la fois.
- ▶ Le transport interrégional peut aider les réseaux à faire face aux interruptions dans l'approvisionnement en électricité en permettant l'accès à la production de réseaux voisins.
- ▶ Enfin, les technologies de réseaux intelligents peuvent consolider les autres solutions mentionnées dans un tout plus efficace et fiable, en plus d'aider à réduire les délais de réponse en cas de pannes de sorte à en réduire la durée (IRENA, 2018).

Ces solutions complémentaires au renforcement de l'infrastructure ont une grande importance. Si ce renforcement s'impose dans de nombreux cas, il peut être coûteux et chronophage. Augmenter la flexibilité du réseau limite les effets des événements extrêmes sur celui-ci et, du coup, permet d'éviter d'avoir à renforcer certaines infrastructures non critiques. En prime, un réseau flexible s'adaptera à un éventail de climats futurs, un atout étant donné que la nature, la localisation et la sévérité des répercussions climatiques demeurent incertaines (Accenture, 2020).

S'il est essentiel d'augmenter la flexibilité des réseaux pour atteindre les cibles de carboneutralité et les objectifs de résilience, il faut parfois accepter une certaine redondance pour assurer la fiabilité et la sûreté des réseaux. Il pourrait s'agir de conserver des sources stables d'énergie acheminable en cas d'urgence, de faire des réserves d'énergie éolienne et solaire grâce au stockage, ou de fournir une production et un stockage de secours ciblés pour les infrastructures critiques (ex. : hôpitaux) et les communautés vulnérables. Bien que cette stratégie s'avérera peut-être importante pour augmenter la fiabilité des réseaux – surtout



pour alimenter les services essentiels et les régions, comme celles éloignées, qui sont confrontées à des obstacles empêchant une flexibilité accrue de leur réseau –, certaines formes de redondance pourraient s'opposer aux cibles de réduction des émissions, notamment les centrales au gaz naturel et les génératrices au diesel de secours, si elles ne sont pas équipées de systèmes de captation et stockage du carbone.

## Améliorer l'efficacité énergétique

L'efficacité énergétique pourrait jouer un rôle central dans l'atteinte de la carboneutralité au pays (Dion et coll., 2021). Son amélioration consiste à réduire la quantité d'énergie nécessaire pour fournir un service énergivore, comme chauffer une résidence ou faire fonctionner une voiture. Les technologies et les mesures écoénergétiques permettent d'utiliser moins d'énergie pour obtenir un même service. Pensons aux électroménagers, aux véhicules ou aux conceptions et matériaux de construction écoénergétiques, ou encore à l'utilisation d'électricité plutôt que de combustibles fossiles dans les utilisations finales. L'efficacité énergétique diffère de la conservation d'énergie, qui, elle, consiste à réduire le recours global à un service énergivore, par exemple en utilisant moins sa voiture, en baissant la température des thermostats en hiver ou en éteignant les électroménagers lorsqu'inutilisés.

L'efficacité énergétique et la conservation d'énergie peuvent toutes deux soutenir non seulement l'atteinte des objectifs de réduction des émissions, mais aussi la résilience des réseaux électriques. L'efficacité énergétique peut atténuer la probabilité d'interruptions en allégeant la pression de la demande sur les réseaux électriques et en permettant aux ménages de traverser des événements extrêmes comme les vagues de chaleur à coût moindre. Pareillement, la conservation d'énergie et la flexibilité de la demande peuvent réduire la probabilité de pannes de courant ou d'interruptions planifiées en cas de vagues de chaleur ou de coups de froid. Et qui dit réseau électrique écoénergétique dit production nécessaire réduite, et donc infrastructure elle aussi réduite, ce qui se traduit par un nombre moindre d'équipements risquant de se briser sous l'effet des changements climatiques (Davis et Clemmer, 2014).

## Mettre en place des mécanismes de reprise

Notons finalement que même si les mesures visant à renforcer l'infrastructure, à augmenter la flexibilité du réseau et à réduire la demande peuvent aider à limiter la sévérité des répercussions climatiques sur l'infrastructure électrique, elles ne peuvent pas les prévenir. Il est donc impératif de mettre en place des mécanismes appuyant une réponse, un rétablissement et une reprise rapides en cas d'événements causés par le climat de sorte que les réseaux puissent sans tarder rétablir le service et maintenir leur fiabilité. Pour cela, il faut des stratégies efficaces de réponse et de rétablissement en cas d'urgence, des cadres complets d'évaluation de la résilience de l'infrastructure électrique, le maintien de coffres pour couvrir les pertes, et le partage des ressources d'intervention entre les territoires.



# Obstacles à la résilience accrue du réseau électrique et pistes de solution

Même si les mesures suggérées plus haut pour accroître la résilience du réseau électrique sont facilement accessibles et déployables dès maintenant, les obstacles à leur application sont nombreux. On en présente ici certains des plus grands, accompagnés de pistes de solution.

## **OBSTACLE : Les mandats des autorités de réglementation et des services publics ne sont pas formulés pour s'attaquer à la résilience**

---

Les mandats des autorités de réglementation et des services publics priorisent la fiabilité à court terme, mais n'incitent pas forcément à mettre l'accent sur la résilience et l'adaptation à long terme. Si la planification de la fiabilité comprend la conception, la construction et l'exploitation des réseaux de sorte à maintenir le débit d'électricité dans des conditions normales et prévisibles, elle ne tient pas compte de la capacité d'un réseau à faire face à des événements extrêmes, moins fréquents. Elle ne suffit donc pas à elle seule à améliorer la résilience des réseaux électriques aux répercussions climatiques.

Plusieurs facteurs compliquent la planification efficace de la résilience. D'abord, les autorités de réglementation du secteur électrique sont réticentes à permettre aux services publics réglementés et aux entreprises de distribution locale d'augmenter les tarifs pour investir dans des projets de résilience, surtout ceux n'ayant pas d'avantages clairs à court terme pour le consommateur. Les services publics doivent maintenir un équilibre entre investissements, taux de rendement, qualité du service et frais aux consommateurs, et les options de renforcement de la résilience sont souvent coûteuses. Ensuite, on reconnaît assez peu le rendement du capital investi dans la protection des infrastructures contre le climat. Les mesures de renforcement de la résilience ne peuvent pas se mesurer aux autres investissements, puisque les avantages des sommes injectées aujourd'hui dans la résilience sont difficiles à quantifier, et que les taux de rendement et les délais de récupération sont incertains. Résultat : les services publics ne disposent pas de sources adéquates de revenus viables pour la construction de réseaux résilients, capables de résister aux risques climatiques qui surgiront.

## **SOLUTION : Faire tomber les barrières réglementaires et améliorer les incitatifs**

---

Il est primordial de faire tomber les barrières réglementaires et de mettre en place des incitatifs adéquats pour encourager les services publics à investir dans l'adaptation et la résilience. Une possibilité : les gouvernements provinciaux et territoriaux pourraient clarifier ou élargir officiellement le mandat des autorités de réglementation pour qu'il comprenne l'atteinte de cibles de résilience à long terme et la priorisation de la planification de l'adaptation. Une autre possibilité consisterait à ce que les autorités de réglementation imposent aux services publics de prendre

en compte les répercussions des changements climatiques dans leur planification des ressources et leurs activités. Par exemple, la California Public Utilities Commission exige maintenant que les services publics effectuent régulièrement une évaluation des risques climatiques pour leurs actifs corporels et la prestation de leurs services, surtout dans les communautés défavorisées, afin de mieux intégrer ces risques à leurs processus de planification (Chhabra, 2020). Une autre façon de favoriser les investissements dans la résilience serait l'ajout par les autorités de réglementation d'une tarification basée sur le rendement en matière de résilience des réseaux : les autorités établiraient des cibles ou des indicateurs de résilience et d'adaptation pour les services publics, et détermineraient le recouvrement des frais en fonction de ceux-ci (AIE, 2021). Une première étape cruciale est de créer des indicateurs et des méthodes pour l'évaluation de la résilience dans les processus de planification des actifs, comme les plans intégrés des ressources, ou dans les marchés de l'énergie concurrentiels, comme abordé plus bas (NREL 2019).

## **OBSTACLE : Les codes et les normes ne concordent pas avec les objectifs de résilience et d'adaptation**

---

Les codes et les normes, notamment le Code canadien de l'électricité, ont un rôle central dans le renforcement de la résilience des réseaux électriques. Ce sont eux qui fixent les exigences minimales pour la conception et qui éclairent les décisions à chaque étape du cycle de vie d'une infrastructure. Mais bien souvent, codes et normes n'exigent pas la prise en compte des risques climatiques futurs dans la construction et le remplacement d'infrastructures électriques, car ils reposent sur des hypothèses climatiques passées. Le manque d'information sur les risques climatiques et de lignes directrices en la matière dans les codes et les normes fait en sorte que les nouvelles infrastructures continuent d'être gérées et construites en fonction du climat passé. Et même si les décideurs sont conscients de ces lacunes, on commence à peine à modifier les codes et les normes du pays pour y intégrer les risques associés aux changements climatiques (Ness et coll., 2021).

## **SOLUTION : Accélérer la création de codes et normes robustes**

---

Les normes et les codes nationaux et régionaux peuvent être améliorés et mis en place plus rapidement pour que les risques associés aux changements climatiques et les principes d'adaptation soient pris en compte dans les infrastructures nouvelles et existantes. Avant tout, il faut mettre à jour les normes de conception des infrastructures électriques et de planification des réseaux selon les répercussions climatiques futures, tout en permettant leur adaptation au contexte régional (ACÉ, 2016; CSA, 2019). Cela touchera le Code canadien de l'électricité ainsi que les normes et les codes régionaux sur l'électricité, mais leur portée est insuffisante pour arriver à une intégration notable de la résilience dans la conception, la planification et l'infrastructure du réseau électrique. Il faudra donc modifier d'autres codes et normes pour que le réseau gagne réellement en résilience (CSA, 2019).

On pourrait par exemple modifier les codes du bâtiment et les normes de construction en faveur de la résilience du réseau. Ces codes pourraient exiger une élévation des bâtiments ou des panneaux électriques pour limiter les dommages dus aux inondations (CSA, 2019). L'imposition de normes plus sévères en matière d'efficacité énergétique réduirait la demande en électricité ainsi que la pression sur le réseau. Les codes du bâtiment pourraient aussi tenir compte des tendances futures de précipitations et de températures et exiger des rénovations réduisant la vulnérabilité aux feux incontrôlés, aux inondations et aux vagues de chaleur (Ness et coll., 2021). Il sera crucial d'avoir des données exactes et à jour sur le climat pour élaborer des codes et des normes qui intègrent bien les principes d'adaptation et de résilience aux changements climatiques (Gouvernement du Canada, 2021).

## OBSTACLE : Les décideurs manquent d'information pour intégrer la résilience à la planification du réseau

---

Les services publics, les autorités de réglementation et les gouvernements manquent d'information adéquate sur les menaces climatiques actuelles et futures pour l'infrastructure électrique. Certes, le Canada travaille à élargir l'accès aux projections de températures et de précipitations, mais ces données ne disent pas tout. Les décideurs ont besoin de projections sur des conditions climatiques centrales comme les tempêtes de verglas et de vent ainsi que de renseignements détaillés sur les dangers climatiques (ex. : feux incontrôlés, inondations et fonte du pergélisol) qui peuvent nuire aux réseaux électriques (Gouvernement du Canada, 2019). Enfin, on reconnaît rarement le lien entre les réseaux électriques et les autres infrastructures essentielles, du moins jusqu'à ce qu'une défaillance se produise.

Il y a encore moins d'information concernant les coûts sociaux et pécuniaires ultérieurs des risques climatiques. Ces données sont primordiales dans les analyses coûts-avantages dont les gouvernements et les autorités de réglementation peuvent se servir pour éclairer leurs politiques et leurs programmes. Mais elles sont soit inexistantes soit difficilement accessibles. Et celles accessibles manquent de pertinence, d'utilité et de légitimité aux yeux des décideurs – services publics, autorités de réglementation et promoteurs –, car elles sont qualitatives ou propres à une région.

Au manque de données et de connaissances de base s'ajoute un manque d'approches solides et cohérentes pour évaluer l'efficacité des stratégies de résilience et d'adaptation par rapport aux cibles et aux objectifs. Mesurer l'avancement en matière d'adaptation et de résilience est une opération complexe en soi. Les cadres à cet effet en sont encore à leurs balbutiements, et contrairement à ceux visant la réduction des émissions, il n'y a pas d'indicateur unique permettant d'évaluer les progrès réalisés dans l'atténuation des risques climatiques et le renforcement de la résilience des réseaux électriques. Du coup, personne ne s'entend dans le secteur de l'électricité (autant les autorités de réglementation, les services publics, les gouvernements que le privé) sur les données, les indicateurs de rendement ou les méthodes à utiliser pour évaluer la résilience d'un réseau (Vugrin et coll., 2017). En plus, les processus décisionnels et les cadres analytiques habituels sous-estiment souvent les risques de l'inaction ou les avantages de l'action et ne sont pas adéquats pour stimuler un changement systémique transformateur (Mercure et coll., 2021).

## SOLUTION : Corriger le manque d'information et établir des indicateurs de rendement partagés

---

Avec une meilleure collecte des données et un partage des processus, il serait possible de corriger le manque d'information actuel et de faciliter l'application de mesures efficaces d'adaptation dans les réseaux électriques et interdépendants. Cette mobilisation des connaissances implique d'améliorer non seulement l'accès à des données pertinentes de grande qualité, mais aussi la capacité à utiliser celles-ci pour orienter la planification d'une infrastructure résiliente au climat. Pour les planificateurs, il sera d'autant plus important de pouvoir transposer les projections générales à une échelle régionale.

En outre, la standardisation des indicateurs de résilience et la promotion de leur utilisation uniforme par les gouvernements, les autorités de réglementation et les services publics aideront à la planification de la résilience et favoriseront la collaboration entre les réseaux électriques des provinces et territoires.

Cependant, même avec de meilleures données et des indicateurs plus uniformes, il n'en reste pas moins que les modèles climatiques, comme tout autre modèle prédictif, comporteront toujours une certaine incertitude et ne peuvent produire des prédictions parfaites des risques et des réper-

cussions. La planification de la résilience et de l'adaptation devra donc rester ouverte aux différents futurs possibles. Poser des gestes pour régler les problèmes actuels d'adaptation et de résilience, tout en surveillant les risques climatiques émergents : voilà une stratégie qui pourrait s'avérer efficace pour renforcer la résilience des réseaux électriques.

## **SOLUTION : Améliorer l'évaluation et la communication des risques climatiques**

---

Les évaluations de la vulnérabilité et des risques climatiques sont d'importants outils pour éveiller les décideurs à la nécessité d'une planification de la résilience. Les évaluations de la vulnérabilité aux changements climatiques ne sont pas obligatoires au Canada, bien que certains services publics en aient réalisé volontairement. Les gouvernements et les autorités de réglementation au pays pourraient exiger des services publics qu'ils mènent régulièrement des évaluations des risques climatiques pour leurs actifs corporels et la prestation de leurs services, de sorte à mieux comprendre les risques systémiques et les atténuer. Étant donné les répercussions en cascade des bris de l'infrastructure électrique et des interruptions de service, ces évaluations devraient prendre en compte les interdépendances entre les infrastructures et les services essentiels et s'appuyer sur des données climatiques et socioéconomiques obtenues par réduction d'échelle. Elles devraient aussi s'intégrer aux cadres généraux de planification du réseau électrique, aux activités d'élaboration de politiques et aux processus décisionnels pour favoriser une application généralisée des principes d'adaptation et de résilience.

Heureusement, le Canada n'est pas à la case départ. L'Optique des changements climatiques, une exigence pour plusieurs projets financés par Infrastructure Canada, constitue une base solide pour la réalisation d'évaluations des risques et de la résilience climatiques. Toutefois, la plupart des services publics ne sont pas tenus de remplir l'évaluation d'Infrastructure Canada pour leurs projets d'investissement. On pourrait élargir l'Optique des changements climatiques, ou un autre outil semblable, à tous les projets d'infrastructure financés par l'État – y compris ceux de réseau électrique – de sorte que la résilience climatique devienne un objectif central dans la planification nationale à long terme des infrastructures. Les gouvernements provinciaux et territoriaux pourraient eux aussi adopter des cadres similaires pour les projets d'infrastructure qu'ils subventionnent.

À l'avenir, à mesure que le fédéral collaborera avec les provinces, les territoires, les municipalités et les communautés autochtones pour créer une stratégie nationale d'adaptation, il sera important d'inclure les services publics et les autorités de réglementation du secteur de l'électricité dans le dialogue. La mise en place de mesures et de stratégies pour renforcer la résilience des réseaux électriques sera essentielle à la création d'un Canada résilient au climat.

# Références

- Accenture (2020). *From Reliability to Resilience: Confronting the Challenges of Extreme Weather*. [https://www.accenture.com/\\_acnmedia/PDF-124/Accenture-Resilience-Extreme-Weather-POV.pdf](https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-124/Accenture-Resilience-Extreme-Weather-POV.pdf)
- ACÉ (Association canadienne de l'électricité) (2016). *Adaptation aux changements climatiques : bilan de la situation et recommandations pour le secteur de l'électricité au Canada*. [https://electricity.ca/wp-content/uploads/2017/05/Adaptation\\_aux\\_changements\\_climatiques-bilan\\_de\\_la\\_situation\\_et\\_recomman.pdf](https://electricity.ca/wp-content/uploads/2017/05/Adaptation_aux_changements_climatiques-bilan_de_la_situation_et_recomman.pdf)
- AIE (Agence internationale de l'énergie) (2019). *Status of Power System Transformation 2019*. <https://www.iea.org/reports/status-of-power-system-transformation-2019>
- AIE (2020). *Power Systems in Transition*. <https://www.iea.org/reports/power-systems-in-transition>
- AIE (2021). *Climate Resilience*. <https://www.iea.org/reports/climate-resilience>
- Bartholameuz, Eranda, Hasna Nazir et Ganesh Doluweera (2021). *Climate Impacts on Canada's Electricity Systems*, Canadian Energy Research Institute, Calgary (Alberta), étude n° 196. [https://ceri.ca/assets/files/Study\\_196\\_Full\\_Report.pdf](https://ceri.ca/assets/files/Study_196_Full_Report.pdf)
- Bartos, Matthew, Mikhail Chester, Nathan Johnson, Brandon Gorman, Daniel Eisenberg, Igor Linkov et Matthew Bates (2016). « Impacts of rising air temperatures on electric transmission ampacity and peak electricity load in the United States », *Environmental Research Letters*, vol. 11, n° 11.
- BC Hydro (2021). « Operational update: Extreme heat leads to record-breaking electricity demand », communiqué de presse. [https://www.bchydro.com/news/press\\_centre/news\\_releases/2021/extreme-heat-leads-to-record-breaking-electricity-demand.html](https://www.bchydro.com/news/press_centre/news_releases/2021/extreme-heat-leads-to-record-breaking-electricity-demand.html)
- Braun, Marco, et Élyse Fournier (2016). *Études de cas d'adaptation dans le secteur de l'énergie – Surmonter les obstacles à l'adaptation*, rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada. <https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/Rapport-EtudeDeCas-FR.pdf>
- Breslow, Paul B., et David J. Sailor (2002). « Vulnerability of wind power resources to climate change in the continental United States », *Renewable Energy*, vol. 27, n° 4, p. 585-598.
- CBC News (2015). « Flare pots used to light Pangnirtung, Nunavut runway after electrical outage », 9 décembre. <https://www.cbc.ca/news/canada/north/pangnirtung-runway-flare-pots-1.3357013>
- CBC News (2016). « Residents of Grise Fiord, Nunavut, staying in local school, await power restoration », 13 janvier. <https://www.cbc.ca/news/canada/north/grise-fiord-nunavut-power-runway-1.3402094>
- CBC News (2017). « New power plant for Pangnirtung, Nunavut, 2 years after fire destroyed original », 3 avril. <https://www.cbc.ca/news/canada/north/pangnirtung-new-power-plant-fire-1.4053726>
- CBC News (2021). « No power overnight for some B.C. Hydro customers, Bell's mobile network also damaged », 15 novembre. <https://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/service-outage-bc-storm-1.6249986>
- Chang, Stephanie E., Timothy L. McDaniels, Joey Mikawoz et Krista Peterson (2007). « Infrastructure failure interdependencies in extreme events: power outage consequences in the 1998 Ice Storm », *Natural Hazards*, vol. 41, n° 2, p. 337-358.
- Chhabra, Mohit (2020). « CPUC Takes a Big First Step Toward Climate Change Adaptation », NRDC, 27 août. <https://www.nrdc.org/experts/mohit-chhabra/cpuc-takes-big-first-step-toward-climate-change-adaptation>
- Cox, Sadie, Eliza Hotchkiss, Dan Bilello, Andrea Watson et Alison Holm (2017). *Bridging climate change resilience and mitigation in the electricity sector through renewable energy and energy efficiency: Emerging climate change and development topics for energy sector transformation*, National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/67040.pdf>
- CSA (Association canadienne de normalisation) (2019). *Development of Climate Change Adaptation Solutions Within the Framework of the CSA Group Canadian Electrical Code Parts I, II and III*. [https://www.csagroup.org/wp-content/uploads/CSA-RR\\_CEC-ClimateChange.pdf](https://www.csagroup.org/wp-content/uploads/CSA-RR_CEC-ClimateChange.pdf)
- Davis, Michelle, et Steve Clemmer (2014). *Power Failure: How Climate Change Puts Our Electricity at Risk—and What We Can Do*, Union of Concerned Scientists. <https://www.ucsusa.org/resources/power-failure>

- Dion, Jason, Anna Kanduth, Jeremy Moorhouse et Dale Beugin (2021). *Vers un Canada carboneutre : s'inscrire dans la transition globale*, Institut canadien pour des choix climatiques. <https://choixclimatiques.ca/reports/vers-un-canada-carboneutre/>
- EPRI (Electric Power Research Institute) (2021). *Canadian National Electrification Assessment: Electrification Opportunities for Canada's Energy Future*. <https://www.epri.com/research/products/000000003002021160>
- Espinoza, Sebastian, Mathaios Panteli, Pierluigi Mancarella et Hugh Rudnick (2016). « Multi-phase assessment and adaptation of power systems resilience to natural hazards », *Electric Power Systems Research*, vol. 136, p. 352-261.
- Fant, Charles, Brent Boehlert, Kenneth Strzepek, Peter Larsen, Alisa White, Sahil Gulati, Yue Li et Jeremy Martinich (2020). « Climate change impacts and costs to U.S. electricity transmission and distribution infrastructure », *Energy*, vol. 195, article 116899.
- GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (2021). *Résumé à l'intention des décideurs. Changement climatique 2021 : les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM>
- Gouvernement du Canada (2019). *Rapport final du Groupe d'experts sur la finance durable – Mobiliser la finance pour une croissance durable*, Ottawa (Ontario). [https://publications.gc.ca/collections/collection\\_2019/eccc/En4-350-2-2019-fra.pdf](https://publications.gc.ca/collections/collection_2019/eccc/En4-350-2-2019-fra.pdf)
- Gouvernement du Canada (2021). « Élaborer des codes et des normes en matière de résilience climatique ». <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/centre-canadien-services-climatiques/essentiels/elaboration-codes-normes-resilience-climatique.html>
- Hamlet, Alan F., Se-Yeun Lee, Kristian E.B. Mickelson et Marketa M. Elsner (2009). « Effects of projected climate change on energy supply and demand in the Pacific Northwest and Washington State », *Climatic Change*, vol. 102, p. 103-128.
- IET (Institut de l'énergie Trottier) (2021). *Perspectives énergétiques canadiennes 2021 – Horizon 2060*. <https://iet.polymtl.ca/perspectives-energetiques/>
- IRENA (Agence internationale pour les énergies renouvelables) (2018). *Power System Flexibility for the Energy Transition, Part 1: Overview for policy makers*. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA\\_Power\\_system\\_flexibility\\_1\\_2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA_Power_system_flexibility_1_2018.pdf)
- Johnson, Jesse M. (2014). *Quantifying the Economic Risk of Wildfires and Power Lines in San Diego County*, Duke University, Durham (Caroline du Nord), États-Unis.
- Kelly, Stephanie (2021). « Louisiana assesses major damage to power grid from Ida », *Reuters*, 31 août. <https://www.reuters.com/world/us/louisiana-assesses-major-damage-power-grid-ida-2021-08-31/>
- Larrivée, Caroline, Claude Desjarlais, René Roy et Nicolas Audet (2016). *Étude économique régionale des impacts potentiels des bas niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent dus aux changements climatiques et des options d'adaptation*, Ouranos. [https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/ACA-GLSL\\_Synthese\\_2016\\_FR.pdf](https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/ACA-GLSL_Synthese_2016_FR.pdf)
- Lee, Caroline (2021). « Tempête de neige au Texas : un avertissement lancé aux Canadiens – Pour une planification de l'électricité tournée vers l'avenir, et non vers le passé », Institut canadien pour des choix climatiques, 23 février. <https://choixclimatiques.ca/tempete-de-neige-au-texas-un-avertissement-lance-aux-canadiens/>
- Mercure, Jean-Francois, Simon Sharpe, Jorge E. Vinales, Matthew Ives, Michael Grubb, Aileen Lam, Paul Drummond, Hector Pollitt, Florian Knobloch et Femke J.M.M. Nijse (2021). « Risk-opportunity analysis for transformative policy design and appraisal », *Global Environmental Change*, vol. 70.
- Most, William Brock, et Steven Weissman (2012). *Trees and power lines: minimizing conflicts between electric power infrastructure and the urban forest*, University of California Berkley, Center for Law, Energy and Environment. <https://escholarship.org/content/qt8kg6t2jx/qt8kg6t2jx.pdf>
- NARUC (National Association of Regulatory Utility Commissioners) (2019). *The Value of Resilience for Distributed Energy Resources: An Overview of Current Analytical Practices*. <https://pubs.naruc.org/pub/531AD059-9CC0-BAF6-127B-99BCB5F02198>
- Ness, Ryan, Dylan Clark, Julien Bourque, Dena Coffman et Dale Beugin (2021). *Submergés : les coûts des changements climatiques pour l'infrastructure au Canada*, Institut canadien pour des choix climatiques. <https://choixclimatiques.ca/wp-content/uploads/2021/09/Infrastructure-FRENCH-report-Sept-28.pdf>
- NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2019). *Valuing Resilience in Electricity Systems*. <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/74673.pdf>

- OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) (2018). « Climate-resilient infrastructure », *OECD Environment Policy Papers*, n° 14. <https://www.oecd.org/environment/cc/policy-perspectives-climate-resilient-infrastructure.pdf>
- Organization of MISO States, National Rural Electric Cooperative Association, Edison Electric Institute et National Association of State Utility Consumer Advocates (2019). *Utility Investments in Resilience of Electricity Systems*. [https://www.cooperative.com/programs-services/government-relations/regulatory-issues/documents/feur\\_11\\_resilience\\_final\\_20190401v2.pdf](https://www.cooperative.com/programs-services/government-relations/regulatory-issues/documents/feur_11_resilience_final_20190401v2.pdf)
- Parkinson, Simon, et Ned Djilali (2015). « Robust response to hydro-climatic change in electricity generation planning », *Climatic Change*, vol. 130, n° 4, p. 475-489.
- Reuters (2019). « Hot weather cuts French, German nuclear power output », 25 juillet. <https://www.reuters.com/article/us-france-electricity-heatwave/hot-weather-cuts-french-german-nuclear-power-output-idUSKCN1UK0HR>
- Rivers, Nicholas, et Blake Shaffer (2020). « Stretching the Duck: How rising temperatures will change the level and shape of future electricity consumption », *The Energy Journal*, vol. 41, n° 5, p. 55-88.
- Vugrin, Eric, Anya Castillo et Cesar A. Silva-Monroy (2017). *Resilience Metrics for the Electric Power System: A Performance-Based Approach*, Sandia National Laboratories. <https://fileservice.eea.comacloud.net/FileService.Api/file/FileRoom/10609060>
- Yao, Yao, Gordon H Hunag et Qianguo Lin (2012). « Climate change impacts on Ontario wind power resource », *Environmental Systems Research*, vol. 1, n° 2.
- Yin, Jun, Annalisa Molini et Amilcare Porporato (2020). « Impacts of solar intermittency on future photovoltaic reliability », *Nature Communications*, vol. 11.