

## Développement et validation d'un modèle de prévision du givre pour les parcs éoliens

*Rapport déposé par :*

*Cédric Arbez, ing.*

*Marilys Clément, M. Sc.*

*Charles Godreau, ing. Jr., M. Ing.*

*Nigel Swytink-Binnema, ing. Jr., M. Sc. A.*

*Kossivi Tete, M. Sc.*

*Matthew Wadham-Gagnon, ing., M. Ing.*

*TechnoCentre éolien*

Présenté à : Ressources naturelles Canada

31 mars 2016



**Coordination :** Cédric Arbez, Matthew Wadham-Gagnon

**Rédaction :** Marilys Clément, Charles Godreau, Nigel Swytink-Binnema, Kossivi Tete

**Révision :** Lucie Fauteux

**Traduction anglaise :** David Joseph Soares

**Autres contributions :** Robert Benoît, Roy Consultants, WeatherTech Scandinavia AB

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2016



## SOMMAIRE

Ce rapport porte sur le développement et la validation du modèle de prévision du givre météorologique GEM-LAM-Jones-Makkonen (GLJM). Ce modèle résulte du couplage du modèle de prévision météorologique GEM-LAM, développé par Environnement Canada (EC), à ceux d'accrétion de la glace de Jones et Makkonen. L'objectif de cette validation est d'évaluer la capacité du modèle GLJM à prévoir les épisodes de givre sur les parcs éoliens et les pertes de production qui y sont associées. Des données météorologiques couplées à des observations sur site et le modèle de prévision du givre *Weather Research & Forecasting* (WRF) serviront de base de comparaison pour la réalisation de cette étude.

Les observations et les données météorologiques proviennent de trois sites situés dans l'est du Canada, soit un parc éolien confidentiel; le Site nordique expérimental en éolien Corus (SNEEC) à Rivière-au-Renard; et le Mont Needle, à Murdochville. Les deux derniers sites sont situés au Québec et sont exploités par le TechnoCentre éolien (TCE).

Les données météorologiques collectées au cours des hivers 2013-2014 et 2014-2015 ont d'abord été utilisées pour répertorier et caractériser les événements givrants de façon à évaluer la perte de production engendrée sur les éoliennes. Ces événements ont ensuite été modélisés avec GLJM et les pertes de production associées aux prévisions de givre ont été calculées. Finalement, la performance du modèle GLJM a été comparée, toujours pour les mêmes événements, à celle du modèle *Weather Research & Forecasting* (WRF), couramment utilisé dans l'industrie.

Lors de l'évaluation empirique des résultats des trois sites, il a été constaté que les sites de Murdochville et de Rivière-au-Renard obtiennent des données de bonne qualité, contrairement au site confidentiel où 92 % des capteurs ont un taux qualifié sous les 60 %. L'analyse de givre utilisant la confirmation par analyse d'images a donc été réalisée sur deux des trois sites, soit Murdochville et Rivière-au-Renard. Ces données ont ensuite permis de calculer des pertes énergétiques dues au givre de l'ordre de 2,2 % à 3,7 % et des pertes maximales de 5,6 % à 37,5 %.

Il est important de mentionner que le modèle GLJM a d'abord été calibré à l'aide d'une méthode MCP (mesure-corrélation-prédiction) au niveau de la température et de la vitesse de vent. Ensuite, le modèle a opéré pour définir la somme de trois types de givre dus à la pluie verglaçante, à un nuage givrant et à de la neige fondante. Le modèle WRF a modélisé les pertes énergétiques et l'accumulation radiale du givre.

Subséquentement, l'ensemble des méthodes a été compilé pour en définir les classes selon IEA Task 19. Ainsi, on remarque que les trois sites ont été évalués selon des pertes partielles à une classe 2 sur l'ensemble des hivers à l'étude. Cependant, les modélisations GLJM et WRF déterminent des givres de classe 3 et 4 et l'observation du givre instrumental détermine des valeurs de classe 2 à classe 4. Généralement, le site de Rivière-au-Renard est le moins givrant des trois avec une classe IEA de 2 ou 3. Le site de Murdochville est le plus givrant des trois avec un classement qui atteint 3 ou 4, selon la méthodologie. Le site confidentiel obtient des valeurs similaires à Rivière-au-Renard, mais la faible qualité des données engendre un biais qui sous-estime son potentiel givrant. La même tendance est observée si on vérifie les classes pour des pertes maximales.

À l'aide de ce classement, la performance du modèle GLJM est comparée à WRF sur quatre critères : l'indice de succès critique, le biais, la probabilité de détection et la probabilité de fausse alarme. Les modèles performant de manière similaire pour tous les critères. Ainsi, le modèle WRF a permis d'identifier 33 % plus d'événements observés que le GLJM. Cependant, le modèle GLJM modélise une occurrence d'événements de givre qui s'avère 82 % plus réaliste que WRF. Pour la sévérité des événements modélisés, le modèle GLJM prévoit des longueurs d'accrétion de givre d'environ un tiers des longueurs observées. En contrepartie, le modèle WRF modélise une sévérité généralement trop élevée par rapport aux observations.

Bien que le modèle GLJM n'ait été développé que dans le cadre de ce projet, il a performé de manière similaire au modèle WRF. Nous recommandons par conséquent de développer ce modèle de manière opérationnelle. Spécifiquement, cela signifie que des améliorations au niveau des sorties du modèle GEM-LAM utilisant le contenu en eau liquide et de la recherche pour les modèles de fonte et d'ablation seront nécessaires pour l'amélioration de sa performance.

Mots clés : GEM-LAM, Jones, Makkonen, WRF, prévision, observation, givre, parc éolien, pertes de production

## TABLE DES MATIERES

Sommaire .....	V
Liste des tableaux.....	IX
Liste des figures.....	XI
Liste des abréviations et des sigles.....	XIII
Liste des annexes .....	XV
Introduction.....	1
<b>1 Types et classification du givre.....</b>	<b>3</b>
1.1 Types de givre .....	3
1.2 Caractéristiques d'un événement de givre .....	4
1.3 Caractérisation d'un site.....	6
<b>2 Description des sites et des infrastructures .....</b>	<b>8</b>
2.1 Périodes d'analyse .....	8
2.2 Localisation des sites.....	8
2.3 Infrastructures et capteurs .....	10
<b>3 Portée du projet.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Tâche 1 : Évaluation des événements de givre.....</b>	<b>14</b>
3.1.1 Contrôle qualité des données.....	15
3.1.2 Analyse d'images .....	16
3.1.3 Détecteurs de givre .....	20
3.1.4 Détermination de la perte d'énergie.....	21
<b>3.2 Tâche 2 : Modélisation du givre avec le modèle GLJM .....</b>	<b>23</b>
3.2.1 Données météorologiques .....	23
3.2.2 Modèles d'accumulation de givre .....	24
3.2.3 Sélection et correction des données .....	25
3.2.4 Paramètres calculés.....	25
3.2.5 Limitations de la modélisation .....	26
<b>3.3 Tâche 3 : Modélisation du givre avec WRF.....</b>	<b>27</b>
3.3.1 Description et configuration du modèle .....	27
3.3.2 Paramètres calculés.....	28
3.3.3 Évaluation de la performance des modèles .....	28
<b>4 Résultats.....</b>	<b>31</b>
<b>4.1 Tâche 1 : Évaluation des événements givrants.....</b>	<b>31</b>
4.1.1 Statistiques des données qualifiées .....	31
4.1.2 Événements de givre .....	31
4.1.3 Pertes de production réelles .....	33
<b>4.2 Tâche 2 : Modélisation du givre avec le modèle GLJM .....</b>	<b>35</b>
4.2.1 Corrections .....	35
4.2.2 Modélisation du givre avec GLJM.....	36

4.3	Tâche 3 : Modélisation du givre avec WRF.....	40
5	Résultats comparés et discussion.....	41
5.1	Comparaison des variables météorologiques de base.....	41
5.2	Comparaison des observations et des modélisations du givre de GLJM et de WRF .....	44
5.3	Comparaison des événements individuels de givre observés et modélisés .....	48
5.4	Classe de givre IEA par site .....	52
5.5	Performance du modèle GLJM .....	56
5.5.1	Prévision du givre .....	56
5.5.2	Modélisation du givre.....	58
5.5.3	Limitations .....	59
5.5.4	Analyse de sensibilité des données météorologiques d'entrée dans les modèles .....	61
5.5.5	Analyse globale du modèle.....	61
	<b>Conclusion .....</b>	<b>63</b>
	<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>63</b>
	<b>Annexes .....</b>	<b>69</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Classes de givre IEA [19] .....	6
Tableau 2 – Périodes d’analyse .....	8
Tableau 3 – Informations sur les infrastructures .....	9
Tableau 4 – Positions réelles et approximatives des structures étudiées .....	10
Tableau 5 – Caractéristiques des éoliennes installées à Rivière-au-Renard et au site confidentiel .....	11
Tableau 6 – Caractéristiques des capteurs installés sur les éoliennes.....	11
Tableau 7 – Caractéristiques des détecteurs de givre .....	12
Tableau 8 – Avantages, limites et utilité des méthodes de détection de givre .....	14
Tableau 9 – Récapitulatif des tests de détection de givre avec le contrôle qualité.....	16
Tableau 10 – Caractéristiques des caméras utilisées pour l’analyse d’images.....	20
Tableau 11 – Conditions des tests sur détecteurs de givre.....	20
Tableau 12 – Provenance des données utilisées dans le modèle GLJM .....	24
Tableau 13 – Performance du modèle .....	29
Tableau 14 – Statistiques des capteurs dont les données qualifiées sont inférieures à 60 %.....	31
Tableau 15 – Pourcentage d’événements de givre confirmés par l’analyse d’images ou par détecteurs de givre.....	32
Tableau 16 – Énergie produite et perdue par une éolienne pour chaque site, par saison.....	34
Tableau 17 – Moyennes des valeurs calculées de $R^2$ pour GEM-LAM et WRF par rapport aux observations pour toute la durée de l’étude .....	41
Tableau 18 – Classes de givre IEA avec pertes partielles .....	53
Tableau 19 – Classes de givre IEA avec pertes maximales .....	54
Tableau 20 – Pourcentage de la longueur de givre accumulée modélisée par WRF et GLJM par rapport aux observations .....	59
Tableau 21 – Événements de givre observés et modélisés par GLJM à Murdochville pour le mois de décembre 2013 (tirés des tableaux Tableau 41 et Tableau 42 à l’Annexe I) .....	60
Tableau 22 – Distance entre la position réelle des sites et les positions modélisées.....	70
Tableau 23 – Configuration des capteurs du mât météorologique TMV2.....	71
Tableau 24 – Configuration des capteurs du mât météorologique MMV2 .....	72
Tableau 25 – Configuration des capteurs du mât météorologique du site confidentiel .....	72
Tableau 26 – Référence aux tests en fonction des étapes.....	74
Tableau 27 – Altitude approximative des 10 premiers niveaux de modèle « sigma » de ERA-Interim.....	75
Tableau 28 – Mesure-corrélation-prédiction de vent pour Rivière-au-Renard .....	80
Tableau 29 – Mesure-corrélation-prédiction de vent pour Murdochville .....	81
Tableau 30 – Mesure-corrélation-prédiction de température pour Rivière-au-Renard.....	82
Tableau 31 – Mesure-corrélation-prédiction de température pour Murdochville.....	83
Tableau 32 – Statistiques des données qualifiées pour Rivière-au-Renard .....	84
Tableau 33 – Statistiques des données qualifiées pour Murdochville.....	85
Tableau 34 – Statistiques des données qualifiées pour le site confidentiel .....	85
Tableau 35 – Tableau des observations pour Rivière-au-Renard durant l’hiver 2013-2014 .....	86
Tableau 36 – Tableau des observations pour Rivière-au-Renard durant l’hiver 2014-2015 .....	87
Tableau 37 – Tableau des prévisions de GLJM pour Rivière-au-Renard durant l’hiver 2013-2014 .....	88

Tableau 38 – Tableau des prévisions de GLJM pour Rivière-au-Renard durant l’hiver 2014-2015 .....	89
Tableau 39 – Tableau des prévisions de WRF pour Rivière-au-Renard durant l’hiver 2013-2014 .....	90
Tableau 40 – Tableau des prévisions de WRF pour Rivière-au-Renard durant l’hiver 2014-2015 .....	91
Tableau 41 – Tableau des observations pour Murdochville durant l’hiver 2013-2014 .....	92
Tableau 42 – Tableau des observations pour Murdochville durant l’hiver 2014-2015 .....	94
Tableau 43 – Tableau des prévisions de GLJM pour Murdochville durant l’hiver 2013-2014 .....	95
Tableau 44 – Tableau des prévisions de GLJM pour Murdochville durant l’hiver 2014-2015 .....	97
Tableau 45 – Tableau des prévisions de WRF pour Murdochville durant l’hiver 2013-2014 .....	98
Tableau 46 – Tableau des prévisions de WRF pour Murdochville durant l’hiver 2014-2015 .....	100
Tableau 47 – Tableau des observations pour le site confidentiel durant l’hiver 2014-2015 .....	101
Tableau 48 – Tableau des prévisions de GLJM pour le site confidentiel durant l’hiver 2014-2015 .....	103
Tableau 49 – Tableau des prévisions de WRF pour le site confidentiel durant l’hiver 2014-2015 .....	105
Tableau 50 – Corrélations de vent pour Rivière-au-Renard .....	108
Tableau 51 – Corrélations de vent pour Murdochville .....	109
Tableau 52 – Corrélations de température pour Rivière-au-Renard .....	110
Tableau 53 – Corrélations de température pour Murdochville .....	111
Tableau 54 – Nombre d’événements de givre observé et modélisé par GLJM .....	112
Tableau 55 – Nombre d’événements de givre observé et modélisé par WRF .....	112
Tableau 56 – Indice de succès critique des modèles GLJM et WRF .....	113
Tableau 57 – Biais des modèles GLJM et WRF .....	113
Tableau 58 – Probabilité de détection des modèles GLJM et WRF .....	114
Tableau 59 – Probabilité de fausse alarme des modèles GLJM et WRF .....	114
Tableau 60 – Comparaisons des différentes méthodes d’évaluation de l’événement de givre entre le 11 novembre 2014 et le 13 novembre 2014 sur les trois sites d’étude .....	115

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Exemple de givre blanc observé à Rivière-au-Renard le 2014-12-18.....	3
Figure 2 – Exemple de verglas observé à Rivière-au-Renard le 2015-05-13.....	3
Figure 3 – Exemple de givre mixte observé à Rivière-au-Renard le 2014-11-12.....	4
Figure 4 – Exemple de gelée blanche observée à Rivière-au-Renard le 2015-02-12.....	4
Figure 5 – Différentes phases de formation du givre.....	5
Figure 6 – Classes de givre IEA.....	7
Figure 7 – Résumé des différentes étapes pour évaluer la performance du GLJM.....	13
Figure 8 – Vue en coupe d’un profil elliptique de givre blanc comme décrit dans la norme ISO12494 [17] et positionnement des caméras.....	17
Figure 9 – Vue en coupe d’un profil uniforme de verglas comme décrit dans la norme ISO12494 [17]....	17
Figure 10 – Évaluation de la durée, des phases et de la sévérité d’un événement de givre à l’aide des résultats de l’analyse d’images.....	18
Figure 11 – Exemple de calcul de l’intensité moyenne d’un événement de givre.....	19
Figure 12 – Critères respectés pour différents capteurs de givre durant la deuxième semaine du mois de novembre 2014 à Rivière-au-Renard.....	21
Figure 13 – Courbes de puissance de référence pour chaque site.....	22
Figure 14 – Détection du givre par contrôle qualité à Rivière-au-Renard pour le mois de février 2015....	31
Figure 15 – Énergie perdue pour chaque site, par saison.....	35
Figure 16 – Corrections appliquées aux données GEM-LAM pour le vent et la température pour le mois de janvier 2014 au site de Rivière-au-Renard.....	36
Figure 17 – Accumulation radiale de givre [mm] en fonction du temps pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard.....	37
Figure 18 – Accumulation radiale de givre [mm], contenu en eau liquide [kg/m <sup>3</sup> ] et température [°C] en fonction du temps pour la période du 25 janvier 2014 18:00 au 26 janvier 2014 18:00 à Rivière-au-Renard.....	38
Figure 19 – Vent [m/s] et production d’énergie [MWh] en fonction du temps pour la période du 25 janvier 2014 18:00 au 26 janvier 2014 18:00 à Rivière-au-Renard.....	39
Figure 20 – Accumulation radiale de givre [mm] en fonction du temps pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard.....	40
Figure 21 – Productions d’énergie sans givre et avec givre [MWh] modélisées par WRF pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard.....	41
Figure 22 – Comparaison de la vitesse du vent [m/s] des observations, des données GEM-LAM et des données WRF en fonction du temps pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard.....	42
Figure 23 – Comparaison de la température [°C] des observations, des données GEM-LAM et des données WRF en fonction du temps pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard.....	42
Figure 24 – Comparaison du contenu en eau liquide des nuages [kg/m <sup>3</sup> ] de ERA-Interim et de WRF en fonction du temps pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard.....	43
Figure 25 – Comparaison du contenu en eau liquide de la pluie [kg/m <sup>3</sup> ] de GEM-LAM et de WRF en fonction du temps pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard.....	44
Figure 26 – Comparaison du contenu en eau liquide de la neige [kg/m <sup>3</sup> ] de GEM-LAM et de WRF en fonction du temps pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard.....	44

Figure 27 – Comparaison de l'épaisseur [mm], du taux d'accumulation [mm/h] et de la durée des événements de givre des trois sources [h] en fonction du temps pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard .....	46
Figure 28 – Comparaison de l'épaisseur [mm], du taux d'accumulation [mm/h] et de la durée des événements de givre des trois sources [h] en fonction du temps pour le mois d'avril 2014 à Murdochville .....	47
Figure 29 – Comparaison de l'épaisseur [mm], du taux d'accumulation [mm/h] et de la durée des événements de givre des trois sources [h] en fonction du temps pour le mois de décembre 2014 au site confidentiel .....	48
Figure 30 – Modélisation d'un événement de givre pour la période allant du 23 avril 2014 00:00 au 27 avril 2014 00:00, à Rivière-au-Renard .....	50
Figure 31 – Modélisation d'un événement de givre pour la période allant du 23 avril 2014 00:00 au 27 avril 2014 00:00, à Rivière-au-Renard .....	51
Figure 32 – Classes de givre IEA avec pertes partielles .....	55
Figure 33 – Classes de givre IEA avec pertes maximales .....	55
Figure 34 – Indice de succès critiques des modèles GLJM et WRF .....	56
Figure 35 – Biais des modèles GLJM et WRF .....	57
Figure 36 – Probabilité de détection des modèles GLJM et WRF .....	57
Figure 37 – Probabilité de fausse alarme des modèles GLJM et WRF .....	58
Figure 38 – Pression de surface [hPa] en fonction du temps pour le mois de décembre 2013 à Murdochville .....	60
Figure 39 – Positions des sites de Rivière-au-Renard et de Murdochville .....	69
Figure 40 – Position des points de modèle pour les trois sites d'étude .....	70
Figure 41 - Schéma des étapes du contrôle qualité .....	73
Figure 42 – Pourcentage d'événements de givre confirmés par l'analyse d'images ou par détecteurs de givre à Rivière-au-Renard .....	107
Figure 43 – Pourcentage d'événements de givre confirmés par l'analyse d'images ou par détecteurs de givre à Murdochville .....	107

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

a.d.s. : Au-dessus du sol

AEP : production annuelle d'énergie (*Annual Energy Production*)

C.S. : Site confidentiel

EC : Environnement Canada

FU : Facteur d'utilisation

GLJM : Modèle de prévision du givre météorologique par couplage du modèle GEM-LAM, développé par Environnement Canada, à ceux d'accrétion de la glace de Jones et Makkonen

GOOD : Données bonnes

IEA : Agence internationale de l'énergie (*International Energy Agency*)

WRF : Modèle de prévision météorologique (*Weather Research Forecasting*)



**LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE A. Cartes des sites étudiés .....	69
ANNEXE B. Liste de capteurs .....	71
ANNEXE C. Étapes du contrôle qualité .....	73
ANNEXE D. Adaptation des données de ERA-Interim .....	75
ANNEXE E. Équations mathématiques des modèles d’accumulation de givre .....	77
ANNEXE F. Correction des données GEM-LAM .....	80
ANNEXE G. Statistiques des données qualifiées .....	84
ANNEXE H. Tableaux des résultats pour le site de Rivière-au-Renard .....	86
ANNEXE I. Tableaux des résultats pour le site de Murdochville .....	92
ANNEXE J. Tableaux des résultats pour le site confidentiel .....	101
ANNEXE K. Pourcentage d’événements de givre confirmés par l’analyse d’images ou par détecteurs de givre .....	107
ANNEXE L. Comparaison des corrélations $R^2$ GEM-LAM – Observations et WRF – Observations .....	108
ANNEXE M. Nombre d’événements prédits par les modèles et confirmés par les observations .....	112
ANNEXE N. Tableaux des résultats d’analyses de performances du modèle GLJM .....	113
ANNEXE O. Comparaisons des données d’entrée dans les modèles .....	115



## INTRODUCTION

En décembre 2015, la capacité de production éolienne installée au Canada atteignait 11 205 MW, soit 5 % de la demande en électricité du pays. Capable d'alimenter trois millions de foyers, cette puissance installée place le Canada au 7<sup>e</sup> rang mondial. L'atteinte de ce niveau de production, qui était de seulement 684 MW en 2005, est le résultat d'une croissance de la puissance installée de 1 600 % sur 10 ans [1].

Comme le Canada est caractérisé par un climat nordique, toutes les éoliennes qui y sont installées peuvent être exposées à des conditions particulières, que ce soit des températures extrêmes (en dessous de -20 °C) ou encore la présence de givre atmosphérique. Comme le souligne Lacroix [2], les manufacturiers d'éoliennes sont aujourd'hui capables de proposer des solutions aux contraintes induites par les températures extrêmes. La grande majorité des problématiques reliées au climat froid sont donc dues à l'accumulation de givre sur les éoliennes.

L'accrétion de givre n'est pas une problématique nouvelle en soi. Son impact sur l'aviation, les lignes électriques et les tours de télécommunication est bien documenté [3], [4], [5]. Cependant, son effet sur la production des éoliennes canadiennes n'a commencé à être étudié que récemment [2], [6]. Le givre atmosphérique complique entre autres l'installation, l'opération et la maintenance des éoliennes [7]. Il affecte également la production d'électricité et diminue la rentabilité des parcs éoliens [2], [8].

Lors d'un épisode de givre, la présence de glace sur les pales de l'éolienne modifie leurs propriétés aérodynamiques, ce qui diminue leur efficacité et génère des vibrations. Ces vibrations augmentent la fatigue matérielle des composantes de l'éolienne, ce qui menace ultimement leur durée de vie [9]. De plus, les éoliennes doivent parfois être complètement arrêtées pour éviter la projection de morceaux de glace qui risqueraient d'entraîner des risques de blessures chez les employés travaillant sur les parcs éoliens ou les citoyens résidants près de ceux-ci. Cette manœuvre engendre une perte directe de production énergétique et donc de revenu pour l'opérateur du parc. En termes relatifs, la présence de givre est responsable de pertes annualisées de l'ordre de 25 % sur certains parcs éoliens [2].

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce projet qui a pour objectif de valider le modèle de prévision du givre météorologique GLJM (GEM-LAM-Jones-Makkonen). Cette modélisation est un couplage du modèle GEM-LAM, développé par Environnement Canada (EC), à ceux d'accrétion de la glace de Jones et Makkonen [10], [11], [12], [13], [14]. Des données météorologiques s'étendant sur deux hivers (2013-2014 et 2014-2015) et provenant de trois sites serviront à valider le modèle GLJM. De plus, les prévisions du modèle seront comparées avec le modèle *Weather Research & Forecasting* (WRF), un autre modèle de prévision du givre disponible sur le marché.

L'est du Canada est l'une des régions les plus sévèrement affectées par le givre avec, en entre autres, la péninsule gaspésienne au Québec [15]. Canmet Énergie et le propriétaire ont d'ailleurs installé des capteurs météorologiques et de détection de givre au parc éolien confidentiel. De son côté, le TechnoCentre éolien (TCE), mandaté par Ressources naturelles Canada pour mener à bien l'exécution du projet, opère le Site nordique expérimental en éolien Corus (SNEEC) à Rivière-au-Renard, ainsi qu'un mât de mesure situé à Murdochville [16].

Dans un premier temps, les données disponibles aux trois sites pour les deux hivers ciblés seront analysées afin d'identifier les événements de givre s'y étant produits. Ces événements seront alors classifiés selon le type de givre, la durée, la sévérité et l'intensité dans le but de quantifier la perte de production causée par l'accumulation de givre. Cela permettra d'établir la relation entre l'accumulation de givre et la perte de production.

Ensuite, les événements d'intérêt seront repris dans le modèle de prévision de givre GLJM. La capacité du modèle à bien prévoir l'accumulation de différents types de givre sera établie en comparant les résultats aux conditions réelles des trois sites. Un calcul de perte de production simplifié sera fait et validé en se basant sur les données des sites choisis.

Finalement, la performance du modèle GLJM sera comparée à celle du modèle WRF. Le modèle WRF possède des schémas et paramètres dédiés à la prévision des différents types de givre et est donc couramment utilisé pour la prévision du givre dans l'industrie éolienne.

La comparaison du modèle GLJM à des observations ainsi qu'à un autre modèle permettra l'évaluation qualitative et quantitative de sa capacité à calculer les pertes de production pouvant être engendrées sur les parcs éoliens par des épisodes de givre. Éventuellement, ce modèle pourra être intégré dans un logiciel de prévision du givre distribué aux opérateurs de parcs éoliens en climat froid.

## 1 TYPES ET CLASSIFICATION DU GIVRE

### 1.1 Types de givre

Le givre atmosphérique désigne toute forme d'accumulation de glace ou de neige sur une surface. Celui-ci est principalement causé par les précipitations, comme la pluie verglaçante et la neige fondante, ou encore par le passage de nuages et de brouillard. Les différentes formes de givre atmosphérique peuvent être décrites de la façon suivante [17], [18].

**Givre blanc** : Le givre blanc (Figure 1) est causé par le gel instantané des gouttelettes d'eau surfondues (eau sous forme liquide à des températures inférieures à 0 °C) au contact d'une structure. Ce type de givre se forme le plus souvent dans un milieu nuageux homogène et s'accumulera sur la surface de la structure exposée au vent. La densité de ce type de givre est proportionnelle à la grosseur des gouttelettes d'eau en surfusion. Plus elles sont grosses, plus le givre sera dense. La densité de ce type de givre peut varier de 200 à 900 kg/m<sup>3</sup>. Comme la cristallisation se produit rapidement, beaucoup d'air se retrouve emprisonné dans la glace, formant un aspect irrégulier, blanc, opaque, et friable. Ce type de givre se forme généralement pour des températures allant de 0 °C à -20 °C.

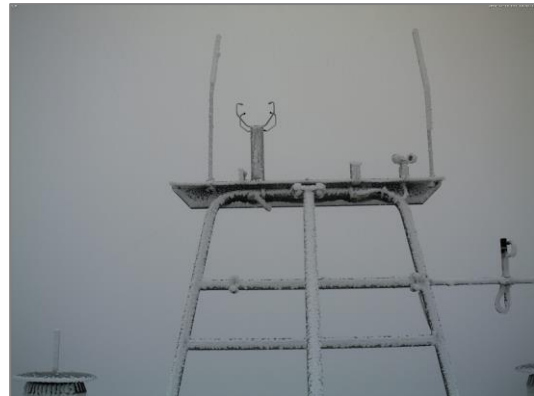


Figure 1 – Exemple de givre blanc observé à Rivière-au-Renard le 2014-12-18

**Verglas** : Le verglas (Figure 2) est causé par différents types de précipitations surfondues qui gèlent au contact d'une structure froide, mais qui, en raison du dégagement de chaleur latente, pourront s'étendre sur la structure avant de geler. Il n'y aura donc pas d'air emprisonné dans la glace. L'aspect du givre sera régulier et transparent, et il ne s'effritera pas. Ce type de givre se produit généralement à des températures allant de 0 °C à -6 °C. Sa densité est d'environ 900 kg/m<sup>3</sup>.



Figure 2 – Exemple de verglas observé à Rivière-au-Renard le 2015-05-13

**Neige fondante** : Lorsque les températures oscillent entre 0 °C à 3 °C, les cristaux de neige avec un contenu en eau élevé peuvent devenir collants au point d’adhérer aux structures. Lorsque la température diminue, l’accumulation de neige fondante gèle pour former du givre avec une densité variant de 300 à 600 kg/m<sup>3</sup>. Visuellement, son aspect se rapproche du givre blanc.

**Gelée blanche** : À des températures très basses, la probabilité de formation du givre s’affaiblit, car les gouttelettes d’eau n’existent plus sous forme surfondue. Toutefois, un autre phénomène peut se produire, soit la condensation solide de la vapeur d’eau contenue dans l’air. Ce type de givre, appelé gelée blanche (Figure 4), se produit lorsque l’humidité relative de l’air est élevée (supérieure à 90 %) et que les vents sont faibles. Bien que ce type de givre soit responsable de pertes par effet de couronne sur les lignes de transmission électriques [4], sa densité et sa force d’adhésion sont faibles, ce qui limite les charges mécaniques imposées aux structures.

**Givre mixte** : Le givre mixte (Figure 3) est une combinaison de différents types de givre résultant du passage d’un nuage responsable de précipitations givrantes.



Figure 4 – Exemple de gelée blanche observée à Rivière-au-Renard le 2015-02-12



Figure 3 – Exemple de givre mixte observé à Rivière-au-Renard le 2014-11-12

## 1.2 Caractéristiques d’un événement de givre

Un événement de givre affecte les infrastructures ou les capteurs qui y sont exposés pendant une période limitée dans le temps. Les événements de givre peuvent se décliner en plusieurs phases.

**Le givre météorologique** : Phase pendant laquelle les conditions atmosphériques sont favorables à l’accumulation de givre. Pendant cette phase, le givre s’accumule sur les infrastructures.

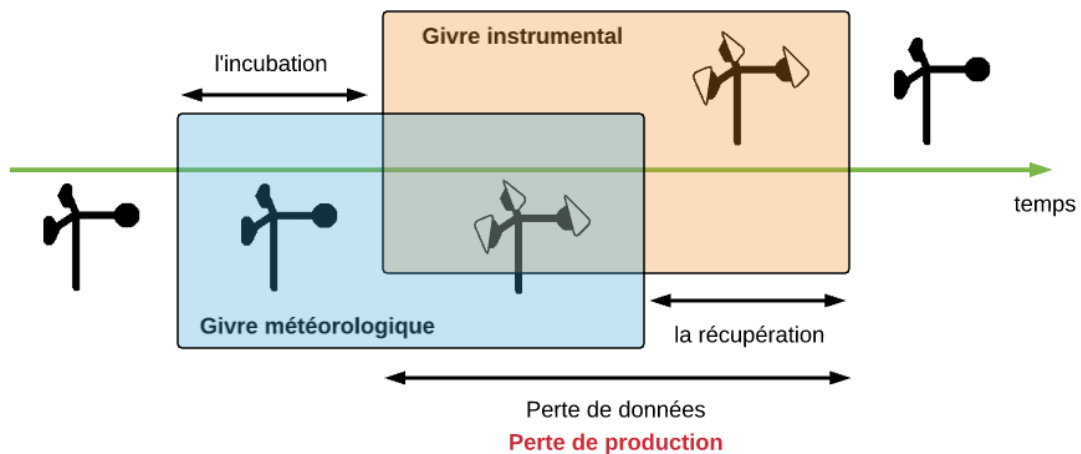
**Le givre instrumental** : Phase pendant laquelle l’accrétion de glace demeure sur une structure. Cette phase est caractérisée par une perturbation du fonctionnement normal des instruments ou

des infrastructures. 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.

**L'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.

**La récupération** : Cette phase succède au givre météorologique. Au cours de cette phase, le givre a cessé de s'accumuler, mais demeure présent sur les infrastructures. La phase de récupération se termine lorsque le givre se détache complètement de la structure ou que l'instrument retrouve son fonctionnement normal.

La figure suivante illustre la progression dans le temps des différentes phases d'un événement de givre.



**Figure 5 – Différentes phases de formation du givre**

Note : Figure adaptée de Baring-Gould [19]

Un événement de givre peut être évalué quantitativement à partir de trois variables.

**La durée** : 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. Pour simplifier l'analyse dans la présente étude, le temps d'incubation est considéré comme nul, c'est-à-dire que le début du givre instrumental coïncide avec le début du givre météorologique.

**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 [17]. Les classes de givre sont un système de classification qui permet de caractériser la sévérité d'un événement de

givre blanc en fonction de la masse linéaire et de la densité du givre. Les classes de givre blanc (ICR) vont de 1 (0,5 kg/m) à 10 (> 50 kg/m). Pour le verglas, qui s'accumule de façon uniforme et possède une densité élevée, les classes (ICG) dépendent de l'épaisseur de la glace et vont de 1 (10 mm) à 6 (> 50 mm).

**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).

### 1.3 Caractérisation d'un site

Le dépôt de givre sur les pales d'une éolienne affecte son fonctionnement. En effet, une éolienne devient moins efficace, car le givre change la forme de la partie de la pale qui entre en contact avec l'air. Le résultat est une production d'énergie moins élevée. Cette perte d'énergie peut être mesurée ou estimée au cours d'une année pour caractériser le site. C'est la raison pour laquelle il existe des méthodes de caractérisation de sites : soit par une mesure de la durée du givre, ou par une mesure de perte de puissance.

Le groupe *Task 19* de l'Agence internationale de l'énergie (IEA) [19] a développé une norme internationale pour standardiser la classification de sites affectés par le givre. Les classes IEA qui apparaissent au Tableau 1 sont basées sur des pourcentages annuels. La présence de givre s'appuie sur la durée du givre météorologique ou instrumental (section 2.2). Les pertes de production sont quant à elles basées sur des pertes estimées pendant des événements de givre.

**Tableau 1 – Classes de givre IEA [19]**

Classe IEA	Givre météorologique	Givre instrumental	Pertes de production
	% de l'année	% de l'année	% de production annuelle
5	> 10	> 20	> 20
4	5-10	10-30	10-25
3	3-5	6-15	3-12
2	0,5-3	1-9	0,5-5
1	0-0,5	< 1,5	0-0,5

Les classes IEA peuvent à l'occasion se chevaucher (Figure 6); il est en effet possible qu'un site ait un pourcentage de pertes le plaçant entre les bornes de deux classes. L'IEA appelle ces classes des « recommandations » et c'est la responsabilité du chercheur d'interpréter la classe selon son expérience. Un site devrait idéalement être caractérisé avec plus d'un an de données.

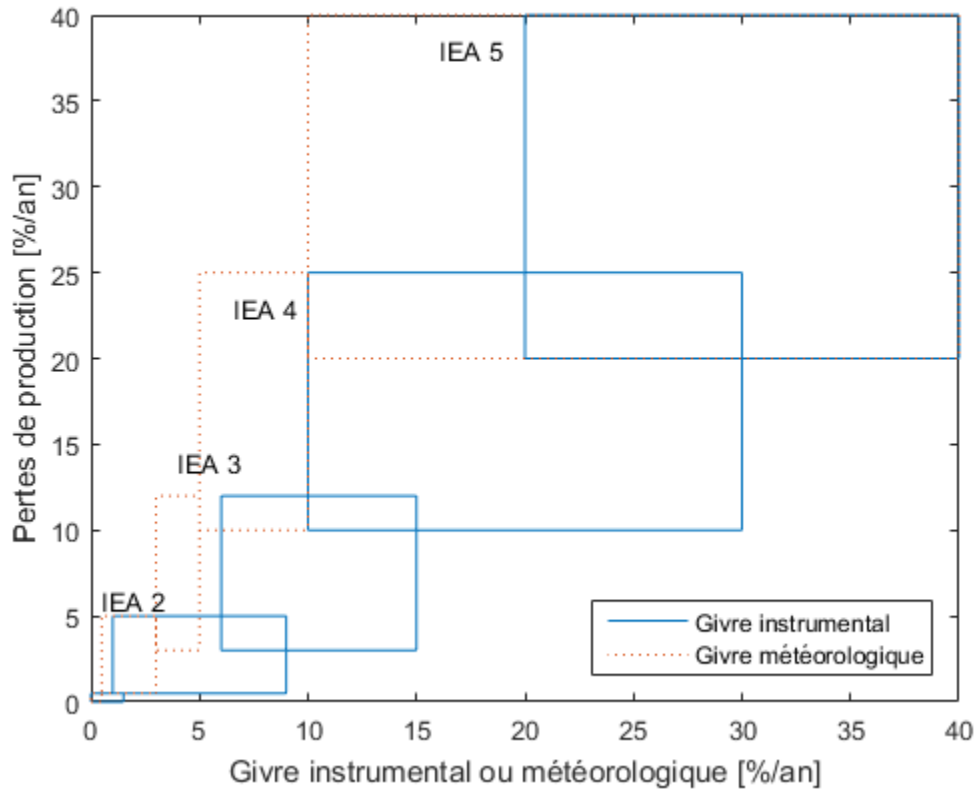


Figure 6 – Classes de givre IEA

## 2 DESCRIPTION DES SITES ET DES INFRASTRUCTURES

Conformément aux exigences du mandat, trois sites devaient être analysés, dont le site du parc éolien confidentiel. Un des deux autres sites devait obligatoirement être un parc éolien doté de données de production d'électricité. Puisque le TechnoCentre éolien (TCE) opère un parc éolien et des mâts météo à Rivière-au-Renard, au Québec, ainsi qu'un mât sur le Mont Needle à Murdochville, les trois sites sélectionnés dans le cadre de cette étude sont ceux de Rivière-au-Renard, de Murdochville et le site confidentiel.

### 2.1 Périodes d'analyse

Ce projet se base sur l'analyse de présence de givre sur deux ans : 2013-2014 et 2014-2015. Étant donné que le givre s'accumule uniquement durant l'hiver, les périodes présentées au Tableau 2 ont été retenues pour l'analyse. Ces dates ont été choisies en fonction des moments typiques d'épisodes de givre sur les trois sites.

Tableau 2 – Périodes d'analyse

Saison	Début (UTC-05)	Fin (UTC-05)
Hiver 1	2013-oct-01 00:00	2014-juin-01 00:00
Hiver 2	2014-oct-01 00:00	2015-juin-01 00:00

### 2.2 Localisation des sites

Le TCE est propriétaire d'infrastructures situées à Murdochville et Rivière-au-Renard, alors que le site confidentiel appartient à un propriétaire confidentiel. Les données utilisées dans cette étude proviennent de deux types d'infrastructures, soit des éoliennes ou des mâts de mesure météorologique. L'ensemble des informations sur le type d'infrastructure disponible par site, leur nom et propriétaire est présenté dans le Tableau 3.

**Tableau 3 – Informations sur les infrastructures**

Site	Type d'infrastructure	Nom de l'infrastructure	Propriétaire
Murdochville (Québec)	Éolienne	N/D <sup>1</sup>	NextEra
	Mât de mesure	TMV2	TCE
Rivière-au-Renard (Québec)	Éolienne	WEC1	
	Mât de mesure	MMV2	
	Mât de mesure	MMV1	
Site confidentiel	Éolienne	Confidentiel	
	Mât de mesure	Confidentiel	

<sup>1</sup>Il existe un parc éolien sur le Mont Copper, près de Murdochville, mais le TCE n'en est pas propriétaire et n'a pas accès aux données.

Le Tableau 4 présente les coordonnées géographiques des sites et les positions approximatives utilisées dans les modèles. La carte de localisation des sites est présentée à l'Annexe A. Les modèles climatiques ne génèrent pas des données à tout endroit sur la planète, mais plutôt à certains points prédéterminés, appelés points de grille, qui dépendent de la résolution du modèle (des détails sur les grilles de modélisation se retrouvent dans la section 3.2.1). Les positions utilisées pour la modélisation du givre sur les différents sites d'étude sont donc des positions approximatives, prises au point de grille du modèle se rapprochant le plus de la position réelle. L'altitude modélisée des sites est conséquemment différente de l'altitude réelle, car elle correspond à l'altitude du point de grille le plus proche, et non à celle du site réel.

**Tableau 4 – Positions réelles et approximatives des structures étudiées**

Positions	Variable	Rivière-au-Renard	Murdochville	Site confidentiel
Réelles	Latitude (°)	49,00	48,94	47,46
	Longitude (°)	-64,46	-65,51	-66,42
	Altitude (m)	325	900	630
GEM-LAM maritime et continentale	Latitude (°)	48,98	48,90	47,45
	Longitude (°)	-64,46	-65,52	-66,43
	Altitude (m)	171	587	571
ERA-Interim	Latitude (°)	49,00	49,00	47,50
	Longitude (°)	-64,50	-65,50	-66,38
	Altitude (m)	110	246	260
WRF	Latitude (°)	49,00	48,96	47,46
	Longitude (°)	-64,44	-65,52	-66,42
	Altitude (m)	110	634	571

### 2.3 Infrastructures et capteurs

Des éoliennes MM92 CCV de Senvion et des V90/3000 de Vestas sont respectivement installées sur le site de Rivière-au-Renard et le site confidentiel (Tableau 5). Pour le site de Murdochville, aucune donnée d'éolienne n'est disponible, cependant des éoliennes Vestas V80/1800 sont installées à proximité du mât de mesure TMV2.

**Tableau 5 – Caractéristiques des éoliennes installées à Rivière-au-Renard et au site confidentiel**

Caractéristique	Rivière-au-Renard	Site confidentiel	Murdochville
Hauteur (m)	80		
Puissance nominale	2,05 MW	3 MW	1,8 MW
Développeur	TCE	Confidentiel	Northland Power Income Fund / 3Ci Inc
Opérateur	TCE	Confidentiel	NextEra Energy Canada
Propriétaire	TCE	Confidentiel	NextEra Energy Canada
Modèle	MM92 CCV de Senvion	Vestas V90/3000	Vestas V80/1800

Le Tableau 6 présente la liste des capteurs installés sur les éoliennes de Rivière-au-Renard et sur celles du site confidentiel.

**Tableau 6 – Caractéristiques des capteurs installés sur les éoliennes**

Site	Capteur	Modèle
Rivière-au-Renard	Anémomètre à coupelle non chauffé	Thies clima- 4.3519.00.141
	Anémomètre et girouette ultrasoniques chauffés (senseur de référence)	Thies Ultrasonic 2D
	Caméra nacelle	Mobotix - M12D-Sec-DNight
Site confidentiel	Anémomètre et girouette	N/D
	Thermomètre	N/D

Les configurations détaillées des mâts de Rivière-au-Renard, Murdochville et du site confidentiel sont respectivement présentées dans les tableaux en Annexe B.

Le Tableau 7 présente les caractéristiques des détecteurs de givre installés sur MMV1 à Rivière-au-Renard à une hauteur de 82 m au-dessus du sol.

**Tableau 7 – Caractéristiques des détecteurs de givre**

Caractéristique	Goodrich 0872F1	Labkotech LID-3300IP *	Combitech IceMonitor
Mode de fonctionnement	Fréquence naturelle de vibration	Variation de l'ultrason et système de chauffage	Capteur de force
Signal minimum	0 mm	0	0 kg/m
Signal maximum	25 mm	100	20 kg/m
Précision	0,13 mm	1	0,05 kg/m
*Signal qui varie entre 100 (pas de givre) et 0 (maximum de givre)			

### 3 PORTÉE DU PROJET

Ce projet porte sur l'évaluation du modèle GLJM à partir d'analyse d'observations et de sorties du modèle WRF pour trois sites situés dans l'est du Canada. Le projet est divisé en trois tâches distinctes résumées à la Figure 7 : l'évaluation d'événements de givre observés; la modélisation de ces événements avec GLJM; et la modélisation de ces mêmes événements avec WRF. La présente section détaille le contexte et la méthodologie pour chacune de ces tâches.

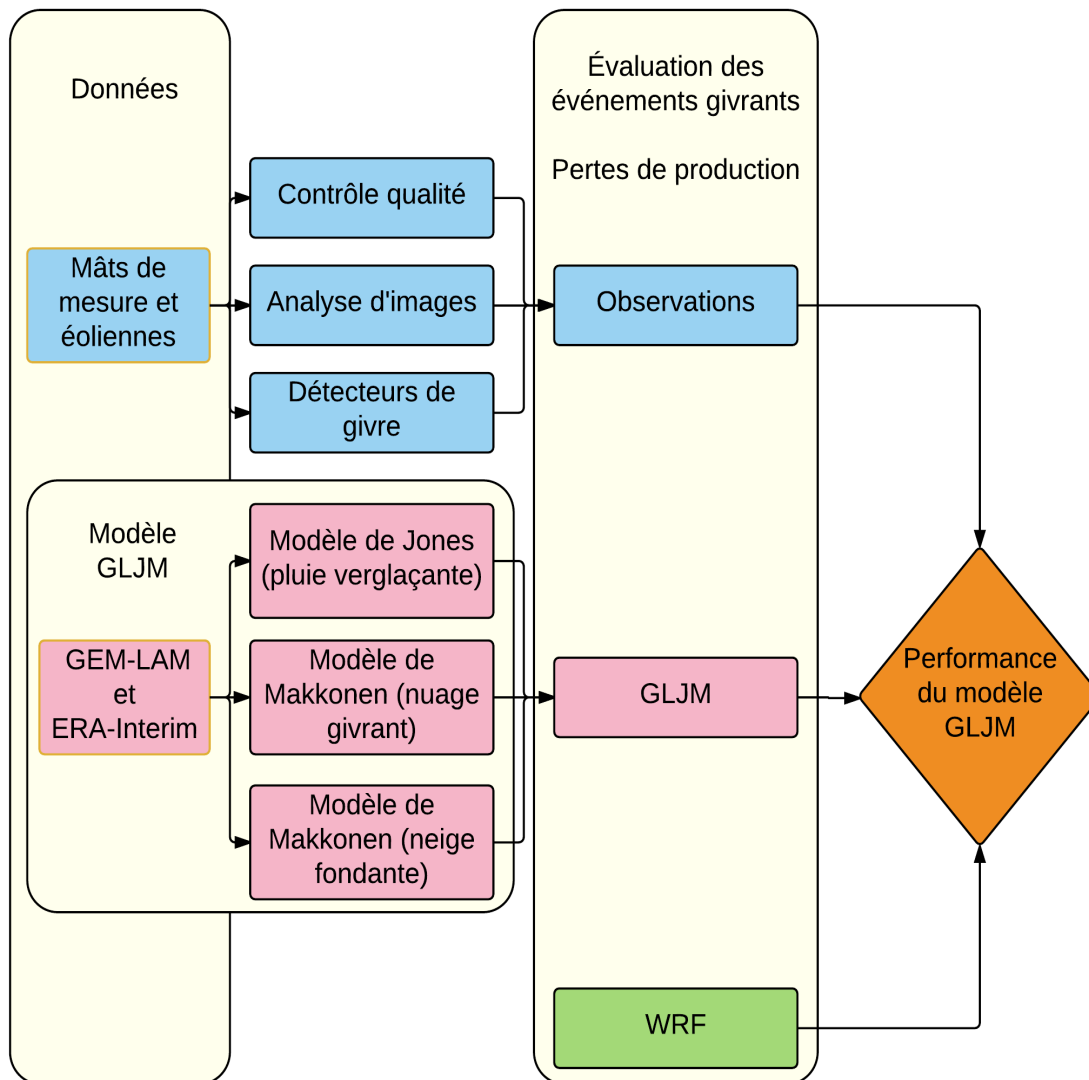


Figure 7 – Résumé des différentes étapes pour évaluer la performance du GLJM

Note : La tâche 1 (section 3.1) est représentée par les éléments bleus, la tâche 2 (section 3.2) par les éléments roses, et la tâche 3 (section 3.3) par l'élément vert.

### 3.1 Tâche 1 : Évaluation des événements de givre

La tâche 1 consiste à déterminer, à partir des observations, les événements de givre sur chaque site, à les classer selon le type de givre accumulé (section 1.1), et à les quantifier en termes de durée, de sévérité, d'intensité, et de pertes de production. Les événements identifiés lors de la tâche 1 seront modélisés lors des tâches 2 et 3 afin d'évaluer le modèle GLJM.

Le traitement des événements se fait en deux étapes distinctes : l'identification des événements, et leur évaluation. L'identification signifie la détermination du début et de la fin d'un épisode où il y a présence confirmée de givre. Pour ce faire, trois méthodes sont utilisées : le contrôle qualité (section 3.1.1), l'analyse d'images (section 3.1.2), et les détecteurs de givre (section 3.1.3). Chacune des méthodes de détection de givre a ses avantages et ses limites (Tableau 8); elles sont donc utilisées conjointement. Étant donné les différents avantages et limites des méthodes, il n'y a souvent pas de consensus sur les durées des événements. Par conséquent, le contrôle qualité sert à identifier les périodes potentielles qui sont ensuite confirmées par l'analyse d'images. Les détecteurs de givre sont utilisés comme méthode alternative dans les cas où l'analyse d'images n'est pas concluante. La liste finale contient les événements de givre confirmés.

**Tableau 8 – Avantages, limites et utilité des méthodes de détection de givre**

Méthode	Avantages	Limites	Utilité
Contrôle qualité	Détecte le givre instrumental Grande disponibilité de la donnée	Ne détecte pas le givre météorologique ni le type de givre	Identification d'événements
Analyse d'images	Permet de détecter le givre météorologique et instrumental ainsi que le type de givre	Qualité et disponibilité des images	Identification et évaluation d'événements
Détecteur de givre	Très sensible à la présence de givre, certains peuvent détecter givre météorologique et instrumental	Ne détecte pas le type de givre	Identification d'événements

Une fois les événements identifiés, la deuxième étape consiste à les évaluer d'après les facteurs énumérés au début de cette section : la durée, la sévérité, et l'intensité de givre (section 1.2); et les pertes de production (section 1.3). La durée est simplement la durée de l'événement. L'analyse d'images (section 3.1.2) sert à évaluer la sévérité et l'intensité du givre. Finalement, les pertes de production sont évaluées avec la méthode de courbe de puissance décrite à la section 3.1.4.

### 3.1.1 Contrôle qualité des données

Le contrôle de qualité s'appuie sur les critères suivants pour valider les données des mâts de mesure et des éoliennes :

- Continuité des données;
- Intervalles météorologiques acceptables;
- Occurrence de vitesse du vent inférieure à 3 m/s;
- Variations temporelles acceptables des données météorologiques;
- Établissement de statuts pour des conditions météorologiques spéciales (givre, vent faible, température très basse et absence de nuage).

Les étapes de vérification suivantes sont effectuées pour qualifier les critères précédents :

1. Contrôle des opérations;
2. Contrôle de l'étendue;
3. Contrôle des tendances;
4. Comparaisons croisées;
5. Observations;
6. Analyses professionnelles.

L'Annexe C présente plus en détail les différents processus du contrôle qualité. Ce processus de contrôle qualité consiste à accepter la donnée, la rejeter ou à lui attribuer un code en cas de conditions météorologiques particulières. Les données contrôlées qui ont échoué aux étapes 1 à 3 ne sont pas utilisées dans les analyses subséquentes. Par contre, elles peuvent être utilisées si elles sont causées par une condition météorologique spécifique, comme le givre, par exemple.

Le Tableau 9 résume la procédure de détection du givre à l'aide de la puissance de l'éolienne, la vitesse et la direction du vent. Il faut noter que ces tests sont efficaces si le capteur ultrasonique chauffé (vitesse et direction du vent) fonctionne correctement.

**Tableau 9 – Récapitulatif des tests de détection de givre avec le contrôle qualité**

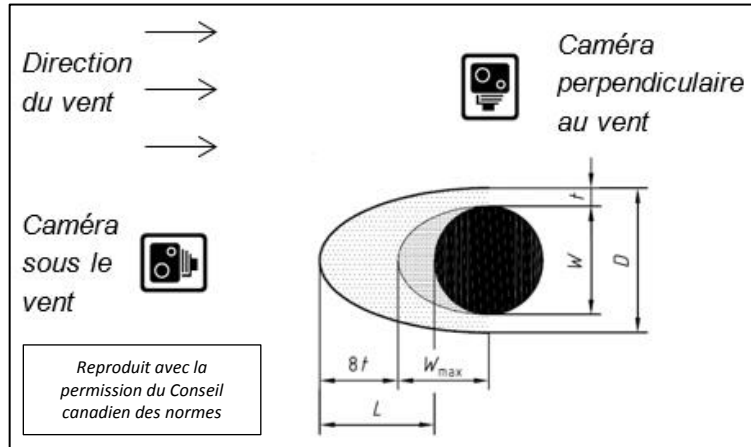
Test	Description	Critères
Vitesse	Anémomètre non chauffé (à coupelle) vs capteur chauffé de référence (ultrasonique)	Référence chauffée $\geq 4$ m/s Référence chauffée $\geq 1,2 \times$ non chauffée
	Anémomètre chauffé (à coupelle) vs capteur chauffé de référence (ultrasonique)	Référence chauffée $\geq 4$ m/s Référence chauffée $\geq 1,2 \times$ chauffée
Puissance de l'éolienne	Test sur courbe de puissance et vitesse du vent (ultrasonique)	Puissance produite < puissance garantie ou calculée
Direction	Girouette non chauffée vs capteur chauffé de référence (ultrasonique)	Référence chauffée $\geq 4$ m/s Écart type non chauffé < 3 °C ou < $1/3 \times$ écart type chauffé référence
	Girouette chauffée vs capteur chauffé de référence (ultrasonique)	Référence chauffée $\geq 4$ m/s Écart type chauffé < 3 °C ou < $1/3 \times$ écart type chauffé référence
Note : Pour tous les tests, la température ambiante doit être inférieure à 1°C		

Le contrôle qualité permet d'identifier les événements givrants. Le début et la fin de ces événements sont déterminés par l'obtention de résultats positifs sur les tests de vitesse et de direction du vent. Compte tenu des limites du contrôle qualité, les événements identifiés doivent être confirmés par l'analyse d'images. De plus, si la qualité des images est inadéquate pour être analysée, ces événements doivent être confirmés par les détecteurs de givre.

### 3.1.2 Analyse d'images

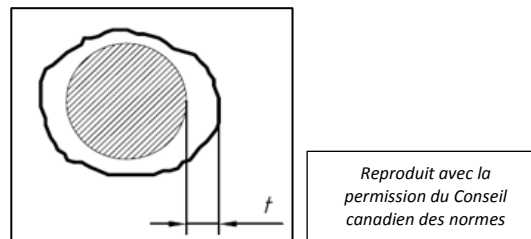
La présence de givre sur une éolienne ou un mât de mesure peut également être confirmée par l'analyse d'images obtenues par les caméras placées sur les éoliennes ou les mâts de mesure. La méthodologie utilisée pour la mesure de l'accrétion de glace à l'aide d'images est basée sur la norme ISO12494 [17] et décrite par Bolduc et al. [20].

Pour le givre blanc, la méthodologie consiste à mesurer la dimension de l'accrétion de glace sur un tube de référence, puis à calculer la charge de glace et la classe de givre (ICR) en se basant sur l'hypothèse que la vue en coupe d'une accumulation de givre blanc prend une forme elliptique et qu'il possède une densité de  $600 \text{ kg/m}^3$ . La Figure 8 illustre le profil utilisé pour le givre blanc et la configuration possible des caméras.



**Figure 8 – Vue en coupe d’un profil elliptique de givre blanc comme décrit dans la norme ISO12494 [17] et positionnement des caméras**

Pour le verglas, la méthodologie et le positionnement des caméras sont similaires. La charge et la classe de givre (ICG) se basent toutefois sur l’hypothèse que le verglas s’accumule de façon uniforme autour du tube et qu’il possède une densité de  $900 \text{ kg/m}^3$  (Figure 9).

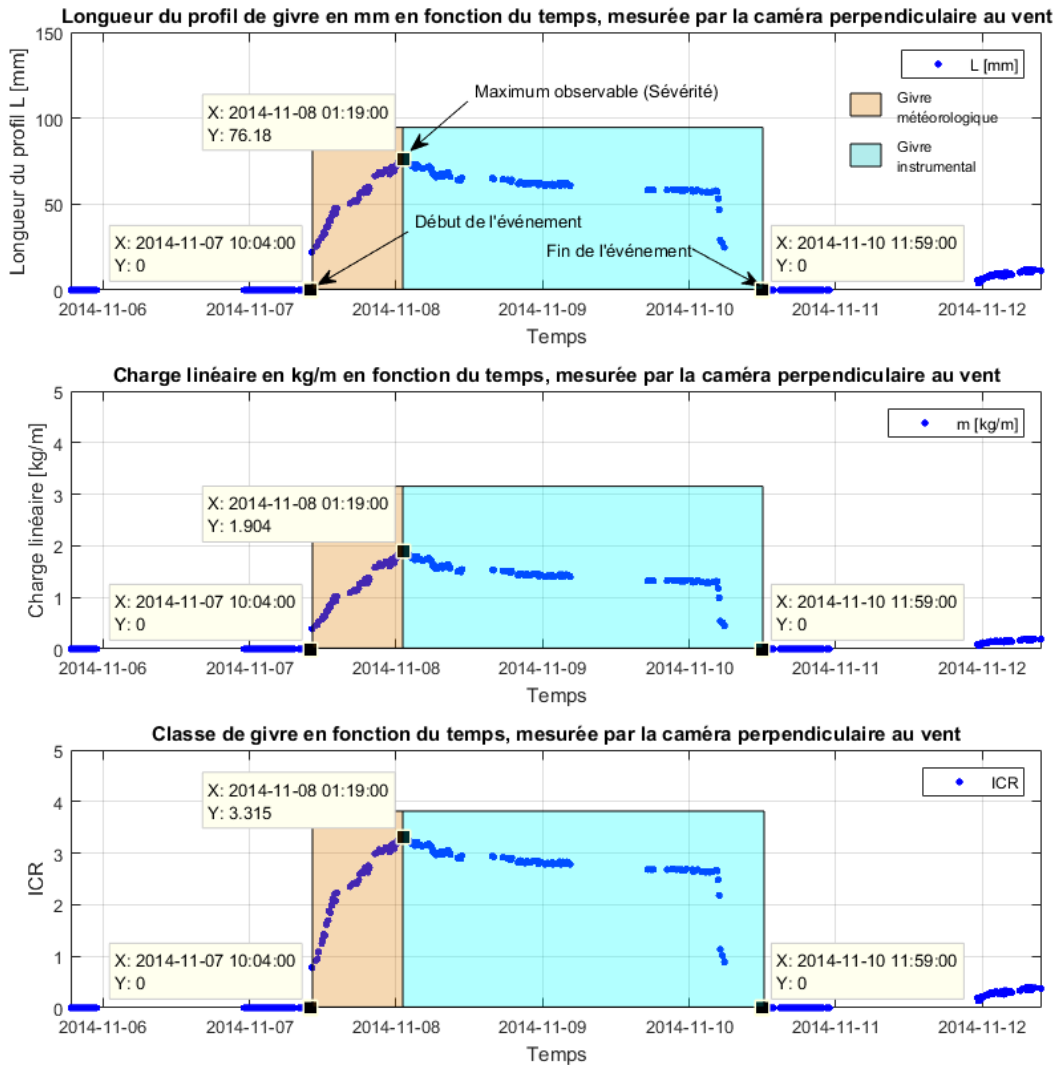


**Figure 9 – Vue en coupe d’un profil uniforme de verglas comme décrit dans la norme ISO12494 [17]**

Les équations détaillées permettant de calculer la charge et la classe de givre selon le type de givre et la dimension mesurée (annexe A de la norme ISO12494 [17]). Ces équations permettent de mesurer les caractéristiques du givre sur chacune des images. Le type de givre d’un événement donné est quant à lui évalué professionnellement selon l’aspect du givre sur les images.

L’évolution d’un événement de givre dans le temps peut être analysée à partir d’une série d’images prises à des intervalles de 5 ou 10 minutes. Le moment où le givre commence à s’accumuler sur le tube de référence correspond au début de l’événement, soit le début du givre météorologique. La phase de givre météorologique se poursuit tant que l’accrétion de glace augmente. La sévérité de l’événement correspond au point où la longueur, la charge et la classe de givre sont à leur maximum. À partir du moment où la mesure de givre est stable, l’événement passe à la phase de givre instrumental. La fin de l’événement correspond au

moment où la glace tombe du tube de référence, c'est à dire quand la mesure revient à zéro. Un événement peut être composé de plusieurs phases successives de givre météorologique et instrumental. La Figure 10 illustre les différentes phases d'un événement de givre identifiées à partir de la mesure de givre sur un tube de référence.



**Figure 10 – Évaluation de la durée, des phases et de la sévérité d'un événement de givre à l'aide des résultats de l'analyse d'images**

Une fois les différentes phases et la sévérité identifiées, l'intensité moyenne de l'accrétion de glace peut être calculée. Celle-ci correspond au taux de variation de la charge linéaire de glace entre le début de l'événement et le moment où la charge est maximale. La Figure 11 illustre la méthodologie employée pour le calcul de l'intensité de l'événement présenté à la Figure 10. Dans cet exemple, la masse linéaire atteint 1,9 kg/m en 15 heures et 15 minutes, pour une intensité de :

$$\text{Intensité} = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{1,9 \text{ kg/m}}{15,25 \text{ h}} = 0,125 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{h}}$$

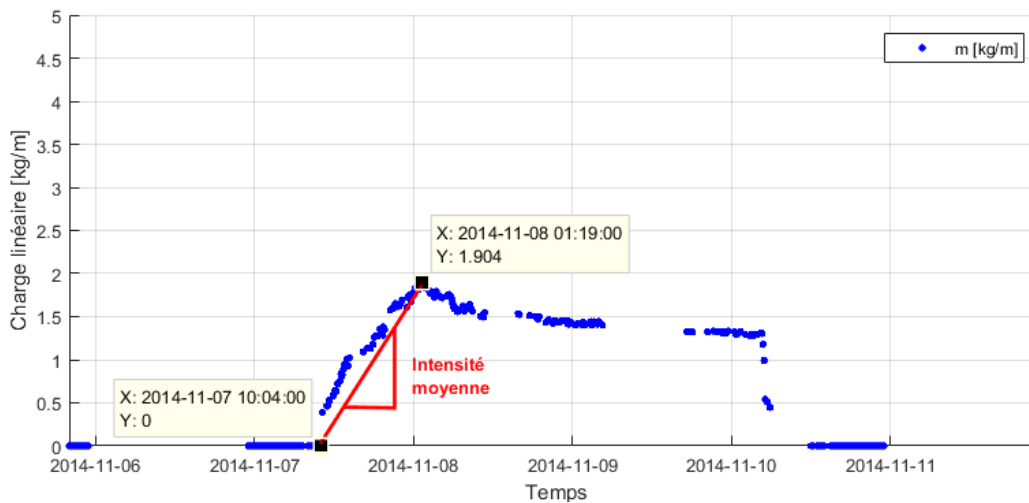


Figure 11 – Exemple de calcul de l'intensité moyenne d'un événement de givre

La précision de la mesure de givre à partir de l'analyse d'images dépend de la résolution de la caméra utilisée. Plus la résolution est élevée, plus l'échelle de conversion entre les pixels et les millimètres est petite. La précision est également affectée par la position de la caméra selon que celle-ci est placée sous le vent ou perpendiculairement au vent. Finalement, la fréquence d'enregistrement des images a un impact sur le nombre d'images disponibles durant les périodes à l'étude. Le Tableau 10 présente les caractéristiques de chacune des caméras utilisées pour l'évaluation du givre.

**Tableau 10 – Caractéristiques des caméras utilisées pour l’analyse d’images**

Site	Caméra	Résolution [MPx]	Orientation par rapport au vent	Fréquence d’enregistrement [min]	Dimension du tube de référence [mm]	Échelle [mm/px]
Rivière-au-Renard	MMV2 Caméra Dôme	0,92	Sous le vent	30	35	2,1
Rivière-au-Renard	MMV1 Caméra Dôme	0,36	Perpendiculaire au vent	10	35	3,27
Rivière-au-Renard	WEC002 Caméra Nacelle	3,15	Sous le vent	5	48,5	1,2
Murdochville	TMV2 Caméra Sol	0,31	Perpendiculaire au vent	5	38,1	10
Murdochville	TMV2 Caméra Sommet	0,34	Sous le vent	5	38,1	2

### 3.1.3 Détecteurs de givre

Les détecteurs de givre sont utilisés comme méthode alternative d’identification des événements de givre lorsque l’analyse d’images est non concluante. Ces détecteurs ont des signaux qui varient selon la sévérité de givre pendant les phases de givre météorologique ou instrumental (Tableau 7). Cependant, leurs signaux sont utilisés pour identifier la présence de givre seulement. À ce sujet, le Tableau 11 présente les conditions des tests.

**Tableau 11 – Conditions des tests sur détecteurs de givre**

Détecteur de givre	Condition de test
Goodrich	supérieur à 1 mm
Labkotech	inférieur à 60
Combitech	supérieur à 0,2 kg/m

Dès que le signal d’un détecteur respecte la condition de test qui lui est associée, le test est considéré comme positif et le givre est détecté. Ce point peut ensuite marquer, au besoin, le début d’un événement de givre.

La Figure 12 illustre un exemple de détection de givre durant la deuxième semaine du mois de novembre 2014 à Rivière-au-Renard. Comme le démontre la figure, les périodes de détection de givre varient selon le capteur utilisé. Si au moins un des tests est positif, la présence de givre est confirmée. Ainsi, les détecteurs de givre peuvent pallier un problème de manque de données provenant de l'analyse d'images.

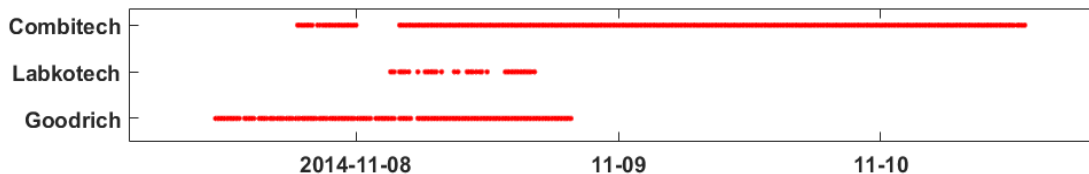


Figure 12 – Critères respectés pour différents capteurs de givre durant la deuxième semaine du mois de novembre 2014 à Rivière-au-Renard

### 3.1.4 Détermination de la perte d'énergie

Une fois les événements identifiés, la perte d'énergie peut être calculée entre le début et la fin de chacun d'entre eux. La perte d'énergie est évaluée à l'aide de la courbe de puissance de référence pour les éoliennes décrites au Tableau 5. Voici les étapes pour calculer les pertes :

1. Une courbe de puissance de référence est calculée avec des données non givrées. Selon la norme IEC 61400-12-1 [21], une courbe de puissance est calculée pour un vent allant de 0,5 m/s à 25,0 m/s, par regroupement de 0,5 m/s. Les puissances mesurées simultanément à chaque vitesse de vent dans un regroupement sont moyennées pour arriver à une courbe qui prévoit la puissance produite par l'éolienne à chaque vitesse de vent.
2. La puissance calculée est déterminée pour chaque donnée de vitesse de vent à partir de la courbe de référence.
3. L'énergie réelle (en MWh) est calculée en sommant la puissance produite à chaque intervalle de 10 minutes. Un calcul similaire est employé pour estimer l'énergie à partir des puissances calculées précédemment.
4. Les *pertes brutes* sont calculées en soustrayant l'énergie réelle de l'énergie calculée.
5. Les *pertes dues au givre* sont calculées en tenant compte des pertes brutes lors d'événements de givre confirmés.
6. Les *pertes maximales* sont aussi estimées en supposant que l'éolienne s'arrête complètement dès qu'il y a du givre instrumental.

Les pertes sont calculées pour une seule éolienne à chaque site, indépendamment du nombre d'éoliennes qui y sont installées. Dans les cas où les données de puissance ne sont pas disponibles, la courbe publiée dans les spécifications du fabricant est utilisée à la place

d'une courbe calculée [22], [23]. C'est le cas pour le site de Murdochville et le site confidentiel. Au site de Murdochville, les spécifications de la Vestas V80/1800 ont été utilisées parce que le TCE n'en est pas propriétaire et n'a pas accès aux données. Au site confidentiel, les spécifications de la **Vestas V90/3000** ont été utilisées pour la modélisation avec WRF (section 3.3) parce que les données de ce site n'ont pas été fournies à temps. Cette même courbe a donc été utilisée pour calculer les pertes avec le modèle GLJM (section 3.2) et les observations. Les courbes de puissance de référence utilisées se trouvent à la Figure 13.

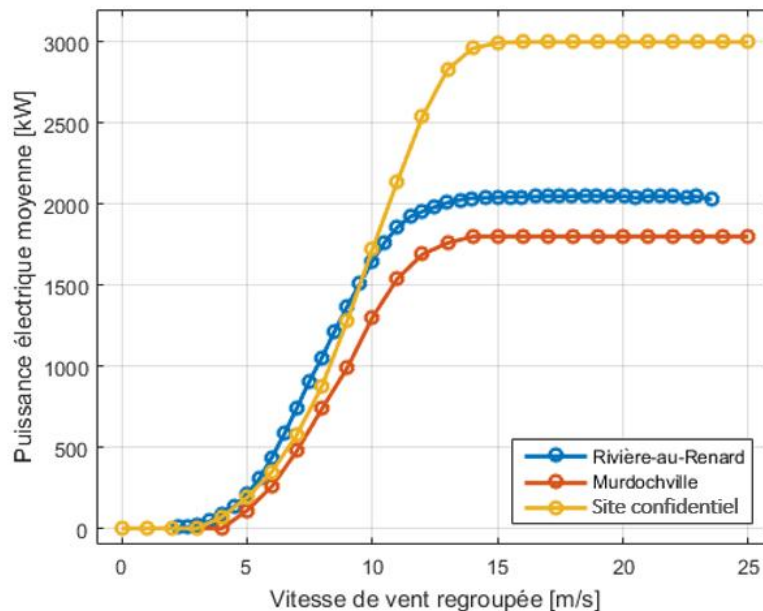


Figure 13 – Courbes de puissance de référence pour chaque site

Les pourcentages de pertes annuelles sont aussi estimés. La production annuelle est estimée avec l'équation suivante :

$$AEP = FU * W_{nom} * 8760$$

Ici,  $AEP$  est la production annuelle d'énergie (*Annual Energy Production*),  $FU$  est le facteur d'utilisation,  $W_{nom}$  est la production nominale (maximale) de l'éolienne, et 8760 est le nombre d'heures dans une année. Le facteur d'utilisation (typiquement autour de 35 % [24]) est le pourcentage d'énergie réellement produit par rapport à son potentiel maximum (où l'éolienne produirait à sa puissance maximale durant toute une année). À Rivière-au-Renard, le facteur d'utilisation ( $FU$ ) se situe autour de 37 %; pour le site confidentiel, un  $FU$  de 40 % est supposé; et pour Murdochville, un  $FU$  de 45 % est supposé. Ces deux derniers sont basés sur la distribution de vent.

### 3.2 Tâche 2 : Modélisation du givre avec le modèle GLJM

L'objectif de la tâche 2 consiste à valider le modèle GLJM au moyen de comparaisons avec les observations de givre identifiées à la tâche 1. Le GLJM est composé d'un modèle de prévision météorologique couplé à deux modèles d'accumulation de givre, permettant de prévoir l'accumulation de givre et de calculer les pertes d'énergie engendrées.

D'abord, le *Global Environmental Multiscale Limited-Area Model* (GEM-LAM) est utilisé pour obtenir les champs météorologiques de base (température, vent, précipitation, humidité de l'atmosphère, paramètres des nuages, etc.). Deux modèles d'accumulation de givre utilisant ces champs météorologiques sont par la suite utilisés : le modèle de Jones [11] et le modèle de Makkonen [12]. Ce couplage de modèles est fortement inspiré de l'article de Yang et al. [10] sur la modélisation du givre pour l'évaluation des pertes d'énergie dans une centrale éolienne.

#### 3.2.1 Données météorologiques

Les données utilisées proviennent des simulations météorologiques du modèle canadien à aire limitée GEM-LAM [25], [26]. Un modèle météorologique permet de résoudre les équations très complexes qui régissent les mouvements atmosphériques pour arriver à prévoir le comportement futur des champs météorologiques. Un modèle à aire limitée, quant à lui, est un modèle dont la grille de calcul ne couvre qu'une portion restreinte de la planète. Son avantage est de raffiner les résolutions horizontale, verticale et temporelle et d'augmenter ainsi la précision des résultats [27]. Le GEM-LAM est un modèle de méso-échelle, c'est-à-dire qu'il est capable de représenter les phénomènes météorologiques d'une étendue spatiale allant d'environ 2 km à 2 000 km. Il offre des prévisions disponibles à chaque heure, avec une résolution spatiale horizontale de 2,5 km. Cette résolution est assez précise pour être utilisée dans des modèles d'accumulation de givre et donner des résultats représentatifs des sites d'intérêt.

Les données météorologiques utilisées proviennent de simulations opérationnelles archivées par Environnement Canada. Elles sont faites sur des grilles différentes pour les deux hivers d'étude; ce changement de grille est dû au changement de disponibilité des prévisions faites par Environnement Canada. La première grille est la LAM Maritime, centrée sur l'est du Canada, et la deuxième grille est la LAM Continentale, englobant tout le Canada, et toutes deux ont une résolution horizontale de 2,5 km. De plus amples détails sur les grilles sont disponibles sur le site d'Environnement Canada [28].

Le contenu en eau liquide est une des variables météorologiques nécessaires au calcul de l'accumulation de givre. Toutefois, cette variable n'est pas une donnée disponible de GEM-LAM. Pour pallier ce problème, sa valeur est tirée des réanalyses ERA-Interim [29], [30]. Les réanalyses sont des produits météorologiques du passé, où des sorties de modèles et des

observations sont combinées de façon à donner la meilleure représentation possible de la réalité passée. Les données ERA-Interim ont une résolution horizontale d’approximativement 80 km et un pas de temps de 6 heures. Certaines conversions, interpolations et approximations se sont avérées nécessaires pour pouvoir les utiliser dans les modèles de Jones et de Makkonen (Annexe D).

Le Tableau 12 résume la provenance des données utilisées dans le modèle GLJM.

**Tableau 12 – Provenance des données utilisées dans le modèle GLJM**

2013-10-01 au 2014-05-31 et 2014-10-01 au 2014-11-18	GEM-LAM Maritime	Température Vent Précipitations Radiations solaires et terrestres Densité de l’air
	ERA-Interim	Contenu en eau liquide
2014-11-19 au 2015-05-31	GEM-LAM Continentale	Température Vent Précipitations
	ERA-Interim	Contenu en eau liquide

Dans les données du GEM-LAM Continentale, la densité de l’air et les radiations solaires et terrestres ne sont plus disponibles. La densité de l’air disponible pour l’hiver 2013-2014 avec GEM-LAM Maritime est utilisée pour calculer une densité de l’air moyenne mensuelle pour chacun des trois sites. C’est cette valeur moyenne qui est utilisée dans GLJM pour les deux hivers à l’étude. Les radiations solaires et terrestres nettes ne sont pas étudiées pour le deuxième hiver.

### 3.2.2 Modèles d’accumulation de givre

Deux modèles de givre sont utilisés pour calculer l’accumulation uniforme de givre sur un cylindre : le modèle de Jones et le modèle de Makkonen. Les détails des équations des modèles sont présentés à l’Annexe E.

Le modèle de Jones calcule l’accumulation de givre due à la pluie verglaçante. L’accumulation de givre dépendra du taux de précipitation de pluie verglaçante, du taux de précipitation de pluie (pour une température atmosphérique inférieure à 2 °C) et de la vitesse du vent.

Le modèle de Makkonen calcule l'accumulation de givre due au passage d'un nuage givrant composé de gouttelettes d'eau surfondue. L'accumulation de givre dépendra de la température (inférieure à 0 °C), du contenu en eau liquide du nuage, des paramètres d'efficacité de collision, d'adhérence et d'accrétion des gouttelettes surfondues et de la vitesse du vent.

Le modèle de Makkonen calcule également l'accumulation de givre due à la neige fondante. L'accumulation de givre dépendra des concentrations de masse de neige, de pluie, de cristaux de glace et de pluie verglaçante qui constituent la neige fondante. L'accumulation dépendra également des paramètres d'efficacité de collision, d'adhérence et d'accrétion de la neige fondante, de la vitesse du vent et de la vitesse terminale des flocons de neige.

### **3.2.3 Sélection et correction des données**

Les données du modèle GEM-LAM ont été comparées aux observations. Pour les trois sites d'étude, la température, le vent, l'humidité relative et la pression au niveau de la mer ont été comparés aux valeurs instrumentales enregistrées. Le GEM-LAM arrive à capturer les conditions atmosphériques caractérisant les trois sites au cours du temps. Cependant, étant donné la différence d'altitude entre la position réelle des sites et la position modélisée (Tableau 4), le vent modélisé est trop faible et la température modélisée est trop élevée. Pour corriger ces deux biais systématiques, une méthode de mesure-corrélation-prédiction (régression linéaire) est appliquée aux valeurs modélisées à 120 m au-dessus de la surface du sol pour chaque mois, aux trois sites (Annexe F). Cette hauteur est la plus haute disponible dans GEM-LAM, donc la plus près de la hauteur des observations.

Il y a également une différence d'altitude entre la position réelle des sites et la position modélisée par ERA-Interim. Par exemple, pour Murdochville, la surface est modélisée à 246 m alors qu'elle est réellement à 900 m. Le contenu en eau liquide est donc pris à 714 m au-dessus de la surface. Il a été prouvé par Nygaard [31] que cette supposition représente le mieux l'état réel de l'atmosphère et permet d'obtenir des accumulations de givre le plus près des observations.

### **3.2.4 Paramètres calculés**

Les données de GEM-LAM, incluant celles corrigées, et la donnée de ERA-Interim sont utilisées comme paramètres d'entrée dans les modèles de Jones et de Makkonen.

Les événements de givre observés aux trois sites d'étude sont modélisés à partir de leurs dates d'occurrence observées. Les résultats suivants sont analysés : les dates de début et de fin et la durée totale de l'épisode, sa sévérité, son intensité, la charge totale de givre accumulée, le type de givre, la classe ICR, la perte de production, et finalement la classe IEA.

Les dates de début et de fin délimitent la durée de l'événement de givre météorologique. L'accumulation totale de givre est modélisée comme une accréation de glace distribuée uniformément autour d'un cylindre. La charge est calculée à partir de l'accumulation totale de givre et de sa densité modélisée, et le taux est calculé comme la variation temporelle de la charge. Le type de givre est classifié selon les catégories présentées à la section 1.1. La classe ICR est identifiée avec la norme ISO12494 par rapport à la masse totale de givre accumulée durant l'événement (section 3.1.2). Selon la méthode décrite à la section 3.1.4, la perte de production est calculée comme une perte totale d'énergie produite dès qu'il y a accumulation de givre. Finalement, la classe IEA est déterminée pour chaque site à partir des totaux annuels de durée des événements de givre météorologique et de perte de production (section 1.3).

### **3.2.5 Limitations de la modélisation**

En ce qui concerne la précision des résultats obtenus, plusieurs limitations par rapport aux sources de données météorologiques méritent d'être mentionnées. Les variables de base utilisées ont été prises à des points de grille situés à proximité des sites d'étude (mais pas exactement au même endroit). Pour les données GEM-LAM, elles peuvent avoir été prises à plus d'un kilomètre. Le contenu en eau liquide provenant de ERA-Interim peut avoir été pris à un point de grille situé à plus de 40 km du site; on peut donc s'attendre à ce que sa valeur soit représentative des systèmes de grande échelle (dépressions, fronts, etc.), mais peu représentative des effets locaux.

De plus, le givre est modélisé comme s'accumulant de manière uniforme sur toute la circonférence d'un cylindre, alors qu'en réalité, certains types de givre s'accumulent de manière presque unidirectionnelle, face au vent. Certains aspects météorologiques ont également été négligés :

- Les effets complexes de la radiation sur une pale en rotation;
- Le profil vertical de la température, qui peut influencer sur le type de précipitation à la hauteur des pales (seules les précipitations à la surface sont enregistrées);
- La vitesse de rotation des pales, qui peut atteindre 250 km/h.

L'ablation (fonte ou chute) du givre accumulé n'est pas modélisée. Une radiation nette positive (accumulation d'énergie et donc, de chaleur) ou une température au-dessus de 0 °C feraient fondre le givre. Or, en raison de leur complexité, ces deux phénomènes ne sont pas considérés dans le modèle GLJM.

### 3.3 Tâche 3 : Modélisation du givre avec WRF

La tâche 3 consiste à comparer les sorties du modèle *Weather Research & Forecasting* (WRF) aux résultats des tâches 1 et 2, afin de valider la performance du modèle GLJM. Le modèle WRF a été choisi, puisque c'est un modèle de prévision météorologique commercial communément utilisé dans l'industrie.

Le modèle WRF est développé par la communauté scientifique internationale. En effet, le *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) et la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) participent à son développement depuis 2000. Ce modèle de nouvelle génération est utilisé dans 82 pays pour la recherche et la prévision, notamment dans les études climatiques et météorologiques [32]. Les sorties de modèle WRF utilisées dans le cadre de cette étude ont été fournies par *WeatherTech Scandinavia AB*<sup>1</sup>.

#### 3.3.1 Description et configuration du modèle

WRF est un modèle météorologique à aire limitée permettant d'étudier les phénomènes météorologiques qui se déroulent entre l'échelle synoptique et la microéchelle. Pour cette étude, la version utilisée est *Advanced Research WRF* (ARW) v3.4.1 [33]. Le modèle WRF utilise une approche eulérienne des équations [32]; il est complètement élastique et non hydrostatique. Plusieurs schémas physiques sont disponibles avec ARW. Le schéma de microphysique utilisé est celui de Thompson [34]. Il permet le calcul du rapport de mélange des gouttelettes de nuage, de la pluie, des cristaux de glace, de la neige, etc. Le schéma de couche limite utilisé est le Yonsei University (YSU) PBL [35]. Les conditions initiales et aux frontières proviennent de ERA-Interim.

Le domaine de simulation a été initialement choisi beaucoup plus large que le domaine d'intérêt. Cette méthode permet de prendre en compte l'influence des montagnes, des océans, etc. qui, bien qu'ils puissent être situés hors du domaine d'intérêt, peuvent tout de même avoir une importante influence sur les systèmes météorologiques. La simulation a une résolution horizontale de 2,5 km sur une grille couvrant les trois sites d'étude (Rivière-au-Renard, Murdochville et le site confidentiel). Cependant, les données finales fournies sont situées sur des grilles distinctes, centrées sur chacun des trois sites.

---

<sup>1</sup> WeatherTech Scandinavia AB : <http://www.weathertech.se>

### 3.3.2 Paramètres calculés

Plusieurs paramètres caractérisant les épisodes de givre sont disponibles pour la simulation. D'abord, les données météorologiques de base telles que la vitesse du vent, la température, la pression atmosphérique et l'humidité relative sont utilisées dans l'optique d'évaluer la capacité du WRF à reproduire les conditions atmosphériques observées. De plus, elles sont comparées à celles utilisées par GLJM. Comme pour la tâche 2, les dates de début et de fin, l'intensité, la sévérité, la perte de production et finalement, la classe IEA sont déterminées pour chaque événement de givre.

À la différence du modèle GLJM, WRF modélise en partie l'ablation de glace. D'abord, la fonte est calculée au moyen d'un bilan énergétique dépendant des échanges de chaleur entre la glace et l'atmosphère (chaleur sensible, chaleur latente, chaleur radiative, etc.) [36]. De plus, la sublimation (passage de la glace à l'état solide directement en vapeur d'eau) est modélisée pour des situations atmosphériques où la température est inférieure à 0 °C, le vent fort et l'humidité relative faible.

Pour pallier le problème des différences d'élévation entre les points de grille modélisés par WRF et les élévations réelles des sites (Tableau 4 – Annexe A), les paramètres météorologiques listés plus haut ont été pris à des hauteurs de 200 m pour Rivière-au-Renard, 200 m pour Murdochville et 80 m pour le site confidentiel.

### 3.3.3 Évaluation de la performance des modèles

Des tests de performance en matière de prévision des épisodes de givre ont été imposés aux modèles GLJM et WRF. Ces tests consistent à évaluer la performance des modèles et à déterminer si ces derniers arrivent à prévoir les événements qui sont observés, mais également, s'ils prévoient des événements qui n'ont jamais eu lieu.

Pour appliquer ces tests, tous les événements de givre météorologique sont automatiquement déterminés dès que les modèles prévoient un taux d'accumulation dépassant un seuil de 10 g/m/h. Ces événements sont par la suite analysés professionnellement : les événements de très courte durée (une heure) et isolés sont négligés et les événements successifs peu espacés dans le temps (écart de moins de deux heures) sont regroupés en un même événement.

Cette base de données est ensuite comparée à la base de données d'événements observés. Les événements observés qui avaient été rejetés en raison de l'absence de confirmation par analyse d'images sont toutefois considérés ici. En d'autres mots, pour un événement météorologique identifié, son existence sera confirmée si les capteurs ont identifié du givre instrumental, que les images aient permis ou non sa confirmation.

Pour chaque site et chaque hiver, les événements sont classés dans les catégories suivantes :

**Vrais Positifs** : Événements observés – modélisés;

**Faux Positifs** : Événements non observés – modélisés;

**Faux Négatifs** : Événements observés – non modélisés.

Comme l'analyse est faite sur la base des événements de givre observés ou modélisés, le nombre d'événements qui n'ont pas eu lieu et qui ne sont pas modélisés (**Vrais Négatifs**) ne peut être évalué.

À partir de cette catégorisation, l'habileté des modèles à prévoir les événements de givre ayant eu lieu pourra être évaluée, ainsi que leurs erreurs de sous-évaluation et de surévaluation du nombre d'événements.

**Tableau 13 – Performance du modèle**

		Observation	
		Oui	Non
Modèle	Oui	<b>VP</b>	<b>FP</b>
	Non	<b>FN</b>	-

À partir des catégories identifiées au Tableau 13, les pourcentages suivants sont calculés :

Indice de succès critique : permet de savoir si les événements modélisés correspondent aux observations  $ISC = VP / (VP + FN + FP)$

Biais : permet de savoir si la fréquence des événements prévus se compare à celle des événements observés  $BIAS = (VP + FP) / (VP + FN)$

Probabilité de détection : caractérise la fraction des événements observés et modélisés  $POD = VP / (VP + FN)$

Probabilité de fausse alarme : évalue la fraction des événements modélisés, mais non observés  $FAR = FP / (VP + FP)$

### Limitation de la méthode

En ce qui a trait à la précision des paramètres de performance des modèles, il nous apparaît important de souligner la limitation de la méthode employée. Normalement, cette analyse se fait sur une base temporelle, en comparant pour chaque heure la présence de givre à la prévision des modèles pour la même période. Or, dans cette étude, la comparaison se fait sur une base d'événements de givre. Cette considération affecte la précision dans les calculs de l'indice de succès critique, du biais, de la probabilité de détection et de la probabilité de fausse alarme.

## 4 RÉSULTATS

### 4.1 Tâche 1 : Évaluation des événements givrants

#### 4.1.1 Statistiques des données qualifiées

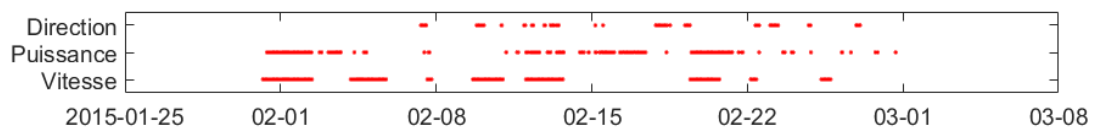
Des statistiques représentant les données utilisées pour l'évaluation des événements de givre ont été calculées. Les données qualifiées par capteurs (Annexe G) sont résumées pour l'ensemble des capteurs dans le Tableau 14. Ce tableau présente le pourcentage des capteurs dont le niveau de données qualifiées est inférieur à 60 %. On voit que le pourcentage de données non qualifiées pour le site confidentiel est notablement supérieur à ceux des sites de Rivière-au-Renard et de Murdochville, ce qui démontre que les données du site confidentiel ne sont pas de bonne qualité. Pour Rivière-au-Renard, le mauvais fonctionnement du capteur ultrasonique a entraîné la perte de données alors qu'à Murdochville, la perte est due au givre.

**Tableau 14 – Statistiques des capteurs dont les données qualifiées sont inférieures à 60 %**

	Rivière-au-Renard	Murdochville	Site confidentiel
Données qualifiées inférieures à 60 % [%]	4	17	92

#### 4.1.2 Événements de givre

La Figure 14 montre un exemple de détection de givre avec le contrôle qualité (section 3.1.1) pour le mois de février 2015 à Rivière-au-Renard. Cette détection est réalisée à partir des données de puissance de l'éolienne, de l'anémomètre et de la girouette (Tableau 9). Les points rouges représentent les périodes pour lesquelles les tests sont positifs (détection de givre). Compte tenu des différences dans la sensibilité des tests, l'analyse professionnelle est nécessaire pour identifier les périodes de givre.



**Figure 14 – Détection du givre par contrôle qualité à Rivière-au-Renard pour le mois de février 2015**

Le Tableau 15 présente les événements de givre confirmés par l'analyse d'images ou par des détecteurs de givre. Le nombre d'épisodes de givre confirmés par l'analyse d'images ou par les détecteurs de givre est inférieur au nombre d'événements détectés automatiquement par le contrôle qualité. En effet, l'objectif du contrôle qualité est de déterminer tous les comportements d'instruments susceptibles d'être affectés par le givre.

Les pourcentages d'événements disqualifiés par l'analyse d'images ou par les détecteurs de givre, c'est-à-dire ceux pour lesquels aucun givre n'était présent, sont respectivement de 10 % et de 50 % pour Murdochville et Rivière-au-Renard. Le pourcentage plus élevé à Rivière-au-Renard peut être expliqué par la plus grande disponibilité des images à ce site qui a permis de confirmer davantage d'événements par analyse d'images. Soulignons qu'à Murdochville, l'analyse d'images ou les détecteurs de givre sont indisponibles pendant 66 % du temps au cours de l'hiver 2014-2015.

**Tableau 15 – Pourcentage d'événements de givre confirmés par l'analyse d'images ou par détecteurs de givre**

Site	Hiver 2013-2014			Hiver 2014-2015		
	Présence de givre		Événement non confirmé	Présence de givre		Événement non confirmé
	oui	non		oui	non	
Site confidentiel [%]	-	-	-	-	-	-
Murdochville [%]	59	14	27	26	8	66
Rivière-au-Renard [%]	41	41	17	47	50	3

Note : Pour le site confidentiel, tous les événements détectés par le contrôle qualité sont pris en considération dans la suite de l'étude.

Les tableaux des annexes H, I et J présentent les événements de givre observés et sélectionnés pour la suite de l'étude. Tous les événements étudiés à Rivière-au-Renard sont listés à l'Annexe H, tous ceux étudiés à Murdochville sont listés à l'Annexe I et tous ceux étudiés au site confidentiel sont listés à l'Annexe J. Les événements de givre sont présentés pour chaque site et chaque saison à l'étude dans trois tableaux : un tableau avec les valeurs observées, un tableau avec les valeurs modélisées par GLJM et un tableau avec les valeurs modélisées par WRF.

Les tableaux de l'Annexe H présentent respectivement les événements de givre à Rivière-au-Renard pour les hivers 2013-2014 et 2014-2015. Les résultats pour l'hiver 2013-2014 s'appuient sur la confirmation à l'aide d'une seule caméra. La durée de ces événements varie de 1 à 4 journées. La charge de givre va de 1 à 5 kg/m et la classe ICR associée varie de 1 à 5. De plus, le givre blanc est l'unique type de givre détecté avec l'analyse d'images. Compte tenu du manque de disponibilité des images pour l'hiver 2014-2015, deux caméras sont utilisées. La charge varie de 1 à 12 kg/m et la classe ICR, de 2 à 7. Les images ont permis de détecter à la fois du givre blanc et du givre mixte.

Le Tableau 41 présente les événements givrants pour Murdochville en 2013-2014. La durée des événements varie d'une journée à une semaine. Le givre blanc est dominant. La classe ICR varie avec la durée de l'événement. Pour cet hiver, l'analyse d'image permet de confirmer la présence de givre instrumental, mais la qualité des images ne permet pas de déterminer le givre météorologique. Compte tenu de l'absence d'observation de givre météorologique, le taux d'accrétion moyen n'est pas calculé. Le Tableau 42 présente les événements givrants pour 2014-2015, toujours à Murdochville. Certains de ces événements peuvent durer jusqu'à deux semaines. Le nombre d'événements de givre blanc est proportionnel au nombre d'événements de givre mixte. En raison de la mauvaise qualité des images, le taux d'accrétion n'est pas calculé pour tous les événements.

Le Tableau 47 présente les événements givrants pour 2014-2015 au site confidentiel. Il faut rappeler que les événements ne sont pas confirmés par analyse d'images ou par les détecteurs de givre. En effet, il n'a pas d'image pour confirmer le type de givre et déterminer l'accumulation, la charge, le type, la classe et le taux d'accrétion.

#### **4.1.3 Pertes de production réelles**

La production d'une seule éolienne est considérée à chaque site (Figure 15 et Tableau 16). À Rivière-au-Renard et au site confidentiel, où les données de puissance d'une éolienne ont été disponibles, les pertes brutes et celles dues au givre ont été calculées. Les trous de données sont ignorés dans cette analyse. Les pertes brutes peuvent inclure des « pertes » négatives tandis que lors d'événements de givre, la plupart des pertes sont positives. Ceci explique que les pertes brutes soient plus élevées que les pertes dues au givre (1,8 % et 2,2 %) pour Rivière-au-Renard, en 2013-2014.

La différence de pourcentage entre chaque site peut être attribuée à la distribution de vent. Murdochville a une vitesse de vent moyenne de 11 m/s, comparée à 8 m/s pour Rivière-au-Renard et 9 m/s pour le site confidentiel. Plus la vitesse de vent est élevée, plus l'éolienne aurait pu produire pendant un événement de givre, et plus les pertes maximales sont élevées.

Au fait, l'éolienne atteint à Murdochville sa puissance nominale 20 % du temps et celles de Rivière-au-Renard et du site confidentiel seulement 8 % du temps.

**Tableau 16 – Énergie produite et perdue par une éolienne pour chaque site, par saison**

MWh	Rivière-au-Renard		Murdochville		Site confidentiel	
	2013-2014	2014-2015	2013-2014	2014-2015	2013-2014	2014-2015
Réelle	4 598	4 990	-	-	-	3 793
Calculée	4 799	5 512	6 261	7 633	-	4 568
Pertes brutes	119	310	-	-	-	648
Pertes dues au givre	144	248	-	-	-	244
Pertes maximales	371	932	2 071	1 517	-	1 446
% AEP brute	1,8 %	4,7 %	-	-	-	7,0 %
% AEP dû au givre	2,2 %	3,7 %	-	-	-	2,7 %
% AEP maximale	5,6 %	14,0 %	37,5 %	27,5 %	-	15,7 %

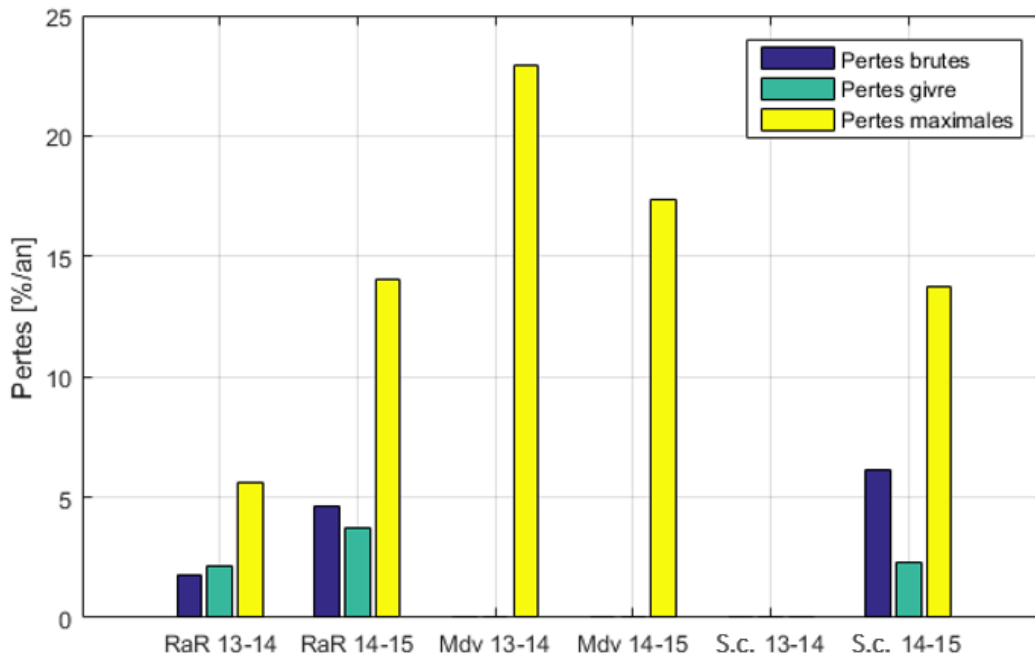


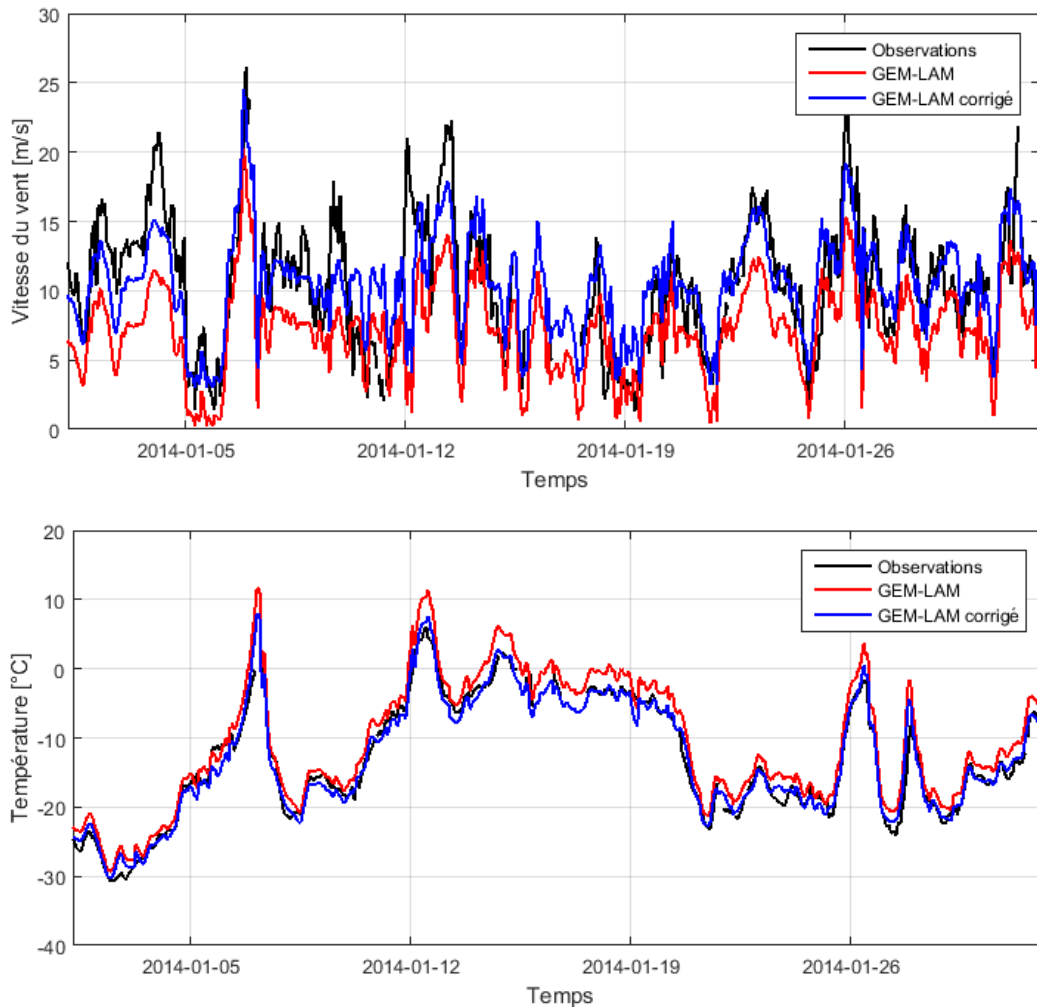
Figure 15 – Énergie perdue pour chaque site, par saison

## 4.2 Tâche 2 : Modélisation du givre avec le modèle GLJM

Cette section porte sur les résultats de la modélisation avec GLJM seulement. Un exemple des corrections apportées aux données GEM-LAM servant d'entrées dans le modèle GLJM et un exemple des résultats de modélisation d'événements de givre obtenus sont présentés. Les comparaisons des résultats du GLJM avec les observations et avec les prévisions du modèle WRF seront présentées à la section 4.3. Les détails et valeurs des événements cités dans cette section sont présentés aux annexes H, I et J.

### 4.2.1 Corrections

Cette section présente les corrections apportées aux données GEM-LAM pour la vitesse du vent et la température (section 3.2.1, Annexe F). Bien que ces corrections aient été apportées, lorsque possible, aux données de chaque mois et de chaque site, seul le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard est présenté à titre d'exemple à la Figure 16.

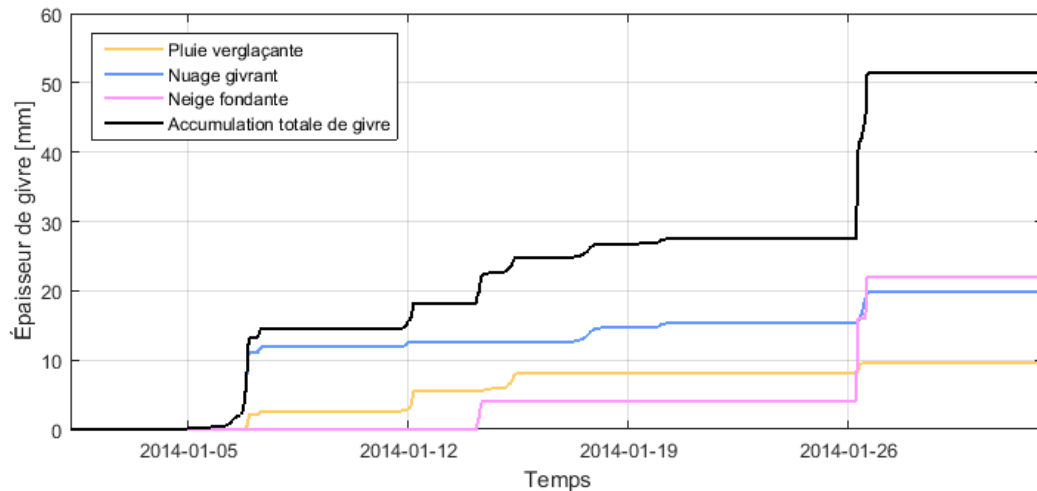


**Figure 16 – Corrections appliquées aux données GEM-LAM pour le vent et la température pour le mois de janvier 2014 au site de Rivière-au-Renard**

Note : Pour tous les résultats, les heures sont en format UTC (heure locale standard + 5h pour Rivière-au-Renard et Murdochville, et heure locale standard + 4h pour le site confidentiel).

#### 4.2.2 Modélisation du givre avec GLJM

La Figure 17 présente un exemple de la modélisation du givre avec le modèle GLJM pour tout le mois de janvier 2014 au site de Rivière-au-Renard. L'épaisseur radiale d'accumulation de givre autour d'un cylindre est illustrée en fonction du temps. Comme GLJM ne modélise pas l'ablation du givre (fonte ou chute), le givre ne peut qu'augmenter ou rester constant au cours du mois.



**Figure 17 – Accumulation radiale de givre [mm] en fonction du temps pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard**

La Figure 18 présente la modélisation de l'événement de givre observé à Rivière-au-Renard du 25 au 26 janvier 2014 (Annexe H, événement 8 du Tableau 37). Le graphique du haut illustre l'accumulation de givre sous forme d'une épaisseur exprimée en millimètres. Une accumulation totale de 35,6 mm a été modélisée pour cet événement. Le graphique du centre illustre les contenus en eau liquide, tous exprimés en  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Finalement, le graphique du bas présente l'évolution de la température, en  $^{\circ}\text{C}$ , tout au long de l'événement. On constate que lorsque la température atteint  $0^{\circ}\text{C}$  (sans dépasser  $2^{\circ}\text{C}$ ), la neige devient de la pluie, ce qui explique l'accumulation de givre dû à de la pluie verglaçante. Étant donné que l'accumulation de givre est due à plusieurs facteurs distincts, le type de givre est dit « mixte » (section 1.1).

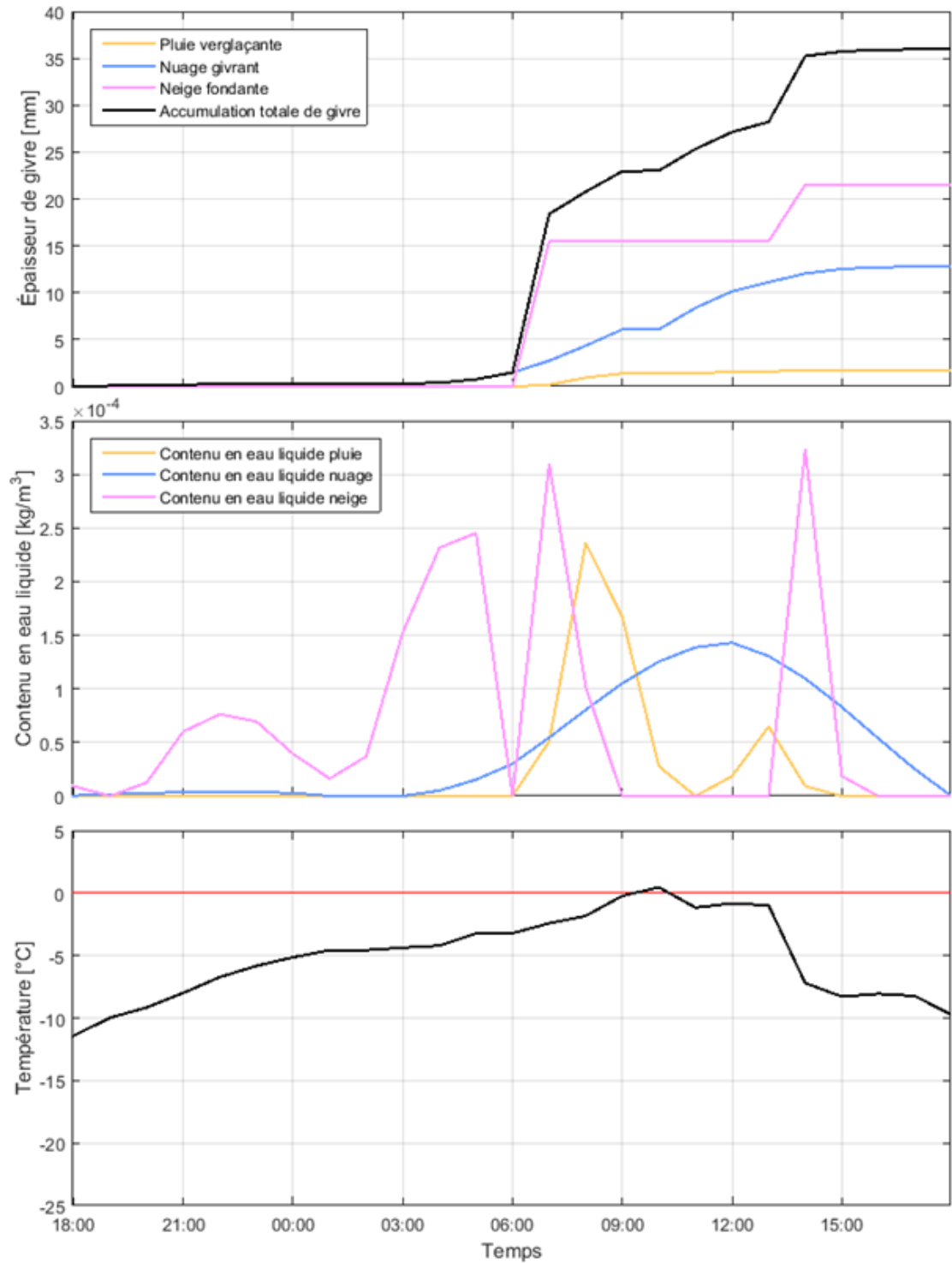


Figure 18 – Accumulation radiale de givre [mm], contenu en eau liquide [kg/m<sup>3</sup>] et température [°C] en fonction du temps pour la période du 25 janvier 2014 18:00 au 26 janvier 2014 18:00 à Rivière-au-Renard

La Figure 19 présente le même événement de givre. Le graphique du haut illustre la vitesse du vent en m/s, tandis que le graphique du bas illustre la production d'énergie sans givre (noir) et la production avec givre (rouge), exprimée en MWh. La production d'énergie sans givre correspond à l'énergie qui serait produite d'après la vitesse du vent modélisé selon la courbe de puissance des éoliennes MM92 CCV de Senvion à Rivière-au-Renard. On remarque que lorsque le vent est assez fort (12 m/s et plus), la production d'énergie sans givre se rapproche de 2,05 MW (la puissance nominale des éoliennes Senvion) et que lorsque le vent est plus faible, l'énergie produite varie en conséquence. La production d'énergie avec givre correspond à l'énergie qui est produite lors de l'événement de givre modélisé. Comme GLJM suppose une perte d'énergie maximale pour la durée d'un événement de givre, il n'y a aucune production d'énergie (courbe rouge à 0 MWh), ce qui donne lieu à une perte maximale de 23,7 MWh pour l'événement.

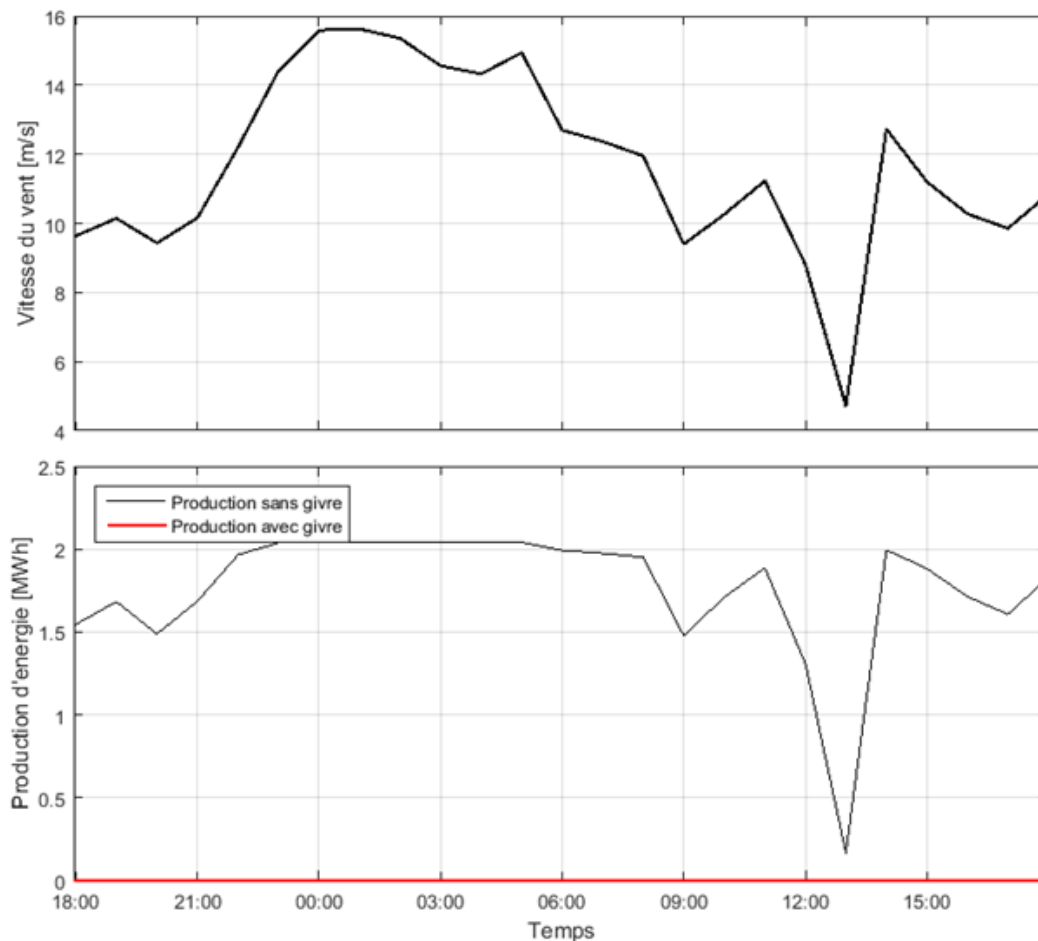
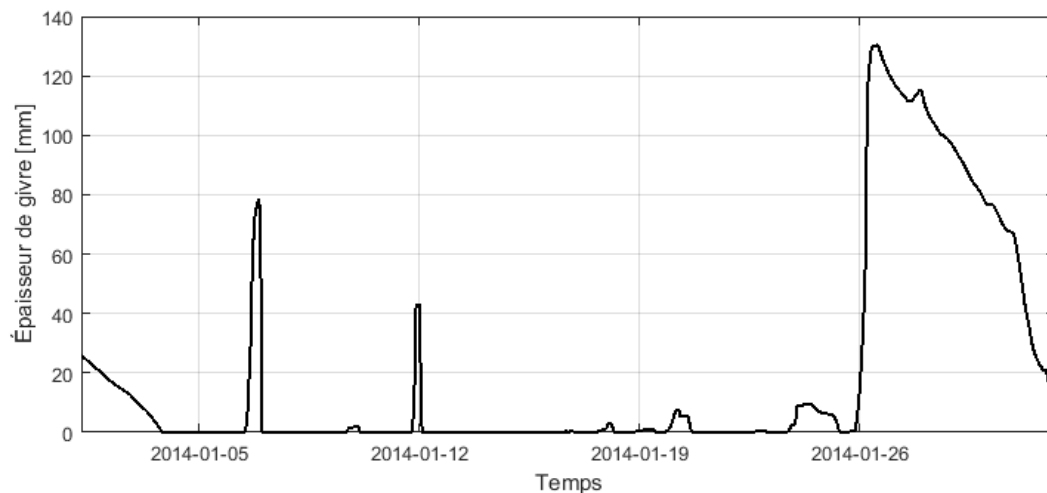


Figure 19 – Vent [m/s] et production d'énergie [MWh] en fonction du temps pour la période du 25 janvier 2014 18:00 au 26 janvier 2014 18:00 à Rivière-au-Renard

### 4.3 Tâche 3 : Modélisation du givre avec WRF

Les figures de cette section présentent des exemples des résultats de la modélisation avec WRF pour le mois de janvier 2014 au site de Rivière-au-Renard.

La Figure 20 illustre l'accumulation radiale de givre autour d'un cylindre en fonction du temps. Étant donné que le modèle WRF modélise la fonte de la glace, l'accumulation peut diminuer au cours du mois selon les conditions atmosphériques.



**Figure 20 – Accumulation radiale de givre [mm] en fonction du temps pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard**

La Figure 21 présente les productions d'énergie avec et sans givre, telles que modélisées par WRF. La production d'énergie sans givre dépend de la vitesse du vent modélisé et de la puissance nominale de l'éolienne étudiée. La production d'énergie avec givre modélisée par WRF dépend de l'accumulation de givre sur l'éolienne. Plus les deux courbes s'éloignent l'une de l'autre, plus les pertes d'énergie sont importantes. La perte de production pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard s'élève à 159,3 MWh.

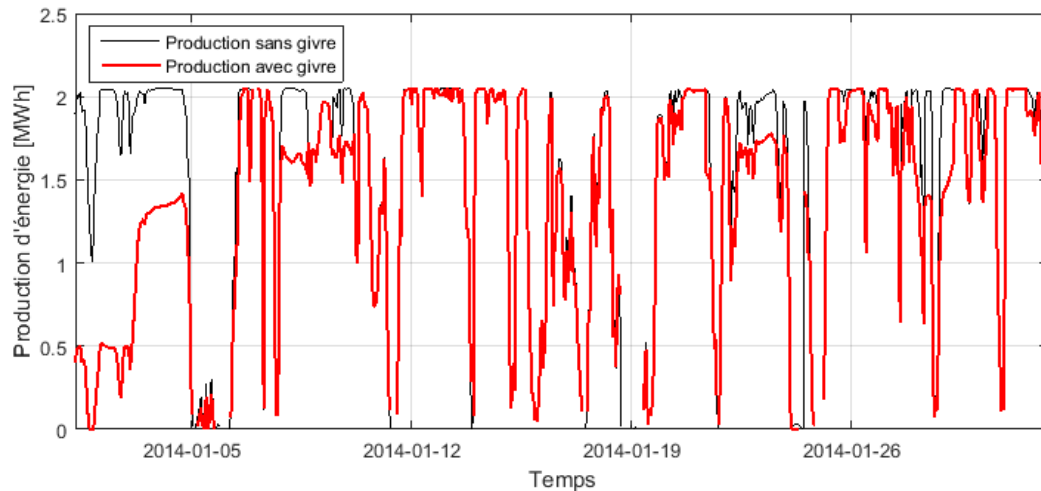


Figure 21 – Productions d'énergie sans givre et avec givre [MWh] modélisées par WRF pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard

## 5 RÉSULTATS COMPARÉS ET DISCUSSION

Le but de cette section est de comparer les résultats d'épisodes de givre observés, modélisés d'une part avec GLJM et d'autre part avec WRF. La performance du GLJM sera évaluée par rapport au givre qui a été observé et par rapport à la prévision d'un modèle d'accumulation du givre utilisé par l'industrie. Les pertes de production modélisées avec GLJM seront également comparées à celles observées et à celles modélisées par WRF.

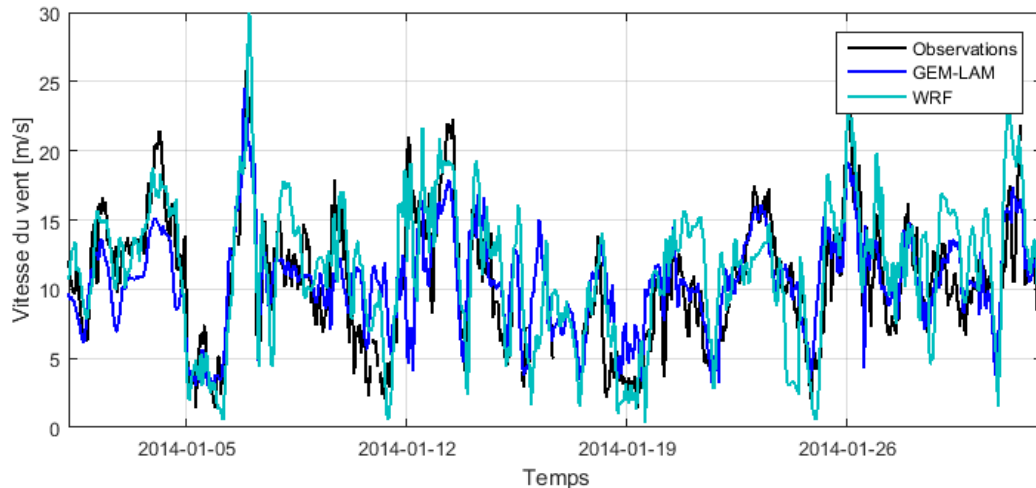
### 5.1 Comparaison des variables météorologiques de base

Les données des observations ont été comparées avec les données modélisées avec GEM-LAM et corrigées, et avec celles modélisées par WRF (Figure 22 et Figure 23). La plupart du temps, les données sont en accord et les tendances observées sont bien modélisées. Les valeurs calculées de  $R^2$  pour chaque mois pour les deux modèles sont présentées à l'Annexe K et résumées au Tableau 17.

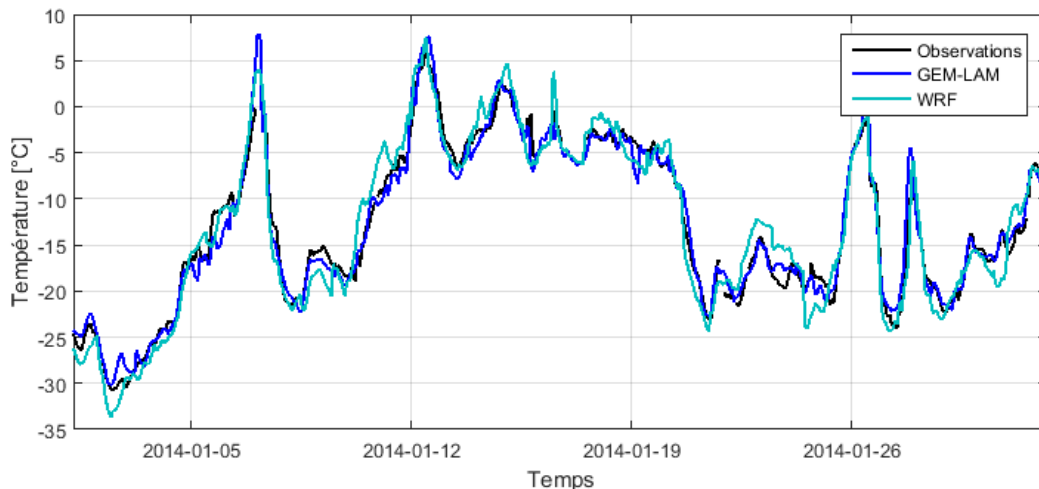
Tableau 17 – Moyennes des valeurs calculées de  $R^2$  pour GEM-LAM et WRF par rapport aux observations pour toute la durée de l'étude

	$R^2$ pour le vent [%]	$R^2$ pour la température [%]
GEM-LAM	65	93
WRF	44	82

En moyenne et pour les deux hivers à l'étude, les données GEM-LAM sont plus proches des observations que les données WRF. Soulignons que seules les données GEM-LAM ont été corrigées par rapport aux observations. De plus, ces valeurs sont associées uniquement aux sites de Rivière-au-Renard et de Murdochville. En effet, les observations incomplètes du site confidentiel n'ont pas permis de calculer une correction des données GEM-LAM, ni d'établir une corrélation entre les modèles et les observations.



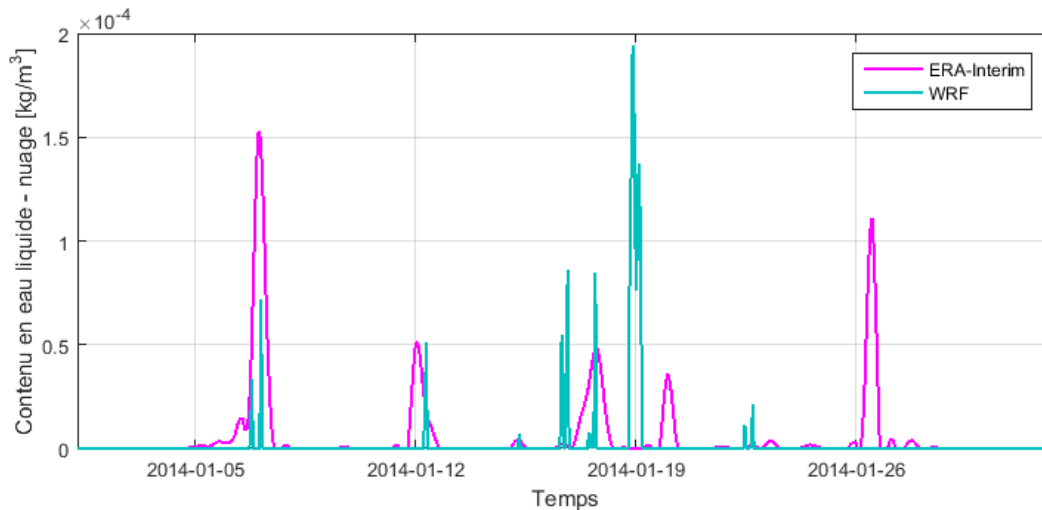
**Figure 22 – Comparaison de la vitesse du vent [m/s] des observations, des données GEM-LAM et des données WRF en fonction du temps pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard**



**Figure 23 – Comparaison de la température [°C] des observations, des données GEM-LAM et des données WRF en fonction du temps pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard**

La Figure 24 présente le contenu en eau liquide des nuages de ERA-Interim pour GLJM et celui de WRF. Soulignons que ces données proviennent de deux sources situées à des points géographiques

différents (Annexe A). On note une importante différence entre les deux sources de données : dans certains cas, le contenu en eau liquide est similaire, alors que dans d'autres cas, les valeurs ERA-Interim et WRF diffèrent complètement et ne prévoient pas du tout les mêmes conditions nuageuses. On peut donc s'attendre à ce que certains épisodes de givre dus à un nuage givrant ne soient pas modélisés de la même façon par GLJM et par WRF.



**Figure 24 – Comparaison du contenu en eau liquide des nuages [kg/m<sup>3</sup>] de ERA-Interim et de WRF en fonction du temps pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard**

Les Figure 25 et Figure 26 présentent les contenus en eau liquide de la pluie et de la neige modélisés par GEM-LAM, et modélisés par WRF. Les épisodes de pluie sont modélisés avec des valeurs et des occurrences comparables. Les épisodes de neige sont modélisés avec des occurrences comparables, mais avec des valeurs qui diffèrent : WRF modélise beaucoup plus de neige que GEM-LAM pour certains épisodes. On s'attend donc à ce que l'accumulation de givre due à la pluie verglaçante soit comparable pour les deux modèles, mais que l'accumulation de givre due à la neige fondante soit plus importante avec WRF qu'avec GEM-LAM. On remarque parfois un petit décalage temporel dû aux positions géographiques des deux modèles : les précipitations n'arrivent pas toujours en même temps aux deux points de grille.

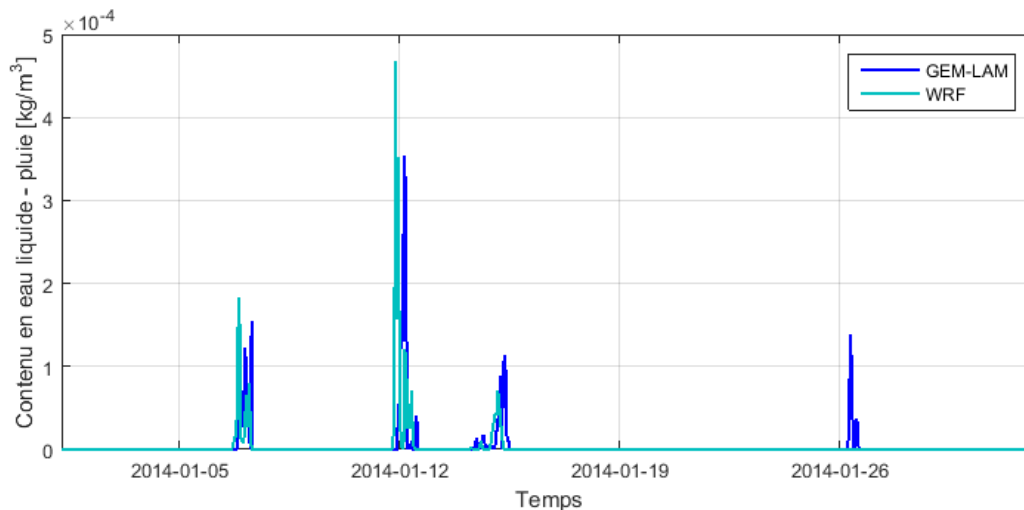


Figure 25 – Comparaison du contenu en eau liquide de la pluie [kg/m<sup>3</sup>] de GEM-LAM et de WRF en fonction du temps pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard

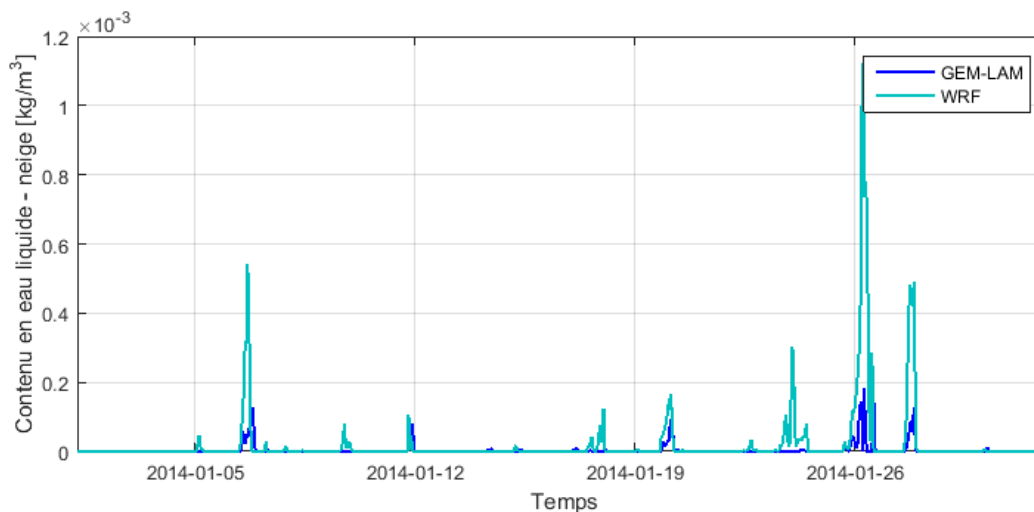


Figure 26 – Comparaison du contenu en eau liquide de la neige [kg/m<sup>3</sup>] de GEM-LAM et de WRF en fonction du temps pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard

## 5.2 Comparaison des observations et des modélisations du givre de GLJM et de WRF

Cette section présente les résultats de la modélisation du givre avec les modèles GLJM et WRF. Les résultats pour trois mois complets à des sites différents sont présentés à titre d'exemple pour illustrer le comportement des modèles les uns par rapport aux autres, et par rapport aux observations.

Les Figure 27, Figure 28 et Figure 29 présentent, pour les trois sites, l'épaisseur de givre modélisée, son taux d'accumulation modélisé et la durée des événements observés, modélisés par GLJM et par WRF. Comme l'illustrent les deux premiers graphiques des Figure 27, Figure 28 et Figure 29, la

majorité des événements de givre coïncident dans les deux modèles, bien que l'intensité soit beaucoup plus élevée avec le modèle WRF (l'épaisseur de givre est en moyenne six fois plus élevée avec WRF qu'avec GLJM pour les deux hivers à l'étude).

L'épaisseur de givre est plus difficile à comparer étant donné que le modèle GLJM ne modélise pas la fonte de la glace, créant ainsi une accumulation continue au cours du mois. On peut tout de même identifier les épisodes de givre et remarquer la différence d'intensité des prévisions de givre des deux modèles.

Seulement deux épisodes de givre observés ont été retenus et confirmés par l'analyse d'images pour janvier 2014 à Rivière-au-Renard (Figure 27). Ces épisodes sont représentés dans le troisième graphique par les deux tirets noirs. Bien que les durées et les dates de début et de fin diffèrent de quelques heures, ces deux événements ont été captés par les deux modèles. En théorie, le givre observé correspondant au givre instrumental devrait apparaître après le début de l'épisode de givre météorologique et durer plus longtemps. On remarque que plusieurs événements de givre ont été modélisés par les deux modèles, mais non observés. Ces événements peuvent être dus à des erreurs des modèles ou à des observations qui n'ont pas pu être confirmées par l'analyse d'images. Les cinq épisodes de givre observés à Murdochville en avril 2014 sont modélisés (Figure 28). Encore une fois, tous les événements observés ont été captés par les modèles. Cependant, certains événements ont été modélisés sans être observés. Finalement, six épisodes de givre ont été observés au site confidentiel au mois de décembre 2014 (Figure 29). Ils ont été généralement bien modélisés par les deux modèles et certains épisodes de givres modélisés n'ont pas été observés.

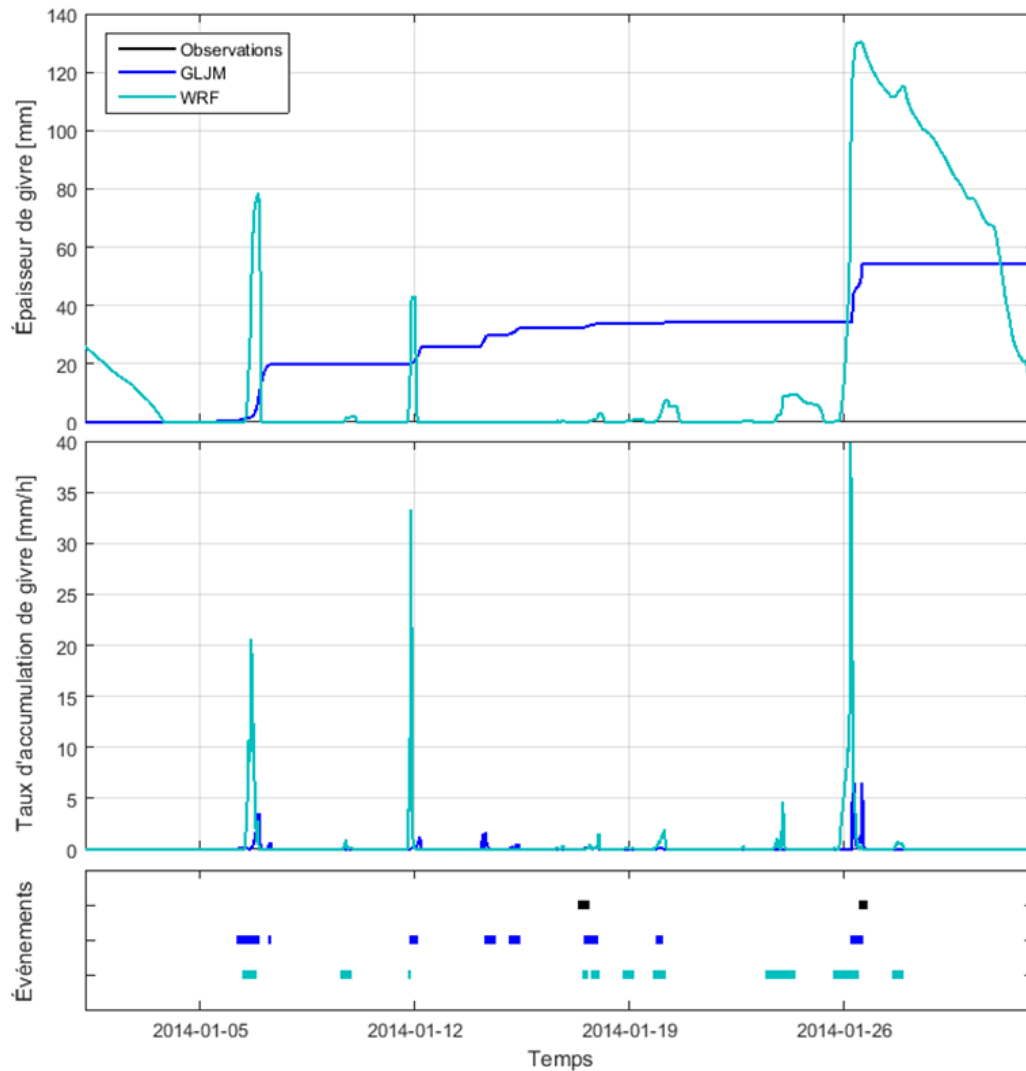


Figure 27 – Comparaison de l'épaisseur [mm], du taux d'accumulation [mm/h] et de la durée des événements de givre des trois sources [h] en fonction du temps pour le mois de janvier 2014 à Rivière-au-Renard

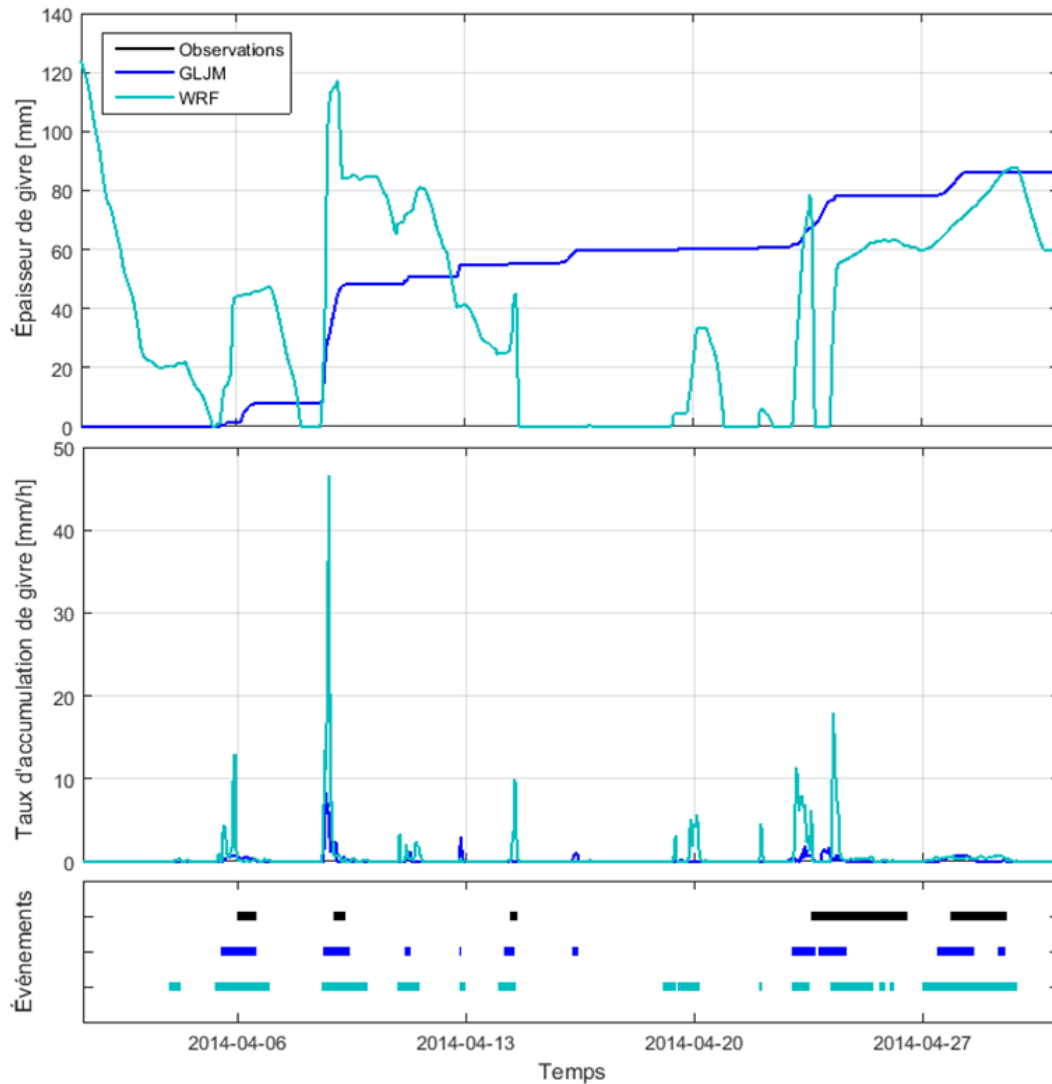


Figure 28 – Comparaison de l'épaisseur [mm], du taux d'accumulation [mm/h] et de la durée des événements de givre des trois sources [h] en fonction du temps pour le mois d'avril 2014 à Murdochville

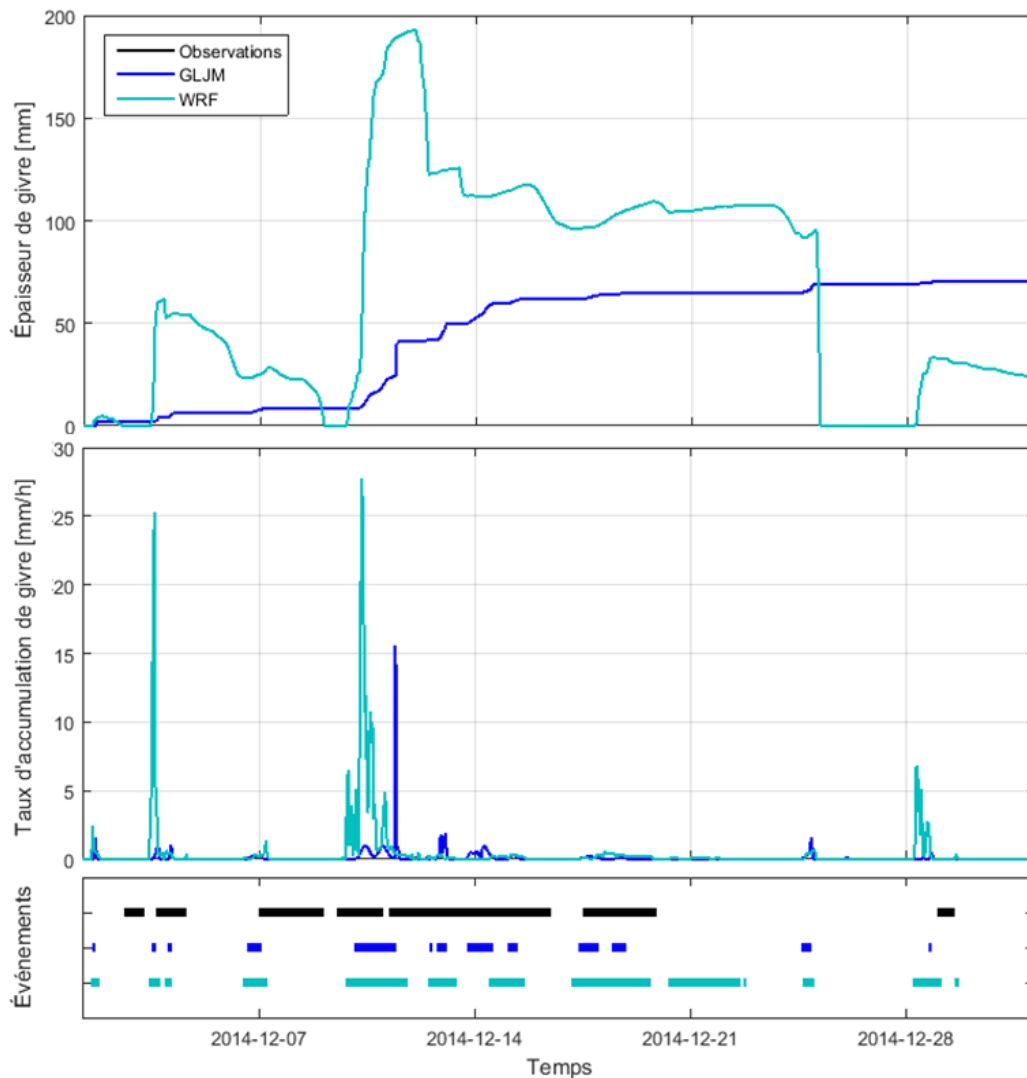


Figure 29 – Comparaison de l'épaisseur [mm], du taux d'accumulation [mm/h] et de la durée des événements de givre des trois sources [h] en fonction du temps pour le mois de décembre 2014 au site confidentiel

### 5.3 Comparaison des événements individuels de givre observés et modélisés

Cette section présente une comparaison des événements de givre observés, modélisés par GLJM et modélisés par WRF. Les événements de givre étudiés sont présentés aux tableaux des Annexe H, Annexe I et Annexe J.

Les Figure 30 et Figure 31 présentent un exemple de modélisation du givre pour un seul événement ayant eu lieu à Rivière-au-Renard du 23 avril 2014 00:00 au 27 avril 2014 00:00 (Annexe H, Tableau 37, événement no 16). Les observations, lorsque disponibles, et les modélisations de l'événement par GLJM et WRF y sont présentées.

Le graphique du haut (Figure 30) illustre l'accumulation de givre sous forme d'une épaisseur exprimée en millimètres. Une accumulation de givre de 92,45 mm a été observée, tandis que GLJM modélisait une accumulation de 31,51 mm et WRF, une accumulation de 50,36 mm. Les deux modèles ont donc sous-estimé l'accumulation de givre pour cet événement (GLJM a modélisé 34 % de l'accumulation et WRF, 54 %). Le graphique du centre présente les contenus en eau liquide pour les deux modèles, tous en  $\text{kg/m}^3$ . La différence d'accumulation de givre des deux modèles s'explique probablement par la différence des valeurs de leurs contenus en eau liquide. En effet, WRF prévoit un contenu en eau liquide environ deux fois plus grand que celui prévu par GLJM. Finalement, le graphique du bas illustre l'évolution de la température ( $^{\circ}\text{C}$ ) tout au long de l'événement. On remarque avec le modèle WRF la fonte du givre lorsque la température du modèle monte au-dessus de  $0^{\circ}\text{C}$ . On voit par les contenus en eau liquide que l'accumulation de givre est due à deux facteurs distincts : nuage givrant et neige fondante. Pour les deux modèles, le type de givre est donc identifié comme étant « mixte ».

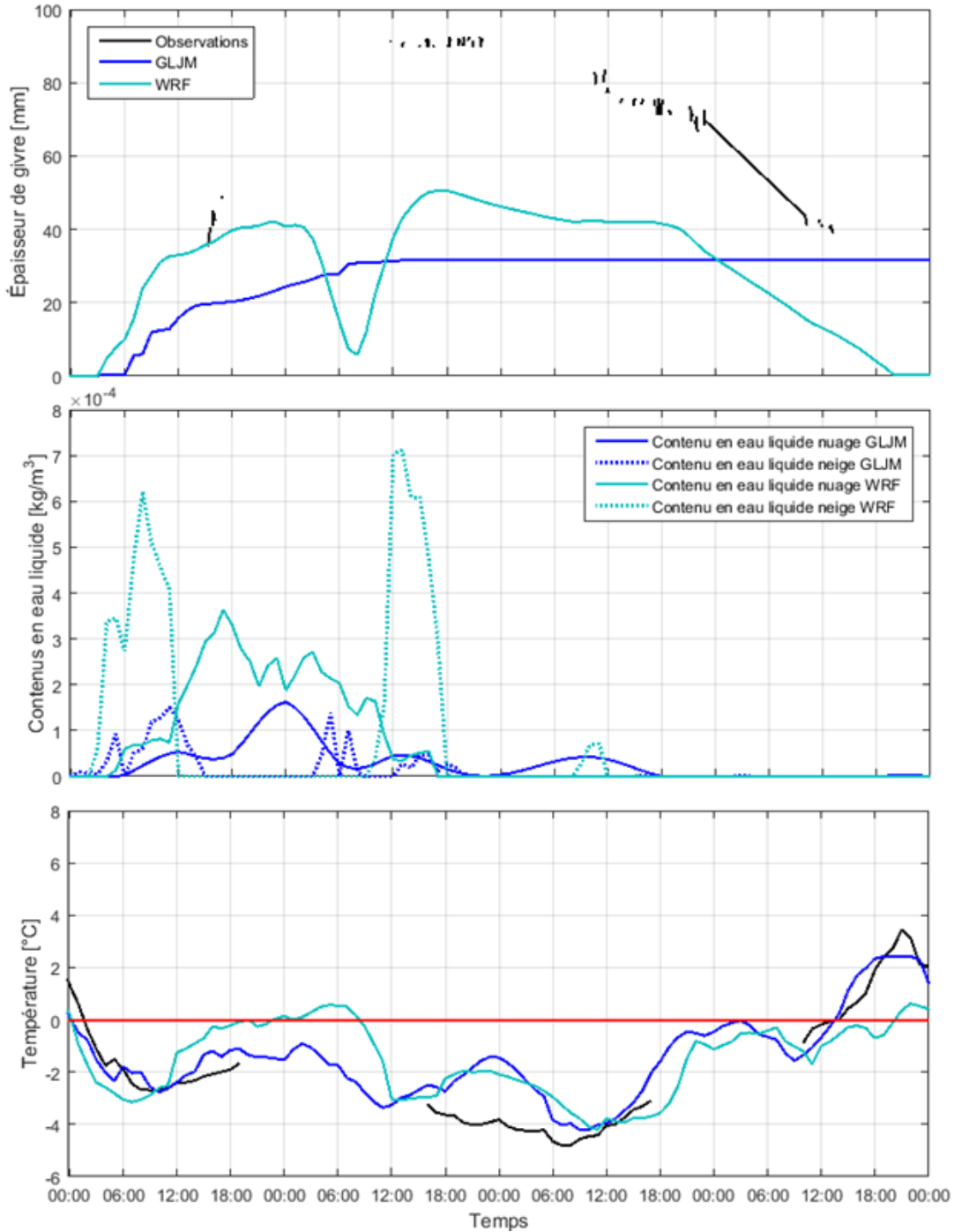


Figure 30 – Modélisation d'un événement de givre pour la période allant du 23 avril 2014 00:00 au 27 avril 2014 00:00, à Rivière-au-Renard

La Figure 31 présente, pour le même événement de givre, la production d'énergie en MWh dans le graphique du haut et la vitesse du vent en m/s dans le graphique du bas. La production d'énergie sans givre correspond à l'énergie qui serait produite d'après l'intensité du vent modélisé selon la

courbe de puissance des éoliennes MM92 CCV de Senvion installées à Rivière-au-Renard. On remarque que le vent modélisé par GLJM est beaucoup plus faible que le vent modélisé par WRF. Cela est dû au fait que pour le mois d'avril 2014, il n'y avait pas d'observation de vitesse du vent à Rivière-au-Renard. Par conséquent, la vitesse du vent modélisée par GEM-LAM n'a pas pu être corrigée (Annexe L, Tableau 50) et est inférieure au vent réel. Selon le modèle WRF, la production d'énergie sans givre se rapproche de 2,05 MW (la puissance nominale des éoliennes Senvion) lorsque le vent est assez fort (12 m/s et plus), et l'énergie produite varie en conséquence lorsque le vent est plus faible. Puisque GLJM suppose une perte d'énergie maximale pour toute la durée d'un événement de givre, il n'y a aucune production d'énergie, ce qui donne lieu à une perte maximale de 14,5 MWh pour l'événement. WRF, qui modélise une perte partielle d'énergie en soustrayant la production avec givre de la production sans givre, obtient, pour le même événement, une perte de 0,05 MWh.

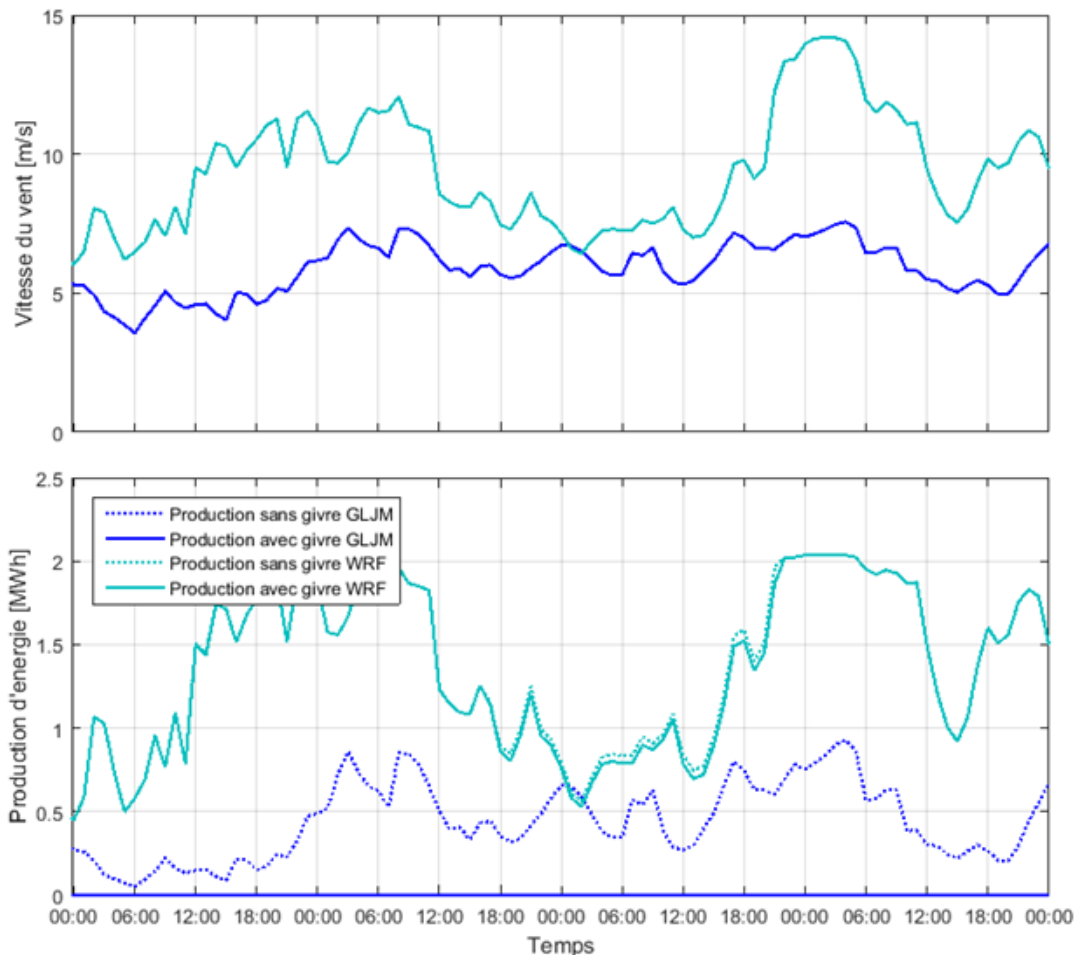


Figure 31 – Modélisation d'un événement de givre pour la période allant du 23 avril 2014 00:00 au 27 avril 2014 00:00, à Rivière-au-Renard

#### 5.4 Classe de givre IEA par site

Les classes de givre IEA [19] pour chaque site sont déduites à partir du pourcentage de givre et des pertes de production annuelles. Deux tableaux de classes IEA sont présentés, soit le premier (Tableau 18), avec les pertes réelles ou partielles, et le second (Tableau 19), avec les pertes maximales (en supposant que l'éolienne s'arrête complètement pour toute la durée de l'événement de givre). Cette distinction entre pertes maximales et partielles est nécessaire pour pouvoir comparer les observations avec les modèles, étant donné que le modèle GLJM suppose une perte maximale, tandis que le modèle WRF et les observations font état d'une perte partielle. Seules les pertes diffèrent dans les deux tableaux, les pourcentages de givre  $\gamma$  sont identiques. Les mêmes résultats sont présentés sous forme de graphiques (Figure 32 et Figure 33).

**Givre météorologique** : le givre météorologique n'a pas pu être observé. Par conséquent, le modèle GLJM ne peut pas être comparé avec les observations, mais seulement avec un autre modèle, en l'occurrence le WRF. En général, GLJM prédit un pourcentage similaire à celui que prédit WRF : le plus grand écart est de 1,8 % à Murdochville pour l'hiver 2013-2014. Pour chaque saison à chaque site, on obtient la même classe IEA avec les deux modèles : Rivière-au-Renard et Murdochville sont des sites de classe 3 ou 4 et le site confidentiel est un site de classe 4.

**Givre instrumental** : le givre instrumental n'a pas pu être estimé ni avec GLJM ni avec WRF. Les pourcentages de givre instrumental observés servent seulement à comparer les classes IEA. Selon les observations, Rivière-au-Renard est un site de classe 2 ou 3, Murdochville est un site de classe 3 ou 4, et le site confidentiel est un site de classe 4. Le pourcentage au site confidentiel est probablement sous-estimé à cause de la faible disponibilité de données : avec moins de 60 % de disponibilité sur la plupart des capteurs, la liste des événements de givre est probablement incomplète.

**Pertes de production partielles** : contrairement à WRF, le modèle GLJM ne modélise pas de pertes de production partielles. Le modèle WRF peut quand même être comparé aux observations : à chaque site, WRF sous-estime les pertes, mais suggère une classe IEA 2, soit la même que les observations. Il y a deux raisons à la sous-estimation. Premièrement, la méthode utilisée prend uniquement en compte les événements de givre instrumental confirmés comme base de données pour la modélisation. Il y a donc des événements modélisés, mais non observés, qui ne sont pas pris en compte pour calculer les pertes. Deuxièmement, les pertes de production sont estimées durant les périodes de givre météorologique; celles-ci durent moins longtemps que les périodes de givre instrumental utilisées pour calculer les pertes observées. Ces sous-estimations sont illustrées à la Figure 32 où les pertes modélisées par WRF apparaissent sous les rectangles représentant les classes IEA de givre météorologique.

**Pertes de production maximales :** les pertes maximales ont été calculées pour les observations et pour WRF de façon à les comparer aux pertes de GLJM. Le modèle GLJM estime la même classe IEA que WRF pour les deux hivers et pour chaque site, sauf au site confidentiel. Cela n'est pas surprenant étant donné que les vitesses de vent et la durée des événements de givre météorologique modélisés sont similaires. GLJM a tendance à sous-estimer les pertes maximales : les différences de pertes vont de 1,5 % au site confidentiel en 2014-2015 à 13,2 % à Murdochville en 2013-2014.

**Tableau 18 – Classes de givre IEA avec pertes partielles**

		Givre météorologique (%)			Givre instrumental (%)			Pertes de production partielles (%)		
Site	Année	Obs.	GLJM	WRF	Obs.	GLJM	WRF	Obs.	GLJM	WRF
Rivière-au-Renard	13-14	-	4,6	3,5	4,5	-	-	2,2	-	0,7
	14-15	-	5,2	5,5	10,8	-	-	3,7	-	1,1
Murdochville	13-14	-	7,2	9,0	20,7	-	-	-	-	2,9
	14-15	-	4,4	3,0	12,6	-	-	-	-	0,6
Site confidentiel	13-14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	14-15	-	9,4	9,3	14,8	-	-	2,7	-	0,8
Code de couleur	N/D	IEA 1	IEA 2	IEA 3	IEA 4	IEA 5				

Tableau 19 – Classes de givre IEA avec pertes maximales

		Givre météorologique (%)			Givre instrumental (%)			Pertes de production maximales (%)		
Site	Année	Obs.	GLJM	WRF	Obs.	GLJM	WRF	Obs.	GLJM	WRF
Rivière- au- Renard	13-14	-	4,6	3,5	4,5	-	-	5,6	3,9	6,2
	14-15	-	5,2	5,5	10,8	-	-	14,0	6,4	10,9
Murdoch- ville	13-14	-	7,2	9,0	20,7	-	-	22,9	9,7	15,9
	14-15	-	4,4	3,0	12,6	-	-	17,3	6,8	5,3
Site confiden- tiel	13-14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	14-15	-	9,4	9,3	14,8	-	-	13,8	12,3	13,8
Code de couleur	N/D	IEA 1	IEA 2	IEA 3	IEA 4	IEA 5				
Note : Les pertes présentées dans ce tableau présupposent que l'éolienne est arrêtée lors de la présence de givre instrumental.										

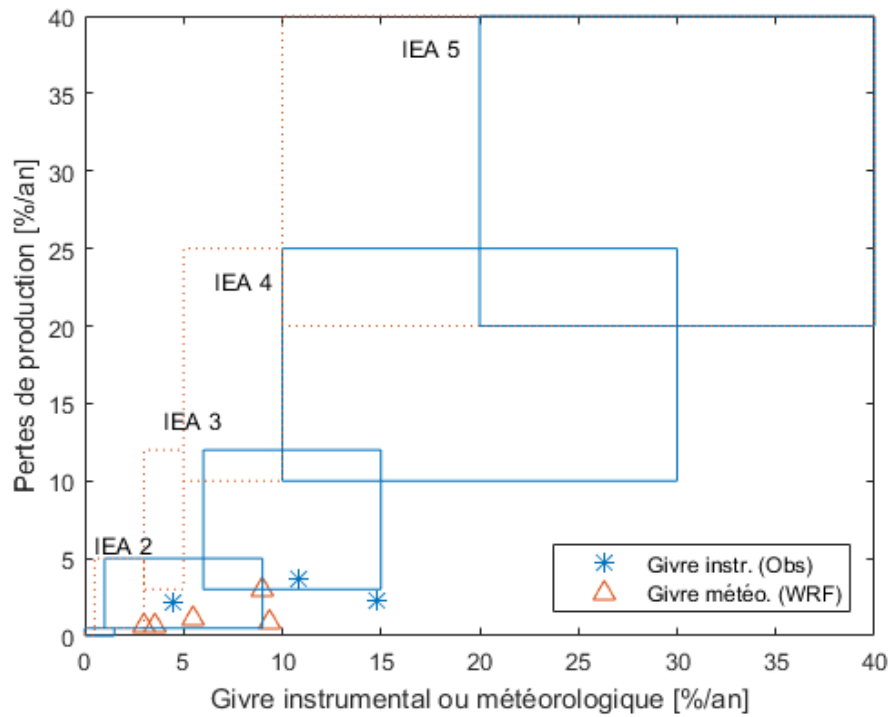


Figure 32 – Classes de givre IEA avec pertes partielles

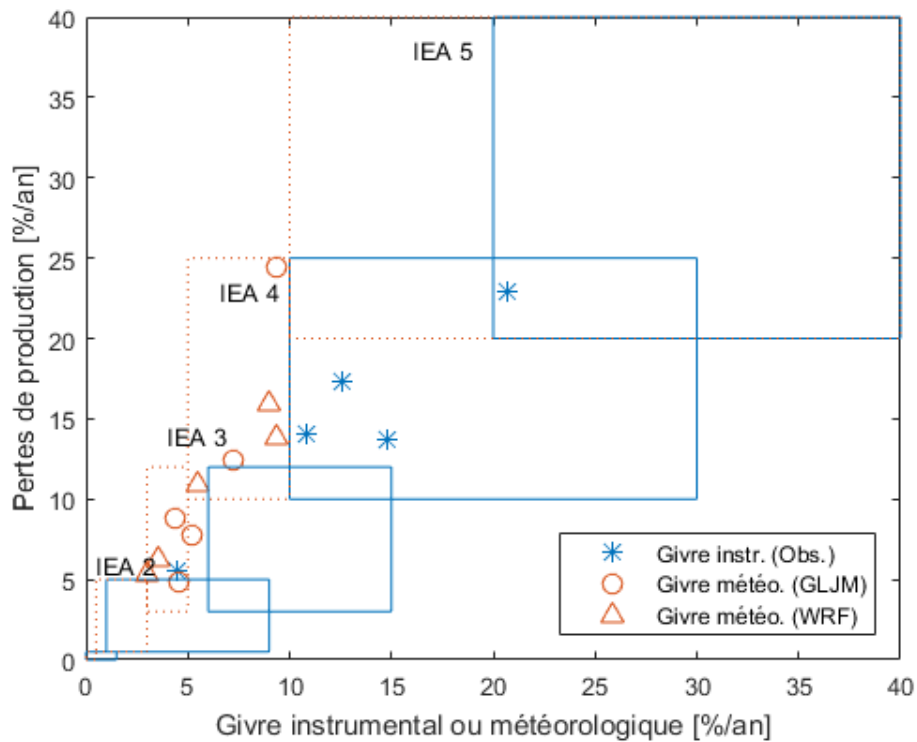


Figure 33 – Classes de givre IEA avec pertes maximales

## 5.5 Performance du modèle GLJM

Cette section fait état de la performance du modèle GLJM à partir de la fiabilité de sa prévision en termes d'événements de givre et de sa capacité à évaluer les événements de givre observés. Les limitations et la sensibilité du modèle sont discutées et un bilan global de sa performance est établi.

### 5.5.1 Prévision du givre

Les Tableau 54 et Tableau 55 (Annexe M) présentent la catégorisation des événements de givre modélisés par GLJM et WRF selon la méthode détaillée à la section 3.3.3. C'est à partir de ces résultats que l'indice de succès critique, le biais, la probabilité de détection et la probabilité de fausse alarme sont calculés (pourcentages à l'Annexe N). Ces paramètres permettent d'évaluer la capacité des modèles à prédire l'occurrence des événements de givre.

La Figure 34 présente l'indice de succès critique des modèles GLJM et WRF pour les trois sites et les deux hivers à l'étude. En général, les indices sont similaires pour les deux modèles, sauf à Rivière-au-Renard durant l'hiver 2014-2015 et à Murdochville pour l'hiver 2013-2014, où le modèle WRF performe mieux que le GLJM.

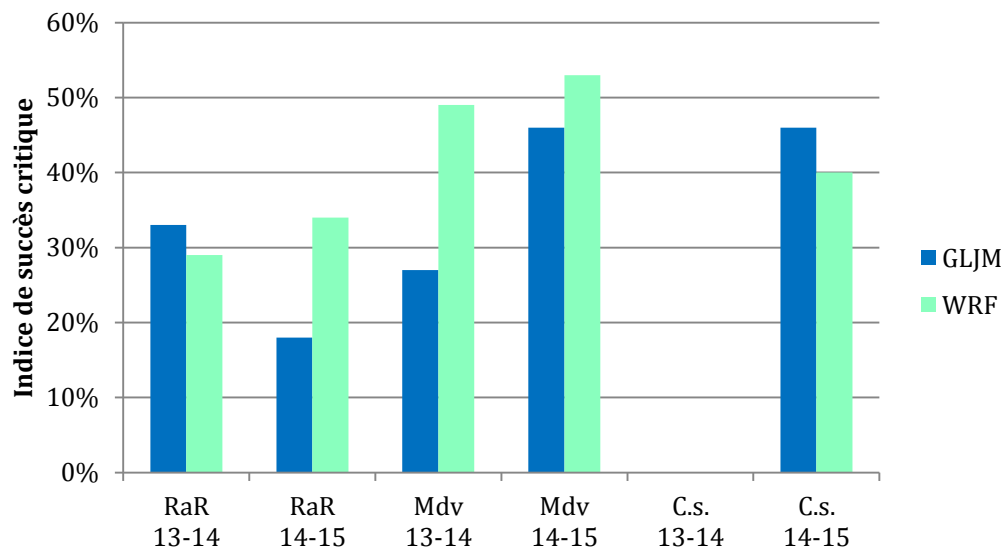


Figure 34 – Indice de succès critiques des modèles GLJM et WRF

La Figure 35 présente les biais des modèles GLJM et WRF. Un biais supérieur à 100 % indique que le modèle surévalue le nombre d'événements de givre. En général, GLJM prévoit correctement le nombre d'événements, tandis que WRF surévalue grandement leur occurrence.

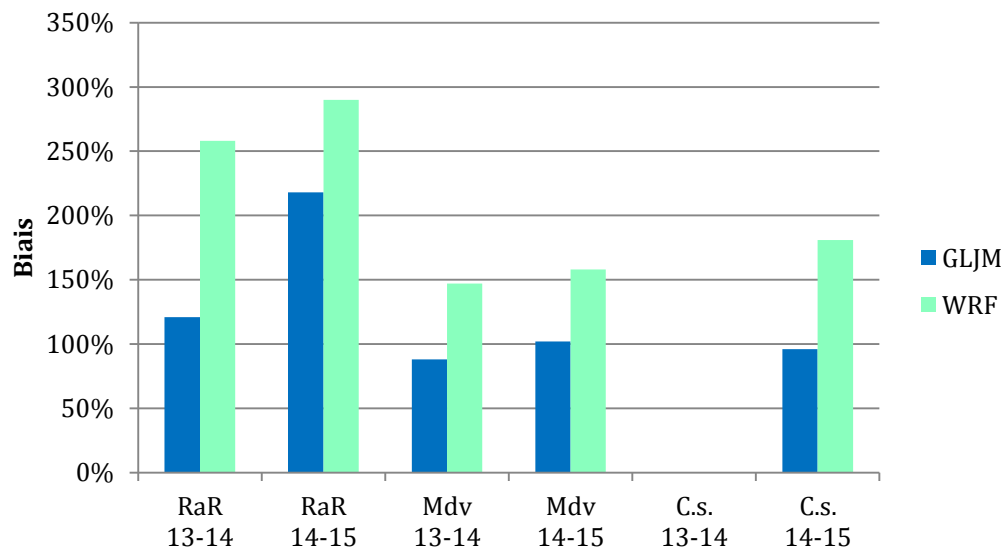


Figure 35 – Biais des modèles GLJM et WRF

La Figure 36 présente la probabilité de détection des événements de givre des modèles GLJM et WRF. La probabilité de détection de GLJM est toujours inférieure à 65 %, tandis que celle de WRF est toujours supérieure à 80 %. On peut donc affirmer que WRF permet de détecter davantage d'événements ayant eu lieu que GLJM.

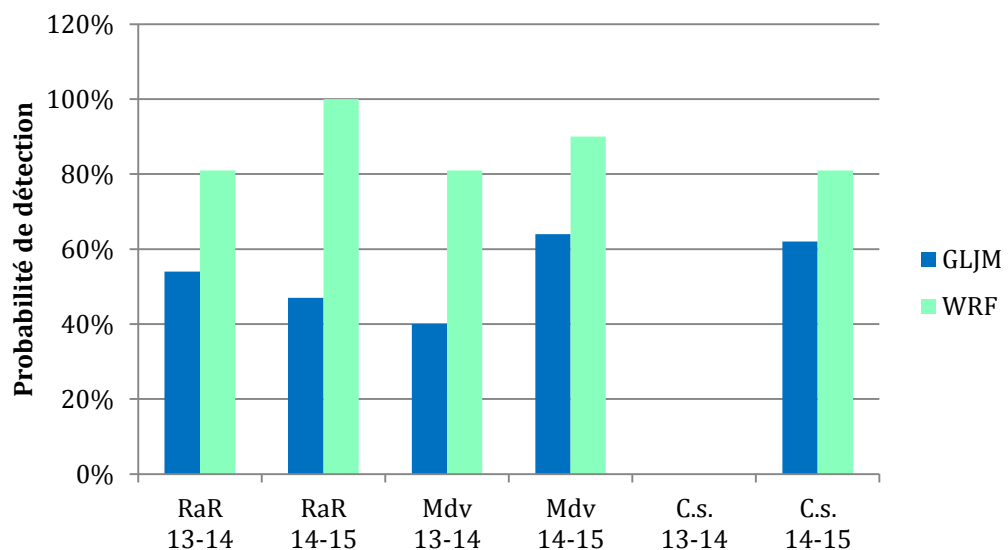


Figure 36 – Probabilité de détection des modèles GLJM et WRF

La Figure 37 présente la probabilité de fausse alarme des modèles GLJM et WRF. En général, la probabilité de détection est comparable pour les deux modèles. Soulignons que plus il y a de givre observé, plus la probabilité de fausse alarme diminue, ce qui explique les valeurs plus faibles pour le site de Murdochville et le site confidentiel.

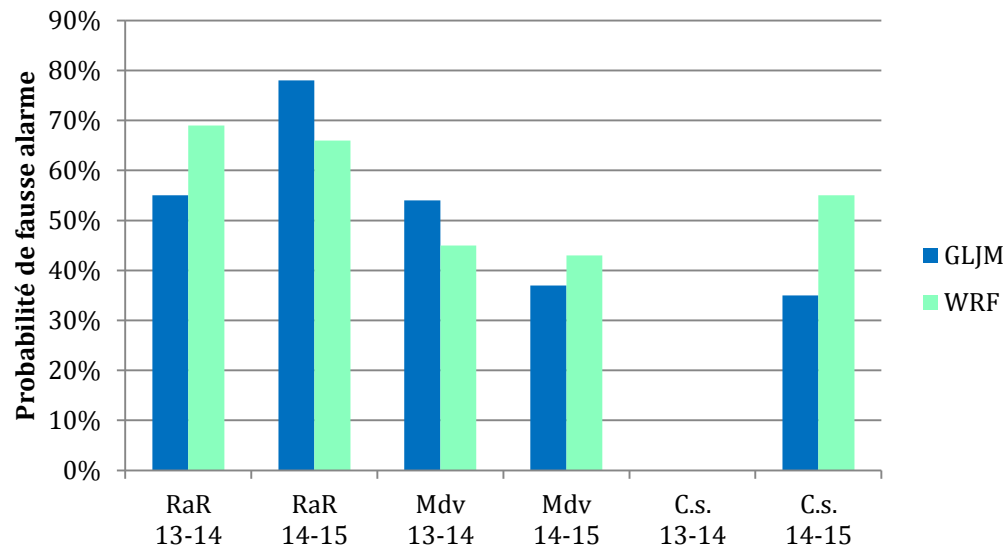


Figure 37 – Probabilité de fausse alarme des modèles GLJM et WRF

On peut conclure de l'analyse des quatre figures précédentes que la performance des deux modèles est similaire. En effet, bien que le modèle WRF permette d'identifier davantage d'événements observés, il surévalue l'occurrence des épisodes de givre météorologique. De son côté, GLJM identifie moins d'événements observés, mais il démontre une occurrence d'événements plus réaliste. Sur cette base, il n'est pas possible de dire qu'un modèle performe mieux que l'autre.

### 5.5.2 Modélisation du givre

Le Tableau 20 illustre la représentativité de la modélisation de la longueur de givre pour les événements analysés (Annexe H à Annexe J). Pour chaque site, l'accumulation de givre modélisée est comparée à celle observée. En moyenne, GLJM modélise le tiers de la longueur du givre observée, tandis que WRF surestime en légèrement la longueur. Ces calculs sont basés sur des disponibilités d'observation d'accumulation de givre de 33 % pour les trois sites d'étude. De plus, il importe de mentionner que le givre s'accumule sur un cylindre de 48,5 mm, diamètre qu'utilise GLJM pour modéliser l'accumulation, alors que WRF la modélise sur un cylindre de 30 mm de diamètre (basé sur le standard de la norme ISO12494 [17]). Les données du site confidentiel n'ont pas permis de calculer la longueur de givre accumulée, d'où l'absence de pourcentage pour ce site.

**Tableau 20 – Pourcentage de la longueur de givre accumulée modélisée par WRF et GLJM par rapport aux observations**

	Accumulation modélisée par GLJM sur accumulation observée	Accumulation modélisée par WRF sur accumulation observée
Rivière-au-Renard	24 %	124 %
Murdochville	30 %	100 %
Site confidentiel	-	-

### 5.5.3 Limitations

Deux principales faiblesses ont été décelées pour le modèle GLJM. La première est l'évaluation des pertes énergétiques à l'aide du concept de perte maximale. Il est rare en effet qu'une éolienne s'arrête complètement à chaque événement de givre. Des études empiriques prouvent plutôt que la perte de production de l'éolienne est proportionnelle à l'intensité de l'épisode de givre [20]. La deuxième faiblesse est que le GLJM ne modélise pas l'ablation ou la fonte de la glace. L'ablation est un sujet d'étude complexe pour lequel les connaissances sont pour le moment peu développées.

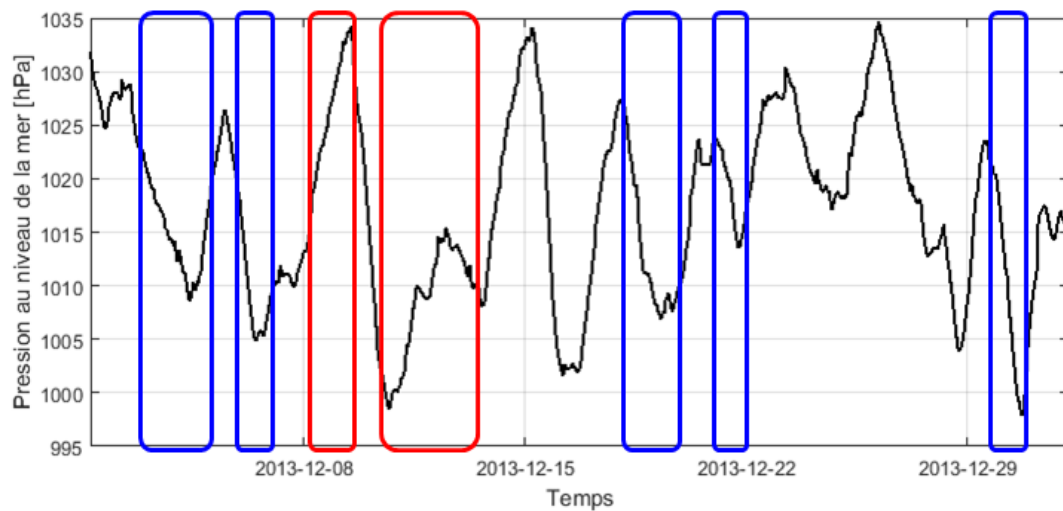
Une autre limitation vient du fait que le modèle GLJM ne peut pas modéliser la gelée blanche. Ce type de givre dû à la condensation solide de la vapeur d'eau contenue dans l'air se produit lorsque la température est très basse (advection ou pertes radiatives), l'humidité relative forte et les vents faibles. Par conséquent, la gelée blanche n'est due ni à la pluie verglaçante, ni à un nuage givrant, ni à de la neige fondante. Les épisodes identifiés dans les observations comme gelée blanche sont en effet des épisodes qui n'ont généralement pas été captés par les modèles.

Finalement, il appert que le givre causé par des effets météorologiques locaux n'est pas toujours capturé par les modèles. Ce phénomène s'explique notamment par le fait que les points de modélisation ne sont pas situés exactement à l'endroit où le givre est observé. À titre d'exemple, les événements de décembre 2013, à Murdochville, sont listés dans le Tableau 21 et sont illustrés à la Figure 38 où est présentée la pression de surface. On remarque que les événements modélisés correspondent à des zones où la pression diminue et les événements non modélisés, à des zones où la pression augmente. À ce titre, lorsqu'il s'agit d'un système synoptique à grande échelle (diminution de la pression de surface), le givre est généralement mieux modélisé que lorsqu'il n'y a pas de système synoptique responsable de précipitations (augmentation pression de surface). En effet, un même

système synoptique peut aisément toucher les points de modélisation et d’observation en raison de son important développement horizontal. Les effets locaux peuvent affecter l’endroit où est observé le givre sans affecter pour autant les points de modélisation. Cela explique la présence de givre observé, mais son absence dans les modèles.

**Tableau 21 – Événements de givre observés et modélisés par GLJM à Murdochville pour le mois de décembre 2013 (tirés des tableaux Tableau 41 et Tableau 42 à l’Annexe I)**

	Observations					Modélisation GLJM			
<b>5a</b>	2013-12-02	03:40	2013-12-07	23:30		2013-12-02	16:00	2013-12-05	03:00
<b>5b</b>	-	-	-	-		2013-12-06	01:00	2013-12-06	12:00
<b>6</b>	2013-12-08	19:10	2013-12-10	07:50		-	-	-	-
<b>7</b>	2013-12-10	17:30	2013-12-12	02:40		-	-	-	-
<b>8</b>	2013-12-12	14:50	2013-12-13	02:40		-	-	-	-
<b>9</b>	2013-12-18	04:50	2013-12-19	14:40		2013-12-18	12:00	2013-12-20	06:00
<b>10</b>	2013-12-21	05:10	2013-12-25	16:30		2013-12-21	03:00	2013-12-22	07:00
<b>11</b>	2013-12-29	21:50	2013-12-31	16:20		2013-12-30	02:00	2013-12-31	01:00



**Figure 38 – Pression de surface [hPa] en fonction du temps pour le mois de décembre 2013 à Murdochville**

Note : Les événements observés qui ont été modélisés par GLJM sont encadrés en bleu et les événements observés qui n’ont pas été modélisés sont encadrés en rouge.

Finalement, comme mentionné à la section 3.2.5, l'utilisation dans GLJM d'une donnée d'entrée (le contenu en eau liquide) provenant des réanalyses de ERA-Interim diminue la qualité de la prévision. La résolution spatiale (~80 km) de ERA-Interim engendre un biais : plus le site étudié est loin du point de grille de ERA-Interim, moins le modèle GLJM est performant. Sa résolution temporelle (~6 h) altère également la précision de la modélisation.

#### **5.5.4 Analyse de sensibilité des données météorologiques d'entrée dans les modèles**

Un événement de givre ayant eu lieu aux trois sites du 11 novembre 2014 au 13 novembre 2014 a été évalué de quatre façons : à l'aide des observations, avec le modèle GLJM utilisant les données d'entrée provenant de GEM-LAM et de ERA-Interim (comme présenté dans cette étude), avec WRF utilisant les données d'entrée de WRF (comme présenté dans cette étude) et finalement, avec le modèle GLJM utilisant les données d'entrée provenant du modèle WRF (nommé ici modèle GLJM-WRF). L'avantage de la dernière méthode est d'évaluer le modèle GLJM avec des données d'entrée plus complètes (contenu en eau liquide des nuages modélisé à la même résolution que le reste des données). Les résultats (Annexe O) démontrent que le modèle GLJM-WRF est celui qui se rapproche le plus des observations. D'abord, GLJM modélise 4 % de la longueur du givre observé, 4 % de sa charge, et calcule une classe ICR très inférieure à celle des observations. WRF modélise 20 % de la longueur du givre observé, 16 % de sa charge, et calcule une classe ICR inférieure à celle des observations. Finalement, GLJM-WRF modélise 30 % de la longueur du givre observé, 78 % de sa charge, et calcule la même classe ICR que celle observée. On peut donc conclure que le modèle développé dans le cadre de cette étude performerait nettement mieux avec des données d'entrée de meilleure qualité.

#### **5.5.5 Analyse globale du modèle**

Le modèle GLJM a été évalué sur deux caractéristiques : sa capacité à détecter un épisode de givre et sa capacité à en évaluer les caractéristiques. En ce qui a trait aux périodes de détection du givre, les modèles WRF et GLJM ont des performances similaires qui se chiffrent entre 50 % et 75 %. Pour la sévérité, le modèle GLJM prévoit une accumulation généralement équivalente au tiers de celle mesurée. La sous-évaluation de la sévérité par GLJM peut être associée à l'utilisation du contenu en eau liquide provenant de ERA-Interim. De son côté, WRF prévoit une accumulation légèrement plus sévère que celle observée.

Le modèle GLJM a ensuite été évalué quant à sa capacité à prévoir les pertes de production énergétique dues au givre. Puisqu'un arrêt complet de l'éolienne est supposé lors de chaque événement de givre, le modèle GLJM surestime la perte de production.

En dépit des multiples limitations du GLJM, ses performances se sont avérées semblables à celles d'un modèle couramment utilisé par l'industrie. En développant de manière plus adéquate le modèle GLJM et en utilisant des données météorologiques d'entrée de plus grande qualité, il serait possible d'obtenir de meilleures performances que celles décrites dans ce rapport.

## CONCLUSION

Ce rapport a détaillé trois méthodes pouvant être utilisées pour identifier et quantifier les épisodes de givre : l'évaluation à partir d'observations, la modélisation avec GLJM et la modélisation avec WRF. Les résultats ont été analysés pour trois sites distincts de l'est du Canada : Rivière-au-Renard (Québec), Murdochville (Québec) et un site confidentiel. Pour l'ensemble des méthodes, il a été trouvé que le site de Rivière-au-Renard est l'un des moins givrants avec une classe IEA 3. Le site confidentiel obtient des résultats ambigus qui s'expliquent notamment par la faible disponibilité des données météorologiques. Compte tenu de cette problématique, il est difficile de comparer les résultats du site confidentiel avec les deux autres sites. On peut toutefois affirmer que son potentiel de givre est supérieur à celui de Rivière-au-Renard, avec une classe IEA 4. Finalement, les pertes et périodes de givre détectées à Murdochville lui confèrent généralement une classification IEA 4.

La prévision faite par le modèle GLJM engendre toujours des pertes énergétiques supérieures à celles modélisées par WRF, puisque des pertes maximales sont calculées. De plus, le modèle GLJM sous-estime la sévérité du givre en modélisant environ le tiers de l'accumulation observée, alors que le modèle WRF surestime légèrement la sévérité observée.

En s'appuyant sur cette étude, il est permis de souligner quatre principales avenues de développement pour améliorer la performance du modèle GLJM dans la prévision du givre et des pertes énergétiques dans les parcs éoliens :

- L'ajout du contenu en eau liquide des nuages dans les sorties du modèle GEM-LAM, qui est nécessaire au calcul d'intensité et de sévérité du givre;
- Le développement et l'intégration de modèles d'ablation et de fonte de la glace pour modéliser la fin des événements de givre;
- Le développement des modèles de pertes énergétiques des éoliennes en fonction de l'intensité de givre;
- La standardisation des méthodes de détection du givre qui permettrait une comparaison plus uniforme entre différents sites.

À la lumière des résultats, des limitations et de la performance du modèle GLJM, nous déterminons qu'avec certaines améliorations, ce modèle pourrait servir de manière opérationnelle dans la prévision du givre des parcs éoliens. Le principal avantage de l'utilisation du modèle GEM-LAM opérationnel demeure la disponibilité et l'accessibilité des données : une prévision est faite chaque 6 h pour les 48 h qui suivent et demeure disponible gratuitement au public.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CanWEA. « Puissance installée », Association canadienne de l'énergie éolienne, 2016. [En ligne]. Disponible : <http://canwea.ca/fr/marches-eoliens/puissance-installee/>. [Accès le 9 mars 2016].
- [2] A. Lacroix et M. Tan. « Assessment of Wind Energy Production Penalties Due to Cold Climate in Canada », CanmetÉNERGIE, Rapport technique, 2012.
- [3] S. Thomas, R. Cassoni et C. MacArthur. « Aircraft Anti-Icing and De-Icing Techniques and Modeling », *Journal of Aircraft*, vol. 33, n°15, p. 841-854, 1996.
- [4] K. Lahti et al. « Transmission Line Corona Losses under Hoar Frost Conditions », *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, n°12, p. 928-934, 1997.
- [5] M. Nielsen et S. Nielsen. « Telecommunications Structures in Arctic Regions », chez POLARTECH, Nuuk, Groenland, 1998.
- [6] A. Lacroix. « Assessment of Wind Energy Production Penalties due to Cold Climate in Canada », CanmetÉNERGIE, 2012.
- [7] DNV GL. « Technical Note 067: Certification of Wind Turbines for Extreme Temperatures », Rapport technique, 2013.
- [8] W. Jasinski, S. Noe, M. Selig et M. Bragg. « Wind turbine performance under icing conditions », *Transactions of the ASME, Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 120, p. 60-65, 1998.
- [9] H. Ganander et G. Ronsten. « Design Load Aspects due to Ice Loading on Wind Turbine Blades », chez *Proceedings of the 2003 BOREAS VI Conference*, Pyhäntunturi, Finlande, 2003.
- [10] J. Yang, W. Yu, J. Choisnard, A. Forcione et S. Antic. « Coupled Atmospheric-Ice Load Model for Evaluation of Wind Plant Power Loss », *J. Appl. Meteor. Climatol.*, vol. 54, p. 1142-1161, 2015.
- [11] K. Jones. « A simple model for freezing rain ice leads », *Atmos. Res.*, vol. 46, p. 87-98, 1998.
- [12] L. Makkonen. « Modelling of ice accretion on wires », *J. Climate Appl. Meteor.*, vol. 23, p. 929-939, 1984.
- [13] L. Makkonen. « Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures », *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, vol. 358A, p. 2913-2939, 2000.
- [14] L. Makkonen et B. Wichura. « Simulating wet snow loads on power line cables by a simple model », *Cold Regions Science and Technology*, vol. 61, p. 73-81, 2010.

- [15] F. Lamraoui et al. « Atmospheric icing severity: Quantification and mapping », *Atmospheric Research*, vol. 128, p. 57-75, 2013.
- [16] TechnoCentre éolien. « Infrastructures de recherche », 2016, [En ligne].  
Disponible : <https://eolien.qc.ca/fr/infrastructures.html>. [Accès le 9 mars 2016].
- [17] ISO-12494. « Atmospheric icing of structures », 2001.
- [18] R. Cattin. « Icing of Wind Turbines: Vindsfork projects, a survey of the development and research needs », Elforsk, Suède, 2012.
- [19] I. Baring-Gould, R. Cattin, M. Durstewitz, M. Hulkkonen, A. Krenn, T. Laakso, A. Lacroix, E. Peltola, G. Ronsten, L. Tallhaug et T. Wallenius. « IEA Wind Recommended Practice 13: Wind Energy in Cold Climates », IEA Wind, Rapport technique, 2011.
- [20] D. Bolduc, M. Wadham-Gagnon, B. Boucher, N. Jolin, A. Camion, J. Petersen et H. Friedrich. « Field Measurement of Wind Turbine Icing », chez *IWAIS XV*, St. John's, Terre-Neuve-et-Labrador, Canada, 2013.
- [21] Commission électrotechnique internationale. « Aérogénérateurs – Partie 12 : Techniques de mesure des performances de puissance », IEC, Norme internationale IEC 61400-12-1, 1998.
- [22] Vestas. « V80-1.8 MW – Pitch regulated wind turbine with OptiSlip and OptiTip », Spécifications techniques, 2003.
- [23] Vestas. « V90 3.0 MW », Spécifications techniques, 2013.
- [24] A. Wiser et M. Bolinger. « 2014 Wind Technologies Market Report », U.S. Department of Energy: Energy Efficiency & Renewable Energy, Rapport technique, 2015.
- [25] J. Côté, J.-G. Desmarais, S. Gravel, A. Méthot, A. Patoine, M. Roch et A. Staniforth. « The operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) model. Part II: Results », *Mon. Wea. Rev.*, vol. 126, p. 1397-1418, 1998.
- [26] J. Côté, S. Gravel, A. Méthot, A. Patoine, M. Roch et A. Staniforth. « The operational CMC-MRB Global Environmental Multiscale (GEM) model. Part I: Design considerations and formulation », *Mon. Wea. Rev.*, vol. 126, p. 1373-1395, 1998.
- [27] Ouranos. « Glossaire – Foire aux questions », [En ligne].  
Disponible : <http://www.ouranos.ca/fr/faq/glossaire.php>. [Accès le 21 février 2016].
- [28] Environnement Canada. « Données du SHRPD en format GRIB2 », [En ligne].  
Disponible : [https://meteo.gc.ca/grib/grib2\\_HRDPS\\_HR\\_f.html](https://meteo.gc.ca/grib/grib2_HRDPS_HR_f.html). [Accès le 16 janvier 2016].
- [29] D. Dee, S. Uppala, A. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R.

- Dragani, M. Fuentes, A. Geer, L. Haimberger, S. Healy, H. Hersbach, E. Hólm, L. Isaksen, P. Kallberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. McNally, B. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavalato, J.-N. Thépaut et F. Vitart. « The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system », *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, vol. 137, p. 553–597, 2011.
- [30] P. Berrisford, D. Dee, P. Poli, R. Brugge, K. Fielding, M. Fuentes, P. Kallber, S. Kobayashi, S. Uppala et A. Simmons. « The ERA-Interim archive, version 2.0 », ERA report series, Rapport technique, 2011.
- [31] B. Nygaard. « Evaluation of icing simulations for the “COST727” icing test sites in Europe », chez *IWAIS XIII*, Andermatt, Suisse, 2009.
- [32] W. C. Skamarock et J. B. Klemp. « A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications », *Journal of Computational Physics*, vol. 227, n°17, p. 3465-3485, 2008.
- [33] W. Skamarock, J. Klemp, J. Dudhia, D. Gill, D. Barker, M. Duda et J. Powers. « A description of the Advanced Research WRF version 3 », NCAR, Rapport technique, n° 475+ STR, 2008.
- [34] G. Thompson, P. R. Field, R. M. Rasmussen et W. D. Hall. « Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization », *Monthly Weather Review*, vol. 136, n°112, p. 5095-5115, 2008.
- [35] S.-Y. Hong et Y. Noh. « A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes », *Monthly Weather Review*, vol. 134, n°19, p. 2318-2341, 2006.
- [36] P. Thorsson. « Modelling of Atmospheric Icing. An introduction essay », Uppsala University, Uppsala, Suède, 2010.
- [37] A. Untch et M. Hortal, « A finite-element scheme for the vertical discretization of the semi-Lagrangian version of the ECMWF forecast model », *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, vol. 130, p. 1505-1530, 2004.
- [38] ECMWF. « L60 model level definition », [En ligne].  
Disponible : <http://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/60-model-levels>  
[Accès le 12 février 2016].
- [39] MathWorks. « Interpolation — Increase sampling rate by integer factor », [En ligne].  
Disponible : [http://www.mathworks.com/help/signal/ref/interp.html?s\\_tid=gn\\_loc\\_drop](http://www.mathworks.com/help/signal/ref/interp.html?s_tid=gn_loc_drop).  
[Accès le 1<sup>er</sup> mars 2016].
- [40] J. J. Cortinas. « A climatology of freezing rain in the Great Lakes region of North America », *Mon. Wea. Rev.*, vol. 128, p. 3574-3588, 2000.
- [41] M. Drage et G. Hauge. « Atmospheric icing in a coastal mountainous terrain. Measurements and numerical simulations, a case study », *Cold Reg. Sci. Technol*, vol. 53, p. 150-161, 2008.

- [42] B. Nygaard, B. Egil, H. Ágústsson et K. Somfalvi-Tóth. « Modeling wet snow accretion on power lines: Improvements to previous methods using 50 years of observations », *J. Appl. Meteor. Climatol.*, vol. 52, p. 2189-2203, 2013.
- [43] P. Admirat. « Wet snow accretion on overhead lines », chez *Atmospheric Icing of Power Networks*, M. Farzaneh, Éd., Chicoutimi, Springer Science + Business, 2008, p. 119-169.
- [44] S. E. Yuter, D. E. Kingsmill, L. B. Nance et M. Löffler-Mang. « Observations of Precipitation Size and Fall Speed Characteristics within Coexisting Rain and Wet Snow », *J. Appl. Meteor. Climatol.*, vol. 45, p. 1450-1464, 2006.
- [45] J. Manwell. « Wind Energy Explained », Wiley, 2002.
- [46] S. Fikke, G. Ronsten, A. Heimo, S. Kunz, M. Ostrozlik, P.-E. Persson, J. Sabata, B. Wareing, B. Wichura, J. Chum, T. Laakso, K. Sääntta et L. Makkonen. « COST 727: Measurement and data collection on icing: State of the Art », MeteoSwiss, 2006.
- [47] T. Laakso et al. « State-of-the-art of wind energy in cold climates », VTT Technical Research Centre of Finland, Rapport technique, 2010.
- [48] T. Laakso et al. « Expert Group Study on Wind Energy Projects in Cold Climates », International Energy Agency, Research and Development on Wind Energy Conversion Systems, Rapport technique, 2005.
- [49] M. Prescornic. « Modélisation médo-échelle d'événements de précipitation givrante pour un parc éolien », Montréal : École de technologie supérieure – Université du Québec, 2015.
- [50] G. Wakahama. « Experimental studies of snow accretion on electric lines developed in a strong wind », *J. Nat. Disaster Sci.*, vol. 1, p. 21-33, 1979.
- [51] T. Houston et S. Changnon. « Freezing rain events: A major weather hazard in the conterminous United States », *Nat. Hazards*, vol. 40, p. 485-494, 2007.
- [52] A. Lacroix. « Atmospheric icing effects on wind energy production in Canada », chez *WindterWind*, Ostersund, Suède, 2013.
- [53] S. Uppala, D. Kobayashi, P. Beresford et A. Simmons. « Towards a climate data assimilation system: status update of ERA-Interim », *ECMWF Newsletter*, vol. 115, p. 12-18, 2008.
- [54] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe et E. Bossanyi. « The Wind Resource », chez *Wind Energy Handbook*, 2<sup>e</sup> éd., Chichester, Wiley, 2011, p. 9-38.
- [55] P. Drobinski, A. Anav, B. C. Lebeaupin, G. Samson, M. Stéfanon et al. « Model of the Regional Coupled Earth system (MORCE): Application to process and climate studies in vulnerable regions », *Environ Model Soft*, vol. 35, p. 1-18, 2012.

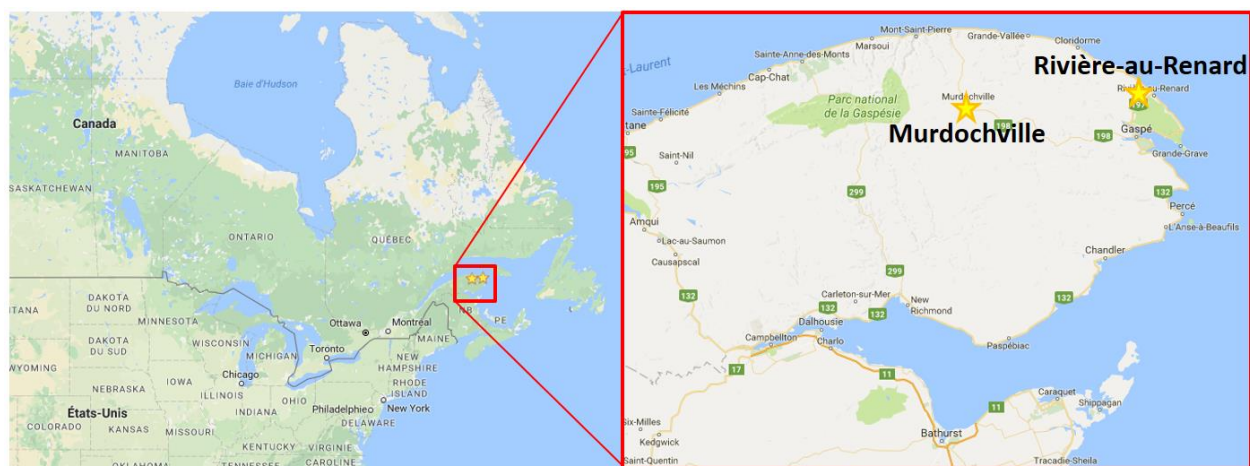
- [56] L. Menut, O. P. Tripathi, A. Colette, R. Vautard, E. Flaounas et B. Bessagnet. « Evaluation of regional climate simulations for air quality modelling purposes », *Climate Dynamics*, Vol. 1 sur 240, issue 9, n°1, DOI : 10.1007/s00382-012-1345-9, p. 2515-2533, 2013.
- [57] L. Menut, S. Mailler, J. C. Dupont, M. Haeffelin et T. Elias. « Predictability of the meteorological conditions favorable to radiative fog formation during the 2011 ParisFog campaign », *Boundary Layer Meteorology*, vol. 150 issue 2, n°1, DOI : 10.1007/s10546-013-9875-1 , p. 277-297, 2014.



## ANNEXES

### ANNEXE A. CARTES DES SITES ÉTUDIÉS

La Figure 39 présente une carte des sites étudiés dans le cadre de cette étude.



**Figure 39 – Positions des sites de Rivière-au-Renard et de Murdochville**

La Figure 40 présente les positions des points de modèle utilisés pour la modélisation à chacun des trois sites d'étude. Le Tableau 22 présente les distances entre les positions réelles des sites et les positions des points modélisés. Les distances sont calculées à vol d'oiseau, en kilomètres. Plus la distance est petite entre la position modélisée et la position réelle, plus la modélisation du givre devrait être proche des observations. Au contraire, plus les positions sont éloignées, plus la modélisation du givre risque de différer des observations.

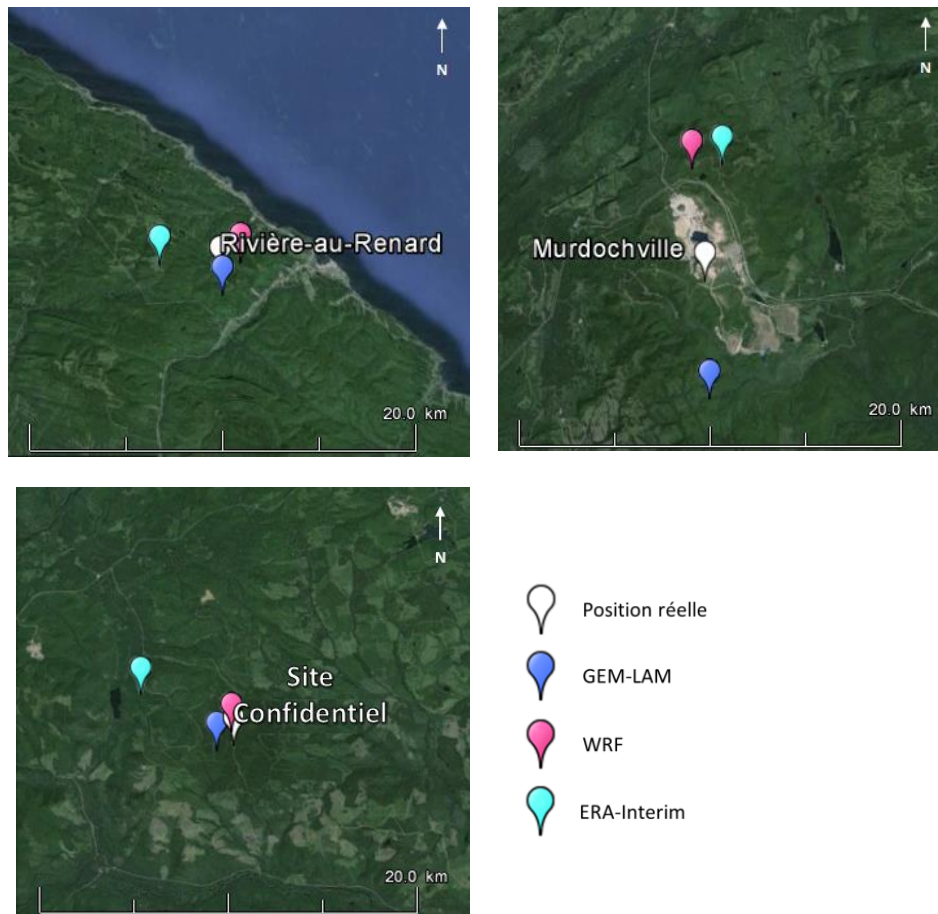


Figure 40 – Position des points de modèle pour les trois sites d'étude

Tableau 22 – Distance entre la position réelle des sites et les positions modélisées

	Distance pos. réelle – pos. GEM-LAM (km)	Distance pos. réelle – pos. ERA-Interim (km)	Distance pos. réelle – pos. WRF (km)
Rivière-au-Renard	1,0	3,2	1,2
Murdochville	6,1	6,1	5,8
Site confidentiel	0,9	5,7	0,7

## ANNEXE B. LISTE DE CAPTEURS

Les capteurs utilisés à chaque site sont listés dans les tableaux suivants.

**Tableau 23 – Configuration des capteurs du mât météorologique TMV2**

Type	Modèle	Hauteur (m)
Anémomètre / girouette ultrasoniques chauffés	LUFFT 8371-UMT	15,3
Pyranomètre	LICOR LI200SZ	0
Thermomètre / hygromètre	Vaisala HMP60 C12A0A3A0	2
Girouette mécanique chauffée	NRG IceFree3V	15,3
Girouette mécanique non chauffée	RMY 05103VM	12,5
Senseur de visibilité	Vaisala PWD22	0
Anémomètre non chauffé	RMY 05103VM	12,5
Anémomètre à coupelle chauffé	NRG IceFree3A	15,3

**Tableau 24 – Configuration des capteurs du mât météorologique MMV2**

Type	Modèle	Hauteur (m)
Girouette chauffée	NRG IceFree3V	103
Girouette non chauffée	DWC VXV	122
Baromètre	RMY 61205V	78,88
Détecteur de glace	T44	75,5
Pyranomètre	LI-200S	14
Anémomètre / girouette ultrasoniques chauffés	Gill WO65	122
Anémomètre à coupelle chauffé	NRG Hybrid	126,48
Anémomètre à coupelle non chauffé	Thies 1stClass	126,41
Ceilomètre	8339	11
Thermomètre / hygromètre	Vaisala HMP60 C12A0A3A0	78

**Tableau 25 – Configuration des capteurs du mât météorologique du site confidentiel**

Type	Modèle	Hauteur [m]
Girouette chauffée	N/S	77
Girouette non chauffée	N/S	77
Baromètre	N/S	81
Pyranomètre	N/S	2
Anémomètre / girouette ultrasoniques chauffés	N/S	81
Anémomètre à coupelle chauffé	N/S	77
Anémomètre à coupelle non chauffé	N/S	79
Thermomètre / hygromètre	-	0

## ANNEXE C. ÉTAPES DU CONTRÔLE QUALITÉ

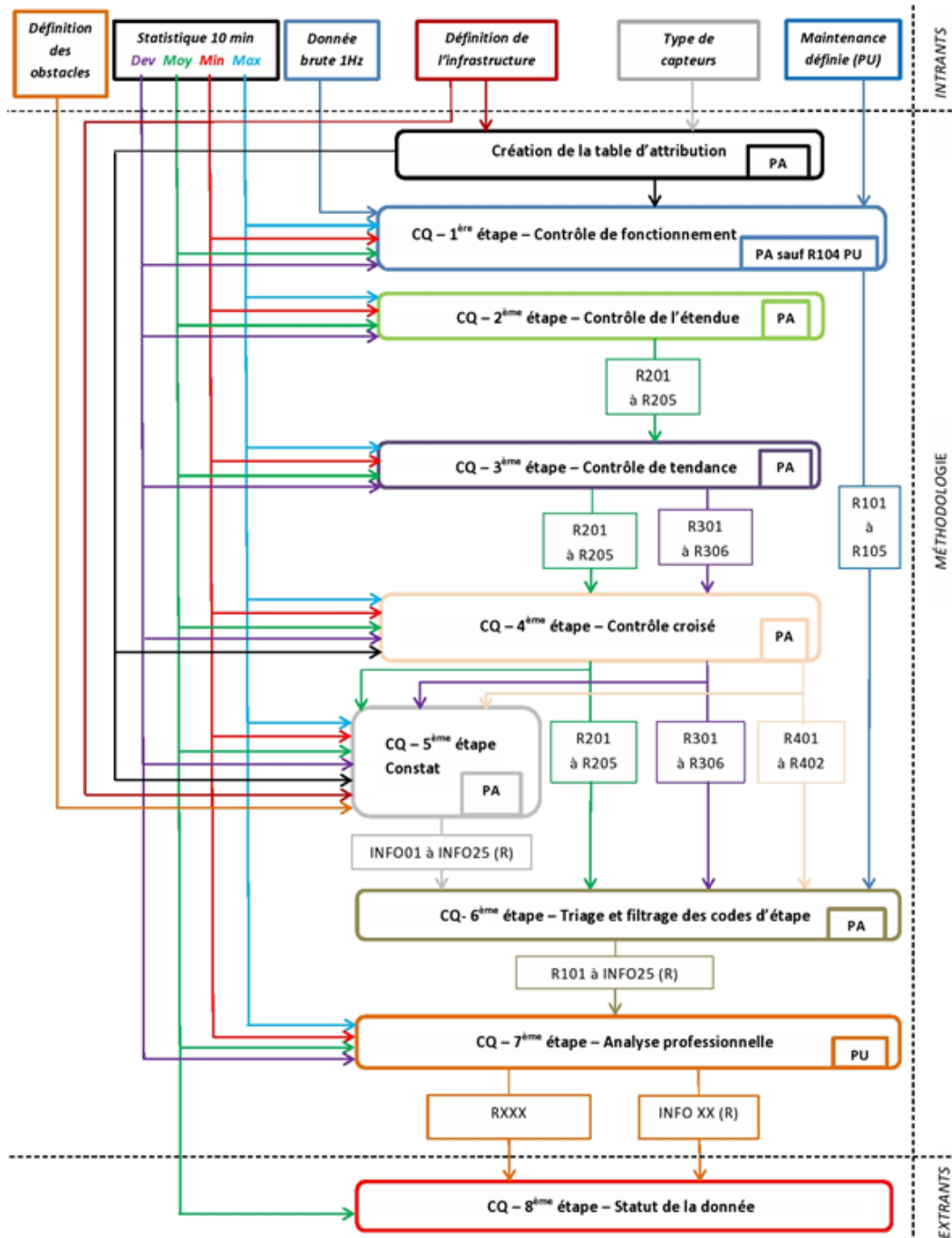


Figure 41 - Schéma des étapes du contrôle qualité

Note : PA : Partie automatique; PU : Partie utilisateur.

Tableau 26 – Référence aux tests en fonction des étapes

	Étape	Code d'étape	Statut de la donnée
RXXX	R10X	R101	Donnée absente ou non calculée
		R102	Donnée non synchronisée
		R103	Taux de recouvrement
		R104	Maintenance
		R105	Opération
	R20X	R201	Crédibilité max
		R202	Crédibilité min
		R203	Crédibilité écart type max
		R204	Crédibilité écart type min
		R205	Crédibilité mensuelle
	R30X	R301	Taux variation max
		R302	Taux variation temporelle max
		R303	Taux variation min CT
		R304	Taux variation min MT
		R305	Taux variation naturelle
		R306	Variance de l'ensemble
	R40X	R401	Comparaison multiniveaux
		R402	Cohérence
INFOXXX	INFO01	Givre – anémomètre à coupelle non chauffée vs chauffée de référence	
	INFO02	Givre – anémomètre à coupelle chauffée vs chauffée de référence	
	INFO03	Givre – Température de givre	
	INFO04	Givre – Test de visibilité horizontale ou verticale	
	INFO05	Givre – Test sur la température de l'air, l'humidité et la radiation solaire	
	INFO06	Givre – Test sur la courbe de puissance et la vitesse du vent	
	INFO07	Givre – Givrage de la girouette non chauffée vs direction de référence	
	INFO08	Givre – Givrage de la girouette chauffée vs direction de référence	
	INFO09	Givre – Givre du capteur (par l'utilisateur du CQ)	
	INFO20	Sillage dû à la présence de la tour	
	INFO21	Sillage dû à la présence d'obstacles	
	INFO22	Vent faible	
	INFO23	Température froide extrême	
	INFO24	Pas de nuage	
	INFO25	Arrêt de l'éolienne	
	INFO26	Vent fort	

## ANNEXE D. ADAPTATION DES DONNÉES DE ERA-INTERIM

### D.1 Interpolation temporelle

Les données ERA-Interim ne sont pas disponibles en niveaux d'altitude comme les données GEM-LAM, mais en niveaux de modèle « sigma ». Ces niveaux de modèle suivent approximativement le relief de la Terre pour la partie inférieure de l'atmosphère [37], donc la partie de l'atmosphère étudiée dans le cadre de cette étude. Pour utiliser conjointement les données ERA-Interim et les données GEM-LAM, il faut établir une correspondance entre les niveaux de modèle et leur équivalent en altitude.

Le Tableau 27 [38] présente ces correspondances.

**Tableau 27 – Altitude approximative des 10 premiers niveaux de modèle « sigma » de ERA-Interim**

Niveau de modèle <i>j</i>	Altitude approximative correspondante (m)
51	909,70
52	714,05
53	546,11
54	404,74
55	288,57
56	195,85
57	124,48
58	71,89
59	34,97
60	10,00

Les 10 niveaux sont énumérés dans le tableau ci-haut et correspondent aux altitudes des structures étudiées, allant de 300 m à 900 m. Ainsi, les niveaux 52, 53 et 56 sont sélectionnés pour Murdochville, pour le site confidentiel et pour Rivière-au-Renard, respectivement. Ces niveaux représentent les altitudes à proximité de l'endroit où est évalué et modélisé le givre.

## **D.2 Interpolation temporelle**

Les données ERA-Interim sont disponibles aux six heures, tandis que celles de GEM-LAM sont disponibles à chaque heure. Ainsi, l'interpolation des données d'ERA-Interim est nécessaire à toutes les heures pour obtenir une équivalence. Les données sont interpolées avec le « lowpass interpolating filter » de Matlab [39]. Cette interpolation permet d'augmenter la quantité de données pour un échantillon choisi à l'aide d'une interpolation linéaire. On passe par exemple d'un échantillon de deux nombres [1 2] à un échantillon de cinq nombres [1 1,25 1,5 1,75 2] en maintenant l'étendue de l'échantillon.

## ANNEXE E. ÉQUATIONS MATHÉMATIQUES DES MODÈLES D'ACCUMULATION DE GIVRE

Les données d'entrée du modèle GLJM proviennent de GEM-LAM à l'exception du contenu en eau liquide qui provient de ERA-Interim. L'accumulation de glace est simulée sur un cylindre de 48,5 mm de diamètre.

### E.1 Modèle de Jones pour la pluie verglaçante

Le taux d'accumulation de glace est calculé comme suit :

$$\frac{dR(t)}{dt} = 0,35 \cdot P \cdot \left[ 1 + \left( \frac{V}{5} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Avec :

$R$  : Épaisseur de l'accumulation de glace (m);

$t$  : Temps (s);

$P$  : Taux de précipitation (m/s);

$V$  : Vitesse du vent (m/s).

Le taux de précipitation considéré dépend du taux de précipitation de la pluie verglaçante et du taux de précipitation de la pluie dans le cas où la température de l'air est inférieure ou égale à 2 °C [10], [40]. En effet, pour une surface froide, la pluie va givrer sans être identifiée comme de la pluie verglaçante par le modèle.

### E.2 Modèle de Makkonen pour un nuage givrant

Le taux d'accumulation de masse de glace par unité de longueur est calculé comme suit :

$$\frac{dM(t)}{dt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \omega \cdot V \cdot D_c$$

Avec :

$M$  : Masse de glace par unité de longueur (kg/m);

$t$  : Temps (s);

$\alpha_1 = 0,225 \cdot \omega$  : Paramètre d'efficacité de collision;

$\omega$  : Contenu en eau liquide actif du nuage (kg/m<sup>3</sup>);

$\alpha_2 = 1$  : Paramètre d'efficacité d'adhérence;

$\alpha_3 = 1$  : Paramètre d'efficacité d'accrétion;

$V$  : Vitesse du vent (m/s);

$D_c = 0,445$  : Diamètre du cylindre (m).

Pour ce modèle, on considère seulement le contenu en eau liquide actif, c'est-à-dire le contenu en eau liquide existant à des températures inférieures ou égales à 0 °C et pouvant givrer. Le paramètre d'efficacité de collision est calculé avec la paramétrisation de Drage et Hauge [41], les paramètres d'efficacité d'adhérence et d'efficacité d'accrétion sont imposés tous deux à 1 [13], [10].

L'épaisseur radiale de glace est calculée comme suit :

$$D(t) = \left\{ \frac{4 \cdot [M(t) - M(t-1)]}{\pi \cdot \rho_i} + D^2(t-1) \right\}^{1/2}$$

Avec :

$D$  : Épaisseur radiale de glace ( $m$ );

$\rho_i = 100 + 20 \cdot V$  : Densité de la glace accrétée due à un nuage givrant [14].

$V$  : Vitesse du vent ( $m/s$ );

Finalement, le taux d'accumulation de glace est calculé comme suit :

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{dD(t)}{dt}$$

Avec :

$R$  : Épaisseur de l'accumulation de glace ( $m$ ).

### E.3 Modèle de Makkonen pour la neige fondante

Le taux d'accumulation de masse de glace par unité de longueur est calculé comme suit :

$$\frac{dM(t)}{dt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \omega \cdot V_i \cdot D_c$$

Avec :

$M$  : Masse de glace par unité de longueur ( $kg/m$ );

$t$  : Temps ( $s$ );

$\alpha_1 = 1$  : Paramètre d'efficacité de collision;

$\alpha_2$  : Paramètre d'efficacité d'adhérence;

$\alpha_3 = 1$  : Paramètre d'efficacité d'accrétion;

$\omega = \frac{\text{neige, pluie, cristaux de glace et pluie verglaçante}}{v_s}$  : Concentration de masse

de neige fondante ( $kg/m^3$ );

$V_i = (V^2 + v_s^2)^{1/2}$  : Vitesse d'impact des flocons de neige fondante ( $m/s$ );

$v_s = 1,7$  : Vitesse terminale de la neige fondante ( $m/s$ );

$V$  : Vitesse du vent ( $m/s$ );

$D_c = 0,445$  : Diamètre du cylindre ( $m$ ).

Les paramètres d'efficacité de collision et d'efficacité d'accrétion sont imposés tous deux à 1 [13], [10]. Les concentrations de masse de neige, de pluie, de cristaux de glace et de pluie verglaçante sont calculées selon la méthode employée par Nygaard et al. [42], référant à Admirat [43]. La vitesse d'impact des flocons de neige fondante est calculée à partir de la vitesse du vent et de la vitesse terminale des flocons de neige [42], [44].

Le coefficient d'efficacité d'adhérence ( $\alpha_2$ ) est calculé selon la méthode employée par Nygaard et al. [42] :

$$\alpha_2 = \frac{1 - \cos(9 \cdot SR - 4,5)}{2 \cdot V^{0,4}}$$

Avec :

$$SR = \frac{\text{neige, cristaux de glace et pluie verglaçante}}{\text{précipitations totales (neige, pluie, cristaux de glace et pluie verglaçante)}}$$

$0,5 < SR < 0,98$  : Fraction de précipitation gelée;

$V$  : Vitesse du vent ( $m/s$ );

L'épaisseur radiale de glace est calculée comme suit :

$$D(t) = \left\{ \frac{4 \cdot [M(t) - M(t-1)]}{\pi \cdot \rho_i} + D^2(t-1) \right\}^{1/2}$$

Avec :

$D$  : Épaisseur radiale de glace ( $m$ );

$\rho_i = 700$  : Densité de la glace accrétée due à de la neige fondante ( $kg/m^3$ ) [42].

Finalement, le taux d'accumulation de glace est calculé comme suit :

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{dD(t)}{dt}$$

Avec :

$R$  : Épaisseur de l'accumulation de glace ( $m$ ).

## ANNEXE F. CORRECTION DES DONNÉES GEM-LAM

### F.1 Correction des données de vent

La méthode de mesure-corrélation-prédiction permet de faire la prévision du vent à une hauteur d'intérêt à partir de mesures du vent à une hauteur inférieure [45]. Cette méthode est ici utilisée pour corriger les données GEM-LAM qui ont été modélisées à une altitude inférieure à celle de l'éolienne. Les paramètres  $a$  et  $b$  de mesure-corrélation-prédiction utilisés sur les données de vent de GEM-LAM sont listés dans les Tableau 28 et Tableau 29. Ces paramètres sont utilisés comme suit pour corriger le vent :  $V_{\text{corrigé}} = a \cdot V_{\text{GEM-LAM}} + b$ . Des paramètres  $a$  et  $b$  sont calculés pour chaque mois étudié à partir des observations de vent. Lorsque les observations ne sont pas disponibles (mois de mars et avril 2014 à Rivière-au-Renard et mois d'octobre 2013 à Murdochville), aucun paramètre ne peut être calculé et les moyennes de  $a$  et  $b$  sont utilisées. De plus, la valeur du coefficient de détermination ( $R^2$ ) est inscrite dans la dernière colonne, indiquant la qualité de la prévision du vent corrélé par rapport au vent observé (0 étant le pire, 1 étant parfait).

**Tableau 28 – Mesure-corrélation-prédiction de vent pour Rivière-au-Renard**

Rivière-au-Renard				
Année	Mois	$a$	$b$	$R^2$
2013	10	1,0744	1,7301	0,7068
2013	11	1,1398	0,7807	0,7176
2013	12	1,2157	1,4052	0,6833
2014	01	1,0791	2,7170	0,5689
2014	02	0,9562	2,6072	0,6642
2014	03	X	X	X
2014	04	X	X	X
2014	05	0,5587	3,3244	0,4456
2014	10	1,0333	1,2471	0,6691
2014	11	0,9048	1,4119	0,6850
2014	12	0,9587	0,6863	0,7474
2015	01	1,0292	0,4268	0,6567
2015	02	1,1298	0,0763	0,8534
2015	03	1,0902	-0,2480	0,7579
2015	04	0,8215	2,0676	0,6600
2015	05	0,7653	1,8824	0,5378
Moyenne		0,9826	1,4368	0,6681

**Tableau 29 – Mesure-corrélation-prédiction de vent pour Murdochville**

Murdochville				
Année	Mois	$a$	$b$	$R^2$
2013	10	X	X	X
2013	11	1,1227	2,1350	0,5775
2013	12	1,3195	1,9597	0,5762
2014	01	1,3081	0,3781	0,6237
2014	02	1,2641	1,4889	0,5963
2014	03	1,3172	1,4566	0,5512
2014	04	1,3059	0,9007	0,6749
2014	05	1,0412	1,5730	0,5359
2014	10	0,9949	2,4698	0,5420
2014	11	1,1153	1,8076	0,6394
2014	12	1,1781	0,4237	0,7539
2015	01	1,0666	1,6954	0,6422
2015	02	1,3132	0,1874	0,8238
2015	03	1,3148	0,0412	0,7432
2015	04	1,1413	1,6556	0,6505
2015	05	1,0293	1,0752	0,5984
Moyenne		1,1888	1,2832	0,6353

## F.2 Correction des données de température

Les paramètres  $a$  et  $b$  de mesure-corrélation-prédiction sont également utilisés sur les données de température de GEM-LAM. Ces paramètres sont listés dans le Tableau 30 et Tableau 31. Ces paramètres sont utilisés comme suit pour corriger la température :  $T_{\text{corrigée}} = a \cdot T_{\text{GEM-LAM}} + b$ . Des paramètres  $a$  et  $b$  sont calculés pour chaque mois étudié à partir des observations de température. Lorsque les observations ne sont pas disponibles (mai 2014 à Murdochville), aucun paramètre ne peut être calculé et les moyennes de  $a$  et  $b$  sont utilisées. De plus, la valeur du coefficient de détermination ( $R^2$ ) est inscrite dans la dernière colonne, indiquant la qualité de la prévision de la température corrélée par rapport à la température observée (0 étant le pire, 1 étant parfait).

**Tableau 30 – Mesure-corrélation-prédiction de température pour Rivière-au-Renard**

Rivière-au-Renard				
Année	Mois	$a$	$b$	$R^2$
2013	10	1,0245	-2,2317	0,9487
2013	11	0,9734	-2,3013	0,9657
2013	12	0,9237	-3,0502	0,9648
2014	01	0,9307	-2,9354	0,9734
2014	02	0,9013	-2,8057	0,9518
2014	03	0,8779	-2,9844	0,9473
2014	04	1,0418	-1,9158	0,9046
2014	05	0,9381	-1,3110	0,9169
2014	10	0,9821	-1,6952	0,9401
2014	11	0,9567	-2,4321	0,9258
2014	12	0,9610	-2,5102	0,9473
2015	01	0,9125	-2,9680	0,9450
2015	02	0,9036	-2,9616	0,9336
2015	03	1,0902	-0,2480	0,8841
2015	04	1,0129	-1,3626	0,9120
2015	05	0,9469	-0,5914	0,8597
Moyenne		0,9611	-2,1440	0,9326

**Tableau 31 – Mesure-corrélation-prédiction de température pour Murdochville**

Murdochville				
Année	Mois	<i>a</i>	<i>b</i>	R <sup>2</sup>
2013	10	1,0333	-1,9211	0,9576
2013	11	0,9766	-1,8161	0,9693
2013	12	0,9901	-1,7704	0,9565
2014	01	0,9558	-2,2313	0,9600
2014	02	0,9395	-2,5936	0,9463
2014	03	0,9550	-2,3288	0,9580
2014	04	0,9615	-1,7707	0,9053
2014	05	X	X	X
2014	10	0,9472	-1,5799	0,8702
2014	11	0,8835	-2,6873	0,9325
2014	12	0,9419	-1,8982	0,9372
2015	01	0,9112	-2,5966	0,9408
2015	02	0,8839	-3,1518	0,8806
2015	03	0,9639	-1,8839	0,9509
2015	04	1,0455	-0,7081	0,9345
2015	05	0,9284	-0,3717	0,8930
Moyenne		0,9545	-1,9540	0,9328

## ANNEXE G. STATISTIQUES DES DONNÉES QUALIFIÉES

Le Tableau 32 présente les statistiques des données qualifiées pour Rivière-au-Renard. Pour l’hiver 2013-2014, 60 % des données de l’anémomètre (WdSpdRefHt) et de la girouette (WdDirRefHt) sont bonnes pour l’analyse. Cependant, de mars 2014 à mai 2014, ces capteurs sont défectueux, rendant ainsi les périodes de givre difficiles à déterminer. Pour la radiation solaire, 50 % des données seulement sont qualifiées : le pyranomètre (SolRad) installé n’enregistre aucune radiation solaire la nuit, les données nocturnes sont donc rejetées. Pour les autres capteurs, plus de 70 % des données sont qualifiées. Étant donné que le givre affecte le fonctionnement de l’anémomètre à coupelle non chauffé (WdSpdUnHt), le pourcentage de données qualifiées tirées de celui-ci est inférieur à celui de l’anémomètre à coupelle chauffé (WdSpdHt).

**Tableau 32 – Statistiques des données qualifiées pour Rivière-au-Renard**

Capteur	Données qualifiées [%]	
	2013-2014	2014-2015
WdSpdRefHt	60,39	86,41
WdSpdUnHt	72,09	69,39
WdSpdHt	89,98	86,83
Temp	94,88	95,90
RH	93,53	93,31
HzVis	98,36	97,55
SolRad	49,11	51,80
WdSpdRefHt2	90,61	88,53
W	88,75	83,20
Press	60,37	92,37
WdDirRefHt	59,43	65,66
WdDirUnHt	84,10	80,52
WdDirHt	85,46	86,32

Le Tableau 33 présente les statistiques des données qualifiées pour Murdochville. Pour l’hiver 2013-2014, les anémomètres non chauffé (WdSpdUnHt) et chauffé (WdSpdHt) atteignent des pourcentages de données qualifiées variant entre 40 % et 60 %. Pour ces deux types de capteurs, les données qualifiées de Murdochville sont inférieures à celle de Rivière-au-Renard. Compte tenu de la variation du nombre de données dans l’intervalle de 10 minutes du capteur de visibilité (HzVis), la statistique des données qualifiées n’est pas évaluée. Le capteur de radiation solaire (SolRad) de Murdochville est de meilleure qualité que celui de Rivière-au-Renard. Ainsi, le pourcentage de données qualifiées pour Murdochville est supérieur à celui de Rivière-au-Renard.

**Tableau 33 – Statistiques des données qualifiées pour Murdochville**

Capteur	Données qualifiées [%]	
	2013-2014	2014-2015
WdSpdRefHt	71,52	81,05
WdSpdUnHt	46,18	55,45
WdSpdHt	56,25	75,93
Temp	70,37	94,60
RH	68,78	88,99
HzVis	-	-
SolRad	85,37	98,74
WdDirRefHt	71,71	87,61
WdDirUnHt	74,71	80,43
WdDirHt	64,86	62,95

Le Tableau 34 présente les statistiques des données qualifiées pour le site confidentiel. Il faut noter que les données n'ont été enregistrées que pour trois mois : octobre 2014 à décembre 2014. Bien que les 13 meilleurs capteurs aient été sélectionnés pour l'étude, les statistiques des données qualifiées sont presque toutes inférieures à 60 %. Ce pourcentage aura un impact sur la qualité de la détection de givre pour le site.

**Tableau 34 – Statistiques des données qualifiées pour le site confidentiel**

Capteur	Données qualifiées [%]	
	2013-2014	2014-2015
WdSpdRefHt	-	39,14
WdSpdUnHt	-	60,68
WdSpdHt	-	59,62
Temp	-	26,70
RH	-	36,07
HzVis	-	-
SolRad	-	18,93
WdSpdRefHt2	-	52,33
W	-	51,83
Press	-	0,01
WdDirRefHt	-	46,07
WdDirUnHt	-	40,66
WdDirHt	-	55,70

## ANNEXE H. TABLEAUX DES RÉSULTATS POUR LE SITE DE RIVIÈRE-AU-RENARD

Les tableaux suivants présentent les résultats par hiver pour les observations, pour la modélisation avec GLJM et pour la modélisation avec WRF. Les mêmes événements (pour un même site et un même hiver) sont représentés par le même numéro d'événement (n°).

Légende pour les types de givre :

gb : givre blanc  
gbl : gelée blanche  
vg : verglas  
m : mixte  
nf : neige fondante

**Tableau 35 – Tableau des observations pour Rivière-au-Renard durant l'hiver 2013-2014**

Observations – Rivière-au-Renard 2013-2014											
n°	Début		Fin		Durée [h]	Accu. [mm]	Charge [kg/m]	Type	Classe ICR	Taux [kg/m h]	Pertes prod. [MWh]
	Jour	Heure	Jour	Heure							
1	2013-11-11	11:30	2013-11-12	17:10	30	-	-	-	-	-	0,2
2	2013-11-22	04:00	2013-11-23	20:10	40	-	-	-	-	-	10,6
3	2013-12-02	17:00	2013-12-06	13:00	92	137,4	5,30	gb	5	0,10	94,6
4	2013-12-15	10:50	2013-12-15	17:10	6	46,25	1,27	gb	3	0,25	0,2
5	2013-12-21	21:00	2013-12-22	16:00	19	-	-	-	-	-	8,0
6	2013-12-30	12:30	2013-12-31	07:30	19	44,33	1,08	-	-	0,29	7,2
7	2014-01-17	08:50	2014-01-17	17:50	9	39,00	0,91	gb	2	-	0,5
8	2014-01-26	11:40	2014-01-26	19:20	8	51,00	1,37	gbl	3	-	0,1
9	2014-02-24	03:20	2014-02-24	13:20	10	-	-	gbl	-	-	0,4
10	2014-03-15	01:30	2014-03-15	19:30	18	36,65	0,93	gb	2	-	-0,4
11	2014-03-16	10:30	2014-03-16	13:30	3	-	-	gb	-	-	0,0
12	2014-03-21	10:40	2014-03-21	17:50	7	39,53	1,02	gb	2	-	1,9
13	2014-03-31	10:10	2014-03-31	23:00	13	39,05	1,03	-	2	-	2,6
14	2014-04-05	11:50	2014-04-06	19:30	32	41,45	1,00	gb	1	-	4,9
15	2014-04-08	18:30	2014-04-08	20:30	2	-	-	-	-	-	3,1
16	2014-04-23	9:30	2014-04-26	15:00	78	92,45	3,01	-	4	-	60,2
17	2014-04-28	7:20	2014-04-28	15:20	8	-	-	-	-	-	0,8

Tableau 36 – Tableau des observations pour Rivière-au-Renard durant l'hiver 2014-2015

Observations – Rivière-au-Renard 2014-2015											
n°	Début		Fin		Durée [h]	Accu. [mm]	Charge [kg/m]	Type	Classe ICR	Taux [kg/m h]	Pertes prod. [MWh]
	Jour	Heure	Jour	Heure							
1	2014-11-02	09:20	2014-11-05	13:10	76	179,5	6,72	m	6	0,36	72,8
2	2014-11-07	00:10	2014-11-08	00:10	24	76,18	1,94	gb	3	0,04	3,6
3	2014-11-12	10:00	2014-11-13	00:40	15	61,11	1,77	gb	3	-	13,5
4	2014-11-18	06:50	2014-11-20	03:30	45	-	-	-	-	-	12,7
5	2014-11-27	11:50	2014-11-28	00:30	13	13,07	0,22	m	1	0,07	10,4
6	2014-12-10	00:00	2014-12-12	02:20	50	168,4	6,14	m	5	0,14	62,0
7a	2014-12-17	22:30	2014-12-25	09:30	179	70,30	1,90	gb	3	0,08	83,1
7b											
8	2014-12-28	17:40	2014-12-29	09:20	16	-	-	-	-	-	3,7
9	2015-01-19	08:20	2015-01-26	06:00	166	-	-	-	-	-	30,5
10	2015-01-27	23:40	2015-01-29	06:00	30	-	-	-	-	-	58,1
11	2015-01-31	05:00	2015-02-02	09:50	53	36,36	0,92	-	2	-	79,0
12	2015-02-12	01:00	2015-02-13	16:40	40	57,78	1,64	gbl	3	0,11	7,0
13	2015-02-19	06:20	2015-02-19	18:00	12	39,21	1,01	gbl	2	-	2,7
14	2015-03-18	11:30	2015-03-18	23:00	12	43,50	1,10	gb	2	-	10,7
15	2015-03-21	14:40	2015-03-22	19:30	29	-	-	-	-	-	8,0
16a	2015-04-22	00:10	2015-04-26	20:20	116	180,0	8,00	m	6	-	94,0
16b											
17	2015-05-13	02:00	2015-05-13	15:00	13	70,63	2,13	vg	-	-	14,8

Tableau 37 – Tableau des prévisions de GLJM pour Rivière-au-Renard durant l'hiver 2013-2014

GLJM – Rivière-au-Renard 2013-2014											
n°	Début		Fin		Durée [h]	Accu. [mm]	Charge [kg/m]	Type	Classe ICR	Taux [kg/m h]	Pertes prod. [MWh]
	Jour	Heure	Jour	Heure							
1	2013-11-11	01:00	2013-11-12	16:00	40	16,08	0,78	m	2	0,02	12,9
2	2013-11-21	13:00	2013-11-23	12:00	41	2,77	0,12	gb	1	0,00	13,2
3	2013-12-02	19:00	2013-12-04	15:00	42	47,79	6,02	m	6	0,14	32,0
4											
5	2013-12-21	08:00	2013-12-22	06:00	23	1,99	0,09	gb	1	0,00	13,1
6	2013-12-29	23:00	2013-12-31	01:00	27	2,03	0,12	gb	1	0,00	25,1
7	2014-01-17	00:00	2014-01-18	06:00	31	7,12	0,36	gb	1	0,01	24,3
8	2014-01-26	04:00	2014-01-26	18:00	13	35,57	2,81	m	5	0,22	23,7
9											
10	2014-03-15	06:00	2014-03-16	04:00	26	3,73	0,11	m	1	0,00	17,1
11											
12	2014-03-20	12:00	2014-03-21	13:00	26	17,74	0,78	gb	2	0,03	16,5
13	2014-03-30	19:00	2014-03-31	18:00	24	2,68	0,12	gb	1	0,00	21,6
14	2014-04-05	15:00	2014-04-06	15:00	23	10,21	0,49	gb	1	0,02	14,7
15	2014-04-08	18:00	2014-04-09	01:00	9	27,38	1,92	m	4	0,21	16,4
16	2014-04-23	06:00	2014-04-24	18:00	37	31,51	1,70	m	4	0,05	14,5
17	2014-04-27	12:00	2014-04-28	15:00	28	25,37	1,36	m	2	0,05	16,9

Tableau 38 – Tableau des prévisions de GLJM pour Rivière-au-Renard durant l'hiver 2014-2015

GLJM – Rivière-au-Renard 2014-2015											
n°	Début		Fin		Durée [h]	Accu. [mm]	Charge [kg/m]	Type	Classe ICR	Taux [kg/m h]	Pertes prod. [MWh]
	Jour	Heure	Jour	Heure							
1	2014-11-02	17:00	2014-11-04	08:00	40	47,29	4,09	m	5	0,10	72,0
2	2014-11-07	09:00	2014-11-08	06:00	22	37,11	3,49	m	5	0,16	27,5
3	2014-11-12	01:00	2014-11-13	12:00	36	2,54	0,08	gb	1	0,00	11,8
4	2014-11-17	21:00	2014-11-18	09:00	14	18,75	0,74	m	2	0,05	5,7
5	2014-11-26	19:00	2014-11-27	20:00	26	2,64	0,13	gb	1	0,01	25,0
6	2014-12-10	02:00	2014-12-11	20:00	43	40,51	2,10	m	4	0,05	62,8
7a	2014-12-17	19:00	2014-12-19	07:00	37	14,87	0,85	gb	2	0,02	40,3
7b	2014-12-24	12:00	2014-12-25	03:00	16	10,78	0,56	m	2	0,04	10,9
8											
9	2015-01-19	07:00	2015-01-20	11:00	29	21,63	0,95	m	3	0,06	29,8
10											
11	2015-01-31	05:00	2015-02-01	13:00	30	2,85	0,20	gb	1	0,01	39,2
12											
13	2015-02-18	21:00	2015-02-20	18:00	44	5,02	0,26	gb	1	0,01	21,2
14											
15	2015-03-21	19:00	2015-03-22	18:00	24	6,13	0,34	gb	1	0,01	18,4
16a	2015-04-21	23:00	2015-04-23	12:00	37	24,81	1,44	m	3	0,04	30,3
16b	2015-04-24	11:00	2015-04-26	16:00	63	71,00	7,78	m	6	0,12	31,9
17											

**Tableau 39 – Tableau des prévisions de WRF pour Rivière-au-Renard durant l'hiver 2013-2014**

WRF – Rivière-au-Renard 2013-2014											
n°	Début		Fin		Durée [h]	Accu. [mm]	Charge [kg/m]	Type	Classe ICR	Taux [kg/m h]	Pertes prod. [MWh]
	Jour	Heure	Jour	Heure							
1											
2											
3	2013-12-02	19:00	2013-12-05	06:00	60	221,2	17,47	m	8	0,29	5,8
4	2013-12-15	17:00	2013-12-16	06:00	8	85,39	3,10	nf	5	0,24	3,2
5	2013-12-21	08:00	2013-12-22	10:00	28	2,51	0,15	m	1	0,01	4,7
6	2013-12-30	01:00	2013-12-31	00:00	24	19,11	0,56	gb	2	0,02	7,2
7	2014-01-17	12:00	2014-01-18	02:00	15	3,18	0,03	m	1	0,00	0,2
8	2014-01-25	21:00	2014-01-26	14:00	18	130,0	6,56	nf	6	0,36	1,1
9											
10	2014-03-15	05:00	2014-03-16	01:00	22	2,59	0,18	m	1	0,01	9,6
11											
12	2014-03-20	19:00	2014-03-21	11:00	17	101,3	5,86	nf	6	0,34	3,0
13	2014-03-31	20:00	2014-04-01	01:00	30	58,16	3,28	nf	5	0,11	3,3
14	2014-04-05	15:00	2014-04-06	16:00	26	4,80	0,25	m	1	0,01	5,5
15	2014-04-08	19:00	2014-04-09	03:00	8	78,01	4,90	m	5	0,61	0,0
16	2014-04-23	04:00	2014-04-24	17:00	38	50,36	1,29	m	3	0,03	0,0
17	2014-04-27	06:00	2014-04-28	14:00	32	49,43	1,24	m	3	0,04	0,0

Tableau 40 – Tableau des prévisions de WRF pour Rivière-au-Renard durant l'hiver 2014-2015

WRF – Rivière-au-Renard 2014-2015											
n°	Début		Fin		Durée [h]	Accu. [mm]	Charge [kg/m]	Type	Classe ICR	Taux [kg/m h]	Pertes prod. [MWh]
	Jour	Heure	Jour	Heure							
1	2014-11-02	09:00	2014-11-04	10:00	50	215,6	16,64	nf	8	0,33	1,7
2	2014-11-07	13:00	2014-11-08	19:00	31	102,8	4,29	m	5	0,14	2,4
3	2014-11-11	16:00	2014-11-13	20:00	29	11,96	0,16	m	1	0,01	1,2
4	2014-11-17	23:00	2014-11-18	11:00	13	37,66	0,80	m	2	0,06	0,2
5	2014-11-27	05:00	2014-11-28	01:00	20	46,25	1,11	nf	3	0,06	2,7
6	2014-12-10	10:00	2014-12-11	22:00	37	152,2	8,74	m	6	0,24	5,3
7a	2014-12-17	19:00	2014-12-19	14:00	44	106,2	4,54	m	5	0,10	6,9
7b											
8											
9	2015-01-19	18:00	2015-01-20	04:00	10	34,86	1,59	m	3	0,16	0,0
10	2015-01-27	19:00	2015-01-29	03:00	33	71,83	2,30	nf	4	0,07	23,4
11	2015-01-31	13:00	2015-02-02	02:00	36	104,9	5,36	nf	6	0,31	25,1
12											
13											
14	2015-03-18	10:00	2015-03-19	02:00	16	23,36	0,39	m	1	0,02	0,2
15	2015-03-21	03:00	2015-03-22	03:00	25	99,96	4,08	nf	5	0,16	0,0
16a	2015-04-21	21:00	2015-04-23	11:00	39	164,0	10,00	m	7	0,26	1,0
16b	2015-04-24	06:00	2015-04-26	18:00	60	15,84	1,77	m	4	0,03	1,3
17	2015-05-13	02:00	2015-05-13	11:00	10	28,83	0,56	m	2	0,06	0,0

## ANNEXE I. TABLEAUX DES RÉSULTATS POUR LE SITE DE MURDOCHVILLE

Les tableaux présentent les résultats par hiver pour les observations, pour la modélisation avec GLJM et pour la modélisation avec WRF. Les mêmes événements (pour un même site et un même hiver) sont représentés par le même numéro (n°).

Légende pour les types de givre :

gb : givre blanc  
gbl : gelée blanche  
vg : verglas  
m : mixte  
nf : neige fondante

Tableau 41 – Tableau des observations pour Murdochville durant l’hiver 2013-2014

Observations – Murdochville 2013-2014											
n°	Début		Fin		Durée [h]	Accu. [mm]	Charge [kg/m]	Type	Classe ICR	Taux [kg/m h]	Pertes prod. [MWh]
	Jour	Heure	Jour	Heure							
1	2013-11-09	05:50	2013-11-16	08:50	171	97,00	2,80	gb	4	-	172,2
2	2013-11-17	19:40	2013-11-18	19:50	24	-	-	-	-	-	38,2
3	2013-11-22	14:40	2013-11-23	08:10	18	-	-	-	-	-	4,7
4	2013-11-27	03:40	2013-11-28	03:30	24	-	-	-	-	-	35,0
5a	2013-12-02	03:40	2013-12-07	23:30	140	90,00	2,22	gb	4	-	144,8
5b											
6	2013-12-08	19:10	2013-12-10	07:50	37	31,90	0,60	-	1	-	47,5
7	2013-12-10	17:30	2013-12-12	02:40	33	44,90	1,00	gb	2	-	48,2
8	2013-12-12	14:50	2013-12-13	02:40	12	-	-	gb	-	-	18,5
9	2013-12-18	04:50	2013-12-19	14:40	34	-	-	gb	-	-	41,8
10	2013-12-21	05:10	2013-12-25	16:30	107	-	-	m	-	-	107,6
11	2013-12-29	21:50	2013-12-31	16:20	43	-	-	-	-	-	53,3
12a	2014-01-01	07:50	2014-01-13	21:50	302	-	-	-	-	-	18,3
12b											
13a	2014-01-15	03:20	2014-01-18	15:30	84	25,90	0,50	gb	1	-	85,9
13b											
14a	2014-01-19	10:50	2014-01-29	15:40	245	66,90	1,72	m	3	-	344,3

14b											
14c											
14d											
15	2014-01-30	07:20	2014-01-30	16:20	9	25,90	0,50	gb	1	-	14,9
16	2014-02-02	22:50	2014-02-05	06:00	55	-	-	gb	-	-	59,3
17	2014-02-05	17:50	2014-02-06	03:30	10	-	-	gb	-	-	4,2
18	2014-02-07	03:00	2014-02-07	13:20	10	-	-	gb	-	-	12,2
19	2014-02-10	00:00	2014-02-13	00:40	73	-	-	gb	-	-	67,5
20	2014-02-23	05:30	2014-02-23	14:00	9	-	-	gb	-	-	15,3
21	2014-02-26	00:20	2014-02-26	13:40	13	-	-	gb	-	-	19,3
22	2014-03-04	01:20	2014-03-05	11:20	34	-	-	gb	-	-	60,7
23	2014-03-10	09:10	2014-03-10	12:10	3	-	-	gbl	-	-	0,8
24	2014-03-11	22:30	2014-03-12	11:30	13	-	-	gb	-	-	20,4
25	2014-03-19	08:40	2014-03-22	12:10	76	-	-	gb	-	-	106,2
26	2014-03-23	06:20	2014-03-23	13:30	7	-	-	gbl	-	-	13,1
27	2014-03-24	00:30	2014-03-25	13:50	37	-	-	gb	-	-	67,5
28	2014-03-26	23:50	2014-03-27	23:20	24	-	-	gb	-	-	42,3
29	2014-03-29	02:00	2014-03-29	15:00	13	-	-	gb	-	-	23,1
30	2014-04-06	00:30	2014-04-06	15:20	15	11,90	0,20	-	1	-	20,9
31	2014-04-08	23:00	2014-04-09	07:40	9	42,90	0,94	-	2	-	15,4
32	2014-04-14	09:20	2014-04-14	15:00	6	-	-	-	-	-	8,9
33a	2014-04-23	15:00	2014-04-26	13:30	71	-	-	-	-	-	112,8
33b											
34	2014-04-27	21:00	2014-04-29	14:50	42	-	-	-	-	-	72,6

Tableau 42 – Tableau des observations pour Murdochville durant l’hiver 2014-2015

Observations – Murdochville 2014-2015											
n°	Début		Fin		Durée [h]	Accu. [mm]	Charge [kg/m]	Type	Classe ICR	Taux [kg/m h]	Pertes prod. [MWh]
	Jour	Heure	Jour	Heure							
1	2014-10-27	04:30	2014-10-28	17:20	37	434,7	8,54	m	8	0,71	61,1
2	2014-10-29	01:30	2014-10-29	09:30	8	-	-	vg	-	-	14,7
3	2014-11-01	05:20	2014-11-01	19:00	14	-	-	vg	-	-	17,6
4	2014-11-02	04:30	2014-11-05	23:20	91	162,0	5,99	m	5	0,32	148,1
5	2014-11-07	10:30	2014-11-08	11:30	25	-	-	m	-	-	44,1
6a	2014-11-11	21:20	2014-11-23	21:00	288	302,0	16,00	m	7	-	445,3
6b											
6c											
7	2015-01-30	22:00	2015-02-01	12:00	38	494,2	37,60	m	8	-	57,6
8	2015-02-03	08:30	2015-02-04	10:45	26	444,0	31,00	m	8	-	45,1
9	2015-02-04	22:00	2015-02-21	14:10	400	463,0	34,00	m	8	-	530,4
10	2015-03-02	09:40	2015-03-03	19:50	34	147,0	5,00	gb	5	-	48,8
11	2015-04-14	14:20	2015-04-14	23:50	10	-	-	-	-	-	13,2
12a	2015-04-22	06:40	2015-04-27	13:20	127	-	-	-	-	-	0,0
12b											
13	2015-05-13	09:00	2015-05-13	17:00	8	136,0	4,52	gb	5	0,57	8,3

Tableau 43 – Tableau des prévisions de GLJM pour Murdochville durant l’hiver 2013-2014

GLJM – Murdochville 2013-2014											
n°	Début		Fin		Durée [h]	Accu. [mm]	Charge [kg/m]	Type	Classe ICR	Taux [kg/m h]	Pertes prod. [MWh]
	Jour	Heure	Jour	Heure							
1	2013-11-10	23:00	2013-11-12	18:00	43	18,76	1,36	gb	3	0,03	34,2
2	2013-11-18	01:00	2013-11-18	16:00	16	2,11	0,16	nf	1	0,01	30,6
3											
4	2013-11-27	12:00	2013-11-28	12:00	25	7,63	0,49	m	1	0,02	4,5
5a	2013-12-02	16:00	2013-12-05	03:00	61	25,25	2,21	gb	4	0,04	83,3
5b	2013-12-06	01:00	2013-12-06	12:00	12	19,37	1,55	gb	3	0,13	23,3
6											
7											
8											
9	2013-12-18	12:00	2013-12-20	06:00	43	1,60	0,09	gb	1	0,00	59,2
10	2013-12-21	03:00	2013-12-22	07:00	29	3,48	0,15	gb	1	0,01	24,1
11	2013-12-30	02:00	2013-12-31	01:00	24	2,67	0,16	gb	1	0,01	37,1
12a	2014-01-06	13:00	2014-01-07	06:00	18	23,54	1,82	m	4	0,10	34,1
12b											
13a	2014-01-14	15:00	2014-01-15	9:00	19	13,38	0,82	nf	2	0,04	20,8
13b	2014-01-17	05:00	2014-01-18	11:00	30	11,38	0,73	gb	2	0,02	22,6
14a	2014-01-19	19:00	2014-01-20	13:00	19	3,28	0,20	gb	1	0,01	27,1
14b											
14c											
14d	2014-01-25	15:00	2014-01-26	17:00	27	12,79	1,06	gb	3	0,04	47,7
15											
16	2014-02-02	06:00	2014-02-03	02:00	19	2,52	0,11	gb	1	0,01	10,1
17											
18											
19											

20	2014-02-22	05:00	2014-02-22	18:00	13	3,42	0,18	gb	1	0,01	19,3
21											
22											
23											
24	2014-03-11	19:00	2014-03-12	06:00	12	1,39	0,08	gb	1	0,01	18,6
25	2014-03-20	18:00	2014-03-21	15:00	22	14,88	0,94	gb	3	0,04	35,5
26											
27											
28	2014-03-26	17:00	2014-03-27	18:00	26	1,11	0,09	gb	1	0,00	48,1
29	2014-03-28	19:00	2014-03-29	12:00	21	6,84	0,35	gb	1	0,02	27,6
30	2014-04-05	13:00	2014-04-06	18:00	30	11,07	0,82	gb	2	0,03	44,6
31	2014-04-08	16:00	2014-04-09	11:00	20	43,47	3,68	m	5	0,18	32,6
32	2014-04-14	01:00	2014-04-14	16:00	16	5,32	0,24	gb	1	0,02	20,9
33a	2014-04-22	21:00	2014-04-24	21:00	48	49,44	4,48	m	5	0,09	61,7
33b											
34	2014-04-27	6:00	2014-04-28	18:00	36	33,72	2,75	gb	4	0,08	57,0

Tableau 44 – Tableau des prévisions de GLJM pour Murdochville durant l'hiver 2014-2015

GLJM – Murdochville 2014-2015											
n°	Début		Fin		Durée [h]	Accu. [mm]	Charge [kg/m]	Type	Classe ICR	Taux [kg/m h]	Pertes prod. [MWh]
	Jour	Heure	Jour	Heure							
1	2014-10-27	01:00	2014-10-28	09:00	33	16,69	1,63	gb	4	0,05	43,0
2	2014-10-29	07:00	2014-10-29	17:00	10	1,41	0,07	gb	1	0,01	17,8
3											
4	2014-11-02	00:00	2014-11-04	10:00	59	25,33	1,77	gb	4	0,03	104,1
5	2014-11-07	13:00	2014-11-08	09:00	21	16,52	1,53	gb	3	0,07	27,4
6a	2014-11-11	19:00	2014-11-13	08:00	38	10,41	0,66	gb	2	0,02	22,9
6b											
6c	2014-11-16	21:00	2014-11-18	19:00	46	10,69	0,77	gb	2	0,02	52,5
7	2015-01-30	18:00	2015-02-01	15:00	43	4,07	0,31	gb	1	0,01	55,3
8											
9											
10											
11	2015-04-15	01:00	2015-04-15	06:00	5	1,62	0,13	m	1	0,03	10,8
12a	2015-04-21	16:00	2015-04-22	16:00	25	14,47	0,51	gb	2	0,02	28,9
12b	2015-04-24	01:00	2015-04-27	03:00	76	42,15	5,26	gb	6	0,07	86,9
13	2015-05-12	11:00	2015-05-13	14:00	28	12,27	0,73	gb	2	0,03	34,1

Tableau 45 – Tableau des prévisions de WRF pour Murdochville durant l’hiver 2013-2014

WRF – Murdochville 2013-2014											
n°	Début		Fin		Durée [h]	Accu. [mm]	Charge [kg/m]	Type	Classe ICR	Taux [kg/m h]	Pertes prod. [MWh]
	Jour	Heure	Jour	Heure							
1	2013-11-09	00:00	2013-11-09	19:00	20	32,87	0,65	m	2	0,03	2,0
2											
3											
4	2013-11-27	09:00	2013-11-27	20:00	11	68,64	4,51	m	5	0,41	1,6
5a	2013-12-02	16:00	2013-12-05	11:00	68	139,3	7,42	m	6	0,11	10,3
5b											
6											
7	2013-12-10	21:00	2013-12-11	21:00	25	4,62	0,37	nf	1	0,01	9,4
8											
9											
10	2013-12-21	06:00	2013-12-25	18:00	108	12,35	0,82	m	2	0,01	33,8
11	2013-12-29	21:00	2013-12-30	21:00	25	8,16	0,35	nf	1	0,01	7,9
12a	2014-01-06	09:00	2014-01-07	00:00	15	115,9	5,33	nf	6	0,36	0,7
12b	2014-01-11	18:00	2014-01-12	01:00	8	107,0	4,61	nf	5	0,58	0,2
13a	2014-01-14	04:00	2014-01-14	18:00	14	21,35	0,34	nf	1	0,02	0,1
13b	2014-01-17	12:00	2014-01-18	05:00	18	21,41	0,44	gb	1	0,02	0,5
14a	2014-01-19	18:00	2014-01-20	13:00	20	21,25	0,36	nf	1	0,02	3,0
14b	2014-01-22	16:00	2014-01-24	06:00	38	48,47	1,08	gb	3	0,03	15,1
14c	2014-01-25	16:00	2014-01-26	12:00	21	77,29	3,70	nf	5	0,18	3,9
14d	2014-01-27	13:00	2014-01-27	22:00	9	20,75	1,54	nf	3	0,17	9,2
15											
16	2014-02-02	04:00	2014-02-03	03:00	23	15,29	0,37	m	1	0,02	2,7
17											
18											
19											
20											

21											
22											
23											
24	2014-03-11	08:00	2014-03-11	12:00	4	19,29	0,30	gb	1	0,07	2,6
25	2014-03-19	03:00	2014-03-22	11:00	57	41,09	2,14	nf	4	0,04	34,1
26											
27	2014-03-23	21:00	2014-03-25	11:00	39	5,25	0,33	m	1	0,01	26,7
28	2014-03-26	20:00	2014-03-27	13:00	18	45,56	3,21	nf	5	0,18	3,6
29	2014-03-28	15:00	2014-03-29	15:00	25	6,91	0,52	m	2	0,02	10,9
30	2014-04-05	10:00	2014-04-07	00:00	39	47,19	1,15	m	3	0,03	7,3
31	2014-04-08	15:00	2014-04-09	03:00	13	117,2	5,52	m	6	0,42	0,1
32	2014-04-14	01:00	2014-04-14	14:00	14	20,48	0,64	gb	2	0,05	0,1
33a	2014-04-23	01:00	2014-04-23	14:00	14	78,52	2,68	m	4	0,19	0,1
33b	2014-04-24	05:00	2014-04-25	21:00	41	63,42	1,92	m	4	0,05	1,0
34	2014-04-27	00:00	2014-04-29	22:00	71	27,98	1,56	gb	3	0,02	3,9

Tableau 46 – Tableau des prévisions de WRF pour Murdochville durant l’hiver 2014-2015

WRF – Murdochville 2014-2015											
n°	Début		Fin		Durée [h]	Accu. [mm]	Charge [kg/m]	Type	Classe ICR	Taux [kg/m h]	Pertes prod. [MWh]
	Jour	Heure	Jour	Heure							
1	2014-10-27	09:00	2014-10-28	07:00	23	77,99	2,65	m	4	0,12	1,8
2											
3											
4	2014-11-02	03:00	2014-11-05	18:00	64	219,2	17,17	nf	8	0,27	16,2
5	2014-11-07	12:00	2014-11-08	17:00	30	129,1	6,45	nf	6	0,22	6,1
6a	2014-11-11	14:00	2014-11-12	23:00	34	63,22	3,54	m	5	0,10	5,1
6b	2014-11-15	03:00	2014-11-15	12:00	10	25,47	0,44	gb	1	0,04	2,3
6c	2014-11-17	21:00	2014-11-19	01:00	29	58,64	2,00	m	4	0,07	3,6
7	2015-01-31	11:00	2015-02-01	12:00	24	40,52	1,73	nf	4	0,09	6,5
8											
9											
10											
11											
12a	2015-04-22	12:00	2015-04-23	02:00	15	213,0	16,26	nf	8	1,08	0,0
12b											
13	2015-05-13	04:00	2015-05-13	13:00	10	39,54	0,86	m	2	0,09	0,1

## ANNEXE J. TABLEAUX DES RÉSULTATS POUR LE SITE CONFIDENTIEL

Les tableaux présentent les résultats par hiver pour les observations, pour la modélisation avec GLJM et pour la modélisation avec WRF. Les mêmes événements (pour un même site et un même hiver) sont représentés par le même numéro (n<sup>o</sup>).

Légende pour les types de givre :

gb : givre blanc  
gbl : gelée blanche  
vg : verglas  
m : mixte  
nf : neige fondante

**Tableau 47 – Tableau des observations pour le site confidentiel durant l’hiver 2014-2015**

Observations – Site confidentiel 2014-2015											
n°	Début		Fin		Durée [h]	Accu. [mm]	Charge [kg/m]	Type	Classe ICR	Taux [kg/m h]	Pertes prod. [MWh]
	Jour	Heure	Jour	Heure							
1	2014-10-02	05:00	2014-10-02	16:00	11	-	-	-	-	-	0,8
2	2014-10-02	23:30	2014-10-03	15:50	16	-	-	-	-	-	0,8
3	2014-10-03	23:50	2014-10-04	22:00	22	-	-	-	-	-	2,2
4	2014-10-05	05:50	2014-10-05	19:40	14	-	-	-	-	-	1,8
5	2014-10-16	02:00	2014-10-17	19:30	42	-	-	-	-	-	5,9
6	2014-10-24	16:10	2014-10-25	00:40	9	-	-	-	-	-	2,3
7	2014-10-26	00:00	2014-10-26	18:50	19	-	-	-	-	-	0,4
8	2014-10-27	09:00	2014-10-27	18:30	10	-	-	-	-	-	5,7
9	2014-10-28	14:20	2014-10-28	23:40	9	-	-	-	-	-	0,2
10	2014-11-02	20:40	2014-11-05	13:30	65	-	-	-	-	-	3,4
11	2014-11-11	22:40	2014-11-13	01:10	27	-	-	-	-	-	44,2
12	2014-11-17	16:00	2014-11-18	19:10	27	-	-	-	-	-	7,5
13	2014-11-22	05:30	2014-11-22	14:40	9	-	-	-	-	-	0,0
14	2014-11-27	17:20	2014-11-30	15:40	70	-	-	-	-	-	0,0
15	2014-12-02	15:50	2014-12-03	07:20	16	-	-	-	-	-	0,0
16	2014-12-03	17:20	2014-12-04	16:20	23	-	-	-	-	-	0,0
17	2014-12-07	01:00	2014-12-09	02:40	50	-	-	-	-	-	0,0
18	2014-12-09	13:10	2014-12-11	01:00	36	-	-	-	-	-	0,0

19	2014-12-11	06:20	2014-12-16	11:40	125	-	-	-	-	-	0,0
20	2014-12-17	13:20	2014-12-19	22:50	58	-	-	-	-	-	0,0
21	2014-12-29	01:20	2014-12-29	14:30	12	-	-	-	-	-	0,9
22a	2015-01-04	10:10	2015-01-10	18:00	152	-	-	-	-	-	33,8
22b											
23	2015-01-13	01:40	2015-01-14	01:40	25	-	-	-	-	-	-2,1
24	2015-01-16	08:40	2015-01-17	03:00	18	-	-	-	-	-	6,1
25	2015-01-19	06:40	2015-01-21	06:50	48	-	-	-	-	-	8,7
26	2015-03-06	04:50	2015-03-06	21:30	17	-	-	-	-	-	-2,3
27	2015-03-08	08:10	2015-03-10	19:30	59	-	-	-	-	-	2,7
28	2015-03-13	18:50	2015-03-13	20:10	1	-	-	-	-	-	-0,1
29	2015-03-14	16:10	2015-03-16	09:10	41	-	-	-	-	-	-1,3
30	2015-03-17	02:50	2015-03-17	10:00	7	-	-	-	-	-	0,2
31	2015-03-18	00:50	2015-03-18	05:50	5	-	-	-	-	-	0,1
32	2015-03-25	17:50	2015-03-25	21:10	3	-	-	-	-	-	0,0
33	2015-03-26	08:30	2015-03-26	19:30	11	-	-	-	-	-	0,8
34	2015-04-03	06:00	2015-04-03	15:50	10	-	-	-	-	-	0,0
35	2015-04-04	19:40	2015-04-05	02:40	7	-	-	-	-	-	0,0
36	2015-04-19	00:40	2015-04-19	06:20	6	-	-	-	-	-	0,2
37	2015-04-20	10:50	2015-04-21	23:40	37	-	-	-	-	-	6,3
38	2015-04-23	00:50	2015-04-25	18:50	66	-	-	-	-	-	25,7
39	2015-04-26	05:10	2015-04-26	15:50	11	-	-	-	-	-	0,3
40	2015-04-26	21:40	2015-05-01	05:00	103	-	-	-	-	-	30,9

Tableau 48 – Tableau des prévisions de GLJM pour le site confidentiel durant l'hiver 2014-2015

GLJM – Site confidentiel 2014-2015											
n°	Début		Fin		Durée [h]	Accu. [mm]	Charge [kg/m]	Type	Classe ICR	Taux [kg/m h]	Pertes prod. [MWh]
	Jour	Heure	Jour	Heure							
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7	2014-10-25	18:00	2014-10-25	23:00	30	1,82	0,05	vg	1	0,00	23,5
8	2014-10-27	06:00	2014-10-27	13:00	8	15,24	0,94	gb	3	0,12	17,4
9											
10	2014-11-02	01:00	2014-11-03	06:00	30	9,51	0,76	gb	2	0,03	65,0
11	2014-11-11	13:00	2014-11-12	17:00	29	25,00	1,55	gb	3	0,05	37,2
12	2014-11-17	15:00	2014-11-18	15:00	25	23,19	1,88	m	4	0,08	31,2
13											
14	2014-11-26	14:00	2014-11-27	18:00	29	2,59	0,22	gb	1	0,00	25,7
15	2014-12-01	15:00	2014-12-01	19:00	4	2,01	0,08	gb	1	0,02	3,4
16	2014-12-03	01:00	2014-12-04	06:00	30	5,77	0,34	gb	1	0,01	84,2
17	2014-12-06	01:00	2014-12-07	04:00	28	5,33	0,28	gb	1	0,01	45,1
18											
19	2014-12-09	14:00	2014-12-15	09:00	140	60,07	6,41	m	6	0,05	179,6
20	2014-12-16	18:00	2014-12-19	03:00	58	15,84	1,10	gb	3	0,02	63,5
21	2014-12-28	19:00	2014-12-28	23:00	29	4,37	0,25	m	1	0,01	47,5
22a	2015-01-04	07:00	2015-01-05	10:00	28	10,26	0,75	gb	2	0,03	77,1
22b											
23											
24	2015-01-15	19:00	2015-01-16	16:00	22	4,24	0,18	gb	1	0,01	30,4
25	2015-01-18	19:00	2015-01-21	15:00	45	11,97	0,80	gb	2	0,02	113,5

26	2015-03-03	19:00	2015-03-04	17:00	23	1,86	0,10	gb	1	0,00	41,2
27											
28											
29											
30											
31	2015-03-17	13:00	2015-03-18	17:00	29	1,61	0,09	gb	1	0,00	31,2
32											
33											
34	2015-04-02	19:00	2015-04-03	09:00	15	1,19	0,06	gb	1	0,00	18,2
35	2015-04-02	19:00	2015-04-04	22:00	52	1,79	0,12	gb	1	0,00	65,7
36											
37	2015-04-20	20:00	2015-04-21	23:00	28	16,40	1,24	m	3	0,04	80,2
38	2015-04-23	01:00	2015-04-25	10:00	58	28,18	0,91	gb	3	0,02	59,6
39											
40	2015-04-26	15:00	2015-04-29	23:00	81	64,76	7,31	m	6	0,09	154,0

Tableau 49 – Tableau des prévisions de WRF pour le site confidentiel durant l’hiver 2014-2015

WRF – Site confidentiel 2014-2015											
n°	Début		Fin		Durée [h]	Accu. [mm]	Charge [kg/m]	Type	Classe ICR	Taux [kg/m h]	Pertes prod. [MWh]
	Jour	Heure	Jour	Heure							
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7	2014-10-25	18:00	2014-10-26	02:00	9	0,99	0,01	gb	1	0,00	0,0
8	2014-10-27	11:00	2014-10-27	17:00	6	18,06	0,27	m	1	0,05	0,0
9											
10	2014-11-02	01:00	2014-11-04	01:00	49	94,12	3,68	nf	5	0,08	9,2
11	2014-11-11	23:00	2014-11-12	18:00	20	48,05	1,35	gb	3	0,07	0,6
12	2014-11-16	16:00	2014-11-18	15:00	48	42,11	0,95	m	3	0,02	2,8
13											
14	2014-11-27	02:00	2014-11-27	23:00	22	33,80	0,68	nf	2	0,03	2,9
15	2014-12-01	14:00	2014-12-01	21:00	7	4,66	0,05	gb	1	0,01	0,7
16	2014-12-03	11:00	2014-12-03	22:00	11	61,55	1,77	m	4	0,16	0,9
17	2014-12-06	12:00	2014-12-07	07:00	20	5,03	0,13	m	1	0,01	2,1
18											
19	2014-12-09	20:00	2014-12-12	01:00	54	192,7	13,49	nf	7	0,25	6,9
20	2014-12-17	04:00	2014-12-19	18:00	62	13,06	0,97	m	3	0,02	11,2
21	2014-12-28	05:00	2014-12-28	20:00	15	33,24	0,67	m	2	0,04	0,7
22a	2015-01-04	05:00	2015-01-05	02:00	21	64,18	2,89	nf	5	0,14	10,4
22b	2015-01-09	04:00	2015-01-09	20:00	16	3,83	0,12	nf	1	0,01	3,1
23	2015-01-12	07:00	2015-01-13	03:00	21	2,77	0,09	nf	1	0,00	1,7
24	2015-01-16	02:00	2015-01-16	22:00	21	9,02	0,11	nf	1	0,01	2,2
25	2015-01-18	08:00	2015-01-21	09:00	26	26,38	1,00	gb	3	0,04	13,7

26	2015-03-04	04:00	2015-03-04	20:00	16	2,75	0,20	nf	1	0,01	10,0
27											
28											
29	2015-03-15	02:00	2015-03-16	22:00	20	6,17	0,30	nf	1	0,02	2,5
30											
31	2015-03-17	19:00	2015-03-19	06:00	35	20,34	0,71	nf	2	0,02	2,2
32											
33	2015-03-26	06:00	2015-03-27	04:00	22	2,62	0,06	m	1	0,00	0,5
34	2015-04-03	01:00	2015-04-03	14:00	14	42,94	0,99	m	3	0,07	0,1
35	2015-04-03	21:00	2015-04-05	00:00	28	62,50	2,40	m	4	0,09	0,6
36	2015-04-18	00:00	2015-04-18	11:00	12	10,43	0,13	gb	1	0,01	0,0
37	2015-04-21	03:00	2015-04-22	04:00	25	57,89	1,60	m	4	0,06	0,2
38	2015-04-23	08:00	2015-04-25	11:00	52	88,53	4,01	m	5	0,08	2,1
39											
40	2015-04-26	12:00	2015-04-29	19:00	80	31,66	2,63	m	4	0,03	1,1

**ANNEXE K. POURCENTAGE D'ÉVÉNEMENTS DE GIVRE CONFIRMÉS PAR L'ANALYSE D'IMAGES OU PAR DÉTECTEURS DE GIVRE**

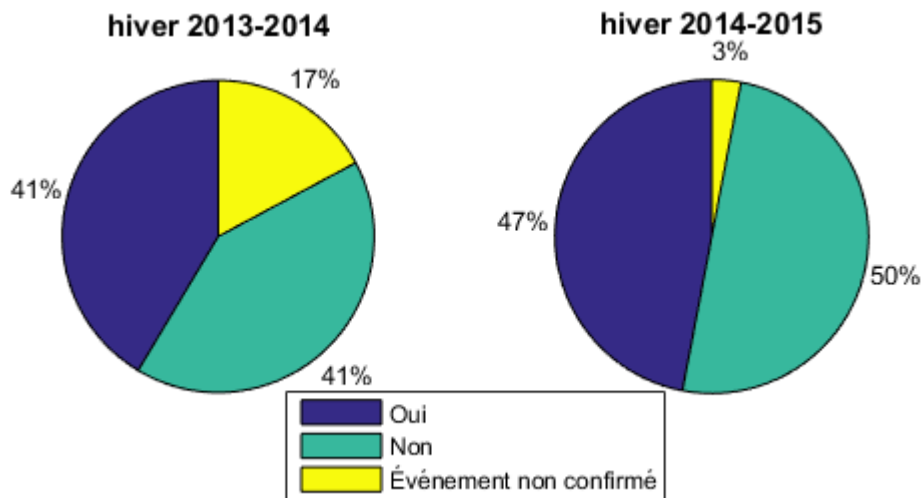


Figure 42 – Pourcentage d'événements de givre confirmés par l'analyse d'images ou par détecteurs de givre à Rivière-au-Renard

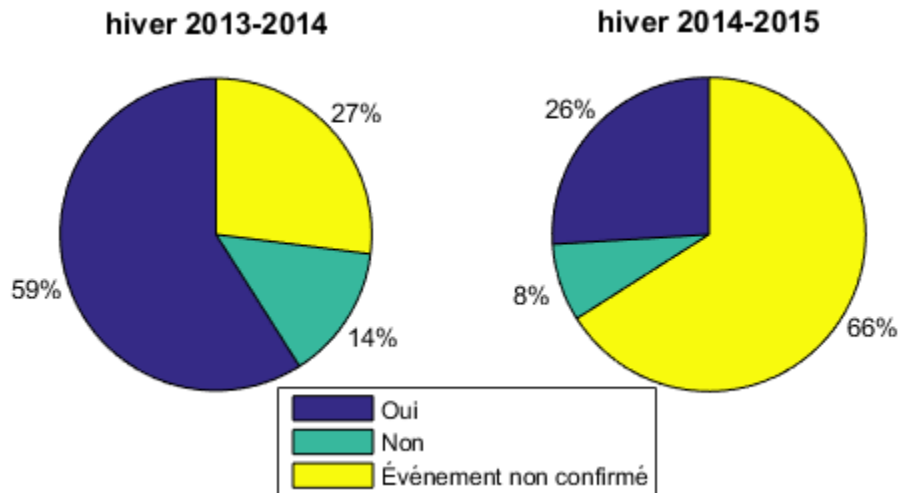


Figure 43 – Pourcentage d'événements de givre confirmés par l'analyse d'images ou par détecteurs de givre à Murdochville

## ANNEXE L. COMPARAISON DES CORRÉLATIONS R<sup>2</sup> GEM-LAM – OBSERVATIONS ET WRF – OBSERVATIONS

Cette annexe présente les corrélations des données corrigées de GEM-LAM avec les observations d’une part et d’autre part, des données WRF avec les observations, et ce, pour tous les mois à l’étude. Dans tous les cas et en moyenne, les données GEM-LAM corrigées sont plus près des observations que celles de WRF. Soulignons que les valeurs de R<sup>2</sup> de GEM-LAM présentées dans les tableaux sont les mêmes que celles présentées à l’Annexe F.

**Tableau 50 – Corrélations de vent pour Rivière-au-Renard**

Rivière-au-Renard			
Année	Mois	R <sup>2</sup> GEM-LAM	R <sup>2</sup> WRF
2013	10	0,7068	0,1646
2013	11	0,7176	0,5333
2013	12	0,6833	0,6152
2014	01	0,5689	0,4271
2014	02	0,6642	0,4015
2014	03	-	-
2014	04	-	-
2014	05	0,4456	0,0000
2014	10	0,6691	0,4752
2014	11	0,6850	0,4379
2014	12	0,7474	0,4731
2015	01	0,6567	0,4516
2015	02	0,8534	0,7454
2015	03	0,7579	0,5284
2015	04	0,6600	0,5120
2015	05	0,5378	0,1751
Moyenne		0,6681	0,4243

**Tableau 51 – Corrélations de vent pour Murdochville**

Murdochville			
Année	Mois	R <sup>2</sup> GEM-LAM	R <sup>2</sup> WRF
2013	10	-	-
2013	11	0,5775	0,4980
2013	12	0,5762	0,4502
2014	01	0,6237	0,0000
2014	02	0,5963	0,3333
2014	03	0,5512	0,3861
2014	04	0,6749	0,4620
2014	05	0,5359	0,3668
2014	10	0,5420	0,4940
2014	11	0,6394	0,6375
2014	12	0,7539	0,6754
2015	01	0,6422	0,2448
2015	02	0,8238	0,6312
2015	03	0,7432	0,6368
2015	04	0,6505	0,4146
2015	05	0,5984	0,6020
Moyenne		0,6353	0,4555

**Tableau 52 – Corrélations de température pour  
Rivière-au-Renard**

Rivière-au-Renard			
Année	Mois	R <sup>2</sup> GEM-LAM	R <sup>2</sup> WRF
2013	10	0,9487	0,7728
2013	11	0,9657	0,8582
2013	12	0,9648	0,8690
2014	01	0,9734	0,9391
2014	02	0,9518	0,7617
2014	03	0,9473	0,7458
2014	04	0,9046	0,7058
2014	05	0,9169	0,8626
2014	10	0,9401	0,9033
2014	11	0,9258	0,7955
2014	12	0,9473	0,9125
2015	01	0,9450	0,8282
2015	02	0,9336	0,7020
2015	03	0,8841	0,6654
2015	04	0,9120	0,8688
2015	05	0,8597	0,8152
Moyenne		0,9326	0,8129

**Tableau 53 – Corrélations de température pour Murdochville**

Murdochville			
Année	Mois	R <sup>2</sup> GEM-LAM	R <sup>2</sup> WRF
2013	10	0,9576	0,9250
2013	11	0,9693	0,9498
2013	12	0,9565	0,9048
2014	01	0,9600	0,9209
2014	02	0,9463	0,7952
2014	03	0,9580	0,8098
2014	04	0,9053	0,4632
2014	05	-	-
2014	10	0,8702	0,8760
2014	11	0,9325	0,9101
2014	12	0,9372	0,9164
2015	01	0,9408	0,8875
2015	02	0,8806	0,6356
2015	03	0,9509	0,7212
2015	04	0,9345	0,7579
2015	05	0,8930	0,8358
Moyenne		0,9328	0,8206

**ANNEXE M. NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PRÉDITS PAR LES MODÈLES ET CONFIRMÉS PAR LES OBSERVATIONS**

**Tableau 54 – Nombre d'événements de givre observé et modélisé par GLJM**

Site	Hiver	Nombre d'événements		
		Observé - modélisé (VP)	Observé - non modélisé (FN)	Non observé - modélisé (FP)
Rivière-au-Renard	2013-2014	11	11	11
	2014-2015	5	9	23
Murdochville	2013-2014	18	31	20
	2014-2015	37	22	17
Site confidentiel	2014-2015	27	20	16

**Tableau 55 – Nombre d'événements de givre observé et modélisé par WRF**

Site	hiver	Nombre d'événements		
		Observé - modélisé (VP)	Observé - non modélisé (FN)	Non observé - modélisé (FP)
Rivière-au-Renard	2013-2014	25	6	55
	2014-2015	30	0	57
Murdochville	2013-2014	67	16	55
	2014-2015	70	8	53
Site confidentiel	2014-2015	46	11	57

## ANNEXE N. TABLEAUX DES RÉSULTATS D'ANALYSES DE PERFORMANCES DU MODÈLE GLJM

Les tableaux dans cette annexe présentent les chiffres correspondants aux figures respectives incluses dans le rapport.

**Tableau 56 – Indice de succès critique des modèles GLJM et WRF**

Sites	Année	GLJM	WRF
Rivière-au-Renard	2013-2014	33 %	29 %
	2014-2015	18 %	34 %
Murdochville	2013-2014	27 %	49 %
	2014-2015	46 %	53 %
Site confidentiel	2013-2014	-	-
	2014-2015	46 %	40 %

**Tableau 57 – Biais des modèles GLJM et WRF**

Sites	Année	GLJM	WRF
Rivière-au-Renard	2013-2014	121 %	258 %
	2014-2015	218 %	290 %
Murdochville	2013-2014	88 %	147 %
	2014-2015	102 %	158 %
Site confidentiel	2013-2014	-	-
	2014-2015	96 %	181 %

**Tableau 58 – Probabilité de détection des modèles GLJM et WRF**

Sites	Année	GLJM	WRF
Rivière-au-Renard	2013-2014	54 %	81 %
	2014-2015	47 %	100 %
Murdochville	2013-2014	40 %	81 %
	2014-2015	64 %	90 %
Site confidentiel	2013-2014	-	-
	2014-2015	62 %	81 %

**Tableau 59 – Probabilité de fausse alarme des modèles GLJM et WRF**

Sites	Année	GLJM	WRF
Rivière-au-Renard	2013-2014	55 %	69 %
	2014-2015	78 %	66 %
Murdochville	2013-2014	54 %	45 %
	2014-2015	37 %	43 %
Site confidentiel	2013-2014	-	-
	2014-2015	35 %	55 %

## ANNEXE O. COMPARAISONS DES DONNÉES D'ENTRÉE DANS LES MODÈLES

Tableau 60 – Comparaisons des différentes méthodes d'évaluation de l'événement de givre entre le 11 novembre 2014 et le 13 novembre 2014 sur les trois sites d'étude

Observations									
	Début		Fin		Durée	Accu.	Charge	Classe	Taux
Sites	Jour	Heure	Jour	Heure	[h]	[mm]	[kg/m]	ICR	[kg/m h]
Rivière-au-Renard	2014-11-12	10:00	2014-11-13	00:40	15	61,11	1,77	3	-
Murdochville	2014-11-11	21:20	2014-11-23	21:00	288	302,00	16,00	7	-
Site confidentiel	2014-11-11	22:40	2014-11-13	01:10	27	-	-	-	-

Données GEM-LAM & ERA-Interim dans modèle GLJM									
	Début		Fin		Durée	Accu.	Charge	Classe	Taux
Sites	Jour	Heure	Jour	Heure	[h]	[mm]	[kg/m]	ICR	[kg/m h]
Rivière-au-Renard	2014-11-12	00:00	2014-11-13	12:00	36	2,54	0,08	1	0,00
Murdochville	2014-11-11	19:00	2014-11-13	08:00	38	10,41	0,66	2	0,02
Site confidentiel	2014-11-11	12:00	2014-11-12	17:00	29	25,00	1,55	3	0,05

Données WRF dans modèle WRF									
	Début		Fin		Durée	Accu.	Charge	Classe	Taux
Sites	Jour	Heure	Jour	Heure	[h]	[mm]	[kg/m]	ICR	[kg/m h]
Rivière-au-Renard	2014-11-11	16:00	2014-11-13	20:00	29	11,96	0,16	1	0,01
Murdochville	2014-11-11	14:00	2014-11-12	23:00	34	63,22	3,54	5	0,10
Site confidentiel	2014-11-11	23:00	2014-11-12	18:00	20	48,05	1,35	3	0,07

Données WRF dans modèle GLJM									
	Début		Fin		Durée	Accu.	Charge	Classe	Taux
Sites	Jour	Heure	Jour	Heure	[h]	[mm]	[kg/m]	ICR	[kg/m h]
Rivière-au-Renard	2014-11-12	06:00	2014-11-12	23:00	17	19,32	1,43	3	0,08
Murdochville	2014-11-12	07:00	2014-11-13	06:00	24	86,82	12,11	7	0,50
Site confidentiel	2014-11-11	12:00	2014-11-12	18:00	30	58,00	6,36	6	0,21



70, rue Bolduc  
Gaspé, Québec, Canada  
G4X 1G2  
1-418-368-6162  
[www.eolien.qc.ca](http://www.eolien.qc.ca)

### Nos principaux partenaires

Acteur du développement de l'industrie éolienne



Développement  
économique Canada

Canada Economic  
Development

Canada

Québec

