Développement d'un modèle semi-empirique de prévision de la surcote due au vent sur le lac Champlain

par

Guillaume LOISELLE

MÉMOIRE PAR ARTICLE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 16 JUILLET 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

Guillaume Loiselle, 2021

Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE RAPPORT DE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Richard Arsenault, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Annie Poulin, codirectrice de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Luc Martel, codirecteur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Annie Levasseur, présidente du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. François Brissette, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 18 JUIN 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier du fond du cœur mon directeur de recherche Richard Arsenault ainsi que mes co-directeurs de recherche Jean-Luc Martel et Annie Poulin pour leur soutien inconditionnel durant une période particulièrement difficile où j'ai énormément douté de moi. Votre support et vos encouragements m'ont permis de continuer à persévérer alors que j'étais prêt à tout abandonner.

Merci à mes parents, France et Guy, qui m'ont appuyé tout au long de mes études et qui continuent d'être pour moi un pilier sur lequel je peux toujours m'appuyer.

Merci à mon frère, Alexandre, à mes amis, Marc-Antoine, Vincent, Guillaume, Maxime et à mes collègues du DRAME/HC3 qui m'ont encouragé et qui ont fait preuve de curiosité à l'égard de mon projet de recherche.

Merci aussi aux gens de la DEH pour leurs commentaires constructifs et leurs suggestions lors de nos rencontres, qui ont mené aux résultats finaux présentés dans ce mémoire.

Développement d'un modèle semi-empirique de prévision de la surcote due au vent sur le lac Champlain

Guillaume LOISELLE

RÉSUMÉ

La prévision des niveaux d'eau du lac Champlain est une composante clef du processus de prévision des inondations dans la région de la rivière Richelieu. Ces prévisions sont normalement réalisées avec des modèles hydrologiques qui prennent en considération uniquement les paramètres hydriques (précipitation, fonte, évapotranspiration, etc.), mais qui ne considèrent pas l'impact du vent sur les niveaux du lac. En effet, lorsque le vent souffle avec intensité sur un grand réservoir pendant une longue période de temps, un phénomène appelé « surcote » peut se produire. Cette surcote est le résultat du frottement entre le vent et la surface de l'eau et se traduit par une différence entre le niveau moyen et le niveau à l'exutoire du lac. L'objectif de cette étude est de créer un modèle semi-empirique de prévision de la surcote sur le lac Champlain dans le but d'améliorer la prévision des débits, et donc des inondations, dans la rivière Richelieu. Le modèle proposé utilise les prévisions de la vitesse et de la direction du vent à plusieurs endroits sur le lac, ainsi que la vitesse des rafales en plus d'être calibré sur plusieurs paliers de vitesses différents. Le modèle est calibré sur des observations provenant de stations météorologiques et hydrométriques et est validé sur un échantillon indépendant d'observations. L'étude présente aussi une comparaison entre le modèle proposé et un modèle développé par le USACE, inspiré de la formulation de Zuider Zee, réalisée sur vingt évènements de surcote survenus entre 2017-2019 en utilisant les données de prévisions de cinq systèmes numériques de prévision météorologiques (GDPS, RDPS, HRDPS, NOAA et ECMWF). Les données de prévision des cinq systèmes ont fait l'objet d'une correction de biais par quantiles. Les résultats montrent que le modèle proposé arrive à correctement prédire les évènements de surcote au moins 72 heures d'avance, une performance supérieure à celle du modèle du USACE. Ultimement, l'inclusion de la vitesse du vent et de la force des rafales à plusieurs endroits sur le lac améliore significativement la performance du modèle.

Mots-clés: Surcote, prévisions, prévision numérique du temps, Lac Champlain, Rivière Richelieu

A Semi-Empirical Wind Set-Up Forecasting Model for Lake Champlain

Guillaume LOISELLE

ABSTRACT

The precision of Lake Champlain's water level estimation is a key component in the flood forecasting process for the Richelieu River. Hydrological models do not typically take in consideration the effects of the wind on the water level (also known as wind set-up). The objective of this study is to create an empirical wind set-up forecast model for Lake Champlain to ultimately improve flood forecasting during high-wind events. The proposed model uses wind speed and direction across the Lake, as well as wind gusts and atmospheric pressure difference between both ends of the Lake as inputs. The model is calibrated to a subset of the observations and evaluated on an independent sample. The model is tested and compared to a variant of the Zuider Zee equation on twenty wind set-up events that have occurred between 2017 and 2019 using hindcast data from five different numerical weather prediction systems (GDPS, RDPS, HRDPS, NOAA and ECMWF). A quantile mapping-based forecast calibration scheme is implemented for each of the forecast products to correct biases in the forecast products. The results show that events are successfully predicted by the proposed model at least 72 hours in advance. These results are better than the other comparative models found in the literature and tested herein. Overall, significant improvements are obtained by including wind speed and wind gusts from different weather stations.

Keywords: Wind set-up, forecasting, numerical weather prediction, Lake Champlain, Richelieu River.

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE 5
1.1 La surcote 6
1.2 Modélisation de la surcote 7
1.3 Les prévisions météorologiques 9

CHAPITRE 2 A SEMI-EMPIRICAL WIND SET-UP FORECASTING MODEL FOR LAKE CHAMPLAIN 12
2.1 Introduction 14
2.2 Data and methods 17
2.2.1 Terminology 18
2.2.2 Study Site and Data 18
2.2.2.1 Lake Champlain 18
2.2.2.2 Observed Data 21
2.2.2.3 Forecasted Data 22
2.2.2.4 Bias Correction 24
2.2.3 Wind Set-up Modeling 24
2.2.3.1 Model A 24
2.2.3.2 Model B 25
2.2.4 Calibration and Validation 27
2.2.5 Forecast Applications 28
2.2.6 Selected Wind Set-up Events 29
2.3 Results 30
2.3.1 Comparison of Observed and Forecasted Wind Speed 31
2.3.2 Wind Set-up Models with Observations 35
2.3.3 Wind Set-up Models with Forecasts 38
2.4 Discussion 46
2.4.1 Observed and Forecasted Data 46
2.4.2 Comparison Between Models A and B 47
2.4.3 Impact from Equifinality 48
2.4.4 Probabilistic Forecasting Systems 49
2.4.5 Multi-model Forecasting Approach 49
2.5 Conclusion 50
2.6 Acknowledgements 52
2.7 Data availabity 53
2.8 Supplementary Material 54

CHAPITRE 3 DISCUSSION 73
3.1 Importance de la qualité des prévisions météorologiques 73
3.2 Développement du modèle 75

3.3 Performance du modèle proposé....77
3.4 Évènements du printemps 2011....79
3.5 Équifinalité....80
3.6 Avenues d'améliorations du modèle....81
3.7 Prévisions probabilistes....82
3.8 Limitations de l'étude....83
3.9 Utilisation d'un modèle de seiche dans des contextes différents....85

CONCLUSION....87

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES....89

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 2.1 Lake Champlain's weather and hydrometric stations characteristics. The weather stations are operated by the Forest Ecosystem Monitoring Cooperative (FEMC) while the hydrometric stations are operated by the U.S. Geologic Survey (USGS). The locations of the stations are shown in Figure 2.1 21

Tableau 2.2 Forecast systems details such as elevation, resolution, release interval, length of forecast horizon, time step of the forecast and time period the dataset is available 23

Tableau 2.3 The twenty largest wind set-up events recorded with their respective characteristics (duration, average and maximum wind set-up values) over the validation period (2017-2019) 30

Tableau 2.4 Mean absolute error (*MAE*) for the twenty largest recorded wind set-up events comparing forecasts from model A and model B, as well as, from intermediate model tests against the observed wind set-ups. 38

Tableau 2.5 Qualitative performance assessment summary of twenty largest wind set-up events between 2017 and 2019 for the modified model A. The relative error |Err.| is used to classify the performance into good (green), fair (yellow) and poor (red) for the 5 NWP products analyzed. The performance is evaluated with respect to the precision in order to obtain the event with a lead time of 96h to 24h before the actual event. The grey fields indicate that the forecast horizon is not available....44

Tableau 2.6 Same as Table 2.5, but for Model B 45

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 0.1 Localisation du Lac Champlain et de la Rivière Richelieu 2

Figure 1.1 Apparition de la surcote.....5

Figure 2.1 Location of Lake Champlain and the closest weather (red) and hydrometric (green) stations relative to the grid cell centers of different Numerical Weather Prediction systems (orange), i.e. GDPS, RDPS, HRDPS, NOAA, and ECMWF, as well as centers of grid points where atmospheric pressure from ERA5-Land/ECMWF (purple) is available. The gray map inset shows the location of the study domain in North America.....20

Figure 2.2 Contingency tables of the five NWP forecast systems first available 24-hour lead time compared to wind speed observations for the north/south component (negative values representing wind values in the south direction).....32

Figure 2.3 Comparison of wind speed observations at Colchester station and forecast from all NWP models before (left) and after (right) the bias correction as a function of the time horizon for three different performance metrics (a, b) coefficient of determination (R^2), (c, d) root mean square error (*RMSE*), and (e, f) mean error (*ME*). The performance is shown for all five NWPs analyzed (colored lines) for all forecast horizons available in each product.....34

Figure 2.4 Comparison of wind set-up observations (black) and simulations obtained with model A original using one calibration parameter (blue), model A modified using a second calibration parameter (orange) and model B and its intermediate steps (green, all components; red, with only one station; purple, without bins; brown, without guts; and cyan, without atmospheric pressure). The wind speed (dashed gray line) is overlaid to show its influence on the seiche effect. The time period displayed is part of the validation period.....37

Figure 2.5 Comparison of the modified model A simulated wind set-up for the April 19, 2019 event using raw NWP forecast from GDPS (blue), RDPS (orange), HRDPS (green), NOAA (red) and ECMWF (purple) against observations at Rouses-Point (black). Simulated wind set-up using observed winds are also shown (cyan). The panels (a-d) show simulations using four forecast releases issued at 00:00 (UTC) of the day indicated in the title of each panel.....39

Figure 2.6 Same as Figure 2.5, but for model B 40

Figure 2.7 Same as Figure 2.5, but using bias corrected NWP forecasts 41

Figure 2.8 Same as Figure 2.7, but for model B 42

Figure 2.9 Comparison of the modified model A simulated wind set-up for the January 8, 2019 event using bias-corrected NWP forecast from GDPS (blue), RDPS (orange), HRDPS (green), NOAA (red) and ECMWF (purple) against observations at Rouses-Point (black). Simulated wind set-up using observed winds are also shown (cyan). The panels (a-d) show simulations using four forecast releases issued at 00:00 (UTC) of the day indicated in the title of each panel.....54

Figure 2.10 Same as Figure 2.9, but for model B 55

Figure 2.11 Same as Figure 2.9, but for the September 22nd, 2018 event 56

Figure 2.12 Same as Figure 2.11, but for model B 57

Figure 2.13 Same as Figure 2.9, but for the November 5th, 2017 event 58

Figure 2.14 Same as Figure 2.13, but for model B 59

Figure 2.15 Same as Figure 2.9, but for the December 5th, 2017 event.....60

Figure 2.16 Same as Figure 2.15, but for model B 61

Figure 2.17 Same as Figure 2.9, but for the September 14th, 2019 event.....62

Figure 2.18 Same as Figure 2.17, but for model B 63

Figure 2.19 Same as Figure 2.9, but for the April 19th, 2019 event.....64

Figure 2.20 Same as Figure 2.19, but for model B 65

Figure 2.21 Same as Figure 2.9, but for the November 28th, 2017 event 66

Figure 2.22 Same as Figure 2.21, but for model B 67

Figure 2.23 Same as Figure 2.9, but for the December 28th, 2018 event.....68

Figure 2.24 Same as Figure 2.23, but for model B 69

Figure 2.25 Same as Figure 2.9, but for the September 25th, 2018 event.....70

Figure 2.26 Same as Figure 2.25, but for model B 71

Figure 3.1 Simulation de la surcote à Rouses-Pointe au printemps 2011.....80

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CAN	Canada
CaSPAr	Canadian Surface Prediction Archive
CMI	Commission mixte internationale
DEH	Direction de l'expertise hydrique
DJF	Décembre-janvier-février
EC	Environnement Canada
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecast
ERA5	ECMWF Reanalysis 5th Generation
É-U	État-Unis
FEMC	Forest Ecosystem Monitoring Cooperative
GDPS	Global Deterministic Forecast System
GEM	Global Environmental Multiscale model
GESP	Grand Ensemble Streamflow Prediction
GFS	Global Forecast System
HRDPS	High Resolution Deterministic Forecast System
IJC	International Joint Commission
ILCRRS	International Lake Champlain-Richelieu River Study
JJA	Juin-juillet-août
LCRR	Lake Champlain and Richelieu River
MAE	Mean Absolute Error
MAM	Mars-avril-mai
MARS	Meteorological Archive and Retrieval System
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MSP	Ministère de la Sécurité publique
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NERFC	Northeast River Forecaster Center

NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRMSE	Normalized Room-Mean-Square Error
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
NWP	Numerical Weather Prediction
R^2	Coefficient de détermination
RDPS	Regional Deterministic Forecast System
RMSE	Root-Mean-Square Error
SCE-UA	Shuffled Complex Evolution - University of Arizona
SLOSH	Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes
SON	Septembre-octobre-novembre
USACE	United States Army Corps of Engineers
USGS	United States Geological Survey

INTRODUCTION

Lors du printemps 2011, des inondations majeures de la rivière Richelieu et du lac Champlain ont causé des dommages importants aux résidences et aux infrastructures publiques de la région. Plus de 2 500 résidences ont été inondées, forçant l'évacuation de plus de 1500 résidents. Les dommages totaux furent estimés à plus de 82 millions de dollars américains (MSP, 2013). Ces inondations historiques ont été attribuées à une combinaison de facteurs, notamment des précipitations liquides records atteignant 182% de la normale pour les mois de mars à mai (EC, 2013) jumelées à une fonte rapide d'un important couvert de neige et à la présence de vents soutenus dans la région du lac Champlain. Cette combinaison de facteurs aggravants a généré des niveaux d'eau records à l'embouche du lac Champlain et des débits extrêmes dans la rivière Richelieu.

Suite aux inondations de 2011, un groupe de prévisionnistes a été formé au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) du Québec pour faire le suivi des débits dans la rivière Richelieu à partir de 2012. De cette façon, des prévisions sont maintenant fournies au Ministère de la Sécurité publique (MSP) du Québec, ce qui lui permet d'être plus proactif dans la gestion des inondations, assurant ainsi la protection du public et des infrastructures. Actuellement, les prévisions des débits dans la rivière Richelieu reposent principalement sur les prévisions des niveaux d'eau dans le lac Champlain, qui sont présentement réalisées par le Northeast River Forecast Center (NERFC) aux États-Unis.

Les inondations de 2011 ont aussi incité les gouvernements des États-Unis et du Canada à collaborer afin d'identifier des mesures de mitigation contre les impacts des inondations du lac Champlain et de la rivière Richelieu. Ceci a mené à la réalisation d'une étude sur le Lac Champlain et la rivière Richelieu (ILCRRS, 2017) par la Commission mixte internationale (CMI). Ce rapport, publié en 2017, a établi que l'amélioration des présents systèmes de prévision de niveau dans le lac Champlain était une des composantes critiques des mesures de mitigation pouvant être mises en place pour diminuer l'impact de futures inondations sur la population. Selon le rapport, une des améliorations possibles est l'addition de l'effet du vent

sur les niveaux d'eau du lac (nommée ci-après la surcote) dans les modèles de prévision. Le vent, par un phénomène appelé surcote, peut causer une augmentation de plusieurs dizaines de centimètres du niveau d'eau à l'exutoire du lac Champlain, ce qui engendre des débits supplémentaires importants dans la rivière Richelieu (USGS, 2014) qui mènent à des inondations plus sévères. Ce désir d'incorporer l'impact du vent dans la modélisation et la prévision des niveaux du lac Champlain enfin d'en améliorer la performance est ce qui a motivé la réalisation de ce projet de recherche.

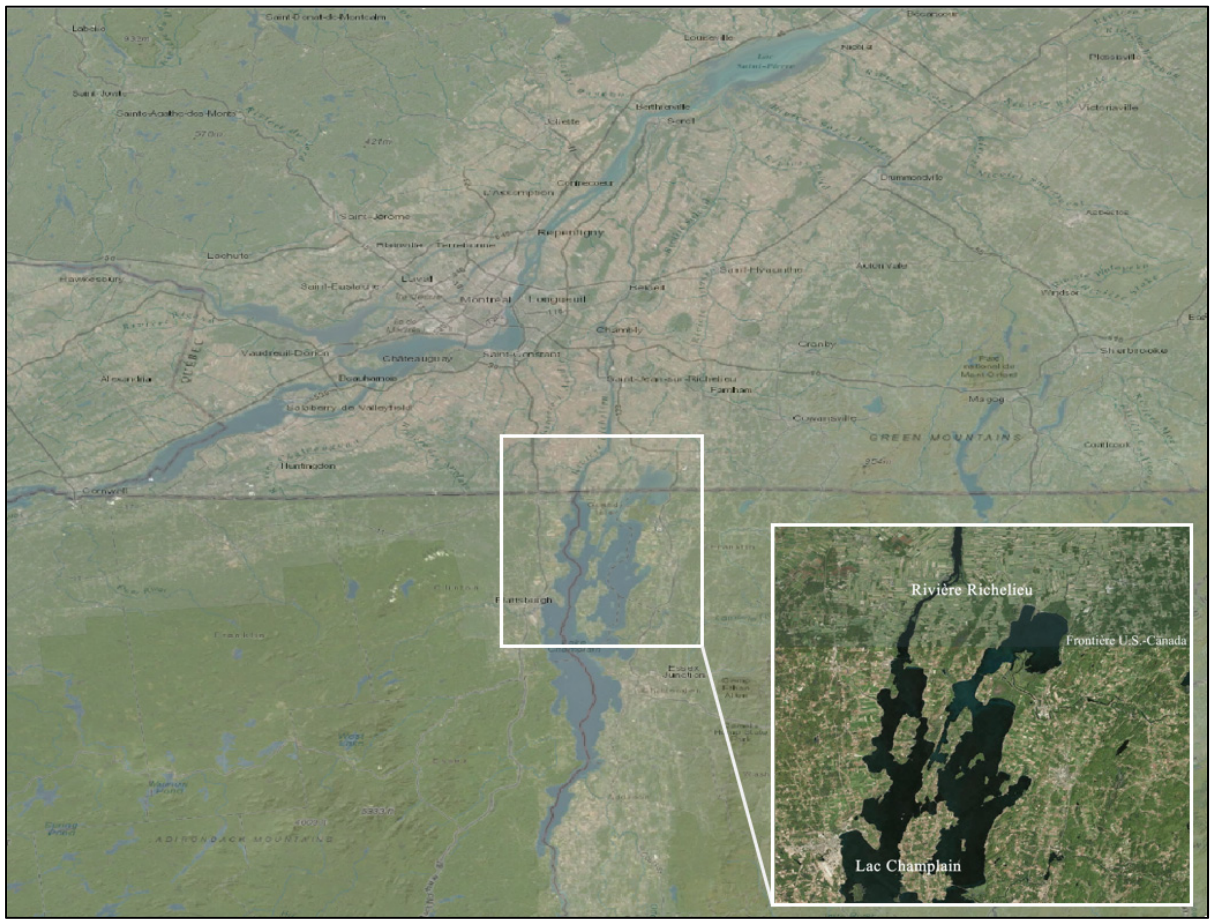

Figure 0.1 Localisation du Lac Champlain et de la Rivière Richelieu

Donc, de façon à éviter de revivre une situation comme celle de 2011, le MELCC désire ajouter une composante de surcote reliée à l'effet du vent sur le lac Champlain dans ses outils de modélisation servant à faire la prévision des débits pour la rivière Richelieu. Il mérite d'être

souligné que des inondations majeures se sont produites à nouveau en 2017 et 2019 dans plusieurs régions du Québec. Considérant que la rivière Richelieu a été atteinte à nouveau, quoique de façon moins importante qu'en 2011, les responsables du MELCC sont d'autant plus motivés à améliorer leurs prévisions hydrologiques.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Les prévisions disponibles des niveaux du lac Champlain et de la rivière Richelieu par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) aux États-Unis (É-U) ne prennent pas en considération les effets du vent. Pour sa part, la Direction de l'expertise hydrique (DEH) du Québec au Canada (CAN) intègre l'effet du vent sur les prévisions via un ajustement empirique d'un prévisionniste qui, bien qu'elle permette de fournir une prévision de meilleure qualité, demeure tout de même empreinte de subjectivité, dû à l'absence d'un modèle objectif et performant tenant compte de l'effet du vent sur les niveaux du lac Champlain.

La présence de vent sur une étendue d'eau est souvent associée à la formation de vagues, mais est aussi responsable d'un phénomène hydraulique moins connu : la surcote (Figure 1.1). Ce phénomène, qui est décrit plus en détail dans la section suivante, peut avoir un impact significatif sur les niveaux d'un lac lorsque les conditions météorologiques y sont favorables. Faire abstraction de l'apparition de la surcote peut engendrer des erreurs considérables lors de la prévision du niveau d'eau à l'exutoire d'un lac.

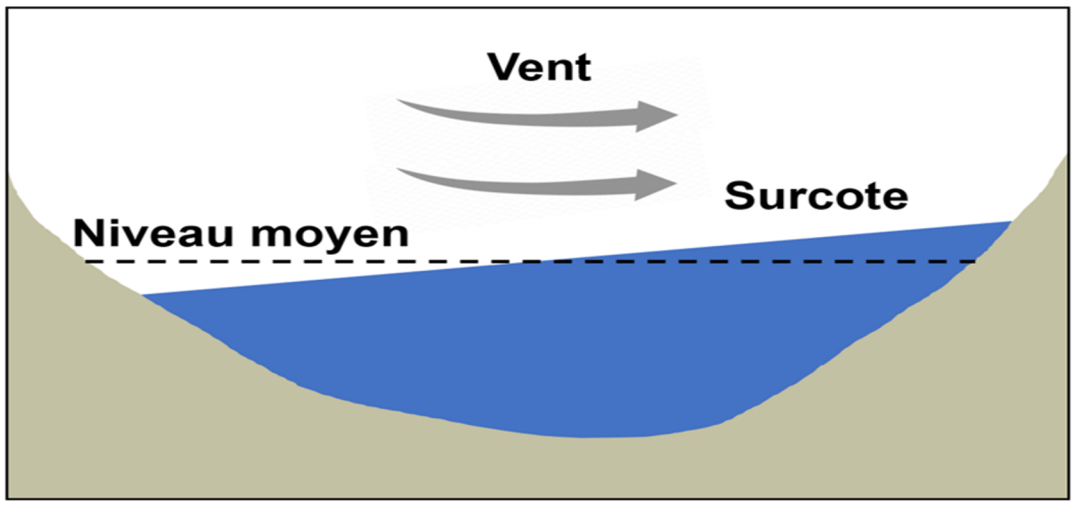

Figure 1.1 Apparition de la surcote

1.1 La surcote

La surcote est un phénomène hydraulique qui survient lorsqu'un vent fort souffle dans une direction relativement constante pendant une période de temps prolongée sur une étendue d'eau (p. ex. un lac ou un réservoir). Cette force continue engendre une accumulation de l'eau d'un côté du lac, ce qui se traduit par une différence d'élévation du niveau de l'eau (une inclinaison du plan d'eau). La cause principale de l'apparition de la surcote est la contrainte de cisaillement causée par la friction entre le vent sur la surface de l'eau. Toutefois, elle peut aussi être entraînée par des changements brusques de pression atmosphérique (Gardner, English, & Prowse, 2006). Il est important de ne pas confondre la surcote avec l'effet de seiche, un phénomène hydraulique qui se traduit par une oscillation du niveau de l'eau lorsque les forces responsables de l'apparition de la surcote cessent et que le niveau retombe sous l'action de la gravité. Cette oscillation, qui est en fait une onde stationnaire, se poursuit jusqu'à ce la surface de l'eau atteigne son niveau d'équilibre hydraulique. L'apparition d'une surcote sur les étendues d'eau est étudié afin de mieux comprendre son impact sur les niveaux d'eau et sur les inondations, les mouvements de sédiments et l'érosion engendrés par le déplacement de grands volumes d'eau (Ostrovsky, Yacobi, Walline, & Kalikhman, 1996). Les surcotes peuvent être observé dans de différents milieux, qui définissent son comportement et ses impacts. Par exemple, ce phénomène est étudié dans les océans (de Jong & Battjes, 2004; Hamon, 1966; Hoeke, McInnes, & O'Grady, 2015; Walton & Dean, 2009) où les grands courants marins ont un effet sur la température de l'eau et de l'air, ce qui engendre des mouvements d'air particuliers dans les golfes (Jönsson, Döös, Nycander, & Lundberg, 2008), dans les deltas (Gardner et al., 2006), dans les estuaires (Garvine, 1985) et dans les Grands Lacs (Hamblin, 1976).

Quelques études (Horn, Mortimer, & Schwab, 1986; Lemmin, Mortimer, & Bäuerle, 2005; MÜnnich, WÜest, & Imboden, 1992) ont porté sur l'apparition de seiches internes dans les lacs, mais celles-ci s'intéressent principalement aux mouvements de la thermocline, qui sont importants pour la biologie lacustre, et n'ont pas ou peu de lien dans le contexte de la prévision hydrologique.

1.2 Modélisation de la surcote

Dans des conditions idéales, la surcote générée par le vent s'exprime ainsi (USACE, 1952) :

$$S = \frac{n \cdot F \cdot T_s}{p \cdot g \cdot d} \tag{1.1}$$

Où S est la surcote, n est un facteur lié au ratio entre la contrainte de cisaillement entre le haut et le bas de la colonne d'eau, F est le fetch, un terme anglais désignant la longueur de l'étendue ouverte sur laquelle le vent souffle, T_s est la contrainte de cisaillement à la surface de l'eau, ρ est la densité de l'eau, g est l'accélération gravitationnelle et d est la profondeur du lac.

Toutefois, dans la réalité, il est difficile d'appliquer cette formule puisque les conditions ne sont jamais idéales. Par exemple, la forme et les dimensions du lac ne sont pas uniformes, la vitesse et la direction du vent varient dans le temps et les forces de cisaillement réelles sont difficilement estimables. Il est donc nécessaire d'ajouter à cette expression des termes d'ajustement qui tiennent compte des conditions réelles. En remplaçant dans l'équation les termes n et T_s par une estimation qui est fonction de la vitesse du vent, on obtient la formulatio n de Zuider Zee :

$$\xi_p = \frac{V^2}{1400 \cdot z} \cdot F \cdot cos(A) \tag{1.2}$$

Où ξp est la surcote en m, V est la vitesse du vent en mph, z est la profondeur du lac en pieds, F est le fetch en miles et A est l'angle entre la direction du vent et la direction du fetch en degrés (°).

Les études s'intéressant spécifiquement à la surcote liée aux vents sur les lacs sont moins nombreuses, et la majorité d'entre elles utilisent principalement des variations de la formule de Zuider Zee (Chimney, 2005; Colvin, Lazarus, Splitt, Weaver, & Taeb, 2018; Taeb, Weaver, & Lazarus, 2019).

Une étude a notamment porté sur l'effet des vents importants reliés au passage d'ouragans sur les niveaux du lac Okeechobee aux États-Unis (Chimney, 2005). L'auteur a comparé la performance des prévisions de la surcote du modèle SLOSH (Sea, Lakes, and Overland Surges from Hurricanes) à d'autres modèles en régime permanent plus simples inspirés de l'équation de Zuider Zee lors du passage des ouragans Frances et Jeanne en 2004. Le modèle SLOSH est outil de modélisation qui est utilisé pour la prévision des ondes de tempêtes (storm surges) créées par le passage des ouragans et des tempêtes tropicales. Ce modèle dynamique complexe utilise les équations de Barré De Saint-Venant pour représenter le mouvement de l'eau du fond marin jusqu'à la surface en fonction des caractéristiques de l'ouragan (pression, grosseur, vitesse des vents, vitesse de déplacement, trajectoire, etc.). Il est paramétrisé selon l'endroit précis d'application afin de bien représenter les côtes et les caractéristiques du fond marin (hauts fonds, vallées sous-marines, roches, etc.). Ce modèle est employé pour déterminer les zones à risque lors du passage d'ouragans et permet aux autorités locales de prendre de meilleures décisions concernant les plans d'évacuation à suivre (NOAA Technical Report NWS 48, 1992). Les résultats de l'étude suggèrent qu'un modèle en régime permanent calibré offre des performances similaires à celles du modèle SLOSH de nature plus complexe. Même si les surcotes engendrées par le passage d'un ouragan sont d'un autre ordre de grandeur comparativement à celles causées par des vents « normaux », les conclusions suggèrent que l'application d'un modèle à régime permanent relativement simple pourrait tout de même mener à des prévisions satisfaisantes.

Une autre étude réalisée par Platzman (1963) a employé un modèle dynamique plus complexe, basé sur une représentation 2D des équations de la spirale d'Ekman, pour analyser les effets du vent sur la surcote du lac Érié. Le modèle développé arrivait à simuler efficacement la surcote sur le lac ($R > 0.9$) en employant les données observées, mais n'offrait pas de résultats satisfaisants en mode prévisionnel. Les modèles plus complexes requièrent généralement une plus grande quantité de données, qui peuvent être difficilement accessibles dans un contexte de prévisions opérationnelles. Il est difficile de dire si la faiblesse prévisionnelle de ce modèle est due à la qualité insuffisante des prévisions des données d'entrée nécessaires ou plutôt à la puissance de calcul limitée des ordinateurs de l'époque.

Une autre étude portant sur l'apparition de surcote dans les rivières (Meyer, 2011) a fait usage de modèles hydrodynamiques complexes pour démontrer que lorsque le vent souffle dans la direction inverse du courant, celui-ci peut entraîner une augmentation du niveau en raison du changement des vitesses d'écoulement du aux frottements entre la surface de l'eau et l'air. Cette étude rapporte que l'augmentation du niveau peut atteindre jusqu'à 0,5 m de hauteur dans certains cas (Rivière Lower Odra). Les équations employées ne sont pas nécessairement applicables dans le cas d'un lac, car elles sont principalement fonction de la vitesse d'écoulement, mais elles offrent tout de même de l'information pertinente sur les variables physiques en jeu (principalement la viscosité de l'eau) et de l'ordre de grandeur de l'impact du vent sur les niveaux d'un plan d'eau.

1.3 Les prévisions météorologiques

La prévision météorologique moderne emploie des modèles numériques (NWP; Numerical Weather Prediction) qui simulent les interactions entre l'atmosphère et l'océan. En partant d'un état initial fidèle aux observations atmosphériques, ces modèles représentent l'évolution des différents systèmes qui régissent la météo, avec un degré de succès qui varie en fonction de l'horizon temporel. Différents NWP sont disponibles, avec des variations au niveau des équations employées et de la résolution spatio-temporelle des simulations. Les NWP peuvent aussi être divisés en deux catégories distinctes : les modèles déterministes et les modèles probabilistes.

Les modèles déterministes se basent sur l'hypothèse que, connaissant parfaitement l'état initial d'un système ainsi que les lois qui le gouvernent, il est possible de déterminer son état à un horizon temporel désiré. Dans la réalité, il n'est pas concevable de connaitre parfaitement les états initiaux de l'entièreté de l'atmosphère et de l'océan et les équations qui décrivent les interactions demeurent imparfaites. Les résultats fournis par les modèles déterministes demeurent donc la meilleure simulation possible de l'évolution du système, qui, même si elle n'est pas totalement fiable, fournit tout de même de l'information précieuse.

Les modèles probabilistes, pour leur part, permettent d'échantillonner l'incertitude associée à la nature chaotique du système climatique (ou variabilité naturelle du climat). Cette propriété fait en sorte que la moindre perturbation dans l'état initial d'un NWP peut engendrer une simulation complètement différente sur un horizon relativement court. Par conséquent, les modèles probabilistes visent à échantillonner l'incertitude dans les observations atmosphériques servant à déterminer les états initiaux du modèle, et ainsi générer des ensembles de plusieurs prévisions équiprobables. Si un événement est simulé par la majorité des prévisions de l'ensemble, la probabilité que cet événement en particulier se produise devient plus grande. Toutefois, les modèles probabilistes exigent une quantité plus importante de calculs, ce qui peut les rendre moins attrayants dans un contexte opérationnel. Par contre, ils offrent aussi une meilleure compréhension de l'incertitude des prévisions lors de la prise de décision.

Une étude de la qualité des vents a été réalisée dans un rapport de la division en recherche météorologique d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC; Fortin, Gaborit, & Dimitrijevic, 2015). Cette étude a notamment comparé aux observations des stations météorologiques disponibles les prévisions offertes par quatre NWP dans la région du lac Champlain, dont la vitesse et la direction des vents. Les résultats indiquent que les quatre modèles sous-estimaient la vitesse des vents et que la qualité des prévisions diminuait grandement après une période de deux jours. Stoffelen (1998) a tenté de quantifier les erreurs entre les mesures de vitesse du vent et les NWP. Il a démontré qu'il existe un biais entre les vents mesurés (par anémomètre ou par diffusomètre) et ceux offerts par les différents modèles. Une autre étude (Azorin-Molina et al., 2018) a découvert que la dégradation des instruments de mesure est en partie responsable des biais dans la mesure du vent. En effet, ils ont observé que la dégradation des paliers des anémomètres peut mener à une mesure biaisée négativement de la vitesse du vent, à la fois lorsque les vents sont forts ou faibles.

Les biais systématiques de la vitesse du vent identifiés dans les analyses précédentes (Fortin et al., 2015) suggèrent qu'une correction de biais doit être employée avant l'utilisation des prévisions de vent. Des travaux réalisés par Li et al. (2019) sur les méthodes de correction de

biais les mieux adaptées pour la vitesse des vents en Asie de l'Est suggère qu'une méthode par correction de quantile serait performante. Similairement, Costoya, Rocha, et Carvalho (2020) ont cherché à déterminer les bénéfices d'une correction de biais de la vitesse des vents dans la prévision de production d'énergie éolienne. Ils ont conclu que l'application d'une correction de biais par quantiles ou par domaine de fréquence permettait de diminuer le NRMSE (calcul normalisé des erreurs entre un modèle et les valeurs observées utile pour comparer des ensembles de données ayant des échelles différentes) des modèles de prévision de la densité d'énergie produite. Selon les auteurs, une combinaison des deux méthodes fournirait de meilleurs résultats, mais l'utilisation d'une seule des deux techniques serait aussi bénéfique.

L'objectif principal de ce projet de recherche est le développement d'un modèle de prévision de la surcote due au vent sur le lac Champlain pour la prévision des inondations dans la rivière Richelieu. Le développement du modèle vise à faire un pont entre le modèle simple inspiré de la formulation de Zuider Zee et les modèles plus complexes afin de créer un modèle performant, mais aussi facilement applicable dans un contexte opérationnel. Même si une certaine littérature existe déjà sur les fondements de ce qu'est la surcote, et aussi sur l'effet de seiche qui demeure un sujet connexe, celle-ci demeure limitée en ce qui concerne la modélisation de la surcote due au vent sur un lac. Il s'agit donc d'une science relativement jeune que les travaux présentés dans ce rapport cherchent à approfondir. Ce projet comporte aussi un objectif secondaire qui est d'analyser la qualité des prévisions de vent dans la région du lac Champlain afin de déterminer si celles-ci peuvent être utilisées efficacement comme données d'entrée du modèle.

CHAPITRE 2

A SEMI-EMPIRICAL WIND SET-UP FORECASTING MODEL FOR LAKE CHAMPLAIN

Guillaume Loiselle[1], Jean-Luc Martel[1], Annie Poulin[1], Simon Lachance-Cloutier[2], Richard Turcotte[2], Judith Fournier[2], Juliane Mai[3], Richard Arsenault[1]

[1]: Département de génie de la construction, École de Technologie Supérieure
1110 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3
[2]: Direction de l'expertise hydrique (DEH), Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC)
675 René-Lévesque Est, Québec, Québec, Canada G1R 5V7
[3]: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Waterloo
200 University Ave W, Waterloo, Ontario N2L 3G1

Article publié dans Hydrological Processes, Mai 2021
Loiselle G., Martel, J-L., Poulin, A., Lachance-Cloutier, S., Turcotte, R., Fournier, J., Mai, J., & Arsenault, R. (2021). A semi-empirical wind set-up forecasting model for Lake Champlain. Hydrological Processes, 35(6), e14240. https://doi.org/10.1002/hyp.14240

Abstract

The precision of Lake Champlain's water level estimation is a key component in the flood forecasting process for the Richelieu River. Hydrological models do not typically take into consideration the effects of the wind on the water level (also known as the wind set-up). The objective of this study is to create an empirical wind set-up forecast model for Lake Champlain during high wind events. The proposed model uses wind speed and direction across the Lake, as well as wind gusts as inputs. The model is calibrated to a subset of observations and evaluated on an independent sample, considering four wind speed bins. It is tested and compared to a variant of the Zuider Zee equation on twenty wind set-up events that occurred between 2017 and 2019 using hindcast data from five different numerical weather prediction systems (GDPS, RDPS, HRDPS, NOAA and ECMWF). A quantile mapping-based forecast calibration scheme is implemented for each of the forecast products to correct their biases. Results show that events are successfully predicted by the proposed model at least 72 hours in advance. These results are better than the other comparative models found in the literature and tested herein. Overall, significant improvements are obtained by including wind speed and wind gusts from different weather stations.

Keywords: Wind set-up, forecasting, numerical weather prediction, Lake Champlain, Richelieu River.

2.1 Introduction

In spring 2011, flooding exceeding major flood stages for more than two months occurred in the Lake Champlain and Richelieu River (LCRR) U.S.-Canada transboundary basin. Significant flood impacts on the basin's economy, human health and safety, infrastructure and natural environment were reported (ILCRRS, 2019). For example, the area experienced a loss of at least US$82 million due to flooding. Additionally, 2535 houses were flooded, forcing the evacuation of 1651 residents. This extreme flood event resulted from a combination of unlikely factors, namely, extreme amounts of spring liquid precipitation falling on a large snowpack, which accelerated and amplified the snowmelt (Riboust & Brissette, 2016).

In response to the 2011 flooding, operational streamflow forecasting over the Richelieu River was implemented in 2012 by the Quebec Ministry of the Environment and Fight Against Climate Change (MELCC). The streamflow forecast for the Richelieu River relies heavily on the Lake Champlain level forecast produced operationally by the Northeast River Forecast Center (NERFC).

One key factor in the 2011 flood was that of the wind set-up effect. The wind set-up effect is the result of strong and/or sustained winds in one direction at the surface of the lake, inducing a shearing force upon its surface and displacing it laterally, such that the surface becomes tilted and higher on one end of the water body. This state of imbalance lasts until the wind subsides and the water returns to its unperturbed state. This is not to be confused with the seiche effect, which is the oscillation that occurs when the wind dissipates and the gravity forces bring the water back to hydrostatic equilibrium, causing a standing wave that can oscillate repeatedly on both sides of the lake (Hunkins et al. 1998). Seiche effects are well understood and depend on the lake's size, depth, and temperature. Wind set-up in idealized conditions can be expressed as follows (USACE 1952):

$$S = \frac{n \cdot F \cdot T_s}{\rho \cdot g \cdot d} \tag{2.1}$$

where S is the set-up, n is a factor related to the ratio of shear stresses between the top and bottom of the water column, F is the fetch length, i.e., the length of the lake in the direction of the wind; T_s is the shear stress at the surface of the water; ρ is the water density, g is the acceleration due to gravity, and d is the depth of the lake.

One problem with applying this theoretical approach is that conditions are never ideal in real wind set-up events: lake geometries are not uniform, wind velocity and direction changes and shear stress is difficult to estimate, especially at the bottom of the water column. Multiple adjustment factors are required to apply this equation successfully in an operational context. Typically, the required factors are estimated or calibrated and are considered independent of the wind velocity and water depth. By estimating the n and T_s values as a function of wind velocity, the Zuider Zee formula is obtained:

$$\xi_p = \frac{V^2}{1400 \cdot z} \cdot F \cdot cos(A) \tag{2.2}$$

where ξ_p is the wind set-up in m, V is the wind speed in mph, z is the depth of the lake in ft, F is the fetch in miles and A is the angle between the wind direction and the north/south axis fetch in degrees (°).

Therefore, wind set-up effects can lead to important fluctuations in water levels. Indeed, during the 2011 flood, Lake Champlain water level was already high due to record inflows, thus it was more reactive to short-term fluctuations caused by the wind's shearing forces pushing the water to one end of the lake. These events played a significant role in the 2011 flooding of the Richelieu River as sustained strong winds on the north/south axis generated a wind set-up at the north end of Lake Champlain, allowing additional water to overflow directly into the Richelieu River (see Figure 2.1). The increased water elevation at the lake's outlet due to those winds ended up shattering the record for the highest level in over 100 years. As of now, neither

the Lake Champlain level forecast from NERFC nor the Richelieu River streamflow forecast from MELCC account for the wind set-up effect.

The 2011 event also prompted the U.S. and Canadian governments to work together to identify measures to mitigate flooding and the impacts of flooding of the LCRR. This led to the International Lake Champlain-Richelieu River Study (ILCRRS) by the International Joint Commission (IJC). The commission's final work plan published in 2017 (ILCRRS, 2017) identified the improvement of the current forecasting system as a necessity. One of the improvement measures, which motivated the current project, consists in adding wind set-up modelling using wind forecasts. The wind set-up model is seen as an additional tool to help improve flood forecasting capabilities considering that, in the present case study, flood inflows to the Richelieu River are increased during strong wind set-up events because of the higher water column at the end of Lake Champlain.

It should be noted that in 2017 and 2019, major floods occurred in many regions of the province of Quebec, with the Richelieu River being impacted again (albeit less strongly than in 2011), urging the need for better wind set-up forecasting tools.

Few studies have analyzed the impacts of wind set-up on lake bodies, although many have investigated its effect on ocean coastlines, where they have looked at its impact on erosion and sediments (Garvine, 1985; Hamon, 1966; Hoeke, McInnes, & O'Grady, 2015; Walton & Dean, 2009). Studies focusing on wind seiches on lakes are less numerous, and most implement variations of the Zuider Zee formulation (Colvin, Lazarus, Splitt, Weaver, & Taeb, 2018; Taeb, Weaver, & Lazarus, 2019). Particularly interesting to the present study, the seiche effect resulting in wind set-up during hurricanes has been studied on Lake Okeechobee in the U.S. (Chimney, 2005). That study compared results from the SLOSH (Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes) model with those of several steady-state models for the forecasting of wind set-up heights during two hurricanes that occurred in 2004 (Frances and Jeanne). The author concluded that the calibrated steady-state models offered a similar performance to that from the more complex SLOSH model. While hurricane-induced wind set-up events are more

extreme than the types of events involved in the 2011 Richelieu River flooding, Chimney (2005) suggests that the use of calibrated relatively simple steady-state models can lead to satisfactory results, even in a similar context. A study by Platzman (1963) used more complex dynamic models to analyze the effects of the wind on wind set-up on Lake Erie. However, the models are data-intensive, which can complicate their implementation in an operational setting.

A study report by the Meteorological Research Division of Environment and Climate Change Canada (Fortin, Gaborit, & Dimitrijevic, 2015) assessed the quality of different forecast systems variables, including the wind speed for flood forecasting on the Lake Champlain and Richelieu River region. They compared four numerical weather prediction (NWP) systems with the closest weather station on the lake. They concluded that all NWP systems underestimated the wind speed and that their performance decreased significantly after two days. This indicates that there is a need to process wind forecasts using bias-correction methods to compensate for these errors and to attempt to increase the accuracy of forecasts at longer lead-times.

The main goal of this paper is thus to develop a model to better represent the wind set-up on Lake Champlain. The model development was based on the premise of finding a balance between model complexity and model applicability in an operational context. As a secondary objective, the quality of the wind observations and forecasts will be assessed and processed for use in the wind set-up model developed.

The study site, the wind set-up forecasting models and the data used as their inputs are introduced in section 2. The results are presented in section 3 and discussed in section 4, followed by the conclusion and recommendations in section 5.

2.2 Data and methods

This section will start off by introducing some common terminology (section 2.1), followed by a description of the study site and data (section 2.2), the introduction of the wind set-up

models tested and developed (section 2.3) and their calibration and validation (section 2.4), as well as the forecast application of these models (section 2.5).

2.2.1 Terminology

The following terminology is used in this paper:

- Wind set-up: Difference between the average water level and the level at the Rouses Point hydrometric station (outlet of Lake Champlain towards the Richelieu River). The wind set-up is also known as the lake surge.
- Fetch: Length of the lake over which the wind friction can generate a lake surge. Over Lake Champlain, the fetch is taken on its north/south axis (longer and more critical for flood events on the Richelieu River) and is estimated at 85,000 m for the main lake body.
- Water depth: Average depth of the lake, estimated at 30 m for Lake Champlain.
- Average level: The average (or still) water level on Lake Champlain without the presence of wind. This level can also be approximated during a lake surge event by averaging the water level from all three hydrometric stations on the lake.

2.2.2 Study Site and Data

2.2.2.1 Lake Champlain

Lake Champlain is located in the states of Vermont and New York and across the Canada-U.S. border in the province of Quebec, flowing into the Richelieu River (Figure 2.1). With a surface area of 1269 km², it is the sixth largest water body in the U.S. The slender geometry (a length of 201 km in the north/south axis and 23 km in the east/west axis) of the lake and the topography of its surroundings (i.e., the Adirondacks and Green Mountains on both flanks, funneling the wind in the lake's longitudinal direction; Carrera et al. 2009) make it particularly susceptible to significant wind set-up, which is dependent on the length of the fetch. Furthermore, the lake bathymetry is such that the bottom slopes upwards towards both ends from the center, making it more susceptible to the impacts of wind set-up.

Large wind set-up events in Lake Champlain can generate a water level increase as high as 0.15 to 0.25 m at Rouses Point, where Lake Champlain empties into the Richelieu River. While set-up events of this scale might seem small in absolute terms, the ensuing increase in flows is estimated at approximately 100 m^3/s in the Richelieu River for every 0.15 m increase in water level when the levels approach flood levels (IJC, 2015). These events occur throughout the spring to fall seasons, although there are typically stronger and more consistent winds (and thus more wind set-up events) during fall. However, the most critical wind set-up events occur during the spring melt period, when the lake level is already high and when a strong wind can contribute to causing floods downstream. For example, the difference between a minor flood (that would require some preparations in terms of sandbags, etc.) and a major one that requires evacuating many houses by the Richelieu River is 271 m^3/s (Lucas-Picher et al. 2021) and when the lake level is already close to the minor flood level, a strong wind set-up event can push the water level above the threshold and require intervention from public safety agencies. It is therefore crucial to consider the wind set-up in flood forecasting.

It is also important to note that the flow in the Richelieu River, and thus possible flooding downstream, is controlled by the Lake Champlain level. The application of a rating curve at Rouses point allows forecasting the flows and floods accurately in the Richelieu River. Furthermore, the still water level (without wind set-up) can be accurately forecasted using a hydrological model and mass balance equations due to the large size of Lake Champlain. Therefore, in this study, the ability to predict the wind set-up at Rouses Point is directly linked with floods forecasting in the Richelieu River.

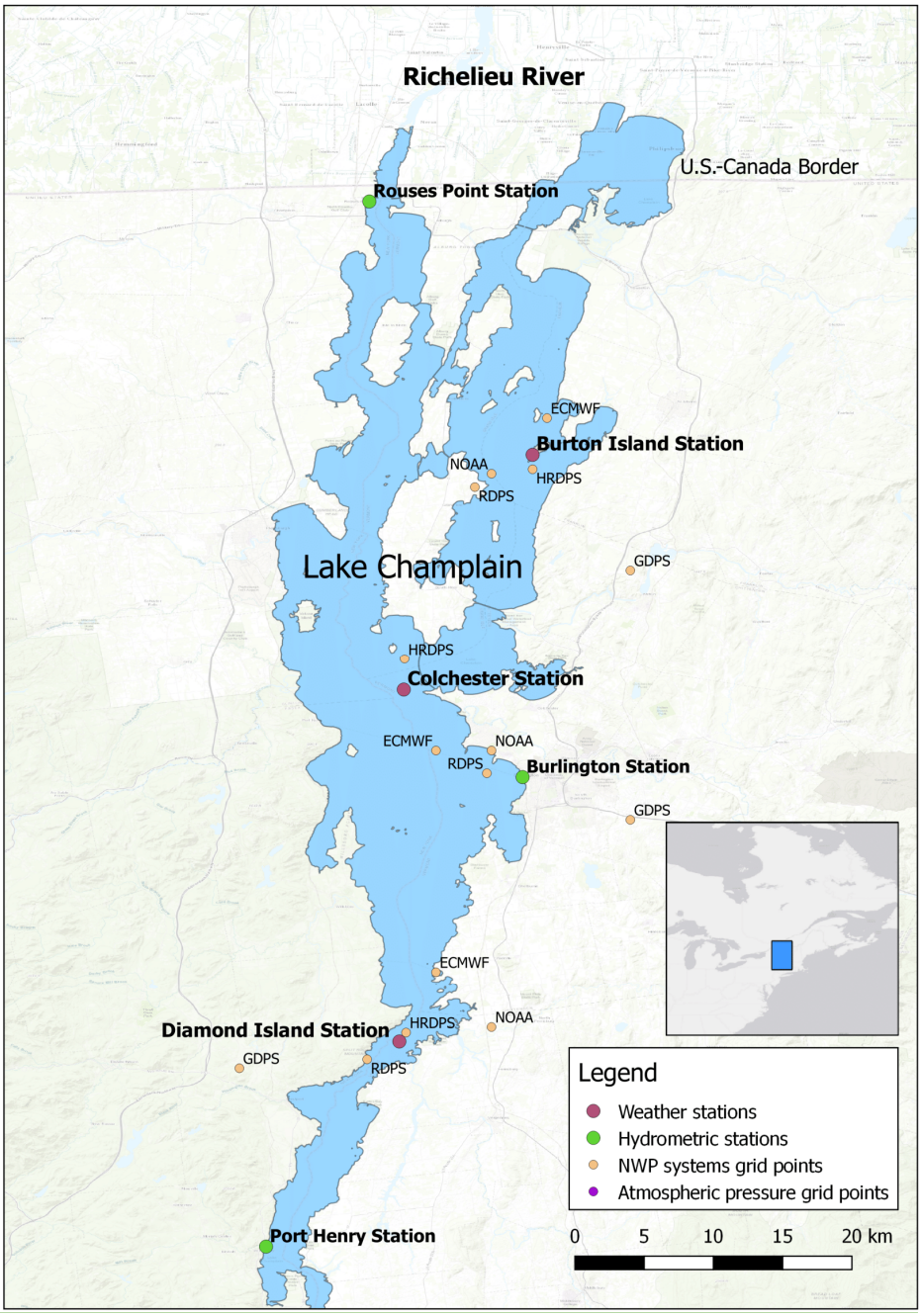

Figure 2.1 Location of Lake Champlain and the closest weather (red) and hydrometric (green) stations relative to the grid cell centers of different Numerical Weather Prediction systems (orange), i.e. GDPS, RDPS, HRDPS, NOAA, and ECMWF, as well as centers of grid points where atmospheric pressure from ERA5-Land/ECMWF (purple) is available. The gray map inset shows the location of the study domain in North America

2.2.2.2 Observed Data

There are currently three weather stations measuring the wind speed (both average and gust) and direction as well as atmospheric pressure across Lake Champlain. These are located at Burton Island, Colchester Reef and Diamond Island (red dots in Figure 2.1). These three stations are operated by the Forest Ecosystem Monitoring Cooperative (FEMC – formerly known as the Vermont Monitoring Cooperative). The characteristics of the stations are presented in Table 2.1. A cursory analysis of the atmospheric pressure variable for these stations showed that the data for the Diamond Island station was of poor quality (there was a lot of missing data and visible recording errors for half of the investigated period). For this reason, the ERA5-Land (C3S, 2019) reanalysis product developed by the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) was used as a replacement for the observed atmospheric pressure.

The present study also uses data from three USGS hydrometric stations, located at Rouses Point, Burlington, and Port Henry (Figure 2.1). These stations are used to calculate the average lake level, and ultimately, the wind set-up at the Rouses Point hydrometric station.

Tableau 2.1 Lake Champlain's weather and hydrometric stations characteristics. The weather stations are operated by the Forest Ecosystem Monitoring Cooperative (FEMC) while the hydrometric stations are operated by the U.S. Geologic Survey (USGS). The locations of the stations are shown in Figure 2.1

Station ID	Station name	Operator	Latitude [°]	Longitude [°]	Elevation	Time step	Active period
Weather stations							
-	Colchester	FEMC	44.555	-73.329	7m	15min	1996-2020
-	Burton Island	FEMC	44.767	-73.213	4m	15min	2010-2020
-	Diamond Island	FEMC	44.237	-73.333	19m	15min	2005-2020
Hydrometric stations							
04295000	Rouses-Point	USGS	44.996	-73.360	-	15min	2007-2020
04294500	Burlington	USGS	44.476	-73.222	-	15min	2007-2020
04294413	Port-Henry	USGS	44.053	-73.453	-	15min	2015-2020

2.2.2.3 Forecasted Data

Different deterministic forecast databases from five NWP systems are analyzed in this study and are summarized in Table 2.2.

The Global Deterministic Prediction System (GDPS) is the Canadian Global Environmental Multiscale (GEM) forecast model, with a horizontal resolution of ~25 km. The NWP is issued by Environment and Climate Change Canada (ECCC). It offers wind speed and direction forecasts at 10 m over a 240-hour horizon, with time steps varying between 1 and 3 hours. Forecasts are issued every 12 hours. The archived forecast data available at the time of our analyses covered the May 22, 2017 to Sep 29, 2019 time period. The data are publicly available at the Canadian Surface Prediction Archive (CaSPAr; Mai et al. (2020))

The Regional Deterministic Prediction System (RDPS) is of a higher resolution than GDPS (horizontal resolution of ~10 km) and is also based on the GEM model and issued by ECCC. It provides wind speed and direction forecasts at 10 m over an 84-hour horizon, with a time step of 1 hour, and the forecasts are issued every 6 hours. The archived forecast data available at the time of the analyses covered the May 21, 2017 to Sep 29, 2019 time period, and are available on CaSPAr.

The High-Resolution Deterministic Prediction System (HRDPS) is of a higher resolution than both RDPS and GDPS (horizontal resolution of ~2.5 km), and is equally based on the GEM model, and is issued by ECCC. Similar to the RDPS, it provides wind speed and direction forecasts at 10 m over a 48-hour horizon, with a time step of 1 hour, and the forecasts are published every 6 hours. The archived forecast data available at the time of the analyses covered the June 1, 2017 to December 30, 2019 time period, and are available on CaSPAr.

The NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) American model used in this study is the NCEP GFS at a resolution of ~20 km. The dataset will be referred to as NOAA herein. It provides wind speed and direction forecasts at an isobaric surface of 1000 mbar over

a horizon of 384 hours, with time steps varying between 3 and 12 hours, and forecasts are published every 6 hours. The archived forecast data available at the time of the analyses covered the Jan 15, 2015 to April 12, 2019 time period. The data are updated daily, and available at the National Center for Atmospheric Research (NCAR) Research Data Archive: https://doi.org/10.5065/D65D8PWK

The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) issues the Deterministic European forecasting model product whose horizontal resolution varies between 8 and 9 km. The dataset will be referred to as ECMWF herein. It offers wind speed and direction forecasts at 10 m over a 240-hour horizon, with time steps varying between 1 and 6 hours, and the forecasts are published every 24 hours. The archived forecast data available at the time of the analyses covered the Jan 1, 2015 to Dec 24, 2019 time period. The data are available from the ECMWF MARS archive on the ECMWF website: https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/operational-archive. Note that only the ECMWF dataset is available for the 2011 event, and that the operational model at the time was a substantially older version than the current model. Therefore, the 2011 event was not specifically investigated in this study.

Tableau 2.2 Forecast systems details such as elevation, resolution, release interval, length of forecast horizon, time step of the forecast and time period the dataset is available

Forecast System	Source	Elevation	Resolution	Release	Horizon	Time step	Available period
GEM-GDPS	ECCC	10m	25km	12hr	240hr	1hr - 3hr	2017-2019
GEM-RDPS	ECCC	10m	10km	6hr	84hr	1hr	2017-2019
GEM-HRDPS	ECCC	10m	2.5km	6hr	48hr	1hr	2017-2019
NCEP-GFS	NOAA	10m	20km	6hr	384hr	3hr - 12hr	2015-2019
ECMWF	ECMWF	10m	9km	24hr	240hr	1hr - 6hr	1979-2019

2.2.2.4 Bias Correction

In general, forecast models exhibit biases when compared to observed data (Hölbig, Machado, & Pavan, 2016). Indeed, a study by Fortin et al. (2015) evaluated the GEM-based NWP issued by ECCC (first three NWP systems listed in Table 2.2) and concluded that they all underestimated the wind speed and required some type of bias correction.

Since the wind set-up model will use observed wind data for calibration, it is imperative that the forecasted wind data be bias-corrected to remove errors. All five forecast systems are thus bias-corrected prior to being used to estimate the wind set-up. A standard quantile mapping procedure (Jeong & Lee, 2018) is used to correct the 10-meter wind-speed (V_{10}) variable for all forecast systems individually. Each season (winter, DJF; spring, MAM; summer, JJA and fall, SON) is corrected independently using a total of 100 quantiles over a 24-hour horizon for all lead times, using all data in the period. Furthermore, calibration was performed in two steps for the GDPS, RDPS and HRDPS following a major update in the ECCC NWP in September 2018, which changed the forecast characteristics in a non-negligible way. Similarly, wind gust data are bias-corrected using the same methodology.

2.2.3 Wind Set-up Modeling

2.2.3.1 Model A

Model A is a simple steady-state wind set-up model developed by the U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 1977), which is heavily based on the Zuider Zee formula, and is defined as follows:

$$\xi_p = \left(\frac{c \cdot V_{10}^2}{z}\right) F \cdot cos(A) \tag{2.3}$$

where ξ_p is the wind set-up in m, V_{10} is the wind speed at a 10 m height in m s^{-1}, z is the depth of the lake in m, F is the fetch in m, A is the angle between the wind direction and the north/south axis fetch in degrees (°) and c is a constant to be calibrated. To use that model on

Lake Champlain, the lake depth (z) and the fetch (F) were respectively set to 30 m and 85,000 m and the wind set-up (ξ_p) is computed at the Rouses Point hydrometric station (see Figure 2.1).

A study led by Chimney (2005) showed that when calibrated on observations, this model can provide reasonable estimates of the wind set-up with errors comparable to those seen in more complex models. Considering that other more sophisticated wind set-up models require a larger number of variables typically not available in a forecasting framework, the USACE model was selected as the baseline for the forecast model developed in the present study.

2.2.3.2 Model B

The proposed wind set-up model developed in this study is a derived version of the USACE model introduced in the previous section. Multiple variations of the model were tested with increasing complexity (i.e., addition of atmospheric variables and/or calibration constants) before we obtained the final proposed model, Model B. Only the modifications that provided a significant increase in the model performance for relatively large wind set-up events were kept. Unlike model A, model B uses the wind speeds and directions from the three available weather stations on Lake Champlain (rather than a single value), allowing for a better representation of the wind at the lake scale. Accounting for this is particularly important in the case of large lakes, such as the one studied here.

To further increase the flexibility and the performance of the model, additional physical variables (all available from the different forecasting centers) were incorporated in the model, better representing the state of the lake. Tests were carried out with the following variables: 1) difference in atmospheric pressure between the south and north ends of the lake, 2) north-south components of the maximum wind gusts at the three weather stations, and 3) both in combination with multiplicative parameters. It was found that the most important gain in model performance was made when considering the wind gusts variable alone (as all additional gain from considering atmospheric pressure differential was superseded by this addition). Indeed,

intense wind gusts can cause variations in the lake level even if the average wind speed over the same period is relatively low. A multiplicative parameter was also added to the maximum wind gust variable.

Finally, to provide additional flexibility to the model when dealing with more intense events, model calibration was performed taking into account different wind speed bins, based on the wind speed data at Colchester station. Starting from using the entire time series, the number of bins was gradually increased and in the present case it was found that 4 bins lead to the best model performance. The four bins are defined based on intervals of 5 m s^{-1} (in absolute values) which generated four sets of parameters to be calibrated. It is worth mentioning that while working with bins increases the number of model parameters to be calibrated, the calibration for each bin is performed independently. Of course, in other different applications, the number of bins to be selected and their threshold values would need to be evaluated.

The final proposed model, referred as model B hereafter, is defined as follows:

$$\xi_p = \left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{X_{(i)} \cdot V_{10,i}^2}{z}\right) F \cdot cos(A)\right] + \left(\theta_{(1)} \cdot \frac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n} V_{gust,i} \cdot cos(A)\right]\right) + \theta_{(2)} \qquad (2.4)$$

where ξ_p is the wind set-up in m, n is the total number of weather stations, $V_{10,i}$ is the wind speed in m s^{-1} at station i, z is the average depth of the lake in m, F is the fetch in m, A is the angle between the wind direction and the fetch in degrees (°), V_{gust} is the maximum wind gust at station i in m s^{-1}, $X_{(i)}$ are multiplicative constants, $\Theta_{(1)}$ is wind gusts multiplicative constant, and $\Theta_{(2)}$ is an additive constant, with a set of calibrated parameters for each of the four wind speed bins (in m s^{-1}) used in this study. This yields $n+2$ parameters to be calibrated for this model, for each bin.

As with model A, to use the proposed model on Lake Champlain, the average lake depth (z), the fetch (F) and the n number of weather stations are respectively set to 30 m and 85,000 m and 3. It should, however, be noted that these values have little impact once the model is

calibrated because of the multiplicative constants $X_{(i,j)}$. The wind set-up (ξ_p) is computed at the Rouses Point hydrometric station (Figure 2.1).

2.2.4 Calibration and Validation

Both models A and B require a calibration and validation of their multiplicative and additive constants in order to provide better wind set-up estimates and forecasts. In the case of model A, only 1 parameter is calibrated, whereas model B has a total of 20 parameters to be calibrated. It is important to note that the jump in complexity was made incrementally and that many intermediate models were tested before leading to the proposed model B.

The models are calibrated by minimizing the Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970) efficiency criterion, described as follows:

$$1 - NSE = 1 - \left(1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}(\xi_o^t - \xi_s^t)^2}{\sum_{t=1}^{T}(\xi_o^t - \bar{\xi})^2}\right) \tag{2.5}$$

where T is the amount of time steps, ξ_o^t is the observed wind set-up at time t, ξ_s^t is the simulated wind set-up in m at time t and ξ_o is the mean observed wind set-up. The NSE values can range from -∞ to 1, where 0 means that the mean wind set-up is as good of a predictor as the model results, and 1 is a perfect match.

To optimize the parameters, the objective function (1-*NSE*) is minimized using the Shuffled Complex Evolution algorithm developed at the University of Arizona (SCE-UA; Duan, Sorooshian, & Gupta, 1992) allowing to obtain optimal parameter sets for the calibration period. To avoid potential over-fitting of the parameters, the first half of the available period (2015-2017) is used for the calibration, and the second half (2017-2019), for the validation. Furthermore, winter months (i.e., January and February) are not considered for the calibration and validation, since both models A and B do not consider the presence of an ice cover on the lake. This methodological choice should not affect the final flood forecasting objective since

the water levels are lower during the winter months and that period is not prone to flooding events. All results shown hereafter are for the validation period.

It is worth mentioning that due to the larger number of parameters in model B, different parameters result in very similar *NSE* calibration and validation values (known as model parameter equifinality; Beven, 2006). However, considering that large wind set-up events are deemed more important in flood forecasting, a visual validation of the largest and most critical wind set-up events (those more likely to generate potential flooding) is applied to ensure that a good fit is obtained on those events. While a multi-objective function that puts additional weight on large events could have been used to obtain similar results, a visual validation was assessed as simpler and sufficient for the purposes of this study, considering the small number of significant wind set-up events in the available period.

2.2.5 Forecast Applications

The calibrated models are then fed with hindcast scenarios (based on the forecast data described in section 2.2.3) allowing to emulate a real-world situation where the wind set-up must be forecasted to assess its impact on a potential flooding event. A total of twenty wind set-up events over the validation period (2017-2019) are visually identified to assess the forecast performances of models A and B.

When working in hindcasting mode, the wind speed data used in models A and B belong to each of their respective forecast systems (GDPS, RDPS, HRDPS, ECMWF and NOAA). However, wind gust data are not available for the GDPS, RDPS or HRDPS models and are taken from the ECMWF model, while the NOAA model uses its own wind gust data.

Considering that the maximum lead time of the forecasts can reach up to 240 hours (10 days), the assessment of the models' performance when simulating major wind set-up events is done by going backwards in time, and starting with the closest midnight release before the wind set-up event, and moving back using a 24-hour time step (corresponding to the largest forecast

release in the models used, and leading to a maximum of ten forecasts used, although only 4 day ahead forecasts were implemented in this study). This also allows to compare the performances of both models A and B and of the forecast models themselves.

2.2.6 Selected Wind Set-up Events

All relatively large wind set-up events over the validation period (2017-2019) are identified and are used to compare the model performance with these major events from a flood forecasting perspective. All events respecting two predetermined thresholds were considered in the analysis: 1) a 12-hour average wind set-up larger than 0.05 m, and 2) a maximum wind set-up larger than 0.1 m. Only the events occurring between the months of April and January, corresponding to the period during which the lake is free of ice cover, are considered. This resulted in a total of twenty events that were individually analyzed considering the relatively small size of this sample. The statistics of these events are summarized in Table 2.3. The reader is further directed to the supplementary material provided with this paper where the largest individual wind set-up events are made available.

Tableau 2.3 The twenty largest wind set-up events recorded with their respective characteristics (duration, average and maximum wind set-up values) over the validation period (2017-2019)

Rank	Date	Duration [h]	Avg. wind set-up [m]	Max. wind set-up [m]
1	2019-01-08	19	0.11	0.27
2	2018-09-22	24	0.12	0.26
3	2017-11-05	33	0.08	0.19
4	2017-12-05	31	0.10	0.18
5	2019-09-14	27	0.09	0.18
6	2019-04-19	28	0.07	0.18
7	2017-11-28	24	0.10	0.18
8	2018-12-28	19	0.06	0.15
9	2018-09-25	43	0.06	0.15
10	2019-01-01	16	0.04	0.15
11	2017-11-29	21	0.06	0.14
12	2018-08-21	39	0.05	0.13
13	2018-10-04	16	0.06	0.12
14	2017-10-15	20	0.06	0.12
15	2018-06-04	29	0.05	0.12
16	2017-11-16	21	0.06	0.11
17	2017-11-21	21	0.05	0.11
18	2017-11-10	29	0.03	0.10
19	2017-11-25	28	0.05	0.10
20	2018-10-09	22	0.05	0.10

2.3 Results

This section presents the results of a comparison between the observed and forecasted wind speeds (3.1), the performance of the aforementioned wind set-up models in a calibration-validation set-up with observed data (3.2), and the performance of the different models and data sets in forecasting scenarios (3.3).

2.3.1 Comparison of Observed and Forecasted Wind Speed

The objective of the following analyses is to assess the quality of the wind speed forecasts in order to determine their viability in the wind set-up models.

The report produced by Fortin et al. (2015) indicates that the Burton Island and Diamond Island stations show incongruities which, according to the team responsible for the maintenance of the stations' equipment, are probably related to the presence of trees obstructing the wind and distorting measurements. They performed a correlation analysis for the period from June 02, 2017 to Sep 18, 2018 between the lake level at Rouses Point and the wind speeds at various stations. They indicate that the Colchester Reef station (correlation of 0.75) indeed provides the best data (correlations of 0.73 and 0.69, respectively, for Burton Island and Diamond Island). This station is therefore used as a reference base for the analyses of the wind forecasts presented hereafter. In all cases, the closest grid point from all NWP systems is used in the comparison with the winds from the Colchester Reef station.

The results of the comparison between the different forecasting models and the Colchester station observations are shown in Figure 2.2 using contingency tables. These tables count the number of times the observations and forecasted wind speed values fall in respective pairs of intervals, for a 24-hour lead-time. The wind speeds are divided in 5 ms^{-1} bins, where positive values indicate that the wind is blowing north, and negative winds indicate south-blowing winds. This analysis for the five NWP forecast models does not easily identify a superior model since they all offer similar performances. Predictions with errors larger than 15 ms^{-1} are very unusual for all models. The 10 ms^{-1} errors are a little more frequent for European and American models (ECMWF and NOAA, respectively) as compared to Canadian models (GDPS, RDPS, HRDPS), but remain relatively rare. However, the previously mentioned negative bias identified by ECCC (Fortin et al., 2015) is difficult to identify with these contingency tables.

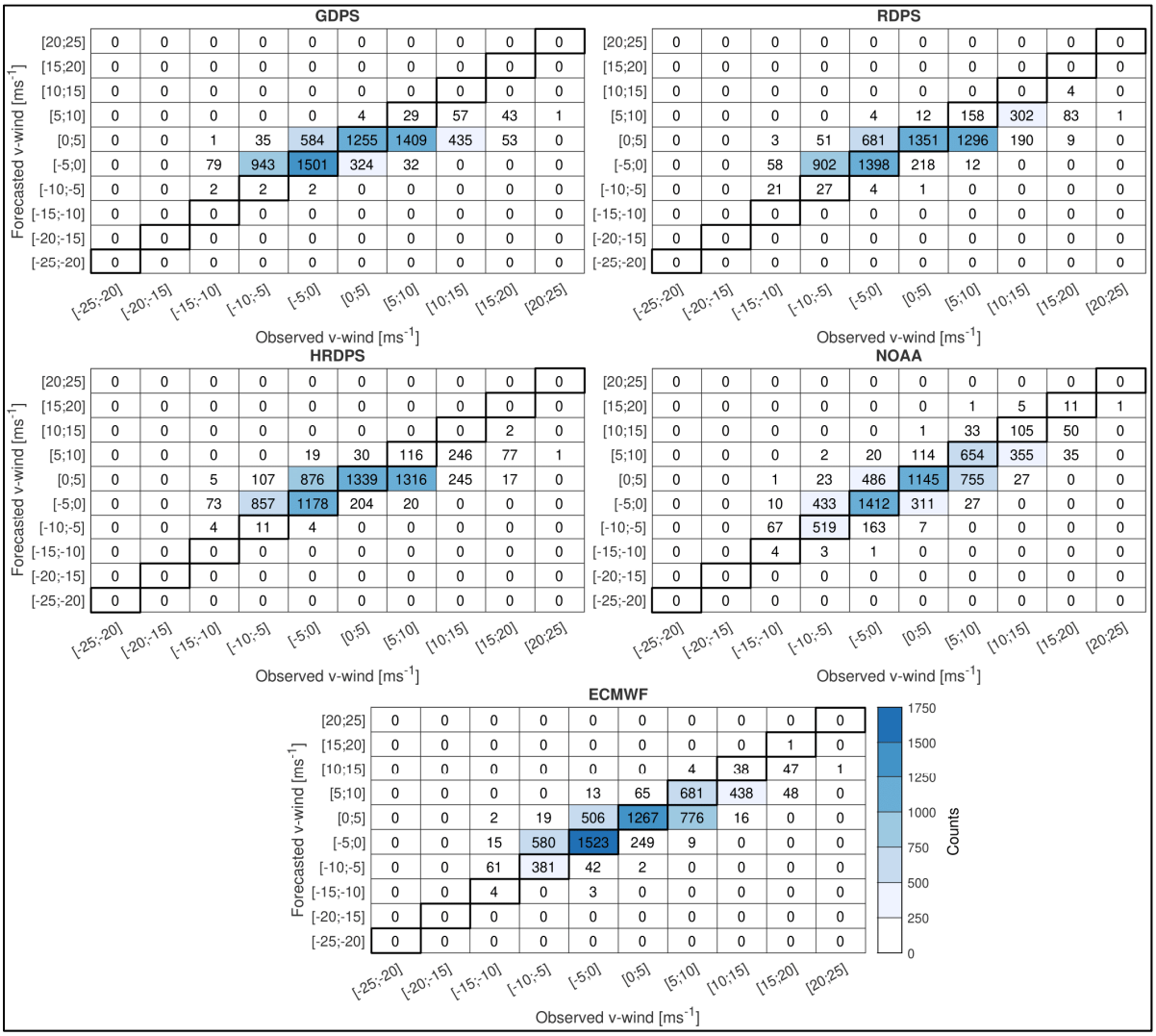

Figure 2.2 Contingency tables of the five NWP forecast systems first available 24-hour lead time compared to wind speed observations for the north/south component (negative values representing wind values in the south direction)

To further investigate the adequation between observations and forecasts, a comparison of the forecast data before and after bias correction is illustrated in Figure 2.3. It provides a comparison before and after bias correction using three performance metrics: the coefficient of determination (R2), the root-mean square error (RMSE), and the mean error (ME). Similar to the results obtained by Fortin et al. (2015), the data before bias correction indicate that all

forecasts underestimate the wind speed (Figure 2.3e). This systematic underestimation from all NWP models has been corrected by the bias correction (Figure 2.3f). Results from the RMSE suggest that bias correction significantly improves the RMSE in the short term (under 3 to 4 days), but that this improvement tapers off towards the end of the forecasting window (Figures 3c and 3d).

It was expected that the forecast would be strongly dependent on the lead time, where after a few days, a significant decrease in performance would be observed. Indeed, the coefficient of determination (R^2) between the ECMWF model and the Colchester station data shown in Figure 2.3 indicate that the performance decreases moderately and linearly for the first 96 hours (4 days), whereas a much steeper drop in performance is obtained for the following time steps, with the largest drop observed after 144 hours (6 days).

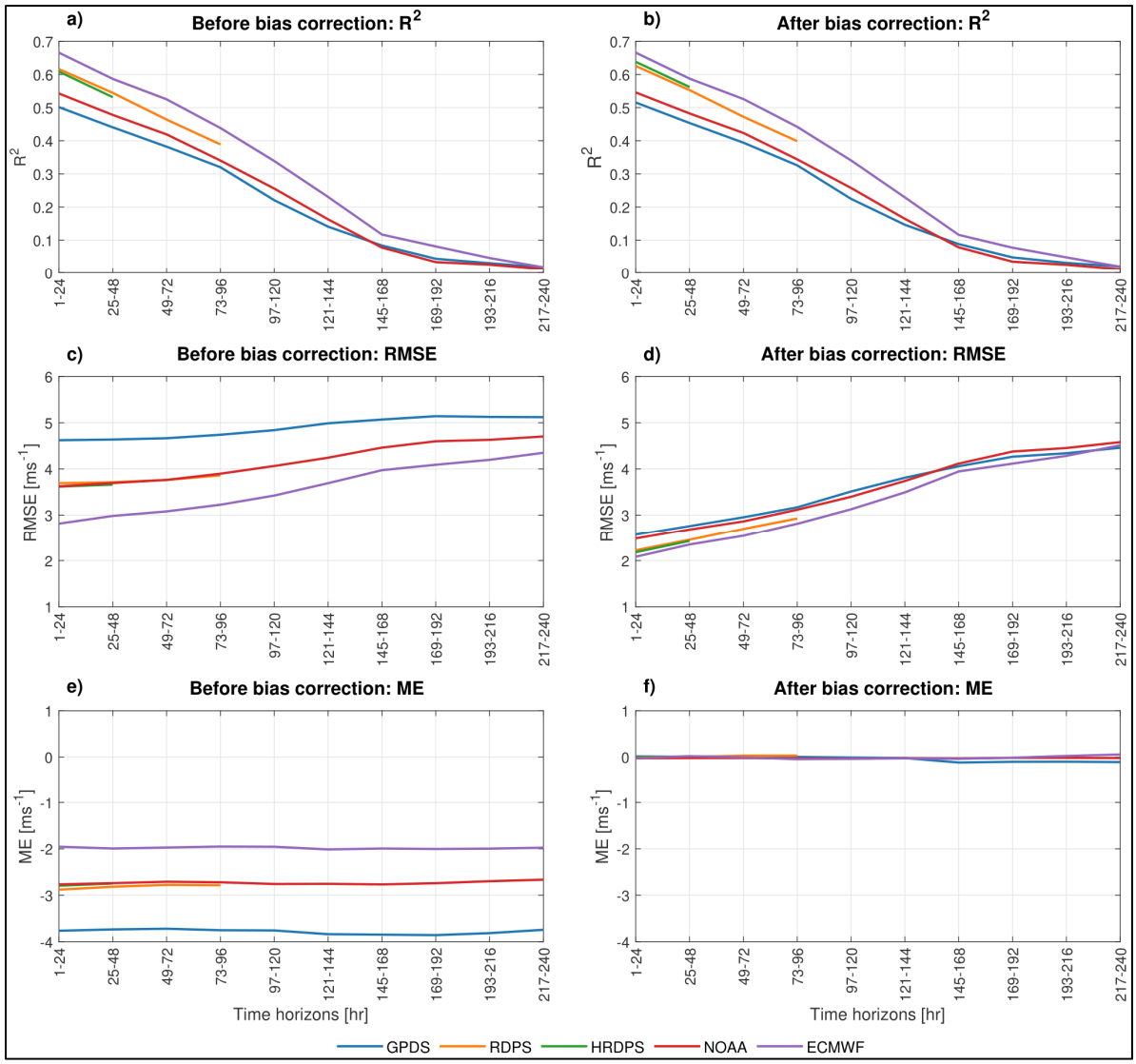

Figure 2.3 Comparison of wind speed observations at Colchester station and forecast from all NWP models before (left) and after (right) the bias correction as a function of the time horizon for three different performance metrics (a, b) coefficient of determination (R^2), (c, d) root mean square error (*RMSE*), and (e, f) mean error (*ME*). The performance is shown for all five NWPs analyzed (colored lines) for all forecast horizons available in each product

2.3.2 Wind Set-up Models with Observations

Wind set-up estimations obtained with model A show the presence of systematic biases (Figure 2.4, purple line) resulting in poor performance (NSE of 0.32) for the validation period (2017-2019). A hypothesis explaining this bias is that Rouses Point is located downstream of the lake. Considering the slender shape and large size of the lake, the elevation at Rouses Point is lower than the center of the lake. Thus, when calculating the height difference value between Rouses Point and the mean lake height used in the model, a negative bias could be introduced. Indeed, similar differences in lake levels at Rouses Point have been observed in other studies (USGS, 2014).

This systematic bias was corrected with an additive constant to model A, which was calibrated alongside of parameter *c* introduced in section 2.3.1. Figure 2.4 compares the validation performance for model A with and without the additive constant for the April 19, 2019 event. This modification of model A improved the performance from a NSE value of 0.32 to 0.73. Thus, we decided to include the additive constant in the baseline model to account for the bias introduced in the analyses. This modification improved model A and helped to better compare the simpler model A and the more complex proposed model B. Hereafter, model A will refer to its modified version, including the additive constant.

Although there is a strong correlation between wind speed and wind set-up height, similar wind speed patterns often result in very different wind set-up heights. For instance, the April 19 event shown in Figure 2.4 has quite similar wind speed patterns (Figure 2.4, grey dashed line), but the resulting observed wind set-ups are completely different. This indicates that variables other than the wind speed are responsible for influencing the wind set-up. Indeed, the much better agreement between final model B (cyan; all components, but without pressure) and observations (black) compared to its intermediate steps (red, with one station; purple, without thresholds; brown without gusts; green with all components) and to model A (blue for original or orange for modified) suggests that the inclusion of wind gusts, different weather stations and categorizing winds in various bins does play a non-negligible role in the wind set-up.

Over the validation period (2017-2019), both models (model A and model B) generally offer relatively good performance in terms of the *NSE* (0.73 for model A, as compared to 0.76 for model B), as well as the mean absolute error (*MAE)* (1.03 cm for model A, as compared to 0.99 cm for model B). However, as previously mentioned, clear differences can be seen between models A and B when looking at particularly large wind set-up events. For instance, the April 18-20 event shown in Figure 2.4 indicates that model A largely underestimates the wind set-up, as compared to model B. Table 2.4 shows a summary of the twenty largest recorded wind set-up events comparing both the *MAE* for both models, as well as, intermediate model tests against the observed wind set-ups. An average *MAE* over the twenty events of 2.40 cm was obtained for model B compared to 2.98 cm for model A, showing that model B performed better than model A (and its intermediate steps) when simulating significantly large wind set-up events that are affected by variables other than wind speed.

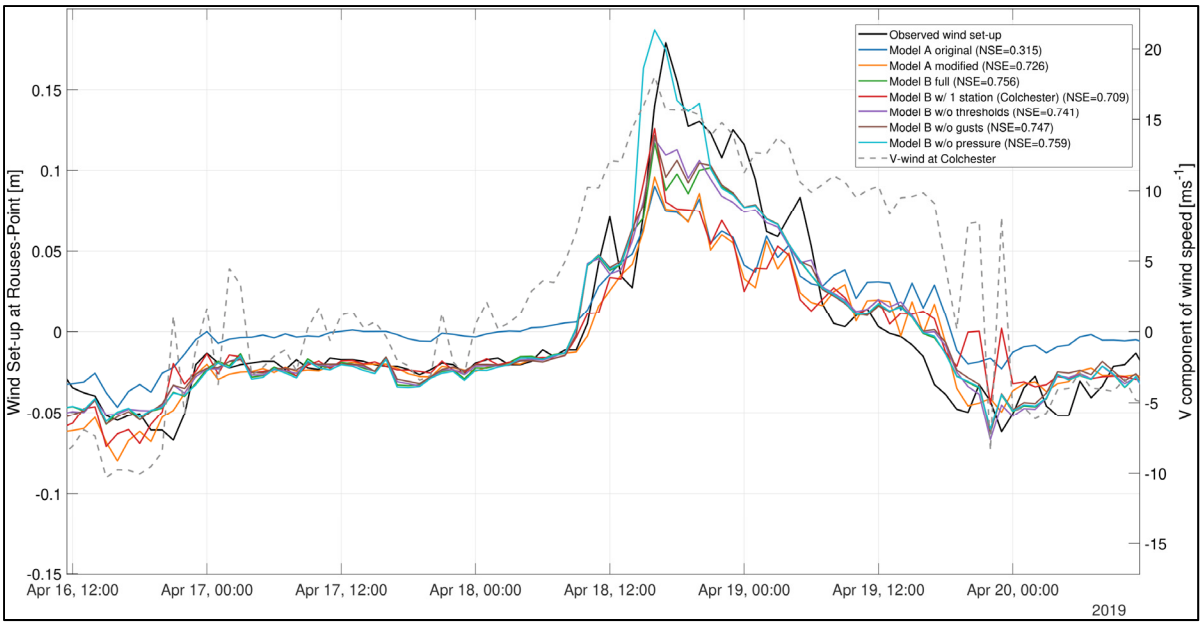

Figure 2.4 Comparison of wind set-up observations (black) and simulations obtained with model A original using one calibration parameter (blue), model A modified using a second calibration parameter (orange) and model B and its intermediate steps (green, all components; red, with only one station; purple, without bins; brown, without guts; and cyan, without atmospheric pressure). The wind speed (dashed gray line) is overlaid to show its influence on the seiche effect. The time period displayed is part of the validation period.

Tableau 2.4 Mean absolute error (*MAE*) for the twenty largest recorded wind set-up events comparing forecasts from model A and model B, as well as, from intermediate model tests against the observed wind set-ups.

Rank	Date event	A original MAE [cm]	A modified MAE [cm]	B full MAE [cm]	B w/ 1 station MAE [cm]	B w/o bins MAE [cm]	B w/o gusts MAE [cm]	B w/o pressure MAE [cm]
1	20190108	6.20	5.50	3.26	4.52	4.55	3.64	3.23
2	20180922	7.05	6.64	4.77	5.83	5.32	4.83	3.12
3	20171105	3.75	3.86	3.93	3.81	4.22	4.00	3.99
4	20171205	5.22	5.09	3.93	4.65	4.19	4.09	3.49
5	20190914	4.08	3.70	2.15	2.93	3.23	2.55	1.69
6	20190419	3.57	3.49	2.31	3.38	2.19	2.18	2.08
7	20171128	3.63	3.04	2.49	2.16	3.26	2.57	2.42
8	20181228	3.51	3.28	1.88	3.07	1.91	1.98	2.00
9	20180925	2.15	2.55	2.58	2.80	2.70	2.53	2.38
10	20190101	3.34	2.89	2.89	3.27	2.53	2.72	3.27
11	20171129	2.15	1.83	1.84	1.46	1.66	1.70	2.08
12	20180821	1.79	2.62	2.90	2.67	2.80	2.87	2.76
13	20181004	2.55	2.43	2.71	2.50	2.60	2.69	2.36
14	20171015	2.89	2.83	1.85	2.88	2.03	1.87	1.80
15	20180604	2.22	2.61	2.08	2.61	2.12	2.16	2.10
16	20171116	1.85	1.48	2.19	1.85	2.36	2.18	2.74
17	20171121	1.65	1.52	1.17	1.40	1.31	1.16	1.17
18	20171110	1.31	1.00	1.04	1.28	1.08	1.03	1.31
19	20171125	1.52	1.20	1.39	1.31	1.26	1.29	2.30
20	20181009	1.96	2.04	1.77	2.19	1.90	1.72	1.77
	Average	**3.12**	**2.98**	**2.46**	**2.83**	**2.66**	**2.49**	**2.40**

2.3.3 Wind Set-up Models with Forecasts

With satisfactory results obtained from observed data, this section assesses the performance of the model in a forecasting framework. In order to assess the model performance in a real-world forecasting context, the hindcast data described in section 2.2.3 are used to feed both calibrated wind set-up models (modified model A and model B).

Based on the results shown in Figure 2.3 and described in section 3.1, a lead time of up to 96 hours (4 days) is selected to evaluate the model performance on specific wind set-up events.

This was done to ensure that the RDPS model be included in the evaluations despite the progressively lower forecasting skill of all models. In other words, the forecasting performance of the models is evaluated up to 4 days in advance of each of the twenty selected wind set-up events and compared to observations. Comparative results between model A and model B simulated wind set-up using all five raw and bias-corrected NWP forecasts against observations at Rouses Point are presented for the event of April 19th 2019 (Figures 5 and 6 for the raw-forecast driven modified model A and model B, respectively, and Figures 7 and 8 for the modified model A and model B driven with bias-corrected forecasts, respectively). Similar figures for the other large wind set-up events are included in the Supplementary Materials accompanying this paper.

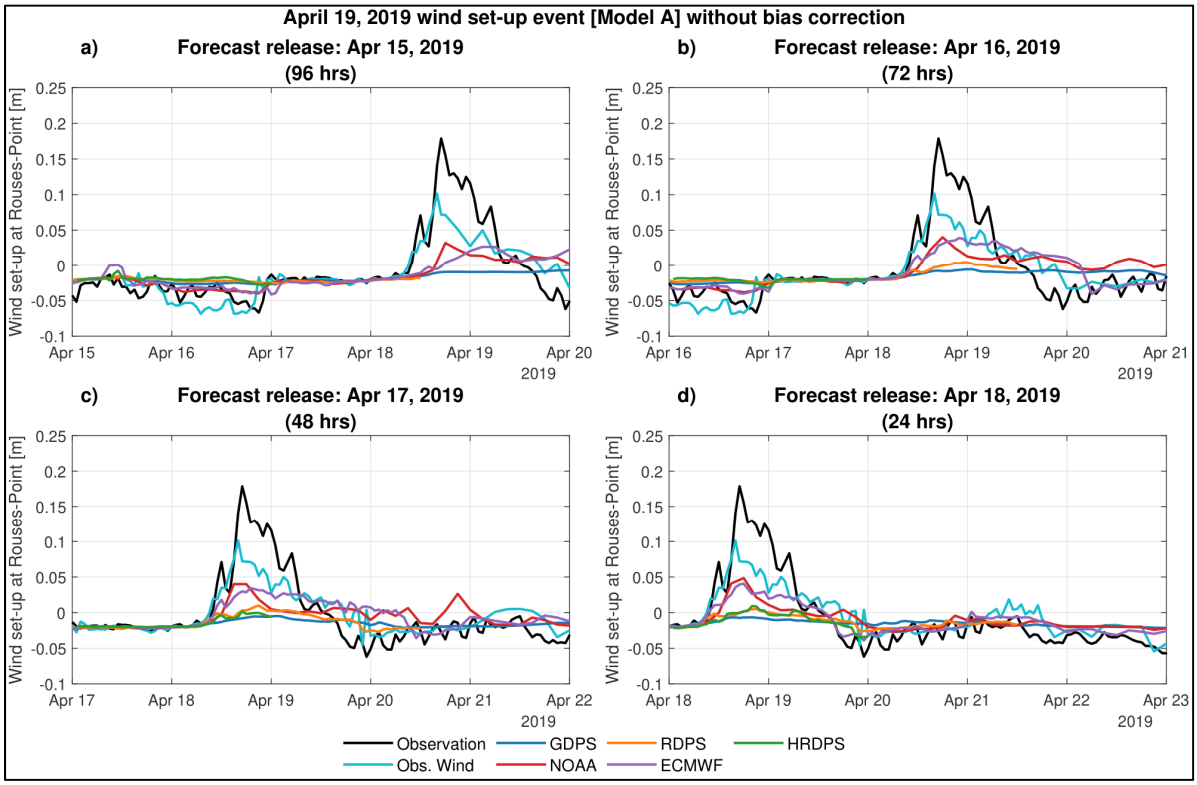

Figure 2.5 Comparison of the modified model A simulated wind set-up for the April 19, 2019 event using raw NWP forecast from GDPS (blue), RDPS (orange), HRDPS (green), NOAA (red) and ECMWF (purple) against observations at Rouses-Point (black). Simulated wind set-up using observed winds are also shown (cyan). The panels (a-d) show simulations using four forecast releases issued at 00:00 (UTC) of the day indicated in the title of each panel

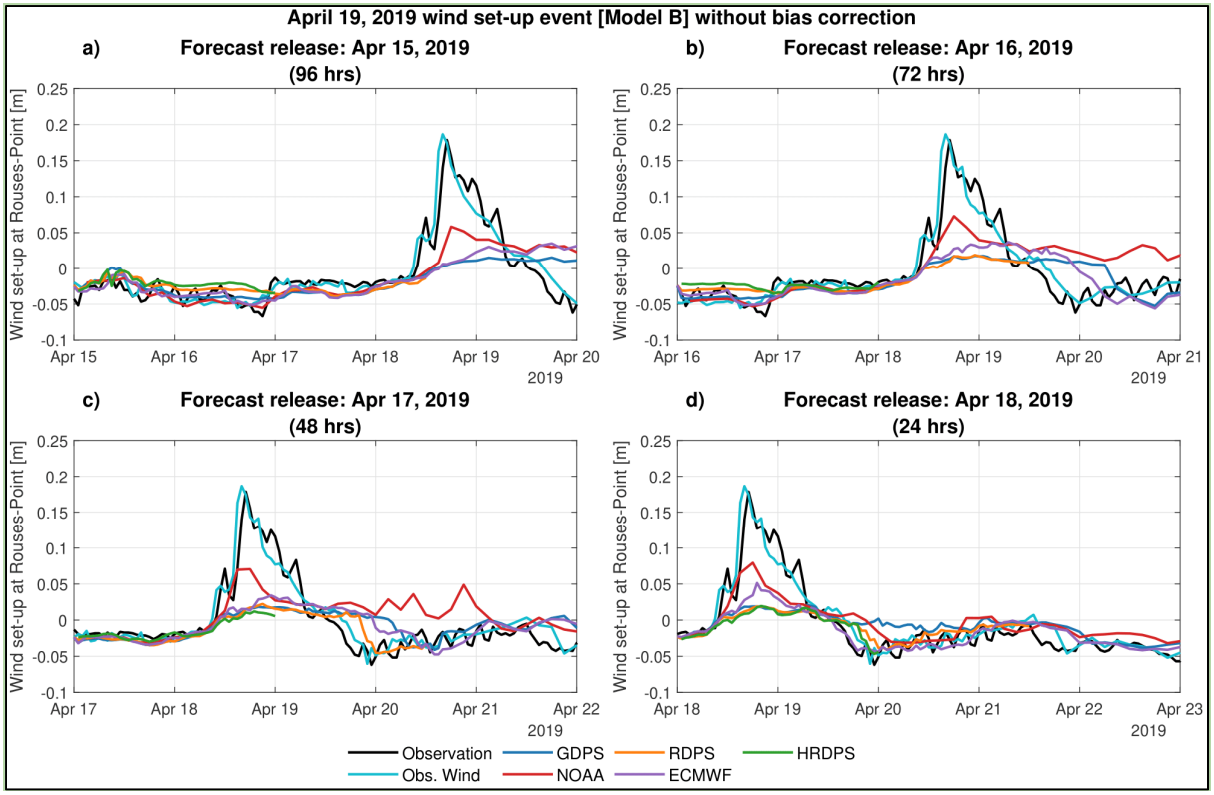

Figure 2.6 Same as Figure 2.5, but for model B

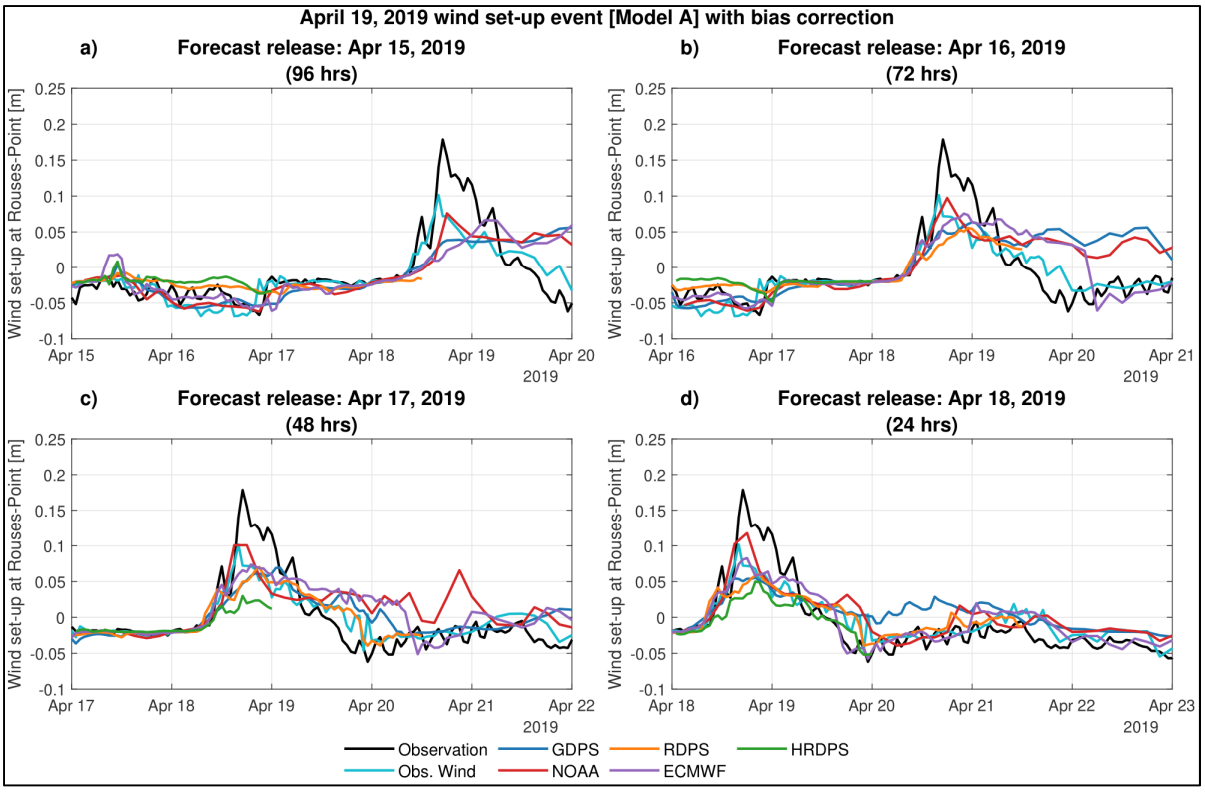

Figure 2.7 Same as Figure 2.5, but using bias corrected NWP forecasts

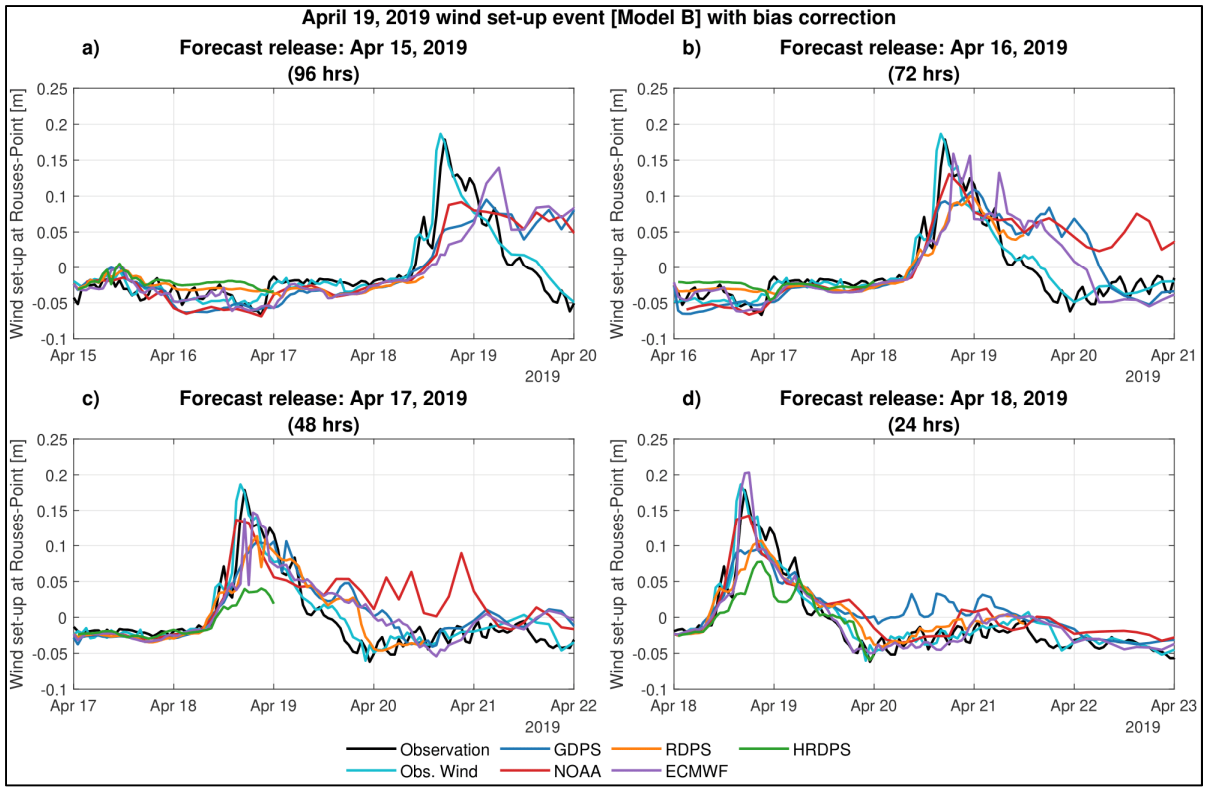

Figure 2.8 Same as Figure 2.7, but for model B

Results from Figures 2.5-2.8 show many important differences between the NWPs, models, and effects of bias correction. First, model B is able to simulate the event almost perfectly using observations (Figure 2.6), whereas model A reacts to the event but lacks in amplitude (Figure 2.5). When using the raw forecast data, both model A and model B fail to react strongly enough to the wind event and underestimate the wind set-up. This is true for all NWPs; however, the NOAA model does show a better response than the others.

Then, when using the bias-corrected forecasts, it can be seen that both model A (Figure 2.7) and model B (Figure 2.8) predict larger (and more accurate) wind set-up heights, and that this skill improves as the lead-time gets shorter. However, model B's performance is clearly superior as the ECMWF- and NOAA- driven forecasts attain the desired values. Furthermore, all NWP products (except the HRDPS to some extent) at least react to an upcoming wind event up to 4 days in advance, providing an early warning that a possibly important wind set-up event

might manifest. From figures 5-8, and those in the supplementary materials, it is clear that the bias-correction is a necessary step to improve the forecast quality and ensure that they are representative of the winds used during model calibration. It is also clear that the model B is able to make use of the added data (wind gusts and multiple stations) and can convert that information to better quality and more accurate wind set-up forecasts.

A qualitative performance assessment of all the twenty events is shown in Tables 5 and 6, for modified model A and model B, respectively. When compared with observations at Rouses Point, a relative difference smaller than 33% is considered good (green), a relative difference between 33% and 66% is defined as fair (yellow), while relative differences above 66% are regarded as poor (red). The RDPS system does not provide forecasts for 96 hours before the event and the HRDPS only offers a 48-hour forecast horizon. These horizons are therefore greyed out in Tables 5 and 6. In the cases of September 14, 2019, November 28, 2017, and November 29, 2017, no forecasting data is available 24 hours before the event for GDPS, and hence no comparison is made.

Tableau 2.5 Qualitative performance assessment summary of twenty largest wind set-up events between 2017 and 2019 for the modified model A. The relative error |Err.| is used to classify the performance into good (green), fair (yellow) and poor (red) for the 5 NWP products analyzed. The performance is evaluated with respect to the precision in order to obtain the event with a lead time of 96h to 24h before the actual event. The grey fields indicate that the forecast horizon is not available

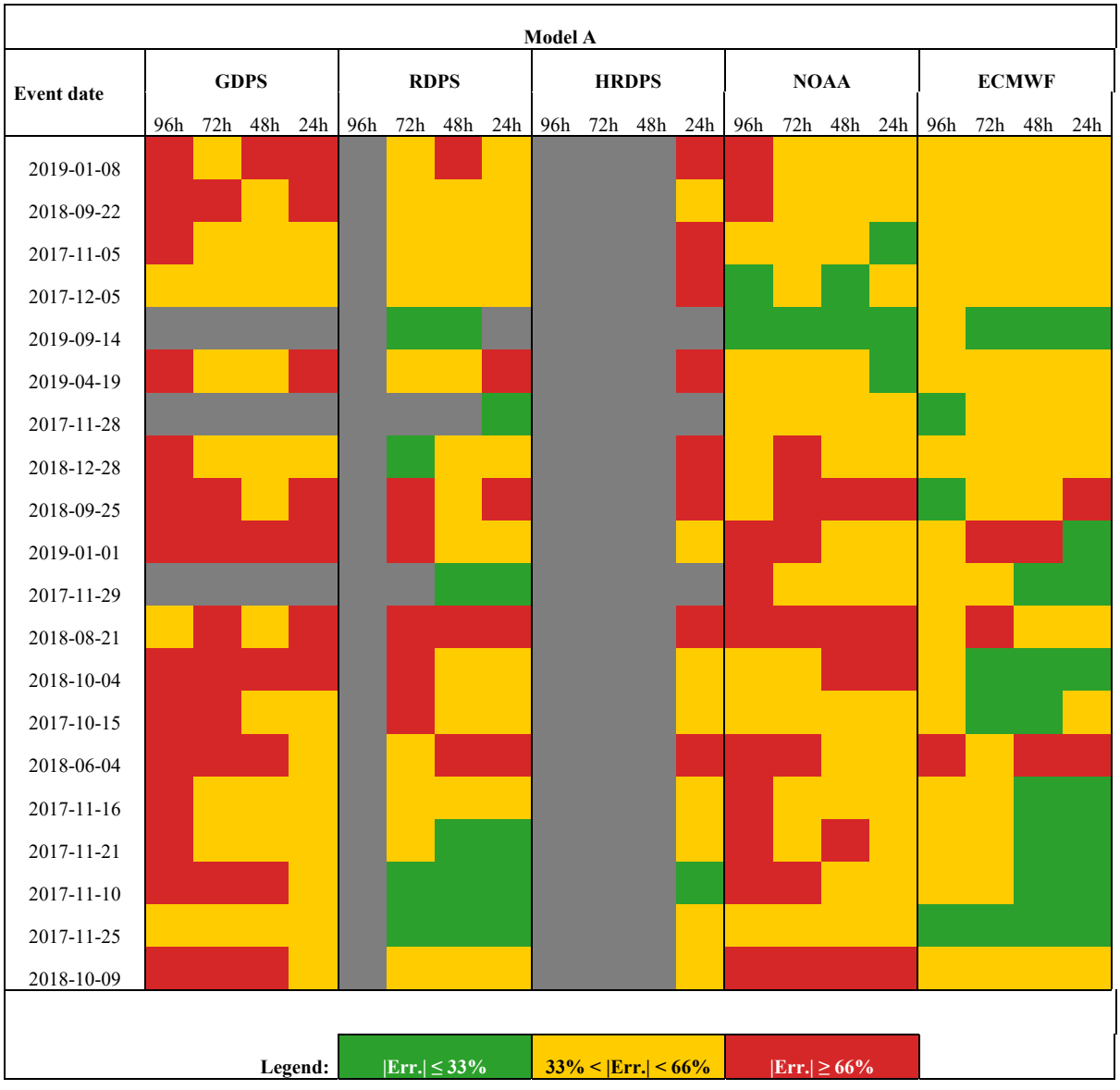

Tableau 2.6 Same as Table 2.5, but for Model B

Of the twenty events analyzed in Table 2.5, modified model A combined with ECMWF is able to provide overall fair forecasts for 16 out of 20 events in most lead times (up to 96 hours). This combination also shows good skills for close to half of the events 24 hours in advance. However, when combined with other NWP models, modified model A has mostly poor to fair

performance. Overall, of the 300 forecasts conducted, only 15% are of good quality, while 56% are fair and 29% are of poor quality.

With respect to model B, the results in Table 2.6 indicate that 17 out of 20 events are successfully completed forecasts with at least a fair or good performance for lead times up to 72 hours. Of all NWP systems, the best performance is obtained using RDPS and ECMWF. However, in some cases, the other NWP systems (GDPS, HRDPS and NOAA) provide just as good a forecast as the RDPS or ECMWF, suggesting that other NWP systems can still provide valuable information. Overall, of the 300 forecasts conducted, 39% are of good quality, while 45% are fair and 16% are of poor quality. Thus, model B provides more than two and a half times as many good forecasts and only half as many of the poor forecasts as the modified model A.

2.4 Discussion

2.4.1 Observed and Forecasted Data

As shown with results from section 3.1, the different NWP systems do not all offer the same quality of forecasts. This is probably due to the meteorological model structures as well as the atmospheric assimilation methods used by the different centers. Furthermore, it is likely that the chosen grid point for the comparison with the observations (i.e., the Colchester weather station) also influences the results since all systems use different grids, resulting in a selected grid point that can be located further away in some systems.

Similar to the results obtained by Fortin et al. (2015), NWP systems tend to underestimate the wind speed. Since this variable has the largest influence on the wind set-up, bias correction becomes essential to improve the forecasting models, such as model A or B. With respect to the bias correction, it can be seen in Figure 2.3 that the correction eliminates the mean error (Figure 2.3e and 2.3f) and improves the RMSE especially for the shorter lead-times. The

correlations are not affected much by the bias-correction step, which is anticipated since the ranking of events remains unchanged.

While the bias correction of the wind speed has a clear impact on the results, as seen in Figures 5-8, wind gusts only provided marginal improvements on the forecast (results not shown). Thus, the correction of the latter is not considered as essential and could be disregarded by the user.

That said, the quantile mapping method used in this study was selected as it is a robust, yet frequently used method in the fields of atmospheric and hydrological sciences. Other types of methods such as Model Output Statistics could also be tested in future applications of the model. Overall, it should be recalled that observed data also have different uncertainties that should not be ignored. For instance, hydrometric and wind speed measurements used in the calibration of the model are subject to different sources of uncertainty, such as measurement errors, missing data, surroundings of the stations (e.g., trees directly affecting the wind), faulty equipment that can induce systematic biases, etc.

2.4.2 Comparison Between Models A and B

The model B proposed in the study showed clear improvements over model A and the modified version of model A when it comes to forecasting larger wind set-up events. The increase in performance can mainly be attributed to the better representation of wind at the lake scale and the different variables included (i.e., spatialized wind, wind gusts and wind velocity profiles/bins). The proposed model can be integrated directly into a hydrological and flood forecasting system that could be used operationally by water resources managers and forecasters. Considering that this remains a relatively simple model using different physical variables, a more complex dynamic model could also be tested, and both models could then be compared based on their performance and on other relevant indicators in the context of operational forecasting, such as computational time and the amount and availability of required input data.

2.4.3 Impact from Equifinality

While the simpler model A has only one parameter (two after the inclusion of an additive parameter allowing to correct the systematic bias problem discussed earlier), model B is run on four bins, each with five parameters, which could potentially lead to equifinality. Equifinality results in different parameter sets that will provide overall very similar performances in terms of the metric used during the calibration process (Beven, 2006). It is found that while the *NSE* validation values are similar for multiple calibration runs, the performance on larger wind set-up events can vary from one parameter set to the next. Thus, it is important to validate that the selected parameter set will provide satisfying results for the forecasting of larger wind set-up events, which, ultimately, is the goal of the developed model. In the present study, this validation is performed by visually inspecting the calibration results and ensuring that the selected parameters allow the best simulation of the wind set-up events that occurred during the calibration period. Where longer time series become available, a calibration approach that would penalize poor performance on the larger wind set-up events might end up becoming necessary to accomplish this. Agencies wishing to implement this model will benefit from calibrating the parameters at regular intervals (i.e., using wind speed bins) to ensure that as much information is included during calibration as possible. Testing for different bin numbers is the recommended approach, in particular when the number of available events remains rather low as is the case in the present study. Using the Akaike Information Criterion (AIC) (or other relevant metrics) could be tested in future applications, to further justify the selection of the number of bins.

Another challenge encountered in this study is the relatively short time period available for the calibration and validation of the models, including the bias-correction implementations for the input data pre-processing. The availability of both observed and archived forecast data (which are different for all NWP systems) resulted in a small sample of large wind set-up events over the study period. This was an added difficulty in balancing the calibration and validation years to ensure enough events were present in the calibration period, while keeping a sufficient number for validation. For instance, ECMWF wind gust data are used for the Canadian NWP

models because they are not made available by ECCC. Evaluating the performance of the proposed model on other lakes might end up being equally challenging because of this.

2.4.4 Probabilistic Forecasting Systems

Another approach that would be worth investigating to further improve flood forecasting involves the use of probabilistic forecasting systems, known as ensemble forecasts. While a deterministic forecast provides the best-guess simulation (using the measured initial conditions) from an NWP system, a probabilistic forecast will generate multiple simulations (an ensemble) integrating the measurement uncertainty in the initial conditions. By having a large number of equiprobable simulations, a probability can be assigned to the different scenarios (e.g., the probability of a strong vs. a weak wind set-up), providing forecasters with better information for decision-making. Future research should investigate the added value of ensemble wind set-up forecasting in similar contexts.

2.4.5 Multi-model Forecasting Approach

Probabilistic forecasting can involve ensemble forecasts from a single NWP system, but it can also make use of forecasts generated by multiple NWPs to cover the uncertainty of the NWP selection in the process, known as a multi-model forecast. The idea of multi-model forecasts has been used in hydrological modelling to create a GESP (Grand Ensemble Streamflow prediction) that allows a more complete representation of uncertainty (Brochero, Anctil, & Gagné, 2011; Demirel, Booij, & Hoekstra, 2013; Velázquez, Anctil, Ramos, & Perrin, 2011). This principle could also be used for wind set-up forecasting to create a GEF (Grand Ensemble Forecast). The results shown in Tables 5 and 6 suggest that combining the different forecasts together could result in an improved overall forecast. By taking into consideration more than one NWP model, some wind setup events could be detected by one or more models, allowing forecasters to make better-educated decisions or at least raise awareness of probable imminent events. It is however important to remember that the results shown in Tables 5 and 6 are biased, since wind gust data from ECMWF were used to run the simulation for the Canadian systems.

It remains to be tested whether using the systems' respective wind gust forecasts would lead to different results.

2.5 Conclusion

This study has shown that the wind set-up can have a significant impact on the water level of Lake Champlain and should be considered in the context of flood forecasting as overlooking it could significantly impair the forecast accuracy. Indeed, a typical large wind set-up event resulting in an increase around 0.15 to 0.25 m at Rouses Point can make the difference between a minor and a major flood in the Richelieu River.

An analysis of individual high wind setup events showed that the average wind speed is correlated with the intensity of the wind set-up. However, similar wind events sometimes lead to drastically different set-up levels, indicating that other variables are at play. It was shown that a simple model that was extended by adding spatialized wind velocity (i.e. including wind data at each important station), wind gusts and a stepwise parameterization as a function of wind speed, can improve the forecasting ability of wind set-up using a semi-empirical framework. This method could possibly be tested with other explanatory variables and in various other configurations to optimize the discretization of the selected wind velocity segments to be calibrated in future works.

Our results show that the proposed steady-state model can be used to successfully model the wind set-up at the outlet of Lake Champlain up to four days ahead. A better representation of the initial state of the lake using the wind speed at various locations is also key in improving the forecasts of larger wind set-up events. These findings were supported by the results of a comparison between two steady-state models of varying complexity.

The wind set-up models were also strongly dependent on the quality of wind speed forecasts. It is highly recommended to perform some type of bias correction (e.g., quantile mapping) to significantly improve the model's performance. Since each system has its own biases, it is

recommended to bias-correct each forecasting product independently. The five NWP systems used in this study showed overall complementary performances, with the ECMWF and RDPS systems offering the most consistent performance. This suggests that in a forecasting context, it might be worth to consider the use of more than one system (i.e., an ensemble) to ensure that an event does not go undetected. It is important to note once again that all ECCC simulations (HRDPS, RDPS and GDPS) were made using ECMWF wind gust forecasts. Different results could be expected if all scenarios were performed using the corresponding variables within each model forecast, i.e., all ECMWF data vs. all GDPS data, etc.

It would be interesting to test the proposed model on other lakes to evaluate whether a similar wind set-up forecasting performance can be obtained. Considering the slender shape of Lake Champlain for which the model was developed, it can be expected that using another lake geometry (e.g., the fetch and depth) could lead to a different performance.

2.6 Acknowledgements

The authors would like to thank the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) for providing access to the forecast data from their computing and archiving facilities, the Canadian Surface Prediction Archive (CaSPAr) for access to Environment and Climate Change Canada (ECCC) forecast records and the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) for access to Lake Champlain water levels, observed wind data and forecasted wind data. This work was supported by the IJC's International Lake Champlain-Richelieu River Study (ILCRRS). Finally, we would like to acknowledge the contributions of the three anonymous reviewers whose comments significantly helped improve this paper and shape the model in its current form.

2.7 Data availabity

All the data used in this study are publicly available:

- Weather stations datasets from the Forest Ecosystem Monitoring Cooperative (FEMC) are available here: https://www.uvm.edu/femc/data#archive
- Hydrometric stations datasets from the United States Geological Survey (USCS) are available here: https://waterdata.usgs.gov/nwis/
- The GDPS, RDPS and HRDPS numerical weather prediction systems from Environment and Climate Change Canada (ECCC) is available at the Canadian Surface Prediction Archive (CaSPAr): https://caspar-data.ca/
- The GFS numerical weather prediction system from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) is available at: https://rda.ucar.edu/datasets/ds084.1/index.html
- The ECMWF numerical weather prediction system as well as the ERA5 reanalysis from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) are available at: https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/operational-archive

SUPPORTING INFORMATION

Figures 2.9 to 2.26 illustrating all the analyzed hindcast scenarios are showed in the next section.

2.8 Supplementary Material

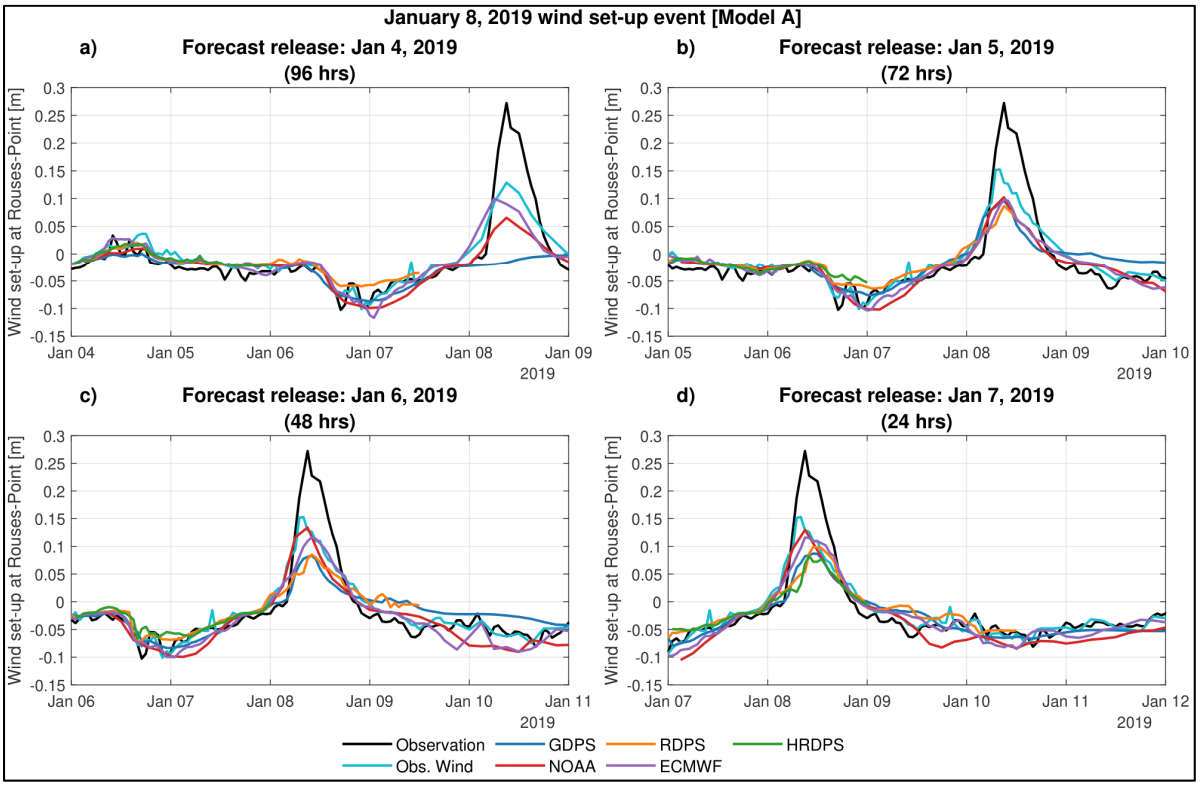

Figure 2.9 Comparison of the modified model A simulated wind set-up for the January 8, 2019 event using bias-corrected NWP forecast from GDPS (blue), RDPS (orange), HRDPS (green), NOAA (red) and ECMWF (purple) against observations at Rouses-Point (black). Simulated wind set-up using observed winds are also shown (cyan). The panels (a-d) show simulations using four forecast releases issued at 00:00 (UTC) of the day indicated in the title of each panel

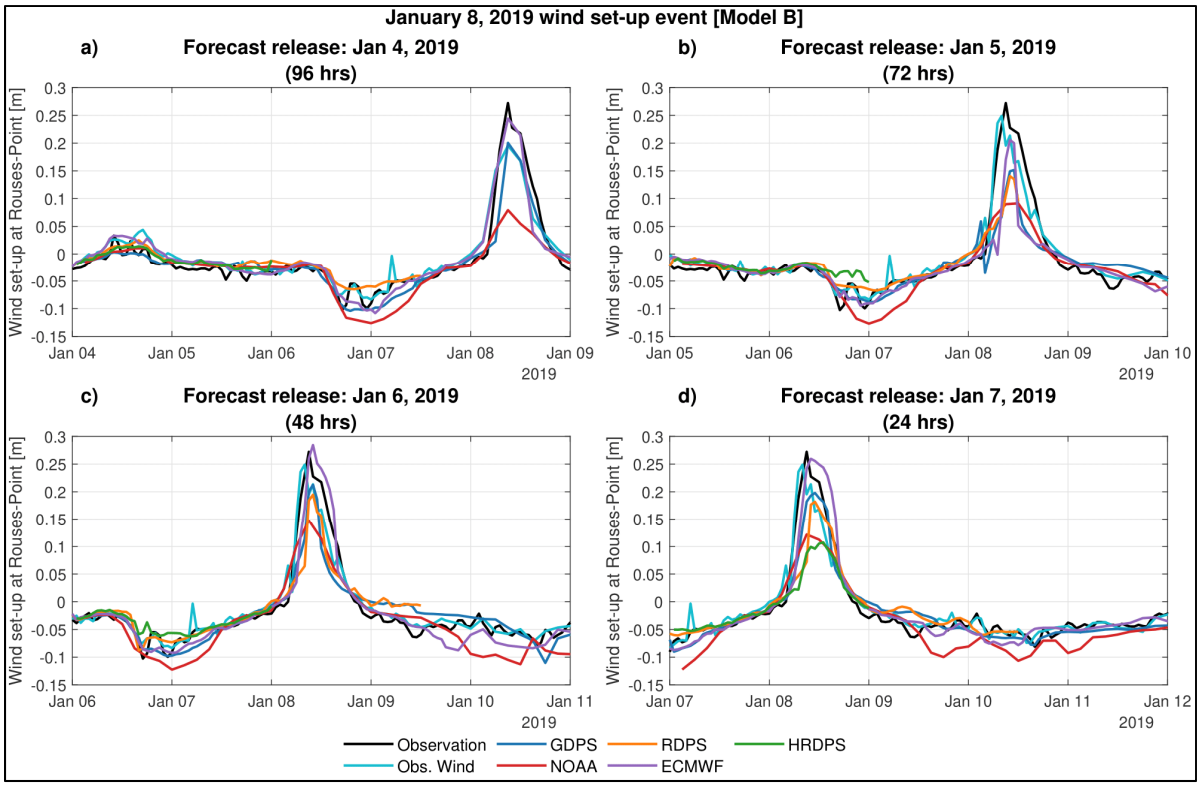

Figure 2.10 Same as Figure 2.9, but for model B

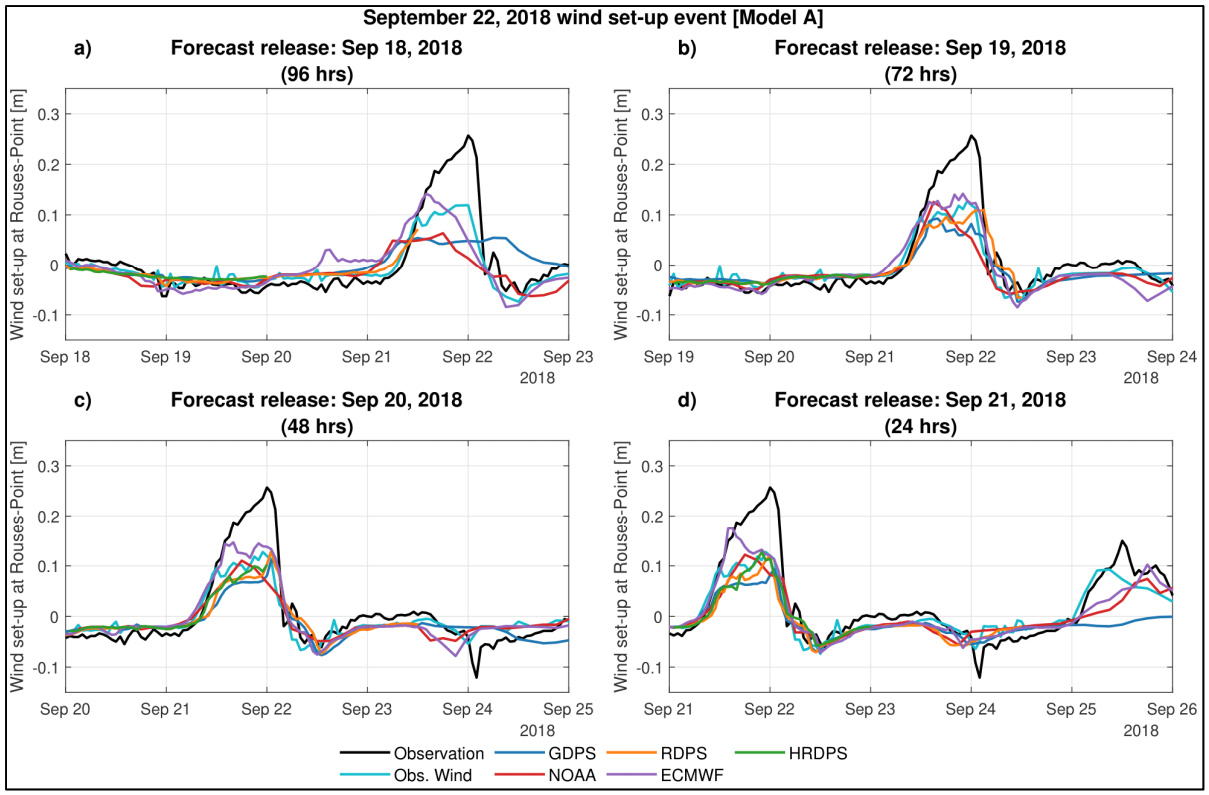

Figure 2.11 Same as Figure 2.9, but for the September 22nd, 2018 event

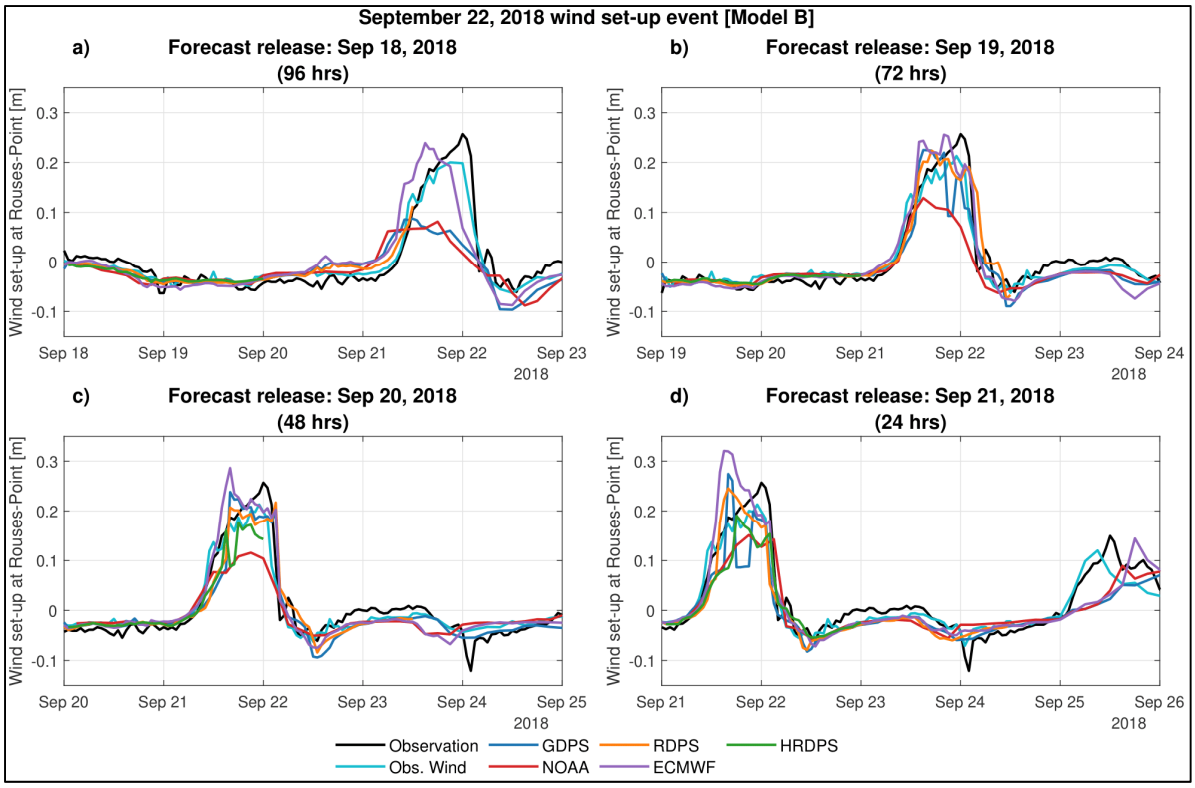

Figure 2.12 Same as Figure 2.11, but for model B

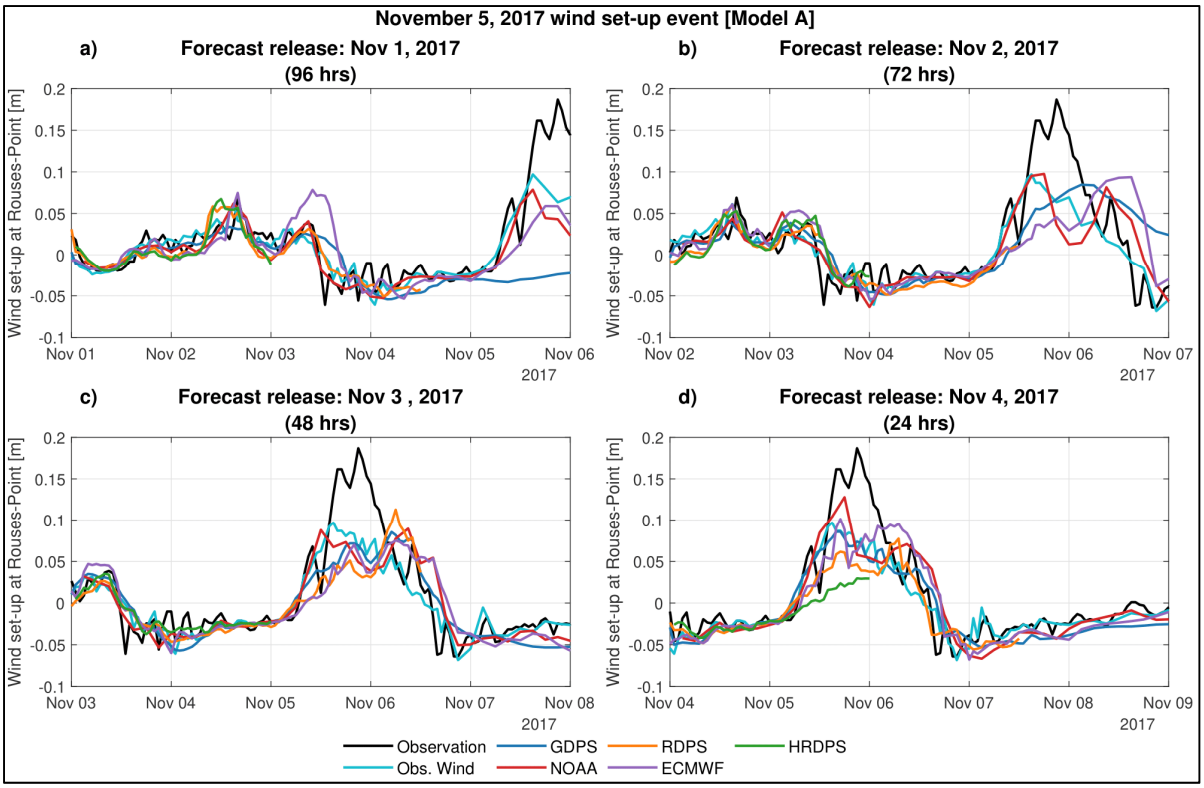

Figure 2.13 Same as Figure 2.9, but for the November 5th, 2017 event

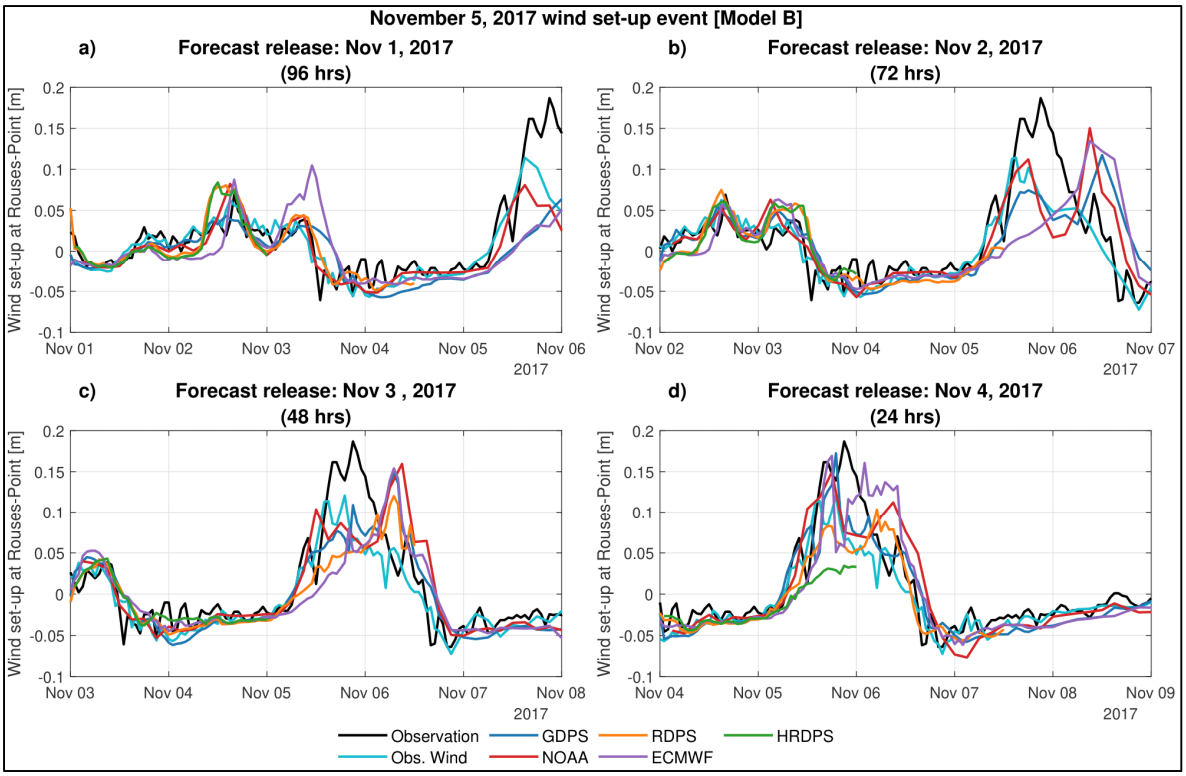

Figure 2.14 Same as Figure 2.13, but for model B

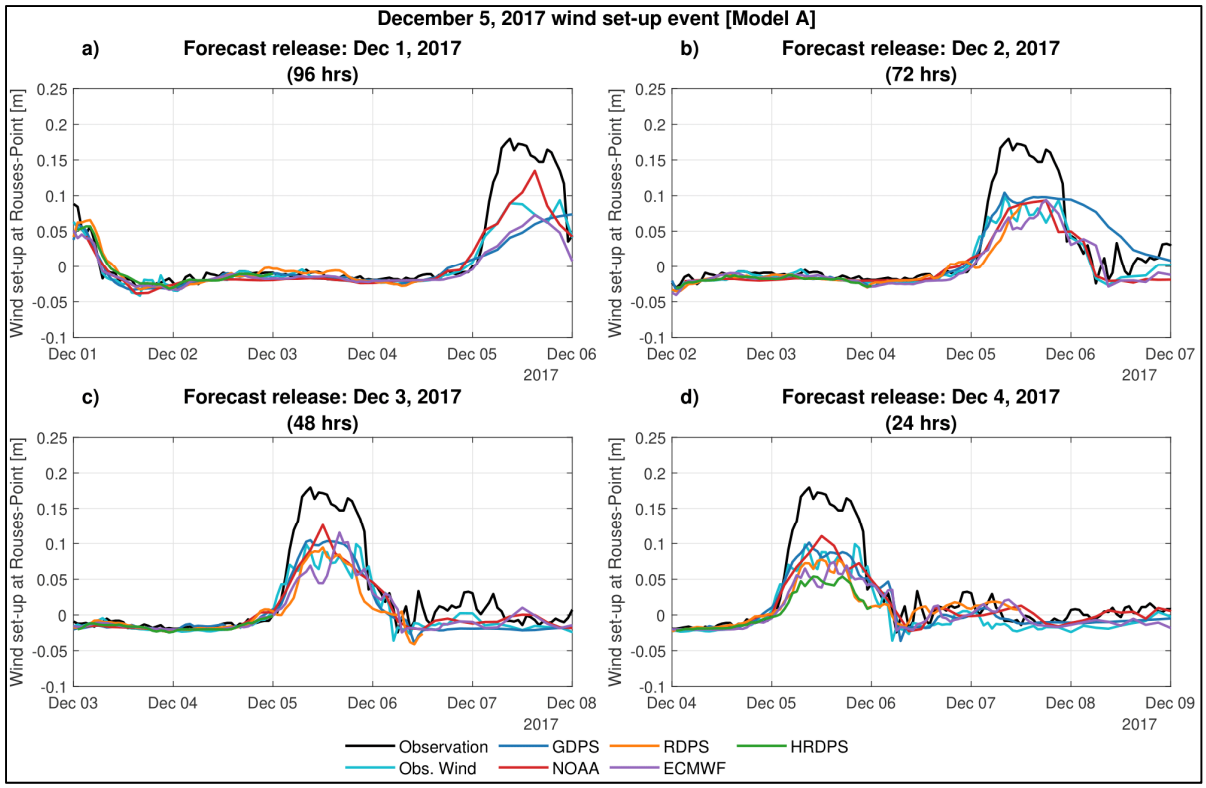

Figure 2.15 Same as Figure 2.9, but for the December 5th, 2017 event

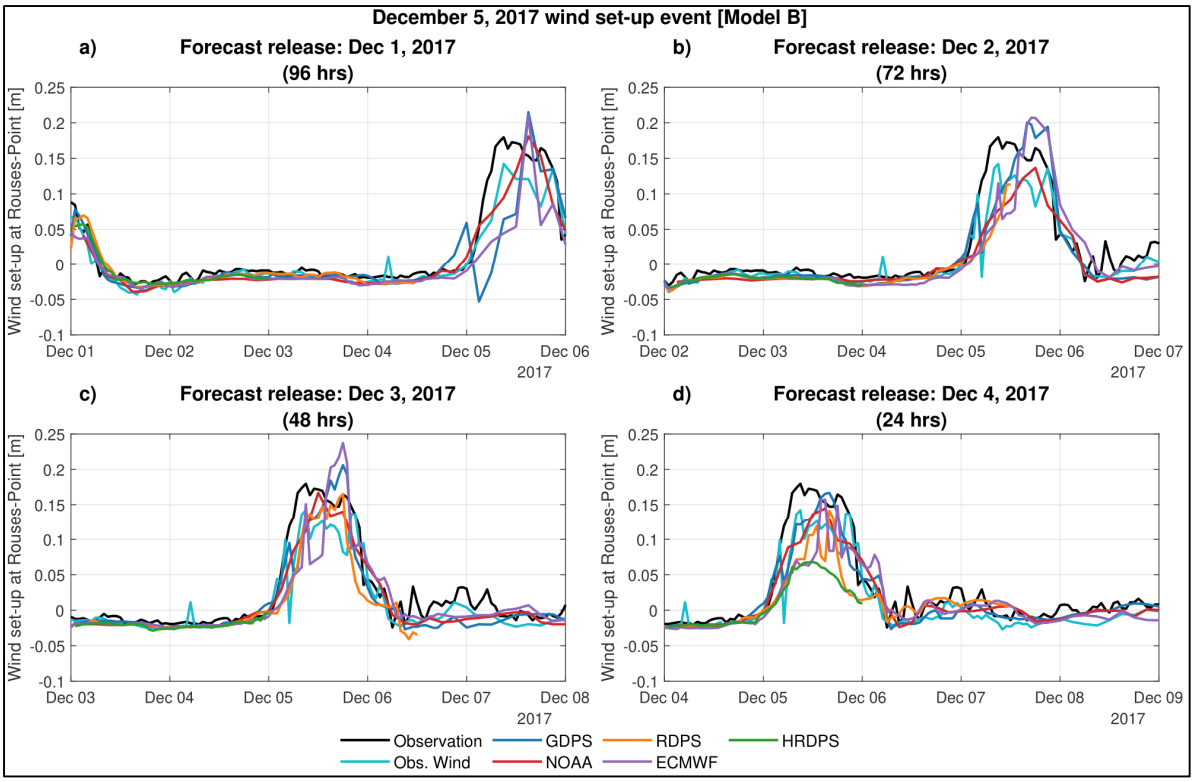

Figure 2.16 Same as Figure 2.15, but for model B

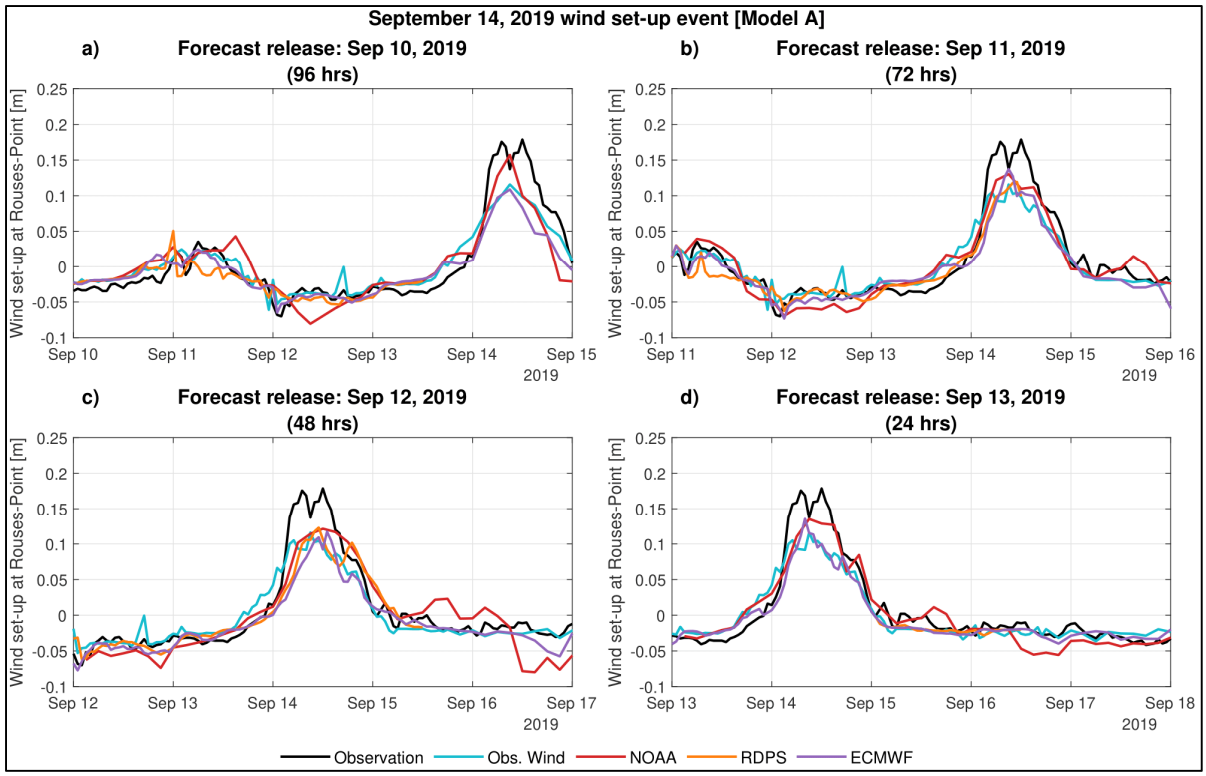

Figure 2.17 Same as Figure 2.9, but for the September 14th, 2019 event

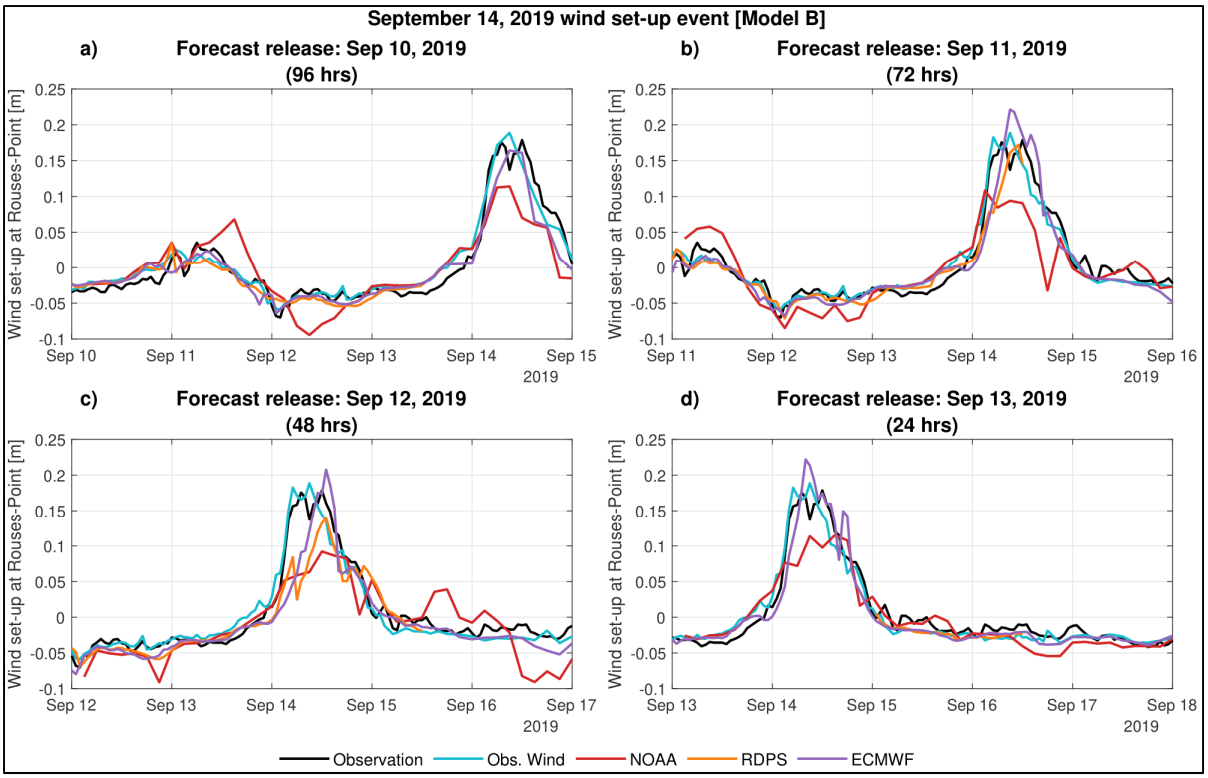

Figure 2.18 Same as Figure 2.17, but for model B

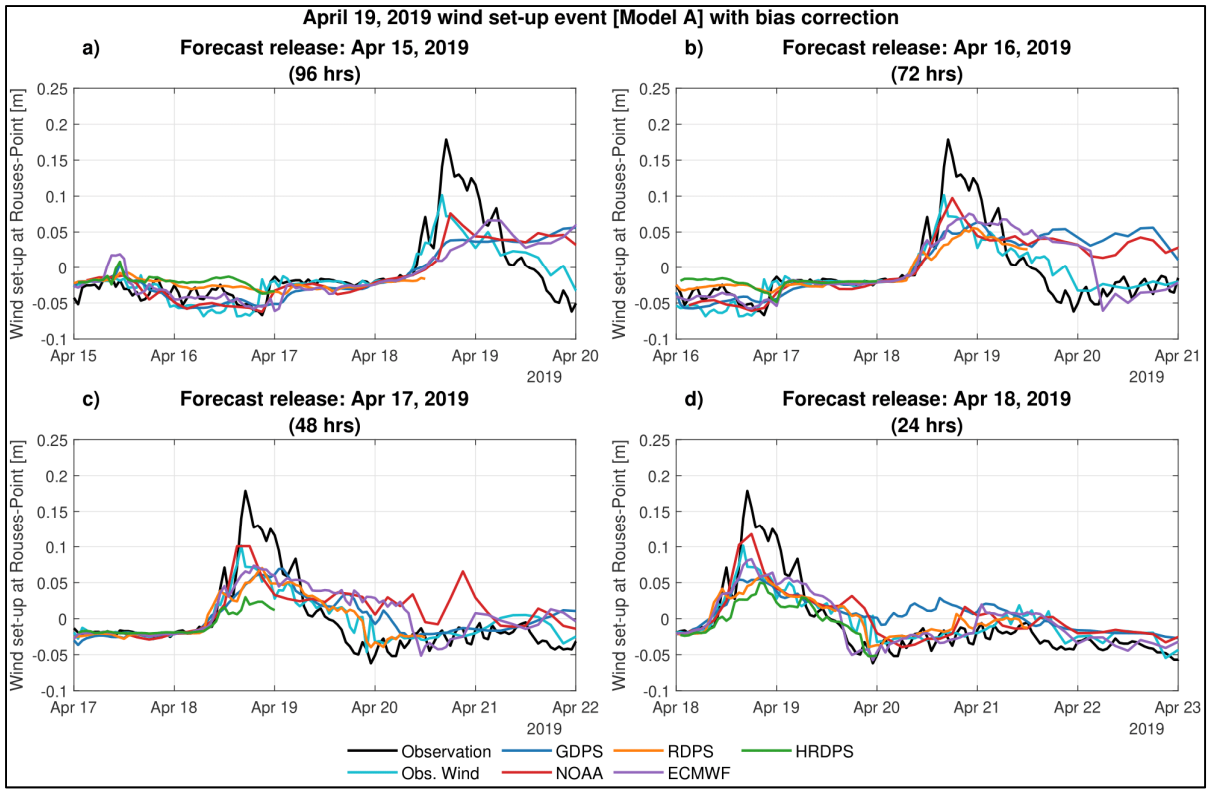

Figure 2.19 Same as Figure 2.9, but for the April 19th, 2019 event

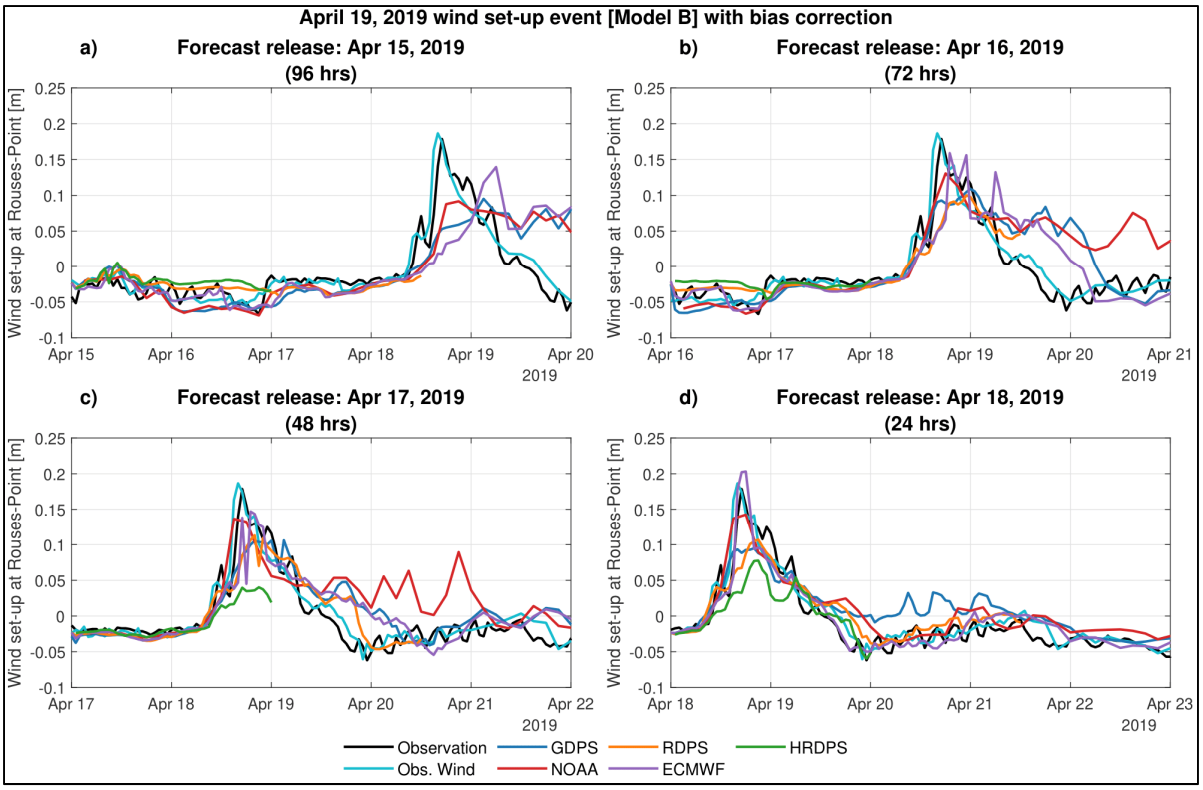

Figure 2.20 Same as Figure 2.19, but for model B

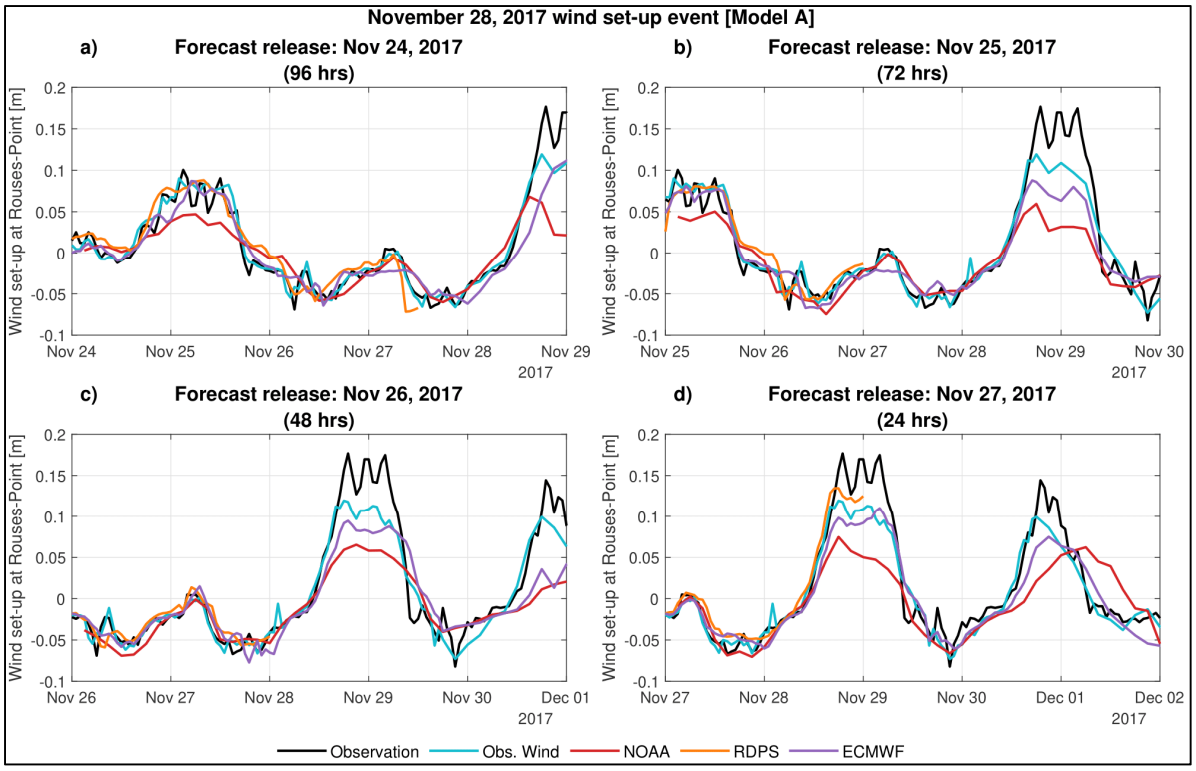

Figure 2.21 Same as Figure 2.9, but for the November 28th, 2017 event

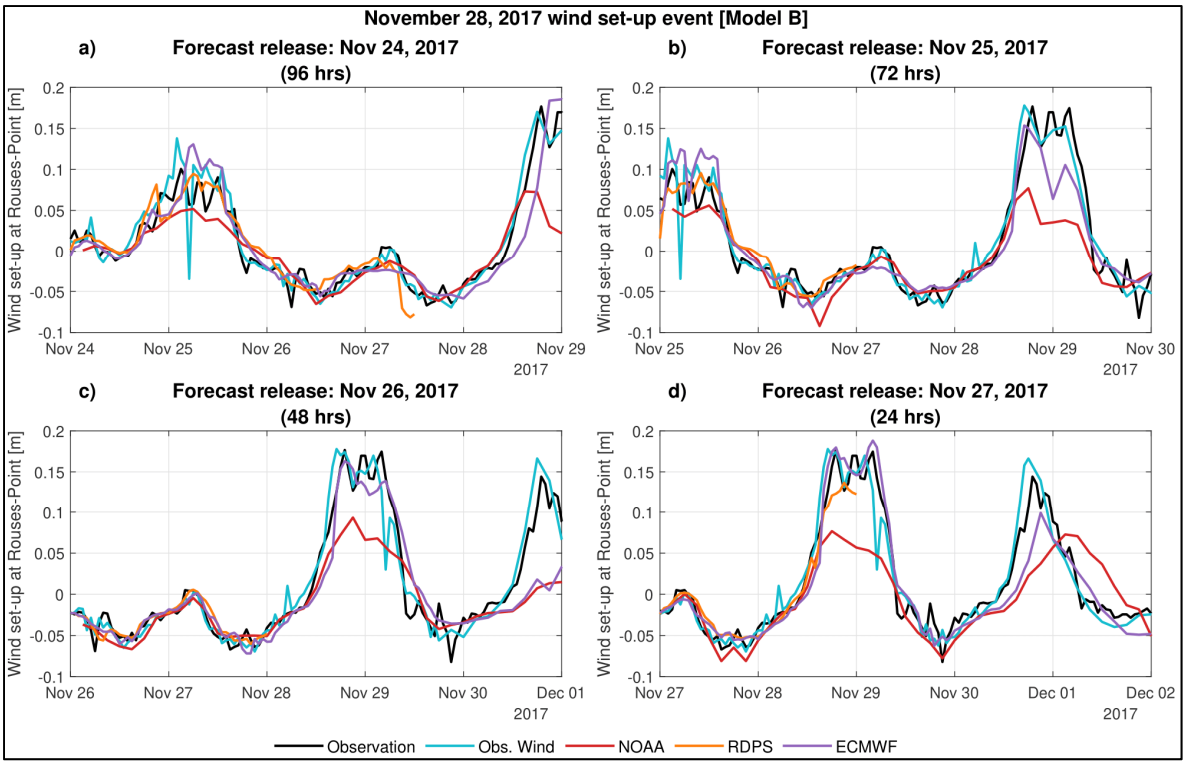

Figure 2.22 Same as Figure 2.21, but for model B

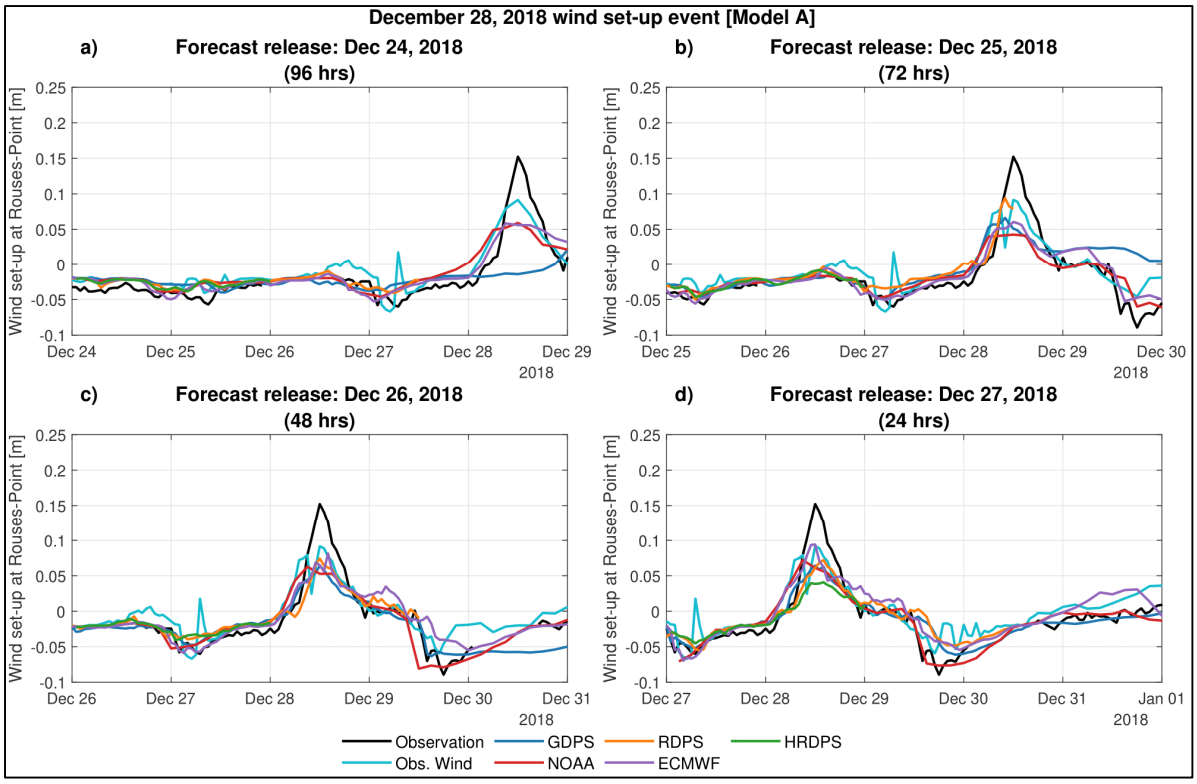

Figure 2.23 Same as Figure 2.9, but for the December 28th, 2018 event

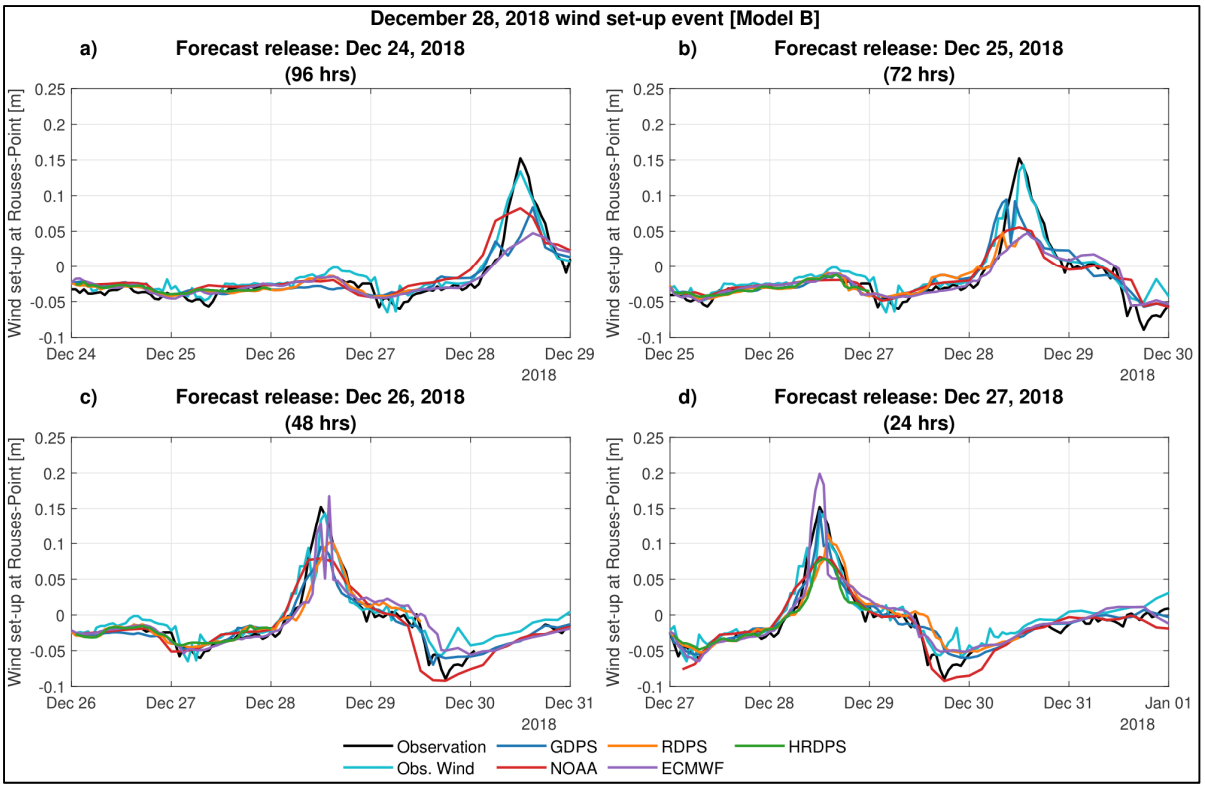

Figure 2.24 Same as Figure 2.23, but for model B

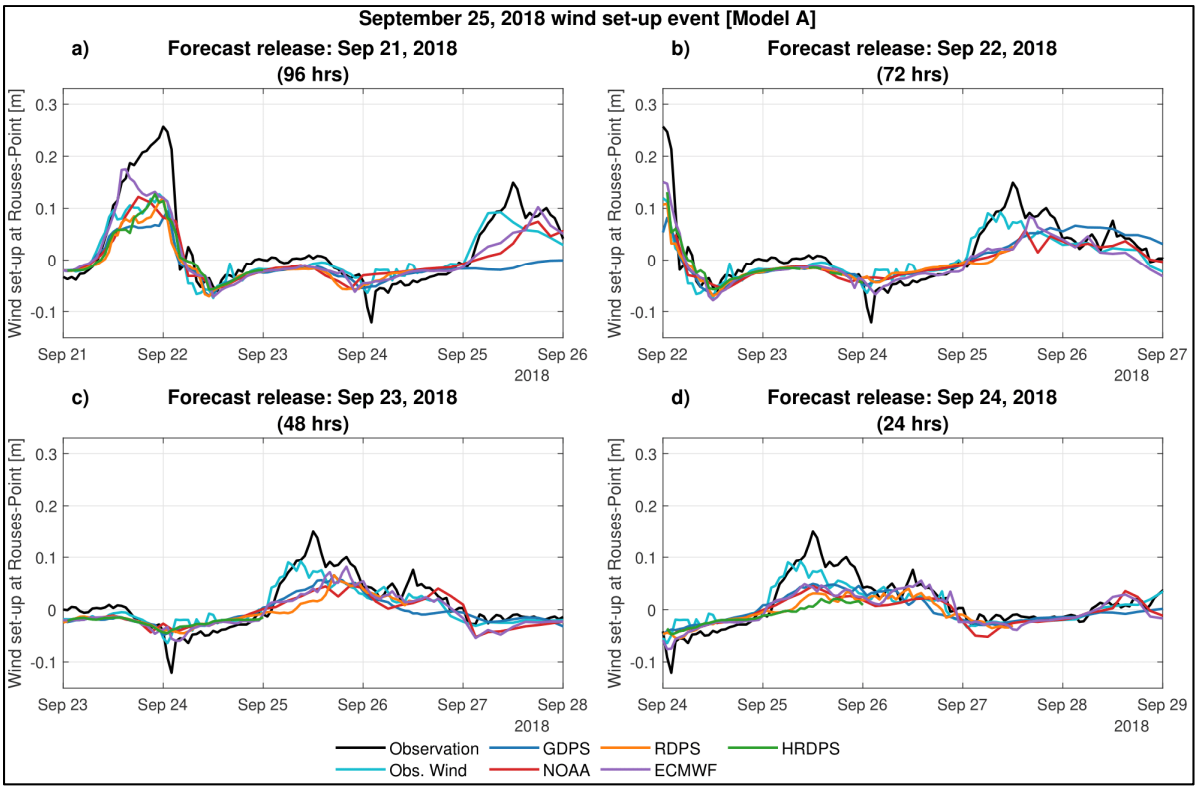

Figure 2.25 Same as Figure 2.9, but for the September 25th, 2018 event

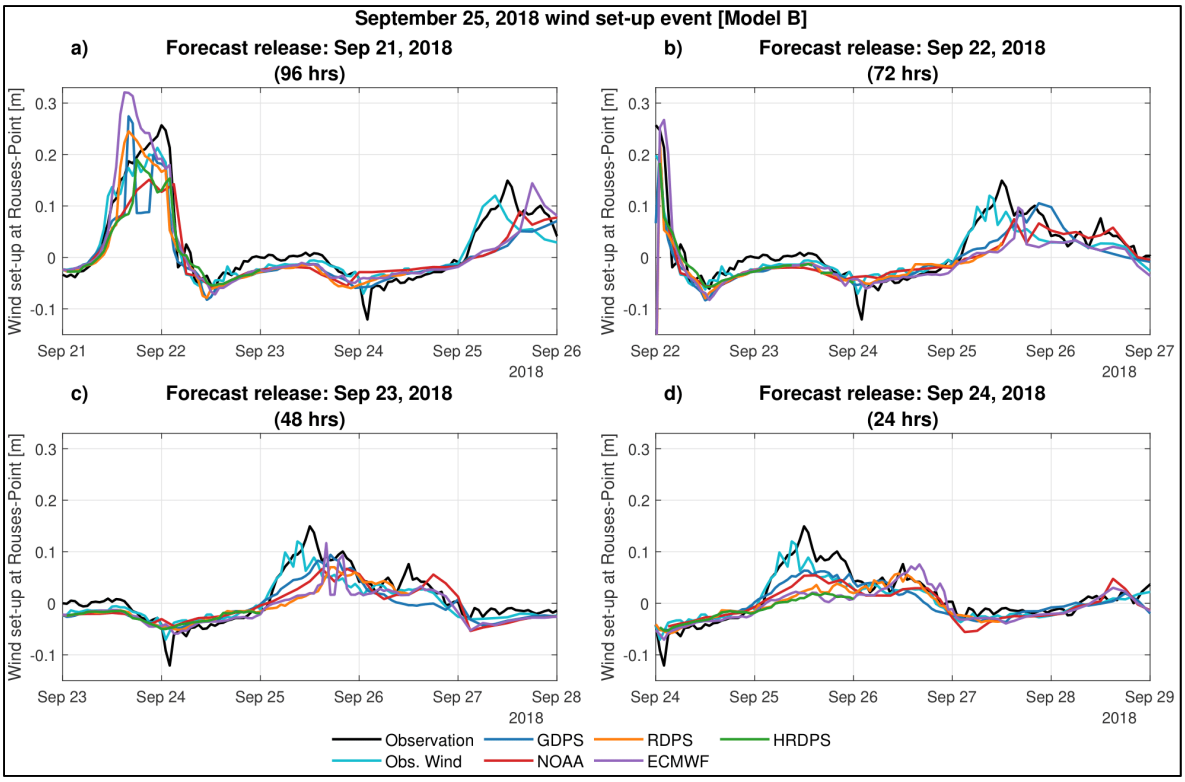

Figure 2.26 Same as Figure 2.25, but for model B

CHAPITRE 3

DISCUSSION

Il est indéniable que le vent peut avoir un effet important sur les niveaux d'eau dans le lac Champlain. Ignorer son impact lors des prévisions a un impact négatif sur leur qualité, ce qui peut nuire à la prise de décision lors de possibles évènements d'inondation.

Les résultats présentés dans cette étude démontrent qu'il est possible d'employer un modèle semi-empirique relativement simple de prévision de la surcote pour améliorer significativement la précision des prévisions de niveaux d'eau à l'exutoire du lac. Cette section aborde la portée de ces résultats dans un contexte opérationnel ainsi que les avenues d'amélioration du modèle.

3.1 Importance de la qualité des prévisions météorologiques

Le développement de ce modèle a démontré que la qualité des données d'entrée fournies au modèle est importante, particulièrement en ce qui a trait aux vitesses et aux directions du vent, qui sont les variables principales responsables de l'apparition d'une surcote sur le lac Champlain.

La première partie de l'étude a permis de conclure que tous les NWP analysés présentaient un biais négatif; c'est-à-dire qu'ils sous-estimaient la vitesse du vent. Il n'est donc pas surprenant que lorsqu'utilisées directement dans le modèle, les prévisions brutes des différents NWP génèrent des surcotes d'amplitude plus faible que celles observées, voire qu'elles ne font pas réagir le modèle du tout. Considérant que ce biais a été observé sur les trois stations météorologiques étudiées, il serait étonnant que ces erreurs soient dues à des problèmes d'instrumentation. Il est probable que le biais soit causé par le décalage géographique entre le point de grille des NWP choisi et la position exacte de la station de mesure. Il est aussi possible que la géographie particulière de la région (lac enclavé par deux chaînes de montagnes) ne soit pas adéquatement modélisée lors de la prévision des vents. Le fait que le modèle présentant le

plus grand biais soit celui possédant la résolution la plus grossière (GDPS avec une résolution horizontale de 25km) supporte en quelque sorte cette hypothèse. Toutefois, il est aussi observable que le système NCEP-GFS de la NOAA (avec une résolution horizontale de 20km) a un biais comparable à celui des modèles avec une résolution plus fine.

Considérant ce biais négatif systématique, une correction de biais s'impose afin d'assurer le succès du modèle, puisque celui-ci est calibré sur les observations. Une méthode relativement simple de correction par quantiles a été appliquée dans cette étude et a fourni des résultats satisfaisants qui ont permis une comparaison pertinente entre les différents modèles. Il demeurerait toutefois intéressant de mettre en application des techniques de débiaisage plus raffinées (p. ex. Sweeney, Lynch, & Nolan, 2013) qui seraient susceptibles d'améliorer davantage la performance du modèle proposé dans les scénarios de prévision. Par exemple, le biais du vent peut être corrigé avec une méthode de correction à court-terme qui utilise une fenêtre mobile de 30 jours plutôt que des saisons, ou encore une correction basée sur le cycle diurne qui tire avantage du fait que les vents sont généralement plus forts durant le jour, mais que les biais sont parfois plus grands la nuit. Un des aspects particuliers du vent dans la région du lac Champlain est que celui-ci souffle principalement dans l'axe nord-sud, en raison de la géographie particulière de la région. La correction de biais effectuée a donc uniquement cherché à corriger le biais sur la vitesse des vents, et non la direction. Cela est définitivement une faiblesse de la méthode puisque la direction des vents est toute aussi susceptible d'être biaisée que la vitesse en elle-même. Il serait donc intéressant, particulièrement dans l'optique d'application de ce modèle à un autre lac, de corriger le biais en considérant aussi la direction.

Il est important de noter qu'une correction de biais de la vitesse des rafales a aussi été réalisée pour arriver aux résultats de modélisation de la surcote présentés dans l'étude. Cependant, une analyse rapide des impacts de ces corrections de biais supplémentaires suggère que leurs effets sur les résultats finaux sont marginaux, comparativement à la correction de la vitesse moyenne du vent. Ces corrections supplémentaires pourraient donc être ignorées dans un contexte opérationnel où la vitesse d'obtention de résultats serait particulièrement importante, sans en impacter significativement les résultats.

Une des problématiques rencontrées lors de l'étude fut la disponibilité de certaines variables météorologiques nécessaires au fonctionnement du modèle. Les données de vitesse et de direction du vent étaient disponibles pour tous les NWP analysés, mais ce n'était pas le cas pour les données de rafales et de pression atmosphérique. Afin de procéder aux essais en prévision du modèle de surcote, il a donc été nécessaire d'employer des données de rafales et de pression atmosphérique provenant de différents NWPs dans le cas où ceux-ci étaient manquants. Même si ces variables météorologiques sont toutes étroitement liées les unes aux autres, il n'en demeure pas moins que d'utiliser des données provenant de systèmes différents peut avoir un impact sur les résultats de la simulation. Cet impact n'a pas pu être quantifié dans le cadre de cette étude, mais il serait intéressant de comparer les effets qu'a cette manipulation, et surtout si le fait d'utiliser toutes les variables d'un même système permet d'obtenir une meilleure représentation de la surcote. De plus, il serait intéressant de vérifier si l'utilisation des données de rafales et de pression atmosphérique provenant du ECMWF est en partie responsable de la bonne performance des autres NWP. Puisque les données de prévision de vent du ECMWF sont les plus performantes et sont aussi celles qui offrent les meilleurs résultats lorsque combinées avec le Modèle A, qui emploie uniquement la vitesse et la direction du vent, il ne serait pas étonnant que cette performance se traduise aussi dans la prévision des rafales et de la pression atmosphérique.

3.2 Développement du modèle

Le modèle de prévision de la seiche présenté dans l'article est né d'une longue série d'itérations de différents modèles qui ont été testés et améliorés. Ces modèles n'ont pas été présentés dans l'article, mais l'analyse de processus de création permet de mieux comprendre la logique derrière le résultat final. Initialement, le modèle consistait en une simple variation de la formulation de Zuider Zee à laquelle avait été ajoutée une constante additive de correction de biais (modified Model A dans l'article). Cette version du modèle qui utilise seulement la vitesse et la direction du vent à un seul point sur le lac arrive à détecter certains évènements de surcote, mais pas avec une précision satisfaisante, particulièrement lors des évènements de grande amplitude qui sont les plus importants.

Un modèle plus complexe a ensuite été testé. Ce modèle, inspiré de la littérature (Chimney, 2005), intègre le coefficient de traînée du vent ainsi que les densités de l'air et de l'eau. Cette version du modèle à toutefois été rapidement abandonnée en raison de sa performance décevante et de la difficulté d'accès aux variables nécessaires à son application.

En conservant donc la logique du premier modèle basé sur la formulation de Zuider Zee, un modèle considérant le vent à trois stations sur le lac, plutôt qu'une seule, a été testé avec l'hypothèse que d'employer le vent à plusieurs points sur le lac allait offrir une meilleure représentation spatiale de l'état du vent sur le lac. Immédiatement, une augmentation de la performance du modèle a été observée, supportant cette hypothèse et offrant une bonne piste d'amélioration du modèle.

Le prochain essai a été réalisé en employant un modèle identique au premier, mais cette fois-ci en y ajoutant un terme représentant la différence de pression entre les extrémités sud et nord du lac avec l'intention d'essayer de capturer les variations de pression qui pourraient ne pas nécessairement se traduire en un mouvement d'air, mais qui pourraient avoir un impact sur les niveaux du lac. Cette addition a permis d'améliorer légèrement la sensibilité du modèle, mais pas de façon aussi marquée que l'ajout de nouvelles stations de mesure du vent.

L'itération suivante du modèle a intégré le principe de calibration par paliers, c'est-à-dire que le modèle était calibré différemment en fonction de la force du vent. Ceci a été fait afin de tester si l'effet du vent sur le niveau de l'eau variait en fonction de sa vitesse, donc pour savoir si la relation entre la vitesse et la surcote était linéaire ou non. Cette addition au modèle a eu un effet légèrement positif sur le critère de NSE, mais moindre que l'addition des différentes stations et de la pression barométrique. Toutefois, même si le gain au niveau du NSE est mineur puisque celui-ci est calculé sur l'ensemble de la période de validation, l'implantation des paliers a un comme impact d'augmenter la précision du modèle lors des évènements de surcote importante. Donc, même si le modèle par paliers augmente sensiblement le temps de calcul nécessaire à la calibration, celle-ci demeure bénéfique. Dans l'éventualité où on souhaiterait augmenter le nombre de paliers, et donc le nombre de paramètres et le temps de calcul, il serait

intéressant de considérer une stratégie de calibration où chacun des paliers seraient optimisés indépendamment. Donc, plutôt que de demander à l'algorithme de chercher sur un espace à 20 ou plus dimensions, il pourrait se limiter à un calcul à 5 dimensions répétés 4 fois.

Le modèle suivant a combiné les trois précédents, alliant l'addition de multiples stations de vent, le terme de variation de la pression barométrique ainsi que la calibration par paliers. Ce modèle, quoique plus complexe et plus long à calibrer, offrait les meilleures performances de toutes les itérations testées, mais continuait de démontrer des faiblesses au niveau de la prévision des grandes surcotes.

Une analyse des différents évènements de surcote a révélé qu'il arrivait que des vents de vitesses similaires produisent des surcotes très différentes, laissant penser qu'un phénomène supplémentaire entrait en jeu. Cette observation a mené à l'addition d'un terme référençant la vitesse moyennée des rafales maximales à trois endroits au-dessus du lac. Cette dernière addition au modèle offre une plus grande précision lors des évènements de grande amplitude.

Finalement, l'impact des différences composantes du modèle a été testé en les retirant une à une du modèle et en observant l'effet sur la performance. Cette analyse a permis de déterminer que le meilleur modèle est celui qui jumelle les trois stations, la calibration par paliers et qui incorpore les rafales, mais qui ne tient pas en compte la différence de pression barométrique entre les deux extrémités du lac, puisque celle-ci n'avait aucun impact sur la modélisation finale. C'est donc ce modèle qui a été présenté et utilisé dans les scénarios de prévision.

3.3 Performance du modèle proposé

L'objectif principal de ce projet de recherche était le développement d'un modèle de prévision de la surcote sur le lac Champlain offrant des performances supérieures aux modèles offerts dans la littérature. Les résultats présentés à la Table 2.3 suggèrent que cet objectif a bel et bien été atteint, considérant que, sur l'échantillon de scénarios testés, le modèle B a offert trois fois plus de prévisions de bonne qualité et la moitié moins de prévisions de mauvaise qualité.

L'ajout des rafales, additionné au fait que le modèle considère trois points de référence pour la vitesse et la direction du vent sur le lac plutôt qu'un seul, offre au modèle une sensibilité et une précision accrue. Bien que ces ajouts représentent du temps de calcul supplémentaire lors de la calibration du modèle, leurs impacts sur la performance sont significatifs. Puisque le modèle n'a pas à être recalibré régulièrement, ceci ne représente pas un obstacle important à son utilisation. Le système de calibration par paliers augmente aussi drastiquement le temps de calibration, mais il permet une plus grande flexibilité dans la description de la réaction du lac. Il serait pertinent de déterminer si le nombre et la grandeur des paliers pourraient être optimisés afin de mieux représenter le phénomène de résonnance qui joue un rôle dans l'apparition d'une onde de seiche, mais qui n'a pas été explorée en détail dans cette étude.

La méthode d'évaluation utilisée pour déterminer la performance des modèles n'est toutefois pas sans faute. En effet, une méthode comportant une certaine part de subjectivité a été employée. Puisque la méthode cherchait principalement à évaluer la sensibilité du modèle, donc à savoir celui qui arrivait à prévoir la pointe de la surcote avec précision, une importance moindre a été accordée à la synchronicité de la pointe. D'un point de vue opérationnel, puisque les évènements de surcote s'échelonnent normalement sur plusieurs heures, voire journées, il est plus important pour le prévisionniste de connaître l'amplitude totale de la surcote, plutôt que le moment exact de son apparition. C'est pourquoi l'évaluation s'est principalement concentrée sur l'erreur relative entre les pointes des surcotes observées modélisées. Il serait toutefois intéressant de développer une métrique d'évaluation plus sophistiquée qui prendrait en considération à la fois l'amplitude, la durée et le moment de l'apparition de la surcote, ce qui permettrait une évaluation beaucoup plus objective des modèles.

À la vue des performances du modèle durant les scénarios à l'étude, celui-ci pourrait définitivement être utilisé dans le cadre de la prévision hydrologique de la rivière Richelieu. Toutefois, en mode opérationnel, le modèle de prévision de la surcote ne ferait pas tout à fait partie du modèle hydrologique à proprement dit. Celui-ci agirait plutôt comme une extension qui utiliserait les prévisions de vents comme intrants et qui fournirait aux prévisionnistes un delta de niveau à Rouses-Point en extrant. Ce delta pourra ensuite être additionné, ou soustrait,

à la prévision de niveau fournie par le modèle hydrologique afin d'ajuster le calcul de débit résultant dans la rivière.

3.4 Évènements du printemps 2011

Puisque la situation du printemps 2011 fut l'élément déclencheur qui motiva la réalisation ces travaux de recherche, le modèle a été utilisé pour déterminer s'il aurait été possible de prévoir l'apparition de la surcote. Toutefois, le manque de données d'observation à la station de Port-Henry avant l'année 2015 ne permet pas d'utiliser la même méthode que pour les autres résultats présentés dans ce rapport. Malgré tout, il est possible d'avoir une idée générale de la réaction du modèle en utilisant le niveau mesuré à la station de Burlington (situé au milieu du lac) comme mesure du niveau moyen. Ainsi, il est possible de calculer la surcote observée en prenant la différence entre le niveau à Rouses-Point et le niveau à Burlington. À noter que les vents à la station de Diamond Island pour la période du printemps 2011 présentent certaines anomalies qui peuvent avoir un effet sur la modélisation. Les résultats de la simulation sont présentés à la figure 3.1.

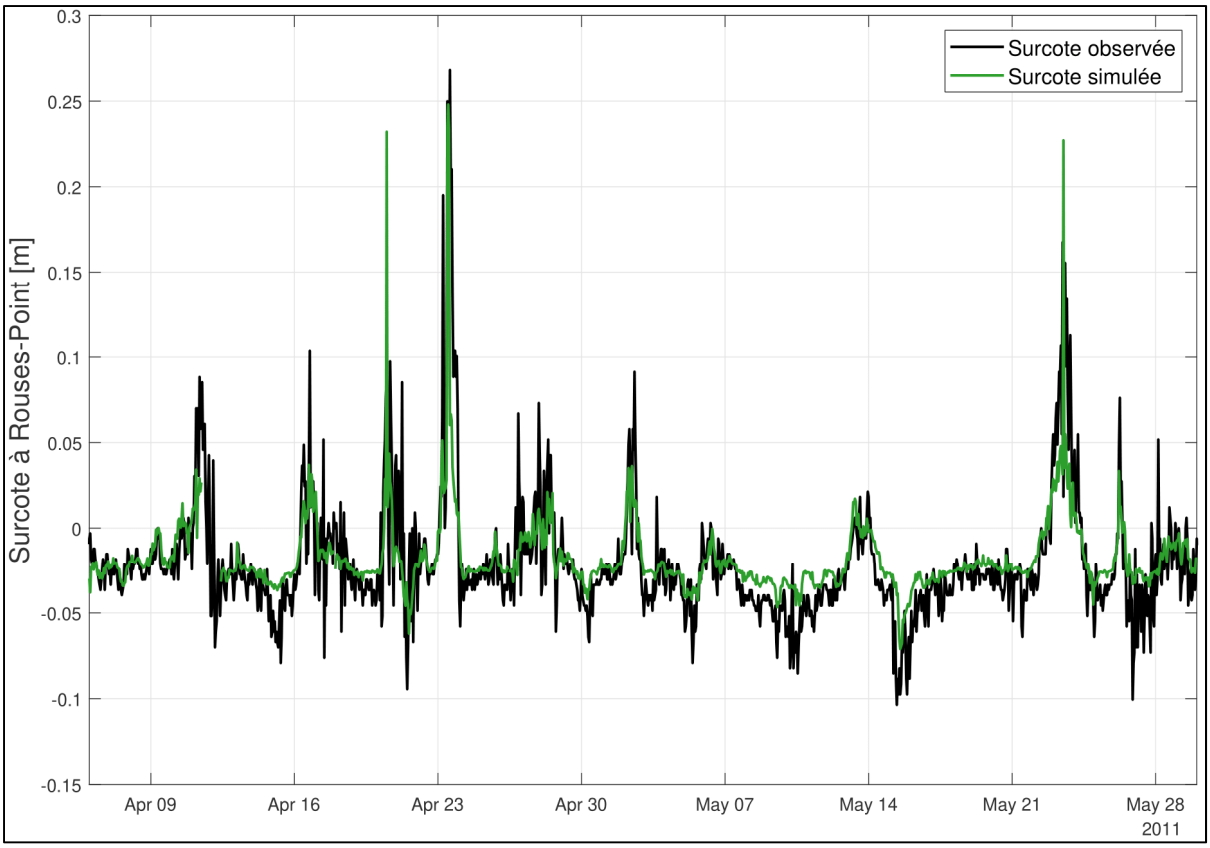

Figure 3.1 Simulation de la surcote à Rouses-Point au printemps 2011

Les résultats de la simulation démontrent que le modèle aurait été en mesure de fournir une information précieuse sur l'augmentation du niveau due au vent.

3.5 Équifinalité

Lors de la calibration du modèle, il a été observé que, en raison du nombre élevé de paramètres qu'il contient, celui-ci était particulièrement susceptible au principe d'équifinalité, c'est-à-dire que pour des calibrations aboutissant à des valeurs similaires du NSE, le modèle avait un comportement différent. Donc, il arrivait que deux calibrations fournissent un NSE sensiblement identique, mais sans pour autant offrir la même performance lors des évènements de surcotes importantes. Ceci est dû au fait que ces évènements sont relativement rares sur une année et que la période étudiée était relativement courte. Pour remédier partiellement à ce problème, l'évaluation du NSE a été réalisée en excluant les mois d'hiver où la surface du lac

est partiellement ou complètement gelée et où le niveau du lac est très bas. Finalement, la série de paramètres optimaux a été sélectionnée objectivement en choisissant parmi plusieurs calibrations celle offrant le meilleur NSE en validation.

Il serait aussi possible de réduire l'impact de l'équifinalité en calibrant chacun des paliers de vent séparément, comme il en a été discuté dans la section 3.2, puisque cette méthode de calibration réduit drastiquement la dimension de l'espace de recherche pour l'algorithme.

3.6 Avenues d'améliorations du modèle

Bien que le modèle développé dans cette étude offre des performances supérieures au modèle simple de Zuider Zee, celui-ci demeure loin de la perfection. Un des aspects qui a été discuté et brièvement testé est l'addition d'une composante temporelle. Présentement, le modèle offre des prévisions instantanées qui ne tiennent pas en considération l'état du lac au pas de temps précédent, ce qui, d'un point de vue conceptuel, est une faiblesse potentielle. Il fut tenté d'incorporer au modèle un système de « banque de vent », dont l'objectif était de forcer le modèle à adapter sa réaction en fonction du vent aux pas de temps antérieurs, simulant ainsi l'accumulation de l'eau d'un côté du lac. Les tentatives réalisées n'ont cependant pas été fructueuses et il a été décidé de conserver la version actuelle du modèle. Une des hypothèses qui pourrait expliquer la pauvre performance des essais réalisés avec ce modèle est le pas de temps auquel les prévisions de vent sont disponibles. Puisque les essais ont été réalisés avec un pas de temps horaire, il est possible que l'agglomération des données de vent ait un impact négatif sur la performance d'un tel modèle. L'utilisation d'un pas de temps plus court se révélerait toutefois aussi problématique puisqu'aucun des NWP offre des prévisions à un pas de temps inférieur à une heure, donc celui-ci serait impossible à alimenter en mode prévisionnel.

Une autre avenue d'amélioration du modèle serait l'addition de stations météorologiques supplémentaires sur le lac. La prise en considération de trois points plutôt qu'un seul fut une des améliorations majeures entre les modèles A et B, démontrant que d'avoir une meilleure

représentation de l'état de l'ensemble du lac aidait à la modélisation de la seiche. Il est donc probable que l'ajout d'autres stations à des positions stratégiques sur le lac aiderait encore davantage la calibration du modèle et permettrait de mieux jauger la quantité d'énergie transmise au lac. L'installation et la maintenance de ces stations engendreraient bien entendu des coûts supplémentaires et il n'est toutefois pas dit que l'amélioration en performance du modèle serait suffisante pour justifier de tels investissements.

Le modèle présenté, même s'il performe mieux que le modèle tiré de la littérature, comporte encore certains artéfacts de sa création. Par exemple, les constantes z et F, qui représentent respectivement la profondeur du lac et la longueur de son fetch, sont pertinentes dans la formulation de Zuider Zee originale, mais l'incorporation du paramètre de calibration multiplicatif c rend la présence de ses constantes obsolètes. Peu importe la valeur de z et F utilisée, la différence sera simplement absorbée par le paramètre multiplicatif. Ces constantes pourraient jouer un rôle dans le contexte où ces valeurs varieraient durant la modélisation (niveau du lac qui monte et qui descend ou encore la présence de glace sur le lac qui modifie la longueur du fetch), mais ce n'est pas le cas dans la version actuelle du modèle.

De plus, il serait aussi envisageable de modifier le paramètre de calibration additif $\Theta_{(2)}$, qui sert à corriger le biais provenant de la variation de l'élévation du fond du lac, et de plutôt utiliser une constante additive. Cela permettrait de réduire le nombre de paramètres de n, améliorant ainsi le temps de calibration.

3.7 Prévisions probabilistes

Toutes les prévisions effectuées dans cette étude ont été réalisées en employant uniquement des prévisions météorologiques déterministes, engendrant une prévision unique à chaque pas de temps par NWP. Considérant la nature chaotique et incertaine du vent, il serait potentiellement intéressant pour les prévisionnistes de plutôt fournir au modèle des données météorologiques d'ensemble (p. ex. ECMWF Ensemble, REPS ou SREF) afin de plutôt obtenir une fenêtre de possibilités. En théorie, ceci aiderait à mieux cerner l'incertitude inhérente à de

tels types de prévisions, au coût d'un temps de traitement de données et de simulation plus important.

Dans le même ordre idées, il pourrait être intéressant d'utiliser non pas les prévisions d'ensemble d'un seul et unique NWP, mais plutôt une combinaison des prévisions déterministes de différents NWP. Ce type de prévision, dit multi-modèles, est de plus en plus envisagé. Des études (Arsenault, Gatien, Renaud, Brissette, & Martel, 2015; Duan, Ajami, Gao, & Sorooshian, 2007) dans le milieu de l'hydrologie ont démontré qu'une pondération de plusieurs simulations hydrologiques de différents modèles pouvait fournir une meilleure simulation des débits en rivière que chaque simulation individuelle. La question se pose donc à savoir si l'utilisation de plusieurs modèles de prévision de la seiche, ou encore l'utilisation de prévisions de vent provenant de plusieurs NWP différents, offrirait de meilleurs résultats que l'emploi d'un modèle unique.

3.8 Limitations de l'étude

Bien que le modèle présenté dans l'article offre des performances suffisantes pour répondre à l'objectif primaire de l'étude, son développement comporte toujours certaines limitations.

En premier lieu, le modèle a uniquement été testé sur un seul lac puisque l'objectif principal de l'étude était le développement d'un modèle pouvant servir sur le lac Champlain. Toutefois, même s'il est logique de croire que les principes qui le régissent devraient en théorie pouvoir être appliqués sur d'autres étendues d'eau, ceci n'a pas été vérifié. Il est possible que les conditions géographiques et météorologiques du lac Champlain soient particulièrement propices à la formation d'une surcote naturellement facile à modéliser et que l'application d'un modèle similaire sur un lac différent échoue. Afin d'appliquer ce modèle a un être étendu d'eau, il sera important d'en adapter les paramètres, tels que le nombre et la position des stations météorologiques utilisées ou encore le nombre de paliers de vent employés.

En second lieu, la calibration et les tests en mode prévisionnel ont été effectués sur un échantillon relativement petit. En effet, les évènements problématiques de surcote (qui se produisent durant la période où le niveau du lac est déjà élevé, soit lors de la fonte des neiges au printemps) sont peu nombreux et les données météorologiques nécessaires n'étaient disponibles que sur quelques années. La taille des échantillons ayant servi à la correction de biais, à la calibration et à la validation est donc une limitation importante de l'étude. Le modèle gagnerait à être recalibré et réévalué dans quelques années, lorsqu'un échantillon plus exhaustif sera disponible.

En troisième lieu, l'étude a été limitée à l'analyse de la performance lors évènements importants de surcote, mais n'a pas abordé concrètement le cas des « fausses alarmes ». Cet aspect de l'évaluation de la performance des modèles est en quelque sorte évalué par le biais de la métrique objective (NSE), qui pénalise lorsque le modèle réagit lorsqu'il ne devrait pas, mais n'a pas fait l'objet d'une analyse aussi approfondie que durant les évènements de grandes surcotes. Ceci est principalement justifié par le fait que, dans le contexte de l'étude, un faux positif n'est pas aussi dommageable qu'un faux négatif. Un faux positif mènerait à une prise de précautions possiblement injustifiée, mais n'aurait pas de conséquence à long terme équivalente à celles associées à un faux négatif, où l'inaction entrainerait des pertes importantes.

En quatrième lieu, un aspect intéressant qui n'a pas été étudié dans ce travail est l'effet de la houle sur le débit déversé dans la rivière. La surcote et la houle sont deux phénomènes distincts qui affectent la quantité d'eau qui s'écoule à l'exutoire du lac. Durant un évènement de vent intense, une surcote se développera et augmentera les débits observés, mais il est probable que de grandes vagues se forment et accentuent davantage l'effet du vent. L'impact de la houle serait un aspect intéressant à analyser dans des travaux futurs.

3.9 Utilisation d'un modèle de seiche dans des contextes différents

L'objectif premier de cette étude était la création d'un modèle de prévision de la seiche utile lors des évènements d'inondations dans le lac Champlain et la rivière Richelieu. Les concepts mis de l'avant dans l'étude pourraient servir au développement de modèles appliqués à d'autres lacs, ou encore d'autres types de plan d'eau susceptibles de développer des surcotes reliées au vent. Cependant, avoir la capacité de prévoir avec précision la surcote ayant lieu sur un plan d'eau pourrait potentiellement être utile et profitable dans d'autres contextes différents. Par exemple, il pourrait être bénéfique pour les gestionnaires de réservoirs hydroélectriques d'être en mesure de prévoir la variation du niveau et de l'inclinaison du plan d'eau afin d'optimiser davantage les hauteurs de chute et de mieux estimer les volumes d'eau.

CONCLUSION

Pour conclure, cette étude a permis de mettre en évidence l'impact du vent sur l'apparition de surcotes sur le lac Champlain ainsi que l'importance de considérer le vent dans un contexte de prévision des inondations dans la rivière Richelieu.

La première partie de l'étude a comparé la qualité des prévisions de vent offertes par cinq différents NWP et a permis de mettre de l'avant la nécessité d'une correction de biais avant l'emploi des données de vent fournies par ces systèmes dans les modèles de prévision de la surcote. La technique de correction de biais par quantiles a permis d'améliorer significativement la qualité des prévisions, particulièrement lors des quatre premiers jours de prévision. De plus, même si tous les NWP étudiés fournissent une information intéressante et éventuellement pertinente pour les prévisionnistes, le système du ECMWF s'est démarqué par la qualité et l'accessibilité des données offertes.

La seconde partie de l'étude a mené à la création d'un nouveau modèle de prévision de la surcote due au vent sur le lac Champlain qui performe mieux que le modèle traditionnellement utilisé par le USACE. L'ajout d'une composante météorologique supplémentaire, soit la vitesse des rafales de vent, couplé à l'addition de plusieurs points de référence sur lac ainsi qu'à une calibration par paliers, permet au modèle proposé de mieux représenter l'état du lac dans son ensemble.

Les essais en mode prévisionnel ont démontré qu'il est possible d'obtenir une prévision satisfaisante jusqu'à un horizon de quatre jours, mais que la précision de celle-ci est fortement dépendante de la qualité des prévisions météorologiques utilisées lors de la modélisation. Ceci met en évidence l'importance du choix de l'origine des prévisions ainsi que de la méthode employée pour les corriger.

Ultimement, cette étude a clairement démontré qu'il était possible d'incorporer une composante reliée à l'effet du vent afin d'améliorer les prévisions du niveau d'eau au lac

Champlain et ainsi être en mesure de mieux prévoir les inondations dans la rivière Richelieu qui pourraient en résulter.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Arsenault, R., Gatien, P., Renaud, B., Brissette, F., & Martel, J.-L. (2015). A comparative analysis of 9 multi-model averaging approaches in hydrological continuous streamflow simulation. *Journal of Hydrology, 529*, 754-767. doi: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.001. Repéré à http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415006848

Azorin-Molina, C., Asin, J., McVicar, T. R., Minola, L., Lopez-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., & Chen, D. (2018). Evaluating anemometer drift: A statistical approach to correct biases in wind speed measurement. *Atmospheric Research, 203*, 175-188. doi: https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.12.010. Repéré à http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809517312401

Beven, K. (2006). A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology, 320*(1), 18-36. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.07.007. Repéré à http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216940500332X

Brochero, D., Anctil, F., & Gagné, C. (2011). Simplifying a hydrological ensemble prediction system with a backward greedy selection of members – Part 1: Optimization criteria. *Hydrology and Earth System Sciences, 15*(11), 3307-3325. doi: 10.5194/hess-15-3307-2011. Repéré à https://hess.copernicus.org/articles/15/3307/2011/

C3S. (2019). C3S ERA5-Land reanalysis. Repéré le 2020-09-01 à https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home

Chimney, M. J. (2005). Surface seiche and wind set-up on Lake Okeechobee (Florida, USA) during hurricanes Frances and Jeanne. *Lake and Reservoir Management, 21*(4), 465-473. doi: 10.1080/07438140509354450. Repéré à https://doi.org/10.1080/07438140509354450

Colvin, J., Lazarus, S., Splitt, M., Weaver, R., & Taeb, P. (2018). Wind driven setup in east central Florida's Indian River Lagoon: Forcings and parameterizations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 213*, 40-48. doi: 10.1016/j.ecss.2018.08.004. Repéré à http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272771418303421

Costoya, X., Rocha, A., & Carvalho, D. (2020). Using bias-correction to improve future projections of offshore wind energy resource: A case study on the Iberian Peninsula. *Applied Energy, 262*, 114562. doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114562. Repéré à http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192030074X

de Jong, M. P. C., & Battjes, J. A. (2004). Seiche characteristics of Rotterdam Harbour. *Coastal Engineering, 51*(5), 373-386. doi: https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.04.002. Repéré à http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383904000511

Demirel, M. C., Booij, M. J., & Hoekstra, A. Y. (2013). Effect of different uncertainty sources on the skill of 10 day ensemble low flow forecasts for two hydrological models. *Water Resources Research, 49*(7), 4035-4053. doi: 10.1002/wrcr.20294. Repéré à https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wrcr.20294

Duan, Q., Ajami, N. K., Gao, X., & Sorooshian, S. (2007). Multi-model ensemble hydrologic prediction using Bayesian model averaging. *Advances in Water Resources, 30*(5), 1371-1386. doi: https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.11.014. Repéré à http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030917080600220X

Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research, 28*(4), 1015-1031. doi: 10.1029/91WR02985. Repéré à http://dx.doi.org/10.1029/91WR02985

EC. (2013). Les dix événements météorologiques les plus marquants au Canada en 2011.

Fortin, V., Gaborit, E., & Dimitrijevic, M. (2015). *Assessing the skill of weather forecasts for the purpose of flood forecasting in Lake Champlain and Richelieu River*. Environment Canada, Meteorological Research Division.

Gardner, J. T., English, M. C., & Prowse, T. D. (2006). Wind-forced seiche events on Great Slave Lake: hydrologic implications for the Slave River Delta, NWT, Canada. *Hydrological Processes, 20*(19), 4051-4072. doi: https://doi.org/10.1002/hyp.6419. Repéré à https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.6419

Garvine, R. W. (1985). A simple model of estuarine subtidal fluctuations forced by local and remote wind stress. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 90*(C6), 11945-11948. doi: 10.1029/JC090iC06p11945.
Repéré à https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JC090iC06p11945

Hamblin, P. F. (1976). Seiches, Circulation, and Storm Surges of an Ice-Free Lake Winnipeg. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 33*(10), 2377-2391. doi: 10.1139/f76-284. Repéré à https://cdnsciencepub.com/doi/abs/10.1139/f76-284

Hamon, B. V. (1966). Continental shelf waves and the effects of atmospheric pressure and wind stress on sea level. *Journal of Geophysical Research (1896-1977), 71*(12), 2883-2893. doi: 10.1029/JZ071i012p02883.
Repéré à https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JZ071i012p02883

Hoeke, R. K., McInnes, K. L., & O'Grady, J. G. (2015). Wind and wave setup contributions to extreme sea levels at a tropical high island: A stochastic cyclone simulation study for Apia, Samoa. *Journal of Marine Science and Engineering, 3*(3), 1117-1135. doi: doi:10.3390/jmse3031117. Repéré à https://www.mdpi.com/2077-1312/3/3/1117

Hölbig, C. A., Machado, V. L., & Pavan, W. (2016). Statistical correction of the result of weather forecast by applying the model output calibration. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 324*, 79-90. doi: 10.1016/j.entcs.2016.09.008. Repéré à http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1571066116300524

ILCRRS. (2017). *The identification of measures to mitigate flooding and the impacts of flooding of the Lake Champlain and Richelieu River*. International Lake Champlain and Richelieu River Study (ILCRRS) Board of the International Joint Commission (IJC).

ILCRRS. (2019). *The causes and impacts of past floods in the Lake Champlain-Richelieu River basin - Historical information on flooding*. International Lake Champlain-Richelieu River Study.

Jeong, J., & Lee, S.-J. (2018). A statistical parameter correction technique for WRF medium-range prediction of near-surface temperature and wind speed using generalized linear model. *Atmosphere, 9*(8), 291. doi: 10.3390/atmos9080291.
Repéré à https://www.mdpi.com/2073-4433/9/8/291

Jönsson, B., Döös, K., Nycander, J., & Lundberg, P. (2008). Standing waves in the Gulf of Finland and their relationship to the basin-wide Baltic seiches. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 113*(C3). doi: https://doi.org/10.1029/2006JC003862. Repéré à https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2006JC003862

Li, D., Feng, J., Xu, Z., Yin, B., Shi, H., & Qi, J. (2019). Statistical Bias Correction for Simulated Wind Speeds Over CORDEX-East Asia. *Earth and Space Science, 6*(2), 200-211. doi: https://doi.org/10.1029/2018EA000493.
Repéré à https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018EA000493

Mai, J., Kornelsen, K. C., Tolson, B. A., Fortin, V., Gasset, N., Bouhemhem, D., . . . Coulibaly, P. (2020). The Canadian Surface Prediction Archive (CaSPAr): A platform to enhance environmental modeling in Canada and globally. *Bulletin of the American Meteorological Society, 101*(3), E341-E356. doi: 10.1175/bams-d-19-0143.1. Repéré à https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0143.1

Meyer, Z. Wind set-up of water level in a river. Acta Geophys. 59, 317–333 (2011). https://doi.org/10.2478/s11600-011-0005-5

MSP. (2013). Rapport d'évènement - Inondations printanières Montérégie 2011. Repéré à https://www.securitepublique.gouv.qc.ca/fileadmin/Documents/securite_civile/inondations_monteregie_2011/rapport_evenement_inondations_monteregie.pdf

MÜnnich, M., WÜest, A., & Imboden, D. M. (1992). Observations of the second vertical mode of the internal seiche in an alpine lake. *Limnology and Oceanography, 37*(8), 1705-1719.doi:https://doi.org/10.4319/lo.1992.37.8.1705.
Repéré à https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.4319/lo.1992.37.8.1705

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology, 10*(3), 282-290. doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
Repéré à http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169470902556

NOAA Technical Report NWS 48 (1992). Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes

Ostrovsky, I., Yacobi, Y. Z., Walline, P., & Kalikhman, I. (1996). Seiche-induced mixing: Its impact on lake productivity. *Limnology and Oceanography, 41*(2), 323-332. doi: https://doi.org/10.4319/lo.1996.41.2.0323.
Repéré à https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.4319/lo.1996.41.2.0323

Platzman, G. W. (1963). The dynamical prediction of wind tides on Lake Erie. Dans *The Dynamical Prediction of Wind Tides on Lake Erie* (pp. 1-44). Boston, MA: American Meteorological Society. doi: 10.1007/978-1-940033-54-9_1.
Repéré à https://doi.org/10.1007/978-1-940033-54-9_1

Riboust, P., & Brissette, F. (2016). Analysis of Lake Champlain/Richelieu River's historical 2011 flood. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques, 41*(1-2), 174-185. doi: 10.1080/07011784.2014.982190.
Repéré à https://doi.org/10.1080/07011784.2014.982190

Sweeney, C. P., Lynch, P., & Nolan, P. (2013). Reducing errors of wind speed forecasts by an optimal combination of post-processing methods. *Meteorological Applications, 20*(1), 32-40. doi: https://doi.org/10.1002/met.294.
Repéré à https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/met.294

Taeb, P., Weaver, R. J., & Lazarus, S. (2019). A seven-member ensemble, coastal hydrodynamic forecast tool and its application to the Indian River lagoon system. Dans *Coastal Sediments 2019* (pp. 1475-1488). doi: 10.1142/9789811204487_0128. Repéré à https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/9789811204487_0128

U.S Army Corp of Engineers (1952). Wind set-up and waves in shallow Water. Beach Erosion

Board. *Technical Memorandum No. 27.*
Repéré à https://erdc-library.erdc.dren.mil/jspui/handle/11681/3362

USACE. (1977). *Shore protection manual, 3rd Edition* (Vol. 1). U. S. Army Corps of Engineers (USACE), Coastal Engineering Research Center.

USGS. (2014). *Assessment of the spatial extent and height of flooding in Lake Champlain during May 2011, using satellite remote sensing and ground-based information* (nº 2014-5163). U.S. Geological Survey.
Repéré à https://pubs.usgs.gov/sir/2014/5163/pdf/sir2014-5163.pdf

Velázquez, J. A., Anctil, F., Ramos, M. H., & Perrin, C. (2011). Can a multi-model approach improve hydrological ensemble forecasting? A study on 29 French catchments using 16 hydrological model structures. *Advances in Geosciences, 29*, 33-42. doi: 10.5194/adgeo-29-33-2011.
Repéré à https://adgeo.copernicus.org/articles/29/33/2011/

Walton, T. L., & Dean, R. G. (2009). Landward limit of wind setup on beaches. *Ocean Engineering, 36*(9), 763-766. doi: 10.1016/j.oceaneng.2009.03.004.
Repéré à http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801809000614