



Climat givrant et productivité : quel capteur utiliser?

Évaluation de la performance de capteurs
météorologiques en conditions givrantes

Contenu technique

Cédric Arbez, ing.
Charles Godreau, ing. jr., M. Ing.
Kossivi Tete, M. Sc.
Marilys Clément, M. Sc.

Rédaction

Lucie Fauteux, réd. a.
Marilys Clément, M. Sc.

© TechnoCentre éolien, 2017

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	IV
INTRODUCTION	1
EXPLOITER EN CLIMAT GIVRANT	4
LE POINT SUR LE GIVRE	6
MESURER L'EFFICACITÉ DES CAPTEURS	10
CLIMAT GIVRANT : OPTER POUR UNE SOLUTION GAGNANTE	17
RÉFÉRENCES	21

RÉSUMÉ

L'énergie éolienne en climat froid représente une option intéressante pour la diversification du portefeuille énergétique et la réduction des gaz à effet de serre de nombreux pays. L'exploitation de ces gisements est toutefois complexifiée par la possibilité d'accumulation de givre sur les différentes infrastructures et plus particulièrement sur les pales des éoliennes. Il va sans dire que ces contraintes entraînent chaque année d'importantes pertes de revenus pour les exploitants de parcs éoliens.

La détection des événements givrants est donc cruciale pour les opérateurs qui doivent assurer la rentabilité et la sécurité de leurs installations, d'où l'importance de se prévaloir de capteurs météorologiques résistants au givre. Mais encore faut-il être en mesure d'évaluer avec précision la performance des capteurs offerts sur le marché.

Figurant parmi les chefs de file pour tout ce qui touche à l'intégration des énergies renouvelables et à l'optimisation des centrales éoliennes, le TechnoCentre éolien a récemment mis au point une méthodologie d'évaluation quantitative de la performance de capteurs météorologiques soumis à des conditions givrantes.

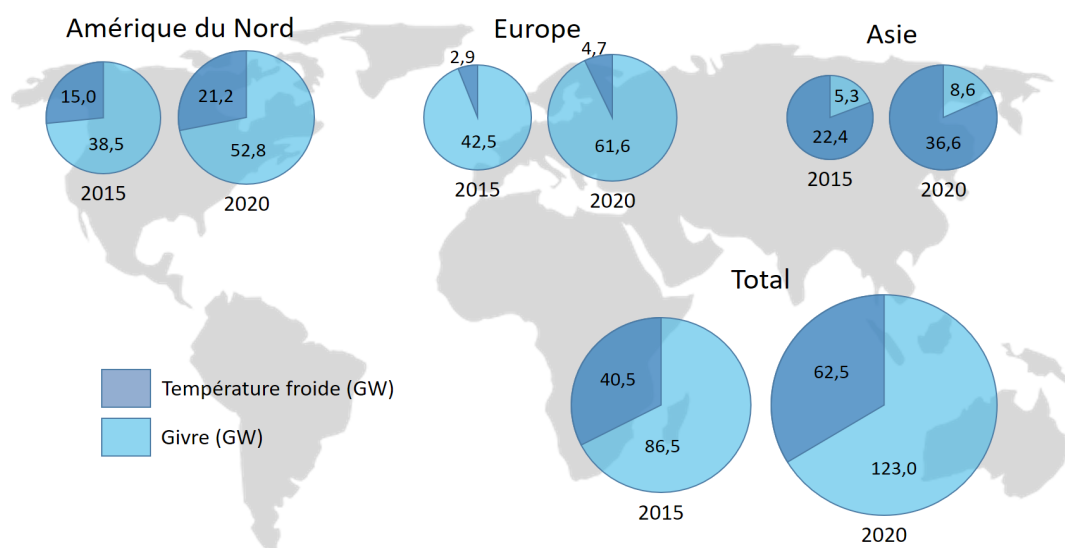
Cette méthodologie par comparaison qui s'appuie sur l'analyse d'images obtenues par des capteurs placés en conditions réelles a soutenu le développement d'un indice de performance destiné à évaluer avec précision la performance et la fiabilité de différents capteurs durant un événement de givre. Des mesures qui permettent aujourd'hui aux utilisateurs de comparer différents capteurs, de faire un choix éclairé en fonction des caractéristiques du site, de réduire les pertes et d'optimiser du coup la rentabilité des parcs éoliens.

INTRODUCTION

L'exploitation de l'énergie éolienne en climat froid ou givrant représente pour de nombreux pays une option intéressante pour la diversification des sources d'énergie et l'intégration des énergies renouvelables. Pensons aux importants gisements de vent et au potentiel éolien élevé des latitudes moyennes soumises au courant-jet. L'exploitation de ces gisements est toutefois complexifiée par la possibilité d'accumulation de givre sur les différentes infrastructures des parcs éoliens, et plus particulièrement sur les pales des éoliennes [1].

La capacité éolienne cumulée installée en climat froid en Scandinavie, en Amérique du Nord, en Europe et en Asie atteignait, à la fin de 2015, environ 127 GW avec un taux de croissance annuel prévu de 11,7 GW jusqu'en 2020 [2]. Plus près de nous, la capacité totale d'énergie éolienne installée au Canada a connu, en l'espace d'une seule décennie (2002-2012), une croissance de plus de 900 % [3] pour atteindre, en 2016, une capacité totale installée de 11 898 MW [4].

Figure 1
Capacité installée en climat froid



Source : figure adaptée du Task 19 de l'Agence internationale de l'énergie [2]

Des études parues en 2011 estimaient que pour les parcs éoliens alors installés au Canada, les pertes de production associées au climat froid s'élevaient à 1,01 million de MWh, ce qui représentait, au prix courant, une valeur de près de 100 M\$ et une occasion manquée de compenser 305 450 tonnes d'équivalents CO₂ [3].

Pertes de revenus associées au climat froid

**MWh**

1,01 million

M\$

100

CO₂

305 450 tonnes

Dans l'est du Canada seulement, ce sont 1 500 éoliennes qui sont affectées par le givre, occasionnant des pertes annuelles de l'ordre de 50 M\$ [3].

Le recours, dans ce contexte, à une instrumentation permettant de mesurer avec précision les conditions météorologiques affectant la production d'énergie est impératif pour assurer la rentabilité des parcs éoliens. Encore faut-il toutefois être convenablement outillé pour évaluer de façon tout aussi précise la performance des capteurs offerts sur le marché.

Que choisir parmi la panoplie de capteurs météorologiques? Quels sont les capteurs qui affichent le meilleur rendement et la plus grande fiabilité lors d'événements givrants?

Les efforts concertés de la communauté scientifique internationale et de la recherche appliquée ont permis, au cours des dernières années, quelques intéressantes avancées dans l'adaptation des parcs éoliens au climat froid et aux conditions givrantes.

Figurant parmi les chefs de file dans ce domaine et représentant du Canada au groupe de travail «Task 19» de l'Agence internationale de l'énergie sur le climat froid, le TechnoCentre éolien (TCE) a récemment développé une méthode d'évaluation de la performance de capteurs météorologiques en conditions givrantes. Cette méthodologie qui s'appuie sur une expérimentation menée en condition réelle assure l'obtention de mesures quantitatives quant à la fiabilité et à la performance des capteurs soumis à des épisodes de givre. Des mesures qui permettent aux utilisateurs de comparer différents capteurs entre eux et de choisir celui qui est le mieux adapté aux conditions rencontrées sur leur site.

EXPLOITER EN CLIMAT GIVRANT

La formation de givre atmosphérique sur les pales et les structures de l'éolienne entraîne de multiples problèmes, que ce soit en termes d'opération, de bris, d'usure prématurée des composantes ou de pertes opérationnelles.



Plus précisément, l'accumulation de givre atmosphérique induit :

- **Des pertes de données ou de disponibilité des données sur les capteurs lors des événements givrants**
- **Des pertes de production partielles ou complètes (arrêt de l'éolienne)**
- **Des dangers associés à la projection de morceaux de glace, que ce soit pour le personnel ou les équipements**

L'accumulation de givre a évidemment un impact non négligeable sur la qualité des mesures enregistrées par les capteurs, anémomètres ou autres. Une étude menée en 2010 a démontré qu'une petite quantité de givre sur les coupelles et l'arbre d'un anémomètre peut conduire, lorsque le vent souffle à 10 m/s, à une sous-estimation de la vitesse du vent d'environ 30 % [5]. D'autres essais portant sur l'impact de l'accrétion de givre sur un anémomètre WAA non chauffé ont par ailleurs démontré qu'une accumulation de 1 mm de glace entraînait une sous-estimation de 22 % par rapport à la vitesse réelle du vent, alors qu'une accumulation de 4 mm pouvait engendrer une mesure de 50 % sous la vitesse réelle [6].



Le givre atmosphérique occasionne ainsi chaque année d'importantes pertes de revenus






Au Canada, les conditions givrantes peuvent atteindre 20 % du temps entre les mois de novembre et d'avril [7]. En supposant un prix de vente à 9 cents le kilowattheure, le revenu annuel d'une éolienne de 2 MW enregistrant un facteur d'utilisation de 35 % s'élèverait à 552 000 \$. Avec des pertes dues au givre de l'ordre de 5 %, les pertes financières annuelles seraient de 28 000 \$, alors que des pertes considérables de l'ordre de 20 % seraient susceptibles d'entraîner des pertes financières qui pourraient atteindre 110 000 \$ [8].

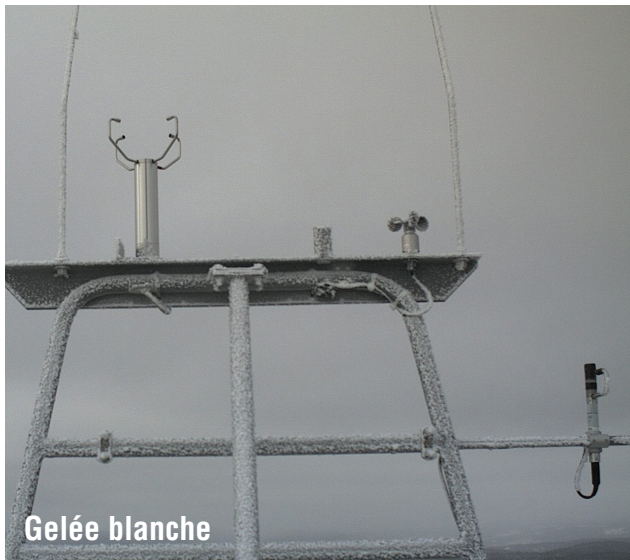


LE POINT SUR LE GIVRE

Le givre est un phénomène qui se traduit par l'accumulation de glace sur les infrastructures, comme les nacelles, les pales ou encore, les capteurs météorologiques. Il est causé par des précipitations, comme la pluie verglaçante et la neige fondante, ou encore par le passage de nuages givrants (bruine ou brouillard à des températures inférieures à 0 °C).

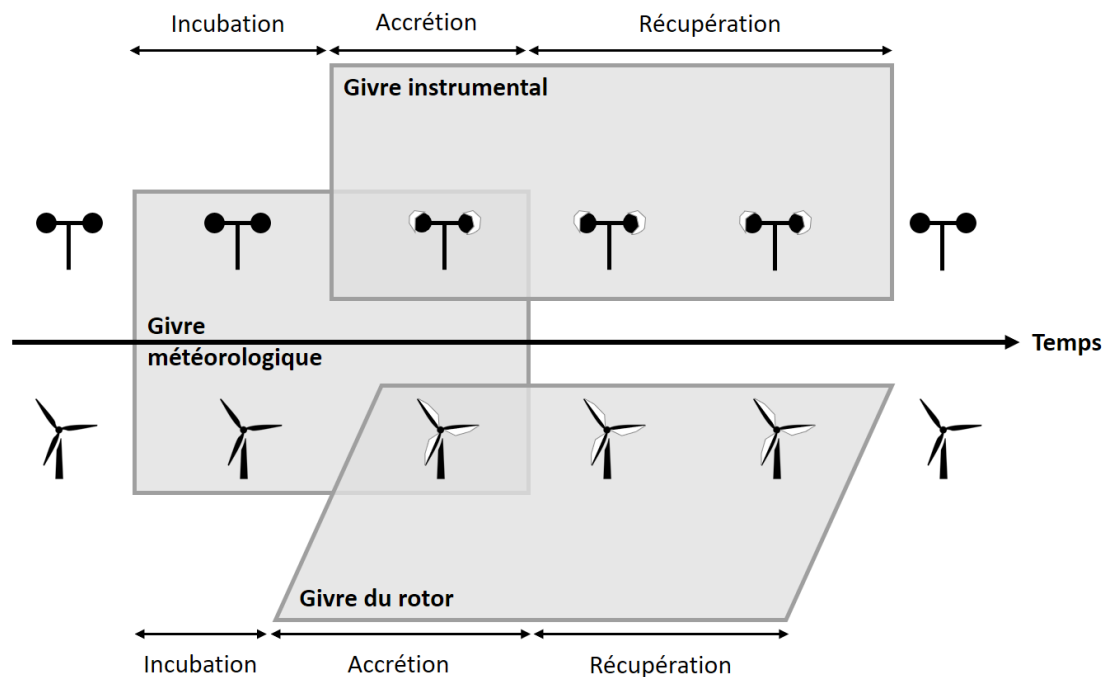
Tableau I
Caractéristiques des différents types de givre

Type	Caractéristiques
 Givre blanc	Gel instantané des gouttelettes d'eau présentes dans un nuage ou dans un brouillard au contact d'une structure
 Verglas	Pluie verglaçante qui s'accumule sur une structure
 Neige fondante	Mélange de différents types de précipitation (cristaux de neige, pluie, pluie verglaçante, etc.) qui adhère à une structure
 Gelée blanche	Déposition solide de la vapeur d'eau dans des conditions où l'humidité de l'air est élevée, le vent est faible, et la température est basse
 Givre mixte	Combinaison de différents types de givre



UN ÉVÉNEMENT DE GIVRE COMPTE CINQ ÉTAPES :
le givre météorologique, l'incubation, le givre instrumental, le givre du rotor¹ et la récupération

Figure 2
Différentes phases de formation du givre



Source : figure adaptée du Task 19 de l'Agence internationale de l'énergie [9]

1 Givre du rotor : équivaut à la période pendant laquelle la glace est présente sur une ou plusieurs pales d'une éolienne. En raison des différences de dimension, de forme, de vitesse d'écoulement et de vibrations, le givre du rotor n'est généralement pas équivalent au givre instrumental. Les temps d'incubation et d'ablation pour le givre du rotor sont en moyenne plus courts que pour le givre instrumental. En outre, la durée du givre du rotor diffère fortement pour une éolienne à l'arrêt par rapport à une éolienne en opération.

Tableau II

Description des différentes phases d'un événement de givre

Givre météorologique :	Phase pendant laquelle les conditions atmosphériques sont favorables à l'accumulation de givre. Pendant cette phase, le givre s'accumule sur les instruments ou les infrastructures.
Incubation :	Phase pendant laquelle l'accumulation de givre n'est pas suffisante pour être détectée par les instruments ou pour affecter la production de l'éolienne. Durant cette phase, les conditions météorologiques sont favorables à la formation de givre, mais les instruments ou les infrastructures ont un fonctionnement normal.
Givre instrumental :	Phase pendant laquelle l'accrétion de glace s'accumule sur les instruments ou les infrastructures, perturbant leur fonctionnement normal. Par exemple, les données météorologiques peuvent être considérées comme non valides pour l'analyse et la production d'énergie de l'éolienne peut être affectée.
Givre du rotor :	Phase pendant laquelle la glace est présente sur une ou plusieurs pales d'une éolienne
Récupération :	Cette phase succède au givre météorologique. Au cours de cette phase, le givre a cessé de s'accumuler, mais demeure présent sur les instruments ou les infrastructures. La phase de récupération se termine lorsque le givre se détache complètement des infrastructures ou que l'instrument retrouve son fonctionnement normal.

MESURER L'EFFICACITÉ DES CAPTEURS

L'adaptation des éoliennes au climat froid passe donc par l'utilisation de capteurs résistants au givre qui permettent de mesurer avec précision les conditions météorologiques affectant la production d'énergie.

Mais comment mesurer la performance des capteurs?

La méthodologie par comparaison utilisée pour évaluer différents types de capteurs et l'analyse d'images développée par le TechnoCentre éolien permettent :

- L'évaluation de la résistance au givre et de la performance des capteurs dans des conditions givrantes;
- La comparaison quantitative des performances des différents capteurs.

La méthodologie

La méthode d'évaluation des performances des capteurs en climat givrant s'appuie sur une expérimentation par comparaison développée à partir des données recueillies lors de dix événements de givre qui sont survenus sur deux sites situés au Québec : cinq au Site nordique expérimental en éolien CORUS (SNEEC) situé à Rivière-au-Renard et exploité par le TechnoCentre éolien et cinq au site du Mont Needle, à Murdochville. Ces événements ont été sélectionnés pour assurer une bonne disparité quant aux caractéristiques de sévérité, d'intensité, de durée et de type d'événement givrant.

La durée totale d'un événement de givre se calcule à partir de l'apparition du givre météorologique jusqu'à la fin du givre instrumental.

La sévérité représente la quantité maximale de glace accumulée sur une structure durant un épisode de givre. Celle-ci peut s'exprimer selon la longueur du profil de givre (mm), la charge linéaire de glace (kg/m) ou la classe de givre décrite dans la norme ISO12494 [10].

L'intensité correspond à la vitesse à laquelle la glace s'accumule sur une structure. Elle s'exprime par un taux de variation de la masse linéaire de glace, exprimé en kilogramme par mètre à l'heure (kg/m-h).

Figure 3
Sites d'expérimentation



Tableau III
Position des sites d'expérimentation




	Latitude [°]	Longitude [°]	Altitude [m]
Rivière-au-Renard	49,00	-64,46	325
Murdochville	48,94	-65,51	900

Les infrastructures

Les données utilisées dans cette étude proviennent de capteurs installés sur une éolienne et sur des mâts de mesure météorologique situés au Site nordique expérimental en éolien CORUS (SNEEC), à Rivière-au-Renard, et à Murdochville.

Ces deux sites de classe 2 à 4 [11] sont caractérisés par une occurrence de givre météorologique de 0,5 % à 10 % de l'année, de givre instrumental de 1 % à 30 % de l'année et de pertes énergétiques dues au givre qui atteignent de 0,5 % à 25 % de la production annuelle [12].

Tableau IV
Informations sur les infrastructures

Site	Infrastructures	Capteurs	Altitude [m]
Rivière-au-Renard		Anémomètre chauffé à coupelle non chauffée	82
		Capteur ultrasonique 2D chauffé	82
		Capteur ultrasonique chauffé	78
Anémomètre à coupelle chauffé		80	
Anémomètre à coupelle non chauffé		80	
Murdochville		Capteur ultrasonique 3D chauffé	11
		Anémomètre chauffé à coupelle non chauffée	13
		Capteur ultrasonique 2D chauffé	15
		Anémomètre à coupelle chauffé	15

L'identification d'événements de givre par analyse d'images

L'identification d'événements de givre consiste à déterminer, à partir des observations, le début et la fin d'un épisode où la présence de givre sur les infrastructures est confirmée.

La méthodologie utilisée pour la mesure de l'accrétion de givre à l'aide d'images s'appuie sur la norme ISO12494 [10] et décrite par Bolduc et al. [13].

Rappelons que le taux d'accrétion correspond à la vitesse à laquelle la glace s'accumule sur une structure. Il s'exprime par la variation de masse linéaire de glace [kg/m-h].

L'analyse d'images s'appuie sur les données obtenues à partir de caméras placées sur une éolienne ou des mâts de mesure. Les événements sont ainsi identifiés et caractérisés en termes de durée, d'intensité, de sévérité et de type de givre. Les périodes de givre météorologique, de givre instrumental, d'incubation et de récupération sont également calculées.



La mesure de la performance des capteurs

Le calcul du ratio entre la durée du givre météorologique et la durée du givre instrumental (indice $I_{\text{COST 727}}$) permet de calculer et de comparer les performances de différents capteurs soumis à un événement de givre [14].

$$I_{\text{COST 727}} = \frac{t_{\text{instr}}}{t_{\text{meteo}}}$$

Où :

t_{instr} : durée de givre instrumental [h]

t_{meteo} : durée de givre météorologique [h]

Cette méthodologie suggère de combiner $I_{\text{COST 727}}$ à l'intensité d'exposition au givre du site. Bien qu'elle s'inspire de cette idée, la méthodologie développée par le TechnoCentre éolien intègre plutôt la sévérité de chacun des événements de givre à un indice de performance.

Paramètres d'évaluation de résistance des capteurs au givre

Le recouvrement opérationnel des données : un bon ratio de données enregistrées fait état d'une bonne performance de l'anémomètre.

Le givre instrumental, divisé en deux catégories : le givre instrumental total et le givre instrumental extrême. Le givre instrumental total correspond à la durée où le capteur est affecté par le givre lors de l'événement, tandis que le givre instrumental extrême correspond à la période au cours de laquelle le capteur est affecté au point d'être complètement arrêté. Ces deux catégories de givre instrumental sont comparées à la durée de givre météorologique.

La sévérité de l'événement de givre : pour une même durée, la performance d'un anémomètre sera meilleure si l'événement est très sévère que s'il l'est peu.

Calculer l'indice de performance pour les anémomètres (IP_{TCE})

Le TechnoCentre éolien pousse plus loin l'analyse de performance en considérant ces autres paramètres d'évaluation de résistance des capteurs au givre et en les combinant dans l'indice de performance IP_{TCE} :

L'indice de performance permet d'évaluer à quel point un anémomètre fonctionne bien et reste fiable lors d'un événement de givre.

$$IP_{TCE} = \left(\frac{\tau_{Instr} + \tau_{Extr}}{\tau_R} \right) \times \alpha$$

Tableau V

Définition des ratios utilisés dans la formule du IP_{TCE}

Ratios et performances associées	Définition des variables utilisées
$\tau_{Instr} = \frac{t_{Instr}}{t_{TOT}}$ <p>τ_{Instr} ↑ : mauvais τ_{Instr} ↓ : bon</p>	<p>t_{Instr} : temps où le capteur est affecté par le givre durant l'événement [h]</p> <p>t_{meteo} : durée totale de l'événement de givre évaluée par l'analyse d'images [h]</p>
$\tau_{Extr} = \frac{t_{Extr}}{t_{TOT}}$ <p>τ_{Extr} ↑ : mauvais τ_{Extr} ↓ : bon</p>	<p>t_{Extr} : temps où le capteur est complètement arrêté par le givre durant l'événement [h]</p> <p>t_{TOT} : durée totale de l'événement de givre évaluée par l'analyse d'images [h]</p>
$\tau_R = \frac{D_R}{D_{TOT}}$ <p>τ_R ↑ : bon τ_R ↓ : mauvais</p>	<p>D_R : données recouvertes opérationnellement pour la durée de l'événement</p> <p>D_{TOT} : données totales qui devraient être générées pour la durée de l'événement</p>
<p>α ↑ : peu sévère α ↓ : très sévère</p>	<p>α : paramètre de sévérité</p>
	<p>IP_{TCE} ↑ : mauvais IP_{TCE} ↓ : bon</p>

Tableau VI

Paramètre α en fonction de la sévérité de l'événement de givre

α	Sévérité [mm]
1,5	< 50
1	> 50

En conclusion, un bon anémomètre, n'étant pas affecté ni complètement arrêté par le givre, et enregistrant bien les données, aura un indice bas. Au contraire, un mauvais anémomètre aura un indice élevé. Les valeurs des indices et les recommandations associées sont présentées au Tableau VII.

Tableau VII

Classification des anémomètres en fonction de leur IP_{TCE}

IP_{TCE}	Classification
0 – 0,3	Excellent instrument, résistant au givre
0,3 – 0,6	Bon instrument, assez résistant au givre
0,6 – 1	Instrument peu résistant au givre
>1	Instrument non recommandé, non résistant au givre

CLIMAT GIVRANT : OPTER POUR UNE SOLUTION GAGNANTE

L'optimisation des centrales éoliennes passe inévitablement par la caractérisation de la ressource, une opération efficace et l'utilisation d'une instrumentation bien adaptée au site. Ce constat vaut d'autant plus en climat givrant où il est primordial d'utiliser des capteurs offrant une bonne résistance au givre et démontrant par le fait même une bonne performance.

Dans une optique purement économique, il importe de garder à l'esprit que le prix du capteur ne peut, à lui seul, garantir le retour optimal sur l'investissement. En effet, l'utilisation d'un capteur bien adapté aux conditions météorologiques du site, même si celui-ci présente un coût d'acquisition plus élevé, accroît le potentiel de réduction des coûts d'opération et de maintenance tout en augmentant la disponibilité et la qualité des données recueillies.

L'indice de performance développé par le TechnoCentre éolien demeure l'outil le plus précis pour évaluer la performance et la fiabilité de la grande majorité des capteurs offerts sur le marché et actuellement utilisés par l'industrie.

La démarche d'expérimentation et de développement d'une méthodologie permettant l'évaluation quantitative des performances des capteurs menée par le TechnoCentre éolien s'est avérée, en effet, fort concluante. Il est désormais possible de déterminer avec précision les performances de capteurs de givre soumis à des événements givrants.



Conclusion

Les résultats obtenus au cours de l'expérimentation menée par le TCE démontrent que les anémomètres ultrasoniques chauffés offrent les meilleures performances lorsque soumis au givre. Suivent de près les anémomètres chauffés à coupelle non chauffée qui offrent de bonnes performances, alors que les anémomètres non chauffés font état d'une piètre performance et ne sauraient, par conséquent, être recommandés pour les parcs éoliens affectés par le givre.

Figure 4
 IP_{TCE} pour les anémomètres à Rivière-au-Renard pour les cinq événements de givre sélectionnés

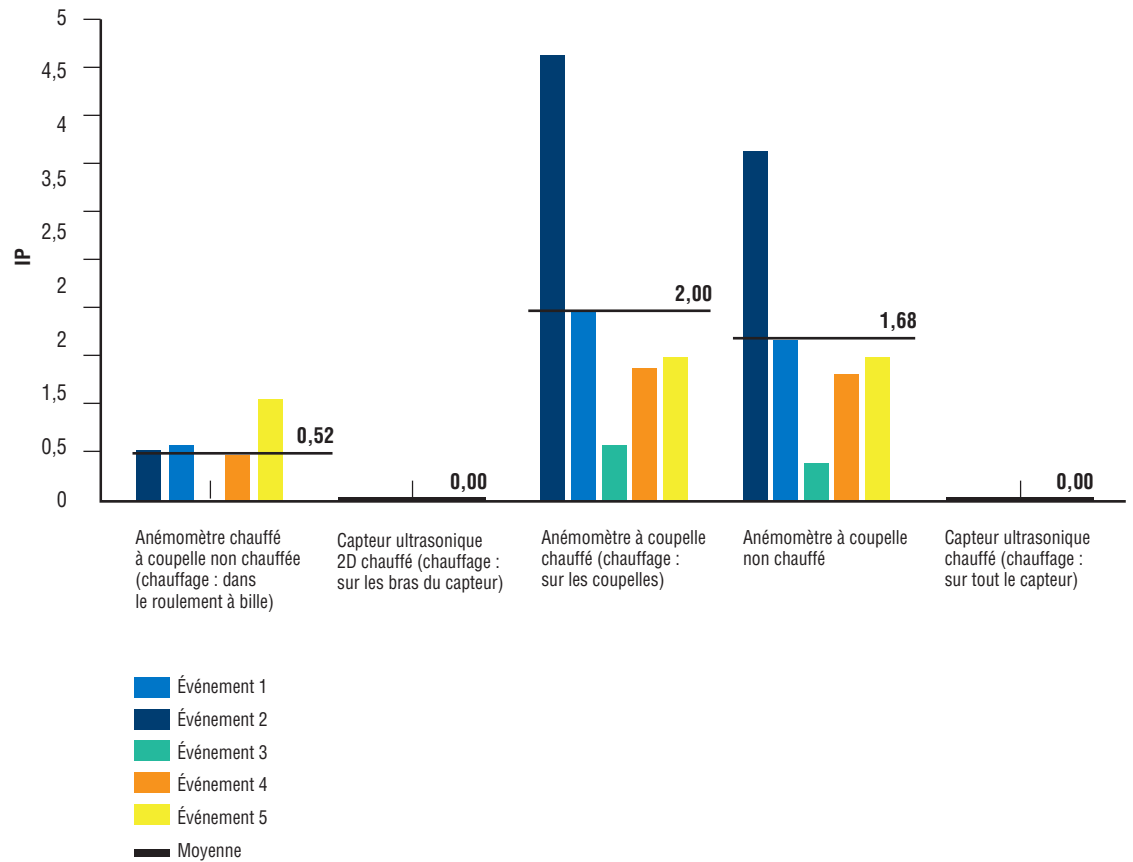
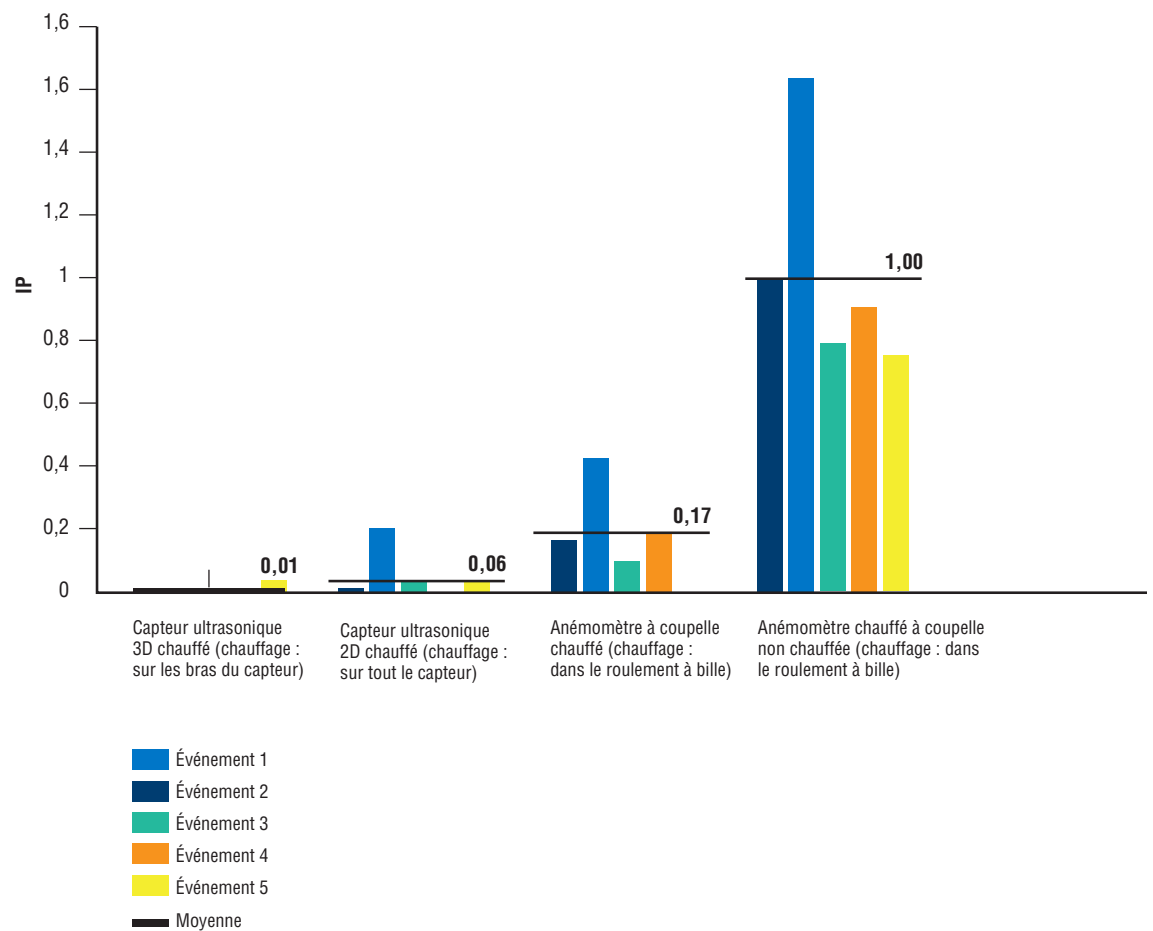


Figure 5
 IP_{TCE} pour les anémomètres à Murdochville pour les cinq événements de givre sélectionnés



Choisir de meilleurs capteurs signifie dans bien des cas augmenter l'efficacité des centrales éoliennes en réduisant les pertes, l'incertitude et les coûts et s'assurer ainsi d'un retour sur l'investissement gagnant.

Grâce à cette méthodologie, les promoteurs et les exploitants de parcs éoliens pourront dorénavant faire appel à des résultats éprouvés pour déterminer quels seraient les meilleurs équipements à acquérir pour s'assurer d'un réel retour sur leur investissement.

La méthodologie résumée dans ce papier représente également une avancée intéressante pour l'optimisation des parcs éoliens. Appliquée à un plus grand nombre de capteurs et de sites par d'autres équipes de recherche nationales ou internationales œuvrant en climat froid, cette méthode de calcul des performances permettra, à terme, de constituer une banque d'information sur la performance des capteurs et de pousser ainsi l'amélioration des connaissances vers l'atteinte d'un objectif commun : optimiser la rentabilité de l'énergie éolienne de façon à en favoriser une meilleure intégration dans le portefeuille énergétique de demain.

■ À propos du TechnoCentre éolien

Le TechnoCentre éolien est un centre d'expertise qui soutient le développement de l'industrie éolienne à travers des activités de recherche, d'aide technique, de transfert technologique et d'accompagnement aux entreprises.

Le TCE se spécialise dans le développement de solutions favorisant l'intégration des énergies renouvelables, l'optimisation de la performance des centrales éoliennes et le soutien à la croissance des PME de la filière éolienne.

RÉFÉRENCES

1. Laakso T., Holttinen H., Ronsten G., Tallhaug L., Horbaty R., Baring Gould I., Lacroix A., Peltola E. et Tammelin B. *State-of-the-art of wind energy in cold climates: Wind Energy Production in Cold Climate*, [En ligne], avril 2013. [<http://www.vtt.fi/virtual/arcticwind/publications.htm>].
2. Agence internationale de l'énergie – Task 19. *Emerging from the cold*, Wind Power Monthly, [En ligne], 29 juillet 2016. [<http://www.windpowermonthly.com/article/1403504/emerging-cold>].
3. Lacroix A. *Assessment of wind energy production penalties due to cold climate in Canada*, CanMET, pp. ISBN 978110021299-9, 25 p, 2012.
4. CANWEA. *Puissance installée*, [En ligne]. [<http://canwea.ca/fr/marches-eoliens/puissance-installee/>]
5. Laakso T., Baring-Gould I., Durstewitz M., Horbaty R., Lacroix A., Peltola E., Ronsten G., Tallhaug L., Wallenius, T. *State-of-The-art of wind energy in cold climates*, [En ligne], 2010. [https://www.researchgate.net/publication/47416837_State-of-The-art_of_wind_energy_in_cold_climates].
6. Tammelin B., Cavaliere M., Holttinen H., Morgan C., Seifert H., Sääntti K. *Wind energy production in cold climate*, Finnish meteorological institute, [En ligne]. [<https://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/47698271EN6.pdf>].
7. Ressources naturelles Canada. *Wind Energy in Cold Climates*, [En ligne]. [<http://www.nrcan.gc.ca/energy/renewable-electricity/wind/7321>].
8. New Energy Update. *Canadian wind sector looks to de-icing systems to boost energy yield, revenues*, [En ligne], 10 octobre 2010. [<http://analysis.windenergyupdate.com/operations-maintenance/canadian-wind-sector-looks-de-icing-systems-boost-energy-yield-revenues>].
9. Agence internationale de l'énergie – Task 19. « IEA Task 19: IEA Wind TCP Recommended Practice 13 », 2^e Edition: *Wind Energy in Cold Climates*, IEA Wind, rapport technique, 2017.
10. ISO-12494, *Atmospheric icing of structures*, 2001.
11. IEA Wind. Expert group study on recommended practices 13. *Wind Energy Projects in Cold Climates*, submitted to the executive committee of the international energy agency programme for research, development and deployment on wind energy conversion systems, deuxième édition, février, 2017, [En ligne]. [https://www.ieawind.org/task_19/020617/Task_19_RP_13_v2_report_2017_ExCo_appr_1Feb17_FINAL.pdf].
12. Arbez, C., Clément, M., Godreau, C., Swytink-Binnema, N., Tete, K., Wadham-Gagnon, M. *Développement et validation d'un modèle de prévision du givre pour les parcs éoliens*, TechnoCentre éolien, 136 p., mars 2016.
13. Bolduc D., Wadham-Gagnon M., Boucher B., Jolin N., Camion A., Petersen J. et Friedrich H. *Field Measurement of Wind Turbine Icing*, chez IWAIS XV, Saint-Jean, Terre-Neuve, Canada, 2013.
14. Fikke S., Ronsten G., Heimo A., Kunz S., Ostrozlik M., Persson P.-E., Sabata J., Wareing B., Wichura B., Chum J., Laakso T., Sääntti K. et Makkonen L. *COST-727, Atmospheric Icing on Structures: Measurements and data collection on icing: State of the Art*, MeteoSwiss, 2006.



70, rue Bolduc
Gaspé, Québec, Canada
G4X 1G2
1 418 368-6162 • www.eolien.qc.ca

Nos principaux partenaires



Développement
économique Canada
pour les régions du Québec

Canada Economic
Development
for Quebec Regions

Québec 