

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

**UTILISATION D'UN MODÈLE PARAMÉTRIQUE POUR
L'ÉVALUATION DU CLIMAT DE VAGUES DE L'ESTUAIRE
ET DU GOLFE DU SAINT-LAURENT ET SON ÉVOLUTION
FUTURE DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS
CLIMATIQUES**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en océanographie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

©BENOIT RUEST

Mai 2014

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

Composition du jury :

Cédric Chavanne, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Urs Neumeier, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Dany Dumont, codirecteur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Denis Jacob, examinateur externe, Environnement Canada

Dépôt initial le 19 décembre 2013

Dépôt final le 2 mai 2014

REMERCIEMENTS

Les tout premiers remerciements reviennent nécessairement à mon directeur de maîtrise, Urs Neumeier, qui a toujours su trouver du temps pour moi au travers de ses projets et qui a su respecter mon autonomie tout en s'assurant de la rigueur de mon travail sur le plan scientifique. Il m'a également permis d'enrichir mon expérience de maîtrise en m'invitant en mer pour plusieurs missions océanographiques visant la mesure des vagues dans le Saint-Laurent, en me permettant de réaliser un stage de recherche en France au Centre d'études techniques maritimes et fluviales (CETMEF) et en m'encourageant à présenter mes travaux de recherche à une conférence internationale. Je remercie également mon codirecteur, Dany Dumont, pour son dynamisme, son encadrement et sa grande disponibilité. Je remercie aussi le stagiaire postdoctoral Adrien Lambert pour son soutien et son intérêt envers mes travaux de recherche. Je tiens aussi à souligner le travail d'Eliott Bismuth, étudiant à la maîtrise en océanographie, qui a accepté de collaborer avec moi pour la rédaction de l'article II présenté dans ce mémoire. Des remerciements particuliers vont aussi à James Caveen pour son travail sur le code source de GENER avant mon arrivée à l'ISMER et à Simon Senneville pour avoir mis à ma disposition les sorties de glace du modèle océanique régional du golfe du Saint-Laurent, ainsi que pour son implication dans le LASSO (Laboratoire d'analyse et de simulation des systèmes océaniques). Merci aussi à Frédéric Cyr d'avoir accepté de partager son canevas L^AT_EX pour la rédaction de mon mémoire.

Dans un deuxième temps, je veux remercier le ministère des Transports du Québec qui a soutenu et financé le projet de modélisation du régime des vagues du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent pour l'adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques dirigé par le professeur Urs Neumeier. J'ai pu contribuer activement à ce projet avec mes travaux de recherche. Je dois aussi remercier le ministère de la Sécurité publique du Québec qui a financé un programme de mesure des vagues dans l'estuaire et dans le golfe du

Saint-Laurent en collaboration avec le professeur Urs Neumeier. Les données obtenues sur la période 2010-2013 ont joué un rôle important pour la réalisation de mon projet de recherche. Merci également au Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT) qui m’a attribué une bourse de maîtrise en recherche et au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) qui m’a financé avec une bourse d’études supérieures du Canada Alexander-Graham-Bell.

Je remercie aussi le CETMEF, plus particulièrement Anne-Laure Tiberi-Wadier et François Bouttes de la division hydraulique et sédimentologie (ingénierie), pour m’avoir accueilli dans leur équipe à Brest au printemps 2013, pour y vivre une expérience complémentaire à ma maîtrise, soit la calibration de l’atlas de vagues ANEMOC-2 sur la Méditerranée. Merci au ministère des Transports du Québec qui a accepté de financer ce stage en France.

Finalement, je remercie Geneviève pour m’avoir soutenu et motivé durant ma maîtrise. J’espère être à ta hauteur pour te rendre la pareille pendant la tienne. Merci aussi à ma famille et à mes amis pour leurs encouragements et leur soutien durant mon cheminement en recherche.

RÉSUMÉ

Ce mémoire de maîtrise a pour objectif principal de mieux caractériser le climat de vagues de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (EGSL) et d'évaluer comment il pourrait évoluer au cours du 21^e siècle dans un contexte de changements climatiques en utilisant un modèle paramétrique de vagues (GENER). Des formules de fetch supplémentaires sont d'abord ajoutées à GENER et un nouvel algorithme est développé afin de permettre le forçage de ce modèle par des données de vents bidimensionnelles issues de modèles atmosphériques. Les vents de la réanalyse MERRA, préalablement ajustés pour mieux correspondre aux conditions de vents dans l'EGSL, sont ensuite utilisés pour simuler les vagues avec GENER à des sites de mesures de vagues afin d'évaluer les performances du modèle par rapport aux mesures. Les comparaisons sont faites pour les hauteurs de vagues significatives (H_s) en insistant sur les événements extrêmes. De manière générale, la plupart des formules de fetch ont des performances satisfaisantes, sauf pour celle du *Shore Protection Manual* de 1984. Celle du *Coastal Engineering Manual* est sélectionnée pour les simulations subséquentes avec GENER. L'évaluation du climat de vagues récent de l'EGSL est réalisée en à partir des H_s simulées en forçant GENER avec les vents ajustés de la réanalyse MERRA sur la période 1981-2010. Une méthode empirique d'atténuation des vagues par la glace en post-traitement permet également de prendre en considération la présence d'un couvert de glace saisonnier dans l'évaluation du climat de vagues. La même approche est réutilisée, mais avec les vents de deux simulations climatiques du Modèle Régional Canadien du Climat (aev et ahj) sur la période 1981-2100. Ces simulations sont forcées par un scénario élevé d'émissions de gaz à effet de serre (A2). La comparaison des climats de vagues des périodes 1981-2010 et 2071-2100 permet de constater que l'incidence des changements climatiques sur le régime des vents devrait avoir un impact minimal sur le climat de vagues de l'EGSL. Par contre, la réduction de la couverture saisonnière de glace devrait provoquer une augmentation significative des H_s extrêmes dans la région au cours du 21^e siècle (5-10% en moyenne).

Mots clés : vagues, changements climatiques, modèle de vagues, estuaire et golfe du Saint-Laurent, GENER, glace de mer, analyse des valeurs extrêmes.

ABSTRACT

The main goal of this master's thesis is to achieve a better characterization of the wave climate in the Estuary and Gulf of St. Lawrence (EGSL) and to evaluate how it could evolve during the 21st century with climate change by using a parametric wave model (GENER). Additional wind-fetch formulas are added to GENER and a new algorithm is developed to allow the forcing of the model by bidimensional wind data from atmospheric models. Wind data from the reanalysis MERRA is adjusted to better correspond to wind conditions in the EGSL. It is then used to simulate waves with GENER at wave monitoring sites. The model performance is evaluated relatively to significant wave height (H_s) measurements, especially for extreme events. Globally, most wind-fetch formulas give fair performances except for the one from the Shore Protection Manual (1984). The formula from the Coastal Engineering Manual is preferred for the following simulations with GENER. Evaluation of the wave climate of the EGSL is performed by analysing wave time-series produced by forcing GENER with the adjusted MERRA wind data on the 1981-2010 period. An empirical method allowing the consideration of wave attenuation by the seasonal sea ice for the wave climate evaluation is used in post-processing. The same approach is also used with wind data from two climate simulations from the Canadian Regional Climate Model (aev and ahj) on the 1981-2100 period. These simulations are forced by a high greenhouse gas emission scenario (A2). Comparisons of wave climates computed for two 30-yr time-slices (1981-2010 and 2071-2100) show that the effect of climate change on wind regimes should have a minimal impact on the wave climate of the EGSL. However, the reduction of the seasonal sea ice cover should induce a significant increase of extreme H_s in the region during the 21st century (5-10% on average).

Keywords : waves, climate change, wave model, Estuary and Gulf of St. Lawrence, GENER, sea ice, extreme value analysis.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	vii
RÉSUMÉ	ix
ABSTRACT	xi
TABLE DES MATIÈRES	xiii
LISTE DES TABLEAUX	xvii
LISTE DES FIGURES	xix
LISTE DES ABRÉVIATIONS	xxiii
LISTE DES SYMBOLES	xxvii
CHAPITRE I	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 Contexte et problématique du projet de maîtrise	1
1.2 Objectifs du projet de maîtrise	8
1.3 Travail complété dans le cadre de la maîtrise	9
CHAPITRE II	
ÉVALUATION DU CLIMAT DE VAGUES DU GOLFE DU ST-LAURENT AVEC UN MODÈLE DE VAGUES PARAMÉTRIQUE	11
2.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DE L'ARTICLE I	11
2.2 WAVE CLIMATE EVALUATION IN THE GULF OF ST. LAWRENCE WITH A PARAMETRIC WAVE MODEL	12
2.2.1 Abstract	12
2.2.2 Introduction	13
2.2.3 Methodology	14
2.2.3.1 The parametric wave model GENER	14
2.2.3.2 Using GENER with wind fields from atmospheric models	15
2.2.3.3 Wind preprocessing	18
2.2.3.4 Validation of GENER	19
2.2.4 Results	22

2.2.4.1	MERRA 10-m wind validation and correction for the Gulf of St. Lawrence	22
2.2.4.2	Validation of GENER used with MERRA 10 m winds	25
2.2.4.3	Wave climate estimation on the Gulf of St. Lawrence with GENER	28
2.2.5	Discussion	29
2.2.6	Conclusions	32
2.2.7	Acknowledgments	33

CHAPITRE III

	CLIMAT DE VAGUES RÉCENT ET CHANGEMENTS FUTURS ANTICIPÉS DANS LES EAUX SAISONNIÈREMENT ENGLACÉES DU GOLFE DU ST-LAURENT, CANADA	35
3.1	RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DE L'ARTICLE II	35
3.2	RECENT WAVE CLIMATE AND EXPECTED FUTURE CHANGES IN THE SEASONALLY ICE-INFESTED WATERS OF THE GULF OF ST. LAWRENCE, CANADA	37
3.2.1	Abstract	37
3.2.2	Introduction	37
3.2.3	Study area	39
3.2.4	Methodology	41
3.2.4.1	Wave simulations	41
3.2.4.2	Wave attenuation by sea ice	45
3.2.4.3	Climate change assessment	47
3.2.5	Results	49
3.2.5.1	Recent-past GSL wave climate	49
3.2.5.2	GSL wave climate evolution with climate changes	49
3.2.6	Discussion	54
3.2.7	Conclusions	60
3.2.8	Acknowledgments	60

CHAPITRE IV	
CONCLUSION GÉNÉRALE	61
RÉRÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	69
ANNEXE A	
FORMULES DE FETCH IMPLÉMENTÉES DANS GENER	79
ANNEXE B	
PERFORMANCES DE GENER RELATIVEMENT À SWAN POUR UNE SIMULATION IDÉALISÉE	85
ANNEXE C	
CODE SOURCE MATLAB DE L'ALGORITHME DE PRÉTRAITEMENT DU VENT DÉVELOPPÉ POUR GENER	91

LISTE DES TABLEAUX

1	Comparison of MERRA wind data with wind measurements ($U_{10} > 10$ m/s) on the GSL at buoy C45138 and WMO station 71710.	22
2	Comparison of the different wind-fetch formulas for wave hindcasting with GENER at validation sites.	26
3	Comparaison des performances de GENER (formule de fetch du CEM) pour simuler les H_s à partir des vents MERRA ajustés avec et sans l'utilisation de l'algorithme de prétraitement du vent au site de la bouée C45138 sur la période 1991-2012 (avril à décembre).	62
4	Valeurs des critères de comparaison statistiques entre les H_s simulées avec SWAN et avec GENER (pour les cinq formules de fetch).	88

LISTE DES FIGURES

1	Map of MERRA grid points over the GSL, localization of the different validation datasets (red), the two GPD validation sites (blue) and the delimitation of both U_{10} correction factors application domain (dashed line).	17
2	Fitted GPDs (solid lines) from the POT sampling (black dots) and 95% confidence intervals (dashed lines) with thresholds selection from percentile 90% (gray), 93% (red), 96% (blue) and 99% (black) at sites GPD-1 (a) and GPD-2 (b).	21
3	Wind comparison between MERRA and buoy C45138 U_{10} with relative density scatter plots (dark red : highest, dark blue : lowest) : a) original MERRA U_{10} , b) MERRA U_{10} direction, c) MERRA U_{10} with a 1.30 correction factor. d) Q-Q plot of buoy U_{10} and MERRA U_{10} (original and with a 1.30 correction factor).	23
4	Wind comparison between MERRA and WMO station 71710 U_{10} with relative density scatter plots (dark red : highest, dark blue : lowest) : a) MERRA U_{10} with a 1.30 correction factor, b) MERRA U_{10} direction, c) MERRA U_{10} with a 1.15 correction factor. d) Q-Q plot of WMO station 71710 U_{10} and MERRA U_{10} (with 1.30 and 1.15 correction factors).	24
5	Q-Q plots of measured H_s and simulated H_s with GENER at each validation site : a) AWAC-A, b) AWAC-B, c) AWAC-C and d) buoy C45138.	27
6	Q-Q plot of simulated H_s with GENER at validation site C45138.	28
7	Comparison of extreme wave estimation at C45138 site with GPD from both measured and simulated H_s .	29
8	Spatial distribution of estimated 50-yr H_s on the western half of the GSL and SLE computed from wave hindcasts (1979-2012, January to December) with GENER and bathymetric contour lines (black solid lines (filled in light gray) : -50 m, black dashed lines : -100 m).	30
9	Location of the study area in the Gulf of St. Lawrence and relevant oceanographic zones.	40
10	Diagram of the methodology adopted for wave climate evaluation at a given location. Temperatures (T°) and wind velocities (U_{10}) are used to obtain ice concentrations and wave heights (H_s).	41

11	Recent-past GSL deep-water wave climate (99% H_s and 50-yr H_s) evaluated with MERRA forcing for ice-free conditions (a and b) and for annually ice-infested conditions (c and d) and relative differences (ice-free – ice-infested) in percent between both conditions (e and f). Points marked with an “x” are statistically significant at 95% confidence level (e and f).	50
12	Climate change impact on GSL 99% H_s (2071-2100 – 1981-2010) for CRCM-aev and CRCM-ahj simulations with and without sea ice consideration. Points marked with an “x” have changes statistically significant at 95% confidence level.	52
13	Climate change impact on GSL 50-yr H_s (2071-2100 – 1981-2010) for CRCM-aev and CRCM-ahj simulations with and without sea ice consideration. Points marked with an “x” have changes statistically significant at 95% confidence level and those also marked with an “O” have changes larger than GPD 95% CI.	53
14	Impact of sea ice on GSL wave climate. Relative differences, in percent, between wave climate evaluated with ice-free and annually ice-infested conditions (ice-free – ice infested) for CRCM-aev and CRCM-ahj simulations and for both 1981-2010 and 2071-2100 climatic periods. Points marked with an “x” have changes statistically significant at 95% confidence level and those also marked with an “O” have changes larger than GPD 95% CI.	55
15	Diagramme Quantile-Quantile comparant les performances de GENER (formule de fetch du CEM) pour simuler les H_s à partir des vents MERRA ajustés avec et sans l’utilisation de l’algorithme de prétraitement du vent au site de la bouée C45138 sur la période 1991-2012 (avril à décembre).	63
16	Diagramme de la méthodologie utilisée pour l’évaluation du climat de vagues à un endroit donné. La température de l’air (T°) et la vitesse du vent (U_{10}) sont utilisées pour obtenir les concentrations de glace de mer et les hauteurs significatives de vagues (H_s).	64
17	Évolution temporelle, entre 1990 et 2100, du climat de vagues et de la glace de mer dans l’estuaire du Saint-Laurent (48.78°N, 68.23°W) selon les simulations MRCC-aev (rouge) et MRCC-ahj (bleu). A) 99% H_s calculées sur les 30 années précédentes avec (traitillés) et sans (traits pleins) considération de la glace de mer. B) atténuation annuelle cumulée des vagues par la glace.	65

18	Évolution temporelle, entre 1990 et 2100, du climat de vagues et de la glace de mer dans le nord-ouest du golfe du Saint-Laurent (49.74°N, 65.83°W) selon les simulations MRCC-aev (rouge) et MRCC-ahj (bleu). A) 99% H_s calculées sur les 30 années précédentes avec (traitillés) et sans (traits pleins) considération de la glace de mer. B) atténuation annuelle cumulée des vagues par la glace.	66
19	Évolution temporelle, entre 1990 et 2100, du climat de vagues et de la glace de mer dans le golfe du Saint-Laurent central (48.46°N, 62.71°W) selon les simulations MRCC-aev (rouge) et MRCC-ahj (bleu). A) 99% H_s calculées sur les 30 années précédentes (traitillés) et sans (traits pleins) considération de la glace de mer. B) atténuation annuelle cumulée des vagues par la glace.	67
20	Schéma de la simulation idéalisée réalisée à différents pas de temps. Le secteur en bleu pâle représente le domaine marin de dimensions 200 × 100 km et de profondeur infinie, les vecteurs représentent les vents de la station météo 71710 à chaque pas de temps t et la croix rouge représente le point d'intérêt où les séries de vagues produites par SWAN et GENER sont comparées.	87
21	Comparaison des hauteurs significatives de vagues simulées avec GENER (méthode de Wilson) et avec SWAN pour les vents de la station météo 71710 (2010-2011). Nuage de points (données horaires) et régression linéaire.	88
22	Comparaison des séries chronologiques des hauteurs significatives et des directions des vagues simulées avec GENER (méthodes du SPM84 et de Wilson) et avec SWAN pour les vents de la station météo 71710 (2010-2011).	89

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i> (profileur de courant acoustique à effet Doppler).
AWAC	<i>Acoustic WAve and Current profiler</i> (ADCP de la firme Nortek mesurant les vagues).
CEM	<i>Coastal Engineering Manual</i> (Resio et al., 2002).
CI	<i>Confidence Interval</i> (intervalle de confiance des distributions généralisées Pareto).
CGCM3	<i>3rd version of the Canadian Coupled Global Climate Model</i> (3 ^e version du modèle climatique global canadien).
CRCM	<i>Canadian Regional Climate Model</i> (modèle régional canadien du climat, MRCC).
CRCM-aev	Simulation aev du <i>Canadian Regional Climate Model</i> (modèle régional canadien du climat) sur la période 1961-2100.
CRCM-ahj	Simulation ahj du <i>Canadian Regional Climate Model</i> (modèle régional canadien du climat) sur la période 1961-2100.
ECHAM5	Modèle climatique global du <i>Max Planck Institute für Meteorologie</i> .
EGSL	Estuaire et golfe du Saint-Laurent.
GCM	<i>Global Climate Model</i> (modèle climatique global).
GEM	<i>Global Environmental Multiscale model</i> (modèle de prévisions atmosphériques global d'Environnement Canada).
GEM-regional	Modèle de prévisions atmosphériques régional d'Environnement Canada.
GENER	Modèle paramétrique de vagues.
GEOS-5	<i>Goddard Earth Observing System 5</i> (système d'assimilation de données du modèle MERRA).
GEV	<i>Generalized Extreme Value distribution</i> (distribution généralisée des valeurs extrêmes).

GPD	<i>Generalized Pareto Distribution</i> (distribution généralisée Pareto).
GSL	<i>St. Lawrence Gulf</i> (golfe du Saint-Laurent).
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC).
ISMER	<i>Institut des sciences de la mer de Rimouski</i> .
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Atmosphere Program</i> .
MATLAB	<i>Matrix laboratory</i> (langage de programmation et logiciel produit par <i>The Mathworks</i>).
MERRA	<i>Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications</i> (modèle atmosphérique global de réanalyse de la NASA).
MRCC	Modèle régional canadien du climat (CRCM en anglais).
MTQ	Ministère des Transports du Québec.
NARR	<i>North American Regional Reanalysis</i> (modèle atmosphérique régional de réanalyse).
NAO	<i>North Atlantic Oscillation</i> (oscillation nord-atlantique).
POT	<i>Peak Over Threshold method</i> (méthode du pic au-delà du seuil).
PROMISE	<i>Pre-Operational Modeling in the Seas of Europe</i> (version du modèle de vagues spectral WAM).
Q-Q plot	Diagramme quantile-quantile.
RCM	<i>Regional Climate Model</i> (modèle climatique régional).
RMS	<i>Root Mean Square</i> (moyenne quadratique).
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> (erreur quadratique moyenne).
ROM	<i>Regional Oceanic Model</i> (modèle océanique régional opéré à l'ISMER).
SLE	<i>St. Lawrence Estuary</i> (estuaire du Saint-Laurent).
SMB	Sverdrup-Munk-Bretschneider (formule de fetch proposée dans le SPM77).

SPM77	<i>Shore Protection Manual</i> de 1977 (CERC, 1977).
SPM84	<i>Shore Protection Manual</i> de 1984 (CERC, 1984).
SRES	Special Report on Emission Scenario, IPCC (Rapport sur les scénarios d'émission de gaz à effet de serre, Nakicenovic et al., 2000).
SRES-A2	Scénario A2 d'émission de gaz à effet de serre du SRES.
SWAN	<i>Simulating WAves Nearshore</i> (modèle de vagues spectral).
WAM	<i>Wave Model</i> (modèle de vagues spectral).
WMO	<i>World Meteorological Organization</i> (Organisation Météorologique Mondiale, OMM).

LISTE DES SYMBOLES

C_D	Coefficient de traînée pour la formule de fetch du CEM.
F	Fetch géographique utilisé dans les formules de fetch [m].
F_{eff}	Fetch effectif utilisé dans les formules de fetch [m].
g	Accélération gravitationnelle [m/s ²].
H_{m0}	Hauteur significative de vagues (selon la méthode spectrale) [m].
H_s	Hauteur significative de vagues (moyenne du tiers supérieur des hauteurs de vagues) [m].
t	Durée du vent [s].
T_p	Période du pic d'énergie du spectre de vagues [s].
T_s	Période significative de vagues (moyenne du tiers supérieur des périodes de vagues) [s].
u_*	Vitesse de cisaillement du vent pour la formule de fetch du CEM [m/s].
U	Vitesse du vent [m/s].
U_{10}	Vitesse du vent mesurée à 10 m de la surface [m/s].
U_A	Vitesse du vent ajustée pour la formule de fetch du SPM84 [m/s].
U_z	Vitesse du vent mesurée à z m de la surface [m/s].
χ^2	Test statistique du chi-carré.

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Contexte et problématique du projet de maîtrise

Les vagues sont un facteur environnemental dominant qui affecte les milieux côtiers (Komar et al., 2009). C'est pourquoi la connaissance du climat de vagues est essentielle à l'étude des processus d'érosion côtière et à la réalisation de projets en génie côtier (Etemad-Shahidi et al., 2009). Le climat de vagues se définit par les statistiques à long terme des principales caractéristiques des vagues (hauteur, période et direction) calculées à partir de séries chronologiques de vagues d'au moins 30 ans (OCDI, 2002). Ces statistiques correspondent généralement aux conditions de vagues ayant des fréquences de dépassement ou des périodes de retour (récurrence en années) données. Les scientifiques qui étudient les processus côtiers les utilisent entre autres pour établir les taux de recul du trait de côte. Les ingénieurs côtiers, pour leur part, ont généralement besoin d'estimer le climat de vagues pour de longues périodes de retour (ex. 100 ans) afin de déterminer les conditions les plus sévères auxquelles une structure côtière pourrait faire face au cours de sa vie utile (Komar et al., 2009). C'est pourquoi les analyses des valeurs extrêmes (Coles, 2001) sont utilisées pour extrapoler les statistiques à long terme des vagues (Jonathan and Ewans, 2013; Mathiesen et al., 1994; Teena et al., 2012) sur 2 à 3 fois la longueur de la série de vagues disponible (Resio et al., 2002). Toutefois, les longues séries de données d'houlographes sont rares et des séries trop courtes augmentent considérablement les incertitudes (Jonathan and

Ewans, 2013). Pour pallier à ce manque de données, des méthodes de prévisions de vagues a posteriori, à partir de données de vents, sont utilisées comme alternative (Holthuijsen, 2007). Cela consiste à reconstituer des séries temporelles de vagues en forçant des modèles de vagues avec des données de vents (généralement plus disponibles) sur des périodes plus ou moins longues.

Les vagues sont essentiellement générées par le vent et leurs propriétés, en un point donné de l'espace et du temps, dépendent principalement du vent (vitesse, orientation et durée) et du fetch (Sverdrup and Munk, 1947), défini comme la longueur du plan d'eau dans la direction sur laquelle le vent souffle sans rencontrer d'obstacle. Plusieurs équations empiriques (appelées formules de fetch) reliant les propriétés des vagues et ces facteurs clés ont été proposées afin de prédire la hauteur et la période des vagues en un point au large (principalement Sverdrup and Munk, 1947; Bretschneider, 1952, 1958; Wilson, 1965; Hasselmann et al., 1976; CERC, 1977; Donelan, 1980; CERC, 1984; Resio et al., 2002). Elles sont toutes basées sur l'hypothèse que le vent est uniforme dans l'espace à un temps donné et que les vagues sont essentiellement générées dans la direction du vent. Les modèles paramétriques de vagues appliquent ces formules de fetch à des conditions de vent qui varient dans le temps, et ce, dans plusieurs directions (caractérisées par différentes distances de fetch). Il y a croissance de l'énergie des vagues sur le secteur correspondant à la direction du vent et atténuation linéaire de l'énergie des vagues sur les autres secteurs (Kamphuis, 2010). Ainsi, l'évolution dans le temps des hauteurs significatives (H_s), des directions moyennes et des périodes significatives des vagues pour un point donné au large est calculée à partir d'une série de vents (vitesses et directions) et des fetchs dans plusieurs directions.

Pour tenir compte de complexités additionnelles dont les interactions non-linéaires entre les vagues, la dissipation d'énergie, l'effet de la bathymétrie sur les vagues (en eaux peu profondes) et la formation de la houle, des modèles numériques eulériens basés sur le concept de spectre d'énergie des vagues (modèles de vagues spectraux) ont été développés plus récemment (ex. Tolman, 1989; WAMDI, 1988; Benoit et al., 1996; Booij et al., 1999;

Ris et al., 1999). Ces modèles calculent l'évolution temporelle des spectres d'énergie des vagues sur une grille spatiale, ce qui nécessite beaucoup plus de temps de calcul et de données d'entrées que les modèles paramétriques de vagues (Moeini and Etemad-Shahidi, 2006). Ils sont donc généralement plus utilisés pour les prévisions opérationnelles (ex. météo marine) nécessitant des prédictions de vagues précises ou pour des simulations de vagues sur le domaine côtier (en eaux peu profondes). Pour les prévisions climatiques de vagues sur plusieurs décennies, les modèles de vagues paramétriques sont généralement, encore aujourd'hui, préférés pour leur grande rapidité d'exécution. En effet, plusieurs domaines d'activités dont le génie côtier utilisent toujours les modèles de vagues paramétriques. Par exemple, l'utilisation des formules de fetch est toujours considérée dans différents manuels techniques comme le *Coastal Engineering Manual* du *U.S. Army Corps of Engineers* (Resio et al., 2002), le *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan* (OCDI, 2002) et le *Guide to Wave Analysis and Forecasting* de l'Organisation météorologique mondiale (WMO, 1998). Malgré la multiplication des modèles de vagues spectraux et l'âge avancé des principales formules de fetch, l'avantage économique marqué de ces méthodes empiriques explique que des travaux de recherche ont encore récemment été entrepris pour tenter de les améliorer, de mieux les valider ou même de les promouvoir (ex. Etemad-Shahidi et al., 2009; Goda, 2003; Le Roux, 2009; Moeini and Etemad-Shahidi, 2006). Par contre, il n'y a toujours pas de consensus sur laquelle des formules de fetch utiliser (Bishop, 1983; Bishop et al., 1992; Etemad-Shahidi et al., 2009; Goda, 2003; Kamphuis, 2010).

Différents modèles paramétriques de vagues ont historiquement été développés. Bishop and Donelan (1989) parlent d'ailleurs de trois de ces modèles ayant été développés à partir de différentes formules de fetch et qui ont été utilisés au Canada (Baird and Glodowski, 1978; Baird et al., 1986; Fleming et al., 1984). Au Québec, c'est le modèle paramétrique GENER (Desjardins and Ouellet, 1984) qui a été le plus utilisé. Il a été développé dans les années 80 par Louis Desjardins et le professeur Yvon Ouellet de l'Université Laval à partir des formules de fetch recommandées dans deux éditions du *Shore Protection Manual* (CERC, 1977, 1984).

Les modèles paramétriques de vagues comme GENER n'intègrent pas la houle dans leurs simulations, c'est-à-dire les vagues ayant été générées au-delà du domaine considéré et s'y étant éventuellement propagées. Ils sont donc plus adaptés aux mers fermées où la houle est généralement limitée. L'EGSL forme justement une mer semi-fermée où les distances de fetch ne peuvent atteindre au maximum que quelques centaines de kilomètres (Saucier et al., 2003). Malgré ses liens avec l'océan Atlantique par le détroit de Cabot et le détroit de Belle Isle, la majorité des conditions de vagues (y compris les conditions sévères) qu'on y retrouve sont générées localement plutôt qu'avoir comme provenance le domaine océanique. La houle y joue un rôle moins important que sur les côtes océaniques (Bryant and McCann, 1972). Cela fait en sorte que l'EGSL forme un domaine marin adapté à l'utilisation de modèles paramétriques de vagues. C'est d'ailleurs pourquoi le ministère des Transports du Québec (MTQ) et différents consultants en génie côtier au Québec utilisent toujours GENER pour l'évaluation du climat de vagues à des sites d'études (e.g. Dupuis and Ouellet, 1999; Neumeier et al., 2013). Toutefois, aucune validation approfondie de GENER n'a été réalisée jusqu'à maintenant à cause du manque de longues séries de vagues mesurées sur l'EGSL.

Encore aujourd'hui, GENER est utilisé de la même manière que lorsqu'il a été développé, c'est-à-dire avec des séries temporelles de vents ponctuelles provenant généralement de stations météorologiques terrestres et souvent éloignées des sites d'intérêt. Pourtant, il existe maintenant différents modèles atmosphériques estimant les vents marins. Les données de vents terrestres utilisées pour le forçage de GENER sont habituellement majorées pour tenir compte du fait que les vents soufflent généralement plus fort sur l'eau que sur terre à cause des différences de rugosité entre les deux milieux (Bishop et al., 1992; Kamphuis, 2010; Resio and Vincent, 1977). Toutefois, cette approche ne permet pas de tenir compte de la variabilité spatiale des vents sur le domaine de génération des vagues et limite nécessairement les performances de GENER comparativement à l'utilisation directe de champs de vents marins bidimensionnels comme données d'entrée.

L'EGSL fait partie des mers les plus méridionales de l'hémisphère nord qui sont couvertes saisonnièrement par de la glace de mer (Forbes et al., 2002). D'ailleurs, c'est une des raisons pour laquelle le climat de vagues de la région est mal caractérisé. En effet, la présence de glace complique autant la mesure que la modélisation des vagues. Les rares bouées de mesure des vagues sont retirées en hiver pour éviter les dommages par les glaces. Seuls des travaux récents réalisés par le professeur Urs Neumeier depuis 2010 dans le cadre d'un projet avec le ministère de la Sécurité publique du Québec ont permis de mesurer les vagues sur des cycles annuels complets à quelques sites avec des mouillages de profileurs de courant acoustiques à effet Doppler (*Acoustic Doppler Current Profilers, ADCP*). Par contre, la longueur de ces séries de mesures demeure trop courte pour les analyses climatiques.

La simulation des vagues dans l'EGSL comporte donc des défis. La période hivernale nécessite la prise en compte des interactions vagues-glace dans les modèles de vagues, un domaine de recherche complexe toujours en développement. En plus de l'aspect thermodynamique de la formation et de la fonte de la glace de mer, celle-ci est influencée mécaniquement par les vagues qui la fragmentent en morceaux dont la taille est fortement déterminée par son épaisseur et les conditions de vagues présentes. En retour, la glace de mer influence elle-même les vagues durant leur génération et leur propagation (Dumont et al., 2011). Pour ces raisons, les professionnels qui travaillent en génie côtier au Québec ont traditionnellement utilisé des méthodes d'évaluation du climat de vagues qui évitent de modéliser explicitement l'impact de la glace de mer sur les vagues. En effet, même si les conditions de vent les plus sévères surviennent généralement en hiver (Hundecha et al., 2008; Wang et al., 2006), ils considèrent la présence de glace près de la côte comme une protection contre l'action des vagues. Ainsi, la période hivernale n'était simplement pas prise en considération pour l'évaluation du climat de vagues avec une période d'englacement définie arbitrairement (Ouellet and Drouin, 1991). Cette approche était peut-être justifiable il y a quelques décennies, mais les réductions récentes du couvert de glace de l'EGSL (Galbraith et al., 2013; Johnston et al., 2005; Savard et al., 2009) rendent

cette approche discutable aujourd'hui. Elle pourrait mener à des sous-estimations du climat de vagues et même engendrer des conséquences graves pour la sécurité publique et l'intégrité des structures côtières (Komar et al., 2009; Ouellet and Drouin, 1991).

Une première tentative d'intégration de l'influence de la glace de mer dans un modèle de vagues pour l'EGSL a déjà été réalisée. En effet, le modèle opérationnel de vagues d'Environnement Canada pour l'EGSL (utilisé pour les prévisions météorologiques marines) développé par Jacob et al. (2002) à partir de la version PROMISE du modèle spectral WAM (Komen et al., 1994) est utilisé depuis 2002 et il intègre l'influence des courants et de la glace de mer sur les vagues (influence de la glace implémenté en 2003). Pour ce faire, il s'alimente des sorties du modèle océanique de l'EGSL (Saucier et al., 2003) opéré à l'Institut Maurice-Lamontagne de Pêches et Océans Canada. Toutefois, son utilité demeure limitée pour la caractérisation du climat de vagues de l'EGSL (principalement les extrêmes). En effet, tout juste 10 ans de données sont disponibles et la validation récente du modèle par Neumeier et al. (2013) a démontré qu'il surestime de manière importante les hauteurs de vagues dans le golfe, mais il est meilleur dans l'estuaire. Le principal problème est qu'il est forcé par des vents à 40 m alors que les formulations physiques pour la génération des vagues implémentées dans WAM ont été développées pour des vents à 10 m (Neumeier et al., 2013).

Dans un contexte de changements climatiques (IPCC, 2013), il devient également légitime de se demander comment le climat de vagues de l'EGSL évoluera au cours du 21^e siècle. L'analyse de longues séries de vagues mesurées au cours des dernières décennies a déjà démontré l'existence d'une tendance au changement dans le climat de vagues de l'Atlantique et du Pacifique Nord (Komar et al., 2009). Pour le futur, autant des changements du climat de vagues global que des climats de vagues régionaux sont envisagés (Weisse and von Storch, 2010). Contrairement à la hausse projetée du niveau de la mer qui présente un degré de certitude relativement important, l'évolution future du climat de vagues d'une région donnée est entourée d'importantes incertitudes (Nicholls et al., 2008). En effet,

la sévérité du climat de vagues pourrait autant être appelée à augmenter qu'à diminuer avec les changements climatiques, dépendamment de la région considérée (Hemer et al., 2013; Wang and Swail, 2006b). En fait, pour évaluer l'influence possible des changements climatiques sur le climat de vagues d'une région donnée, des simulations de vagues doivent nécessairement être réalisées en forçant un modèle de vagues avec les vents de modèles climatiques, car aucune sortie sur les conditions de vagues futures n'est produite par les modèles climatiques actuels (Wang and Swail, 2006a).

L'érosion côtière, les dommages aux bâtiments et aux infrastructures côtières et les coûts d'entretien des ouvrages de protection côtière sont déjà des problèmes auxquels font face les communautés de l'EGSL et qui pourraient s'intensifier avec les changements climatiques (Bernatchez and Dubois, 2004). En plus de la hausse du niveau marin et de la réduction du couvert de glace saisonnier, l'augmentation possible de la fréquence des conditions de vagues extrêmes est également un facteur important à considérer (Forbes et al., 2004; Savard et al., 2009). Toutefois, aucune étude n'a encore permis d'estimer l'évolution future du climat de vagues régional de l'EGSL. Ainsi, alors que la tendance à la hausse du niveau de la mer est généralement considérée dans les études de génie côtier ou de géomorphologie côtière (Ewing, 2009; Knuuti, 2002), rien ne permet, à ce jour, d'y intégrer également l'évolution possible du climat de vagues de l'EGSL.

C'est dans ce contexte que le MTQ a mandaté les professeurs Urs Neumeier et Dany Dumont de l'ISMER afin de réaliser la modélisation du régime des vagues de l'EGSL pour l'adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques (Neumeier et al., 2013). L'objectif principal du projet est d'arriver à mieux évaluer le climat de vagues actuel de l'EGSL et d'anticiper comment il pourrait évoluer au cours du 21^e siècle. Cela nécessite le forçage d'un modèle de vagues sur plus d'un siècle avec des données de vents de modèles atmosphériques, dont le Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC, Caya and Laprise, 1999; Music and Caya, 2007) opéré par Ouranos. Le projet prévoit l'utilisation de GENER pour la simulation des vagues afin de maintenir des temps de calcul raisonnables. Toutefois,

cela nécessite que GENER soit validé et idéalement adapté au forçage par des champs de vents bidimensionnels de modèles atmosphériques. L'étude de l'évolution future du climat de vagues à partir d'un modèle de vagues paramétrique est réalisable et a déjà été accomplie par Sutherland and Wolfe (2002) pour les côtes de l'Angleterre. Ils avaient alors utilisé le modèle de vagues paramétrique HINDWAVE (Hawkes, 1987).

1.2 Objectifs du projet de maîtrise

Le but principal de ce projet de maîtrise est d'améliorer le modèle paramétrique GENER afin de mieux caractériser le climat de vagues en eaux profondes de l'EGSL et d'évaluer comment il pourrait évoluer dans un contexte de changements climatiques. Pour y arriver, le projet comporte deux objectifs principaux à atteindre qui ont chacun une série d'étapes de réalisations :

Objectif 1 : Améliorer et valider le modèle paramétrique de vagues GENER.

- a) Intégrer de nouvelles formules de fetch à GENER ;
- b) Développer une méthode pour permettre le forçage de GENER à partir d'une grille de vents marins issus de modèles atmosphériques ;
- c) Valider GENER avec des mesures de vagues pour différents sites de l'EGSL (avec l'emphase sur les évènements de vagues extrêmes) et établir les limites d'applicabilité de GENER ;
- d) Déterminer les formules de fetch les plus adaptées à l'EGSL.

Objectif 2 : Évaluer le climat de vagues actuel de l'EGSL et déterminer comment il pourrait évoluer au cours du 21^e siècle.

- a) Évaluer le climat de vagues actuel de l'EGSL avec GENER à partir de données de vents de réanalyse ;

- b) Évaluer l'évolution du climat de vagues de l'EGSL au cours du 21^e siècle en simulant les vagues avec GENER à partir de données de vents de modèles climatiques.

La réalisation de l'objectif 2 nécessite l'étude de la couverture de glace saisonnière de l'EGSL et son influence sur les vagues. C'est justement le sujet de recherche d'Eliott Bismuth, étudiant à la maîtrise en océanographie à l'ISMER. C'est donc en collaboration avec lui que la réalisation de cet objectif est possible.

1.3 Travail complété dans le cadre de la maîtrise

La réalisation des deux principaux objectifs du projet de maîtrise s'est surtout faite par la rédaction de deux articles scientifiques (chacun répondant à un objectif). Toutefois, du travail a été réalisé en amont du premier article. Dans un premier temps, de nouvelles formules de fetch ont été ajoutées au code source C++ de GENER (décrites à l'Annexe A) qui avait préalablement été mis à jour par James Caveen et Urs Neumeier. Par la suite, les performances du modèle paramétrique de vagues ont été comparées au modèle de vagues spectral SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*, Booij et al., 1999; Ris et al., 1999) pour une situation idéalisée (Annexe B). Cela visait à s'assurer que la manière dont GENER traite la croissance et la décroissance des vagues en réponse à des variations temporelles des vents est adéquate.

L'article I, *Wave climate evaluation in the Gulf of St. Lawrence with a parametric wave model*, présente l'algorithme de prétraitement du vent et l'utilise pour caractériser, avec GENER, le climat passé de l'EGSL (sans considération de la glace de mer). Cet algorithme a été développé pour calculer une série temporelle de vecteurs vents représentatifs pour alimenter GENER à partir de champs de vents bidimensionnels issus de modèles atmosphériques. Le code source MATLAB de l'algorithme de prétraitement du vent est présenté à l'Annexe C. Il est utilisé avec des champs de vents de réanalyse pour simuler les vagues avec GENER. Les sorties de GENER sont alors comparées à des mesures

de vagues dans l'EGSL afin de valider le modèle paramétrique et déterminer la formule de fetch la plus appropriée pour la simulation des vagues dans la région. Les vagues de l'EGSL sur la période 1979-2012 sont finalement simulées avec GENER (sans considération de la glace de mer) et une méthode automatique d'ajustement d'une distribution des valeurs extrêmes est appliquée aux séries temporelles de vagues. Cela permet de caractériser la variabilité spatiale des conditions de vagues extrêmes dans l'EGSL.

L'article II, *Recent wave climate and expected future changes in the seasonally ice-infested waters of the Gulf of St. Lawrence, Canada*, présente pour sa part les résultats de l'évaluation du climat de vagues du passé récent de l'EGSL et sa possible évolution au cours du 21^e siècle. La méthode développée pour l'article I est essentiellement reprise pour la simulation des vagues dans l'EGSL sauf que l'influence de la glace de mer sur les vagues est maintenant prise en compte de manière empirique. Pour ce faire, les séries temporelles de vagues produites par GENER sont atténuées en post-traitement relativement à la concentration de glace simulée par le modèle océanographique régional de l'EGSL. Cette approche empirique d'atténuation des vagues par la glace a essentiellement été développée par l'étudiant Eliott Bismuth durant sa maîtrise (également codirigé par Urs Neumeier et Dany Dumont). En plus des données de réanalyse, des sorties de modèles climatiques régionaux sont utilisées en entrée pour la simulation des vagues avec GENER afin d'estimer l'évolution future du climat de vagues de l'EGSL dans un contexte de changements climatiques.

CHAPITRE II

ÉVALUATION DU CLIMAT DE VAGUES DU GOLFE DU ST-LAURENT AVEC UN MODÈLE DE VAGUES PARAMÉTRIQUE

Benoit Ruest, Urs Neumeier, Dany Dumont, Adrien Lambert

2.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DE L'ARTICLE I

Un nouvel algorithme de prétraitement du vent permet le forçage d'un modèle paramétrique de vagues (GENER) avec des vents marins provenant de modèles atmosphériques. Les vents marins de MERRA pour le golfe du Saint-Laurent (GSL) sont ajustés à partir de comparaisons avec des mesures de vents avant de réaliser des simulations de vagues dans le GSL avec GENER pour la période 1979-2012. La comparaison des distributions de vagues simulées avec des mesures de vagues sur le GSL montre une concordance raisonnable. L'exécution de GENER sur une grille régulière permet l'évaluation du climat de vagues régional en eaux profondes avec des temps de calculs minimaux. Les hauteurs de vagues extrêmes sont estimées avec des distributions Pareto généralisées et un atlas régional des vagues extrêmes est produit. La même approche pourrait aussi être utilisée pour évaluer le climat de vagues futur du golfe du Saint-Laurent en forçant GENER avec des vents de différents scénarios de modèles climatiques.

Cet article intitulé *Wave climate evaluation in the Gulf of St. Lawrence with a parametric wave model* a été corédigé par moi-même ainsi que par les professeurs Urs Neumeier et Dany Dumont et le stagiaire postdoctoral Adrien Lambert. Il a été publié dans

les comptes rendus de la conférence internationale *Coastal Dynamics 2013* (Ruest et al., 2013). La conférence s'est tenue à Arcachon (France) en juin 2013 et j'y ai présenté oralement le contenu de l'article. Comme premier auteur, j'ai fait la recherche documentaire sur l'état de l'art, j'ai ajouté de nouvelles paramétrisations au modèle de vagues GENER, j'ai fait l'acquisition et le traitement des données de modèles atmosphériques, j'ai développé la méthode et j'ai rédigé l'article. En tant que deuxième auteur, Urs Neumeier a fourni l'idée de départ pour orienter les travaux de recherche, a développé des outils MATLAB complémentaires à GENER et a contribué à la révision de l'article. Dany Dumont et Adrien Lambert ont, pour leur part, participé activement à la révision de l'article et ont nourri les discussions tout au long des travaux de recherche. J'ai également présenté une partie de l'article sous forme d'une affiche scientifique au colloque anniversaire de Québec-Océan ayant pour thème « L'heure juste sur la santé des océans » en novembre 2012.

Mots-clés : *climat de vagues, analyse des valeurs extrêmes, modèle paramétrique de vagues, GENER, golfe du Saint-Laurent.*

2.2 WAVE CLIMATE EVALUATION IN THE GULF OF ST. LAWRENCE WITH A PARAMETRIC WAVE MODEL

2.2.1 Abstract

A new wind preprocessing algorithm allows the forcing of a parametric wave model (GENER) with offshore wind data from atmospheric models. MERRA offshore winds for the Gulf of St. Lawrence (GSL) are adjusted from comparisons with wind measurements before performing long-term (1979-2012) wave hindcasts on the GSL using GENER. Comparisons of simulated wave distributions with wave measurements on the GSL show a reasonable fit. Executing GENER on a regular grid allowed an evaluation of the regional deep water wave climate for the GSL with minimal computing time. Extreme wave heights are estimated

with the generalized Pareto distribution and a regional extreme waves atlas is produced. The same approach could also be used to evaluate the future wave climate in the GSL by forcing GENER with winds from different scenarios of climate models.

Keywords: wave climate, extreme value analysis, parametric wave model, GENER, Gulf of St. Lawrence.

2.2.2 Introduction

Like other regions of the world, many shoreline sections of the Gulf of St. Lawrence (GSL), Canada, have critical coastal erosion problems that are increasing with climate change (Savard et al., 2009). Therefore, understanding coastal dynamics, designing coastal structures, decision-making for public safety and application of integrated coastal zone management all require information about the wave climate and its future trends. Although research has been done to establish the global trends in wave climate, regional analyses are still required (Weisse and von Storch, 2010). Wave climate can only be characterized if sufficiently long datasets are available. Extreme values analyses are then used to extrapolate long-term wave statistics beyond 2-3 times the length of the available wave time series (Resio et al., 2002), but at the price of increasing uncertainties (Jonathan and Ewans, 2013). Hence, to achieve a better characterization of the wave climate while minimizing uncertainties, long-term time series are required. Climate models do not directly produce wave outputs (Wang and Swail, 2006a) and wave measurements are scarce. Obtaining multi-decadal wave model simulations thus constitute the best avenue to achieve wave climate studies.

Despite the ability of spectral models to represent wave generation, dissipation and non-linear processes in complex environments (Holthuijsen, 2007), parametric wave models based on wind-fetch formulas have the great advantage of being simple and fast, which makes them still very useful for coastal engineers wanting to rapidly obtain reliable wave

climate estimations in deep water (Goda, 2003). These models calculate the significant wave height H_s and the significant period T_s (or the peak period T_p) at a point of interest with minimum computing time and input data (Etemad-Shahidi et al., 2009), therefore representing a valuable solution to perform wave hindcasts over long periods.

In this study, we use and improve this approach to simulate waves in the GSL based on reanalysis wind data. The GSL generally has a winter ice cover but wave-ice interactions are not taken into account in these simulations. Extreme values analyses are then performed to estimate extreme H_s and thus characterize the regional wave climate of the GSL. This approach can easily be employed to evaluate future wave climate by using climate model wind outputs.

2.2.3 Methodology

2.2.3.1 The parametric wave model GENER

GENER is a parametric wave model that was developed to predict waves (H_s , T_s and direction) at one deep water location using wind records from a nearby weather station (e.g. Desjardins and Ouellet, 1984). The only required inputs are a time series of 10-m wind (velocity U_{10} and direction) and the computed weighted fetches for 16 directional sectors around the point of interest following the Saville (1954) method (Appendix A) recommended by OCDI (2002). The main assumptions made when using GENER is that the single wind input at each time step represents the global wind conditions over the wave generation domain and that wave generation only occurs in the direction of the wind.

GENER smoothes wind directions in time using a 9 hours moving average to make time blocks with wind from the same sector. At time step n of a time block, a wind-fetch formula based on the effective fetch of the sector is applied to compute the largest H_s and T_s obtained from all the possible combinations of duration and time-averaged wind velocity (step n , steps

$n - 1$ to n , ..., steps 1 to n). To take into account the previous wave conditions, a history of H_s and T_s of previous time blocks is kept in memory and a linear decay of these H_s and T_s is applied between time steps, based on the time that waves of period T_s take to cover the fetch distance in deep water. H_s is then computed as a summation of wave energy (proportional to square of H_s) over present and past time blocks while T_s and wave direction are assumed to be the ones from the time block with the largest contribution to the global wave energy. The biggest advantage of GENER over recent spectral wave models is its capacity to compute wave time series over many decades at one location within a few seconds.

In the original version of GENER, two wind-fetch formulas were implemented in the model, which are the methods presented in the Shore Protection Manual of 1977 (SPM77, CERC, 1977) and 1984 (SPM84, CERC, 1984). For the present study, other wind-fetch formulas were added to GENER source code to compare different parametric methods and to determine the most suitable formula for the GSL. The newly implemented wind-fetch formulas are the one presented in the Coastal Engineering Manual (CEM, Resio et al., 2002), the JONSWAP method (Hasselmann et al., 1976) and the Wilson method (Wilson, 1965).

2.2.3.2 Using GENER with wind fields from atmospheric models

Wind data obtained from onshore weather stations are often used for estimating waves with parametric wave models in coastal engineering applications. However, this can be quite tricky because there are known discrepancies in both direction and velocity of wind depending, for example, on whether it blows over water or over nearby land areas. Empirical adjustment factors are therefore generally applied to onshore wind data (Resio et al., 2002). Offshore wind measurements are not as abundant as they are onshore, but atmospheric models represent a suitable alternative (Swail and Cox, 2000). In the present study, a new algorithm is developed in order to use GENER with wind data from atmospheric models instead of the classic approach.

Atmospheric model wind data

The North American Regional Reanalysis (NARR, Mesinger et al., 2006) and the Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA, Rienecker et al., 2011) were chosen as two wind datasets covering the GSL for the period 1979-2012. These reanalysis datasets were respectively retrieved from NOAA National Operational Model Archive and Distribution System and from NASA Modeling and Assimilation Data and Information Services Center. NARR is a regional reanalysis with a 0.3° spatial resolution and 3-hourly U_{10} while MERRA is a global reanalysis with a grid resolution of $1/2^\circ$ latitude \times $2/3^\circ$ longitude and hourly U_{10} . MERRA proved to be more reliable than NARR to represent wind conditions over the area, despite its lower spatial resolution which remains reasonably sufficient for wave hindcasting in the GSL with a parametric wave model (Figure 1). This could possibly be explained by its atmospheric data assimilation system GEOS-5 (Goddard Earth Observing System 5) which aims to improve the reanalysis accuracy (Gunturu and Schlosser, 2012) and also by its better temporal resolution. Therefore, only results obtained from MERRA wind data are presented hereinafter.

Validation and calibration of wind data

In order to characterize the validity of the U_{10} components from MERRA for the GSL, 5-m wind measurements from the 3-m discuss buoy C45138 (measuring also waves, 49.5°N , 65.8°W , Environment Canada and Fisheries and Oceans Canada) located 30-km offshore from Mont-Louis and 7.6-m wind measurements from Magdalen Islands airport weather station (47.4°N , 61.8°W , World Meteorological Organization (WMO) station 71710) are used as reference (Figure 1). These datasets were respectively downloaded from Fisheries and Oceans Canada Integrated Science Data Management website and from Environment Canada National Climate Data and Information Archive website. Data at the buoy is available from 1991 to 2012 generally for the April-November period, while data at the

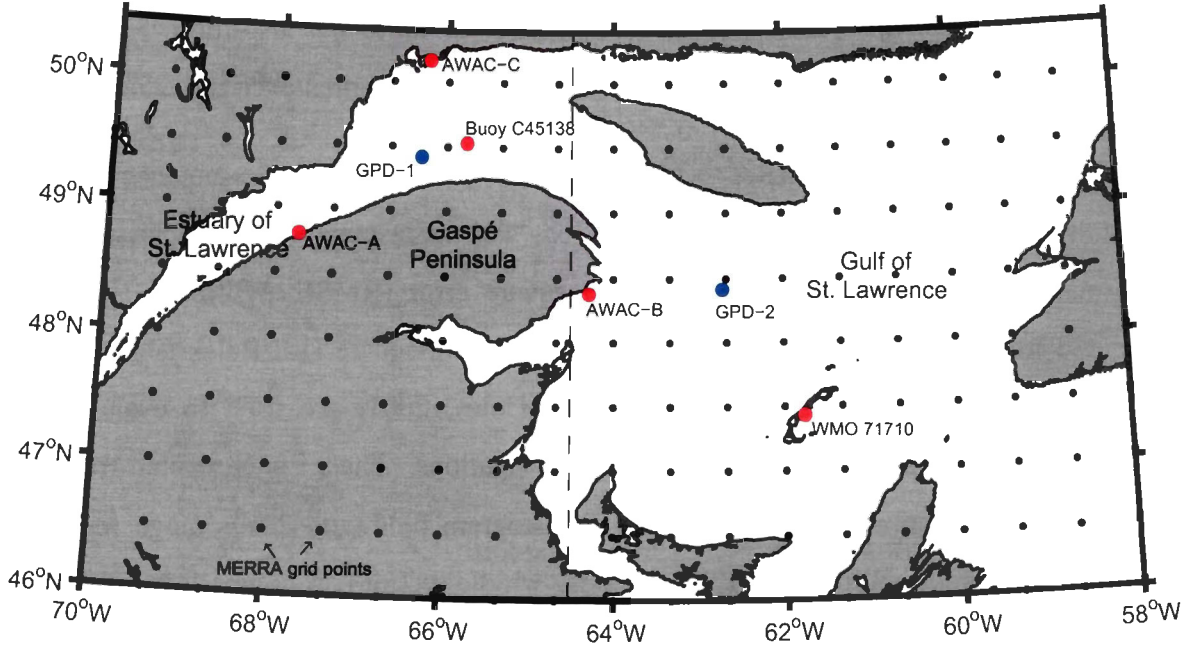


Figure 1: Map of MERRA grid points over the GSL, localization of the different validation datasets (red), the two GPD validation sites (blue) and the delimitation of both U_{10} correction factors application domain (dashed line).

weather station is available from 1994 to 2012. Validation of MERRA U_{10} is undertaken at the nearest grid point for both validation sites.

Wind velocities at height z (in m) are adjusted to represent U_{10} using the logarithmic profile recommended by Kamphuis (2010):

$$U_{10} = U_z \left(\frac{10}{z} \right)^{1/7}$$

where U_z (in m/s) is the wind velocity at elevation z . To adjust overland wind velocities from WMO station 71710 and make them representative of overwater winds, the method proposed by Resio and Vincent (1977) is applied. It proposes a correction factor dependent of the overland wind velocity (larger for low wind velocity). However, the recommendation from

Bishop et al. (1992) which limits the lowest correction factor to 1 is also followed to make sure that the adjusted overwater winds are never weaker than original overland winds.

The validation of MERRA offshore U_{10} is done for both instantaneous wind conditions and overall long-term wind distributions. For the instantaneous comparisons with wind measurements, the bias and root mean square error (RMSE, Willmott, 1982) are computed for the wind speed and direction while the chi-square (χ^2 , Balakrishnan et al., 2013) and quantile diagnostic plots (Q-Q plot, Coles, 2001) are used to evaluate the accuracy of the reanalysis for long-term wind distributions. The χ^2 is computed from the given probabilities in each histogram bin (15 histogram bins with 2 m/s range for wind speed and 16 histogram bins with 22.5° range for wind direction). A comparison is better if the bias is closer to zero, RMSE is smaller, χ^2 is smaller, and the Q-Q plot is nearer to the diagonal.

2.2.3.3 Wind preprocessing

GENER cannot directly receive a bi-dimensional wind field from an atmospheric model as input, so a new algorithm was developed to compute, at a given time, a representative wind (velocity and direction) for wave generation at one location from gridded wind data. The algorithm, described below, is applied to wind data from atmospheric models before executing GENER.

Given a bi-dimensional wind field at a time step, not every wind vector would necessarily generate waves that would propagate toward the target location where waves must be computed. The location could also be sheltered from waves coming from certain directions. We thus require the algorithm to spatially average wind vectors influencing wave conditions at the location. To achieve this, 16 directions are considered. For each direction, the area where wind could potentially influence wave conditions at the location is defined as a 90° sector centered on the direction and having a radius equal to the length of the effective

fetch in that direction, but without any land region. At each time step and for each direction, an “averaged wind vector” is constructed with direction from the mean wind vector and magnitude from the root mean square (RMS) of wind velocities, using all the wind vectors within the selection area (RMS is chosen over an arithmetic average to give more weight to high wind velocities in the calculation of the “averaged wind vector”). If the angle between the “averaged wind vector” and the direction is superior to 90° (wind blowing away from the location), the wind velocity for this direction is set to 0. Finally, from the 16 “averaged wind vectors”, the one with the largest magnitude is selected as input for GENER at the given time step.

2.2.3.4 Validation of GENER

Validation wave data

GENER validation is performed by comparing its outputs with recent wave datasets obtained from Nortek current profilers (AWAC-AST 600 kHz) at three locations within the lower St. Lawrence Estuary (SLE) and GSL (Figure 1). Wave parameters H_{m0} (equivalent to H_s), T_s and mean direction are available offshore of Saint-Ulric (AWAC-A, 48.8°N , 67.7°W , 32-m depth) and Sept-Îles (AWAC-C, 50.2°N , 66.2°W , 28-m depth) from May 2010 to October 2012, and offshore of Cap d’Espoir (AWAC-B, 48.4°N , 64.3°W , 38-m depth) from October 2010 to October 2012. Although these datasets cover the winter season, only data from April to December is used to perform GENER validation in order to avoid taking in consideration waves influenced by the likely presence of ice.

These datasets are supplemented by wave data from buoy C45138 (Figure 1) at 49.5°N , 65.8°W (335-m depth). This buoy produced non-directional spectral wave parameters from 1991 to 2012, April to November only (downloaded from Fisheries and Oceans Canada Integrated Science Data Management website). Wave measured at this location should theoretically not be influenced by wave-bottom interactions. This dataset

allows the validation of GENER both on short-term wave conditions or long-term wave distributions.

Validation criteria

H_s are computed with GENER at each measurements sites location using the wind preprocessing algorithm and corrected MERRA U_{10} data. Validation is undertaken through the same statistical proxies as used for wind (bias, RMSE, χ^2 and Q-Q plot). 20 histogram bins with 0.5 m range are used for χ^2 . Since the main objective is to use GENER outputs for extreme wave heights analysis, Q-Q plots are particularly relevant to evaluate the similarity between measured and simulated wave distributions, especially for the highest wave heights.

Extreme wave analysis

The extreme wave analysis of stationary time series ought to be done through extreme value theory (Mathiesen et al., 1994). The most used methods (Teena et al., 2012) are the generalized extreme value distribution (GEV) and generalized Pareto distribution (GPD), both described in Coles (2001). Both distributions need to be fitted to a sample of independent extreme events by maximum likelihood estimation. The sampling of these independent extreme events is done by the block maxima method (only the maximum values over a defined period of time are used) for the GEV whereas it is achieved by the Peak Over Threshold method (POT) for the GPD (POT selects the peak of each independent extreme event greater than a pre-set threshold). Thus, when fitting the extreme value distribution, the GPD method have the advantage to take into account all independent storm events larger than the specified threshold instead of the GEV whose sampling method certainly omits some extreme events if more than one occur during a block of time (Coles, 2001; Holthuijsen, 2007; Teena et al., 2012; Jonathan and Ewans, 2013). Therefore, we favoured the GPD approach for the present study.

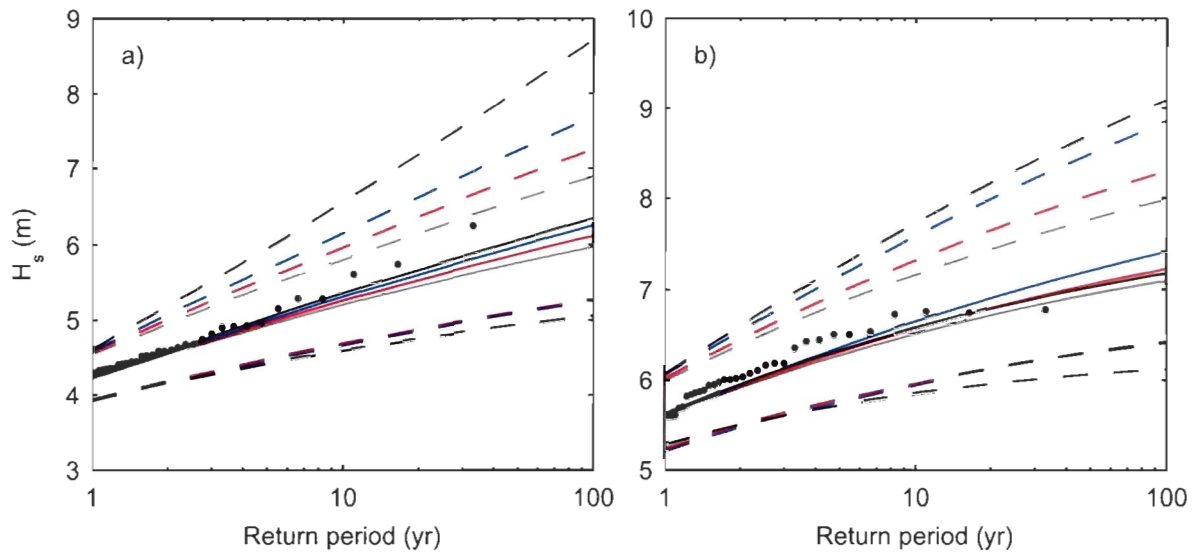


Figure 2: Fitted GPDs (solid lines) from the POT sampling (black dots) and 95% confidence intervals (dashed lines) with thresholds selection from percentile 90% (gray), 93% (red), 96% (blue) and 99% (black) at sites GPD-1 (a) and GPD-2 (b).

Application of the POT method requires the determination of a threshold (minimum H_s value) and a minimum time lag between two consecutive events in order to ensure statistical independence of sampled events. Threshold selection is generally difficult and despite different attempts to overcome this step in extreme value analysis, graphical threshold selection methods are still the standard (Jonathan and Ewans, 2013). It involves a balance between bias and variance in the GPD fit (Coles, 2001). Mazas and Hamm (2011) recommend using a graphical method for the threshold selection based on the GPD shape parameter and modified scale parameter. This method is applied for threshold selection at buoy C45138 site for measured and simulated wave height but it cannot easily be applied for threshold selection over a large number of locations like the whole GSL. Caires and Sterl (2005) achieved global extreme wave heights estimation from a POT analysis with a spacially varying threshold selection method based on the 93% percentile of the whole dataset. Thus, a sensitivity analysis on threshold selection was performed on simulated waves for the period of 1979-2012 at multiple locations of the GSL. It showed that the 93% percentile of the whole H_s time series is generally an adequate threshold value for extreme

wave analysis with a reasonable balance between bias and variance for the fitted GPD. For example, Figure 2 shows that threshold selection has little influence on the fitted GPDs at locations GPD-1 and GPD-2 (Figure 1). So, the same approach for threshold selection as Caires and Sterl (2005) is followed in the present study when performing extreme wave heights analyses on the GSL for the 1979-2012 period. In the absence of weather variability data over the GSL and the SLE, a minimum 48-h time lag between successive POT is taken for the present study as recommended by Mathiesen et al. (1994) and Teena et al. (2012).

2.2.4 Results

2.2.4.1 MERRA 10-m wind validation and correction for the Gulf of St. Lawrence

The comparison of adjusted U_{10} measured at buoy C45138 with MERRA U_{10} output at the nearest grid point (49.5°N, 66.0°W) shows that both are generally in phase but that the reanalysis globally underestimate the stronger U_{10} speeds (Figure 3a) while having a good agreement regarding directions (Figure 3b). The underestimation of U_{10} by MERRA is confirmed by the Q-Q plot (Figure 3d).

By applying a correction factor of 1.30 to MERRA U_{10} , the agreement with the wind measurements at buoy C45138 is improved both for individual wind events comparisons (Figure 3c) and for quantiles distribution comparisons (Figure 3d). Table 1 shows that the bias, the RMSE and χ^2 are effectively lowered with the application of the correction factor.

Table 1: Comparison of MERRA wind data with wind measurements ($U_{10} > 10$ m/s) on the GSL at buoy C45138 and WMO station 71710.

	Buoy C45138 - MERRA			Station 71710 - MERRA			
	Wind speed at 10 m		Direction	Wind speed at 10 m		Direction	
Correction factor for MERRA	1.00	1.30	-	1.00	1.15	1.30	-
Bias (m/s or °)	-3.04	-0.30	-3.17	-1.84	0.33	1.17	3.49
RMSE (m/s or °)	3.56	2.32	26.54	2.86	2.50	3.03	23.26
χ^2	0.48	0.06	0.01	0.28	0.27	1.07	0.02

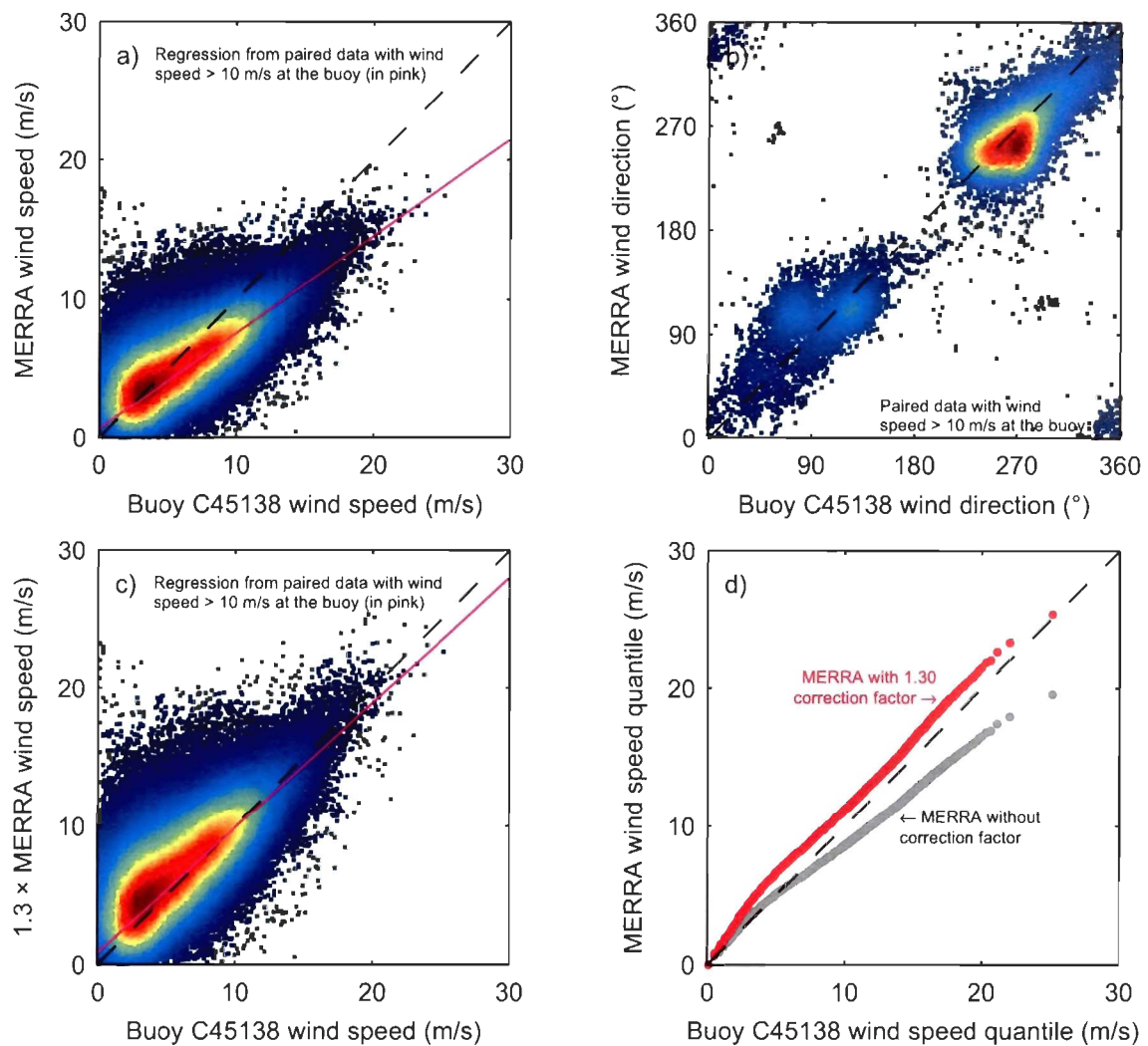


Figure 3: Wind comparison between MERRA and buoy C45138 U_{10} with relative density scatter plots (dark red: highest, dark blue: lowest): a) original MERRA U_{10} , b) MERRA U_{10} direction, c) MERRA U_{10} with a 1.30 correction factor. d) Q-Q plot of buoy U_{10} and MERRA U_{10} (original and with a 1.30 correction factor).

The same 1.30 correction factor is also applied to U_{10} at nearest MERRA grid point (47.5°N, 62.0°W) from the WMO station 71710 and the corrected U_{10} are compared with the adjusted U_{10} at the weather station. Figure 4a shows that the 1.30 correction factor seems adequate but the Q-Q plot (Figure 4d) illustrates that globally, it leads to an overestimation of U_{10} quantiles distribution. Table 1 indicates that there is effectively a positive bias between datasets with the 1.30 correction factor while the bias is negative if no correction factor is

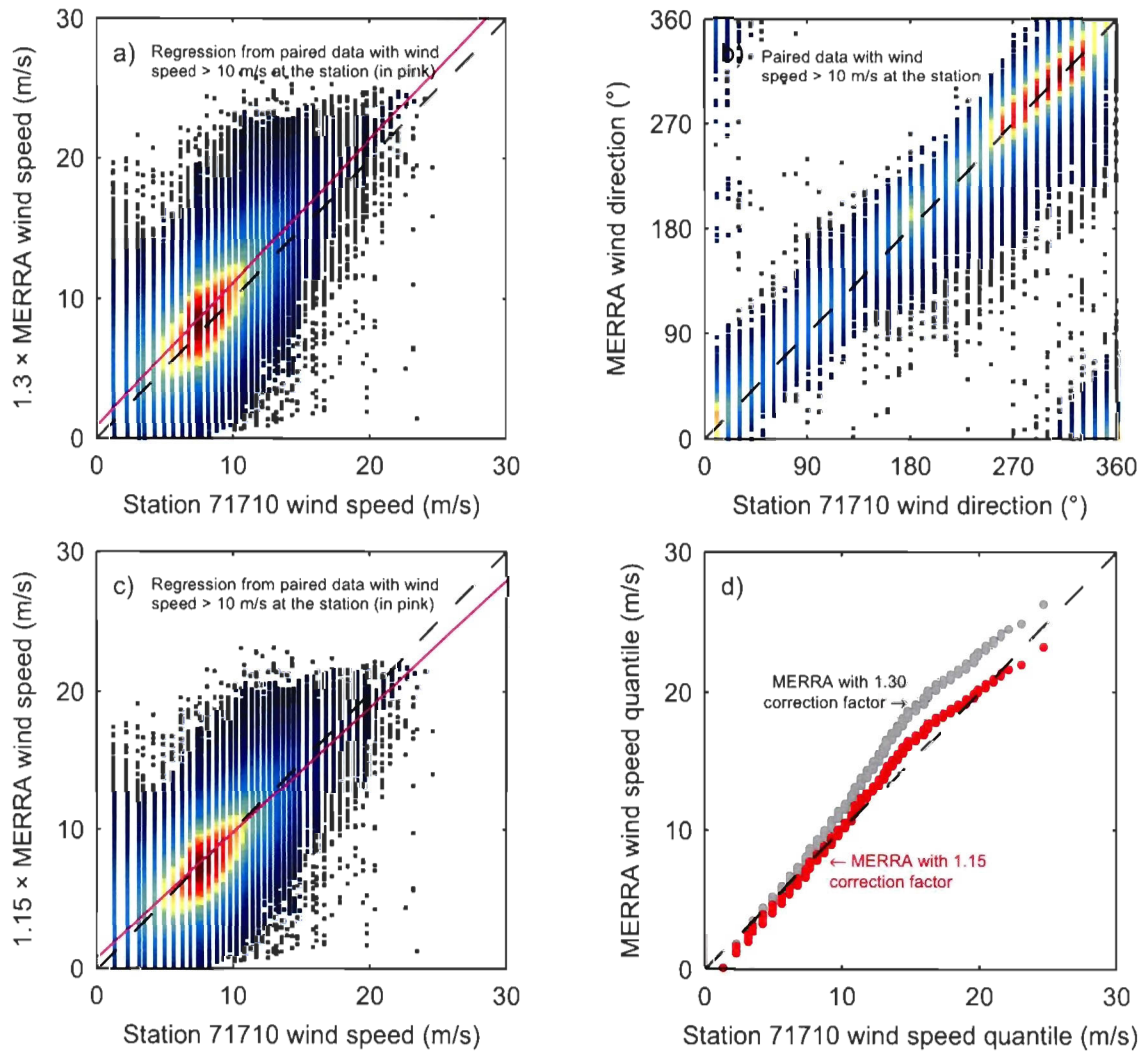


Figure 4: Wind comparison between MERRA and WMO station 71710 U_{10} with relative density scatter plots (dark red: highest, dark blue: lowest): a) MERRA U_{10} with a 1.30 correction factor, b) MERRA U_{10} direction, c) MERRA U_{10} with a 1.15 correction factor. d) Q-Q plot of WMO station 71710 U_{10} and MERRA U_{10} (with 1.30 and 1.15 correction factors).

applied to MERRA U_{10} . The use of a correction factor of 1.15 instead of 1.30 is more suitable since it improves the fit of the Q-Q plot (Figure 4d) and the values of the different statistical tests (Table 1).

Validations of MERRA offshore U_{10} showed that the reanalysis tends to underestimate the wind velocity over the GSL (at least at both validation sites). Empirical adjustment factors had to be used to make reference wind datasets theoretically equivalent to U_{10} speed, but nevertheless, MERRA underestimation appears to be larger in the northwestern sector of the GSL. Given MERRA spatial resolution, this might be explained by the closer location of the shoreline which could potentially affect offshore wind estimation in the surface layer within MERRA. The lack of further offshore wind measurements on the GSL and the need of reanalysis offshore U_{10} with minimal bias for the present study constrained us to apply correction factors to MERRA U_{10} based on these results. Therefore, a correction factor is applied to U_{10} depending on the location of the grid point. A 1.30 correction factor is applied to MERRA U_{10} vectors west of 64.5°W (northwestern part of the GSL and SLE) while a 1.15 correction factor is applied to wind data located east of 64.5°W (eastern part of the GSL, Figure 1).

2.2.4.2 Validation of GENER used with MERRA 10 m winds

Comparison of the different wind-fetch formulas

The different wind-fetch formulas implemented within GENER were used to simulate H_s with the corrected MERRA U_{10} and the wind preprocessing algorithm at the four validation sites. The bias, RMSE and χ^2 computed for comparisons with the different validation datasets are presented in Table 2. It shows that for each site, the use of the SPM84 method causes the largest bias (positive), the highest RMSE and the highest χ^2 results in the computed H_s . In addition, Figure 5 shows that the SPM84 largely overestimates H_s quantiles at each validation site. Otherwise, the general performance of the SMP77, JONSWAP, CEM and Wilson methods are relatively similar with comparable values for the bias, RMSE and χ^2 . For all the wind-fetch formulas, AWAC-C site is the one where the weakest results are obtained (Figure 5c). Setting aside this validation dataset, the

CEM method seems to be a good choice for H_s hindcasting on the GSL. Indeed, even if every wind-fetch formulations has poor accuracy on instantaneous H_s estimation (relatively high RMSE), CEM method leads to the lowest bias and χ^2 values at each validation site and best overall visual fits on the Q-Q plots (Figure 5). Therefore, further wave simulations on the GSL with GENER are undertaken using the CEM wind-fetch formulation.

Table 2: Comparison of the different wind-fetch formulas for wave hindcasting with GENER at validation sites.

	AWAC-A			AWAC-B			AWAC-C			C45138		
	Bias (m)	RMSE (m)	χ^2	Bias (m)	RMSE (m)	χ^2	Bias (m)	RMSE (m)	χ^2	Bias (m)	RMSE (m)	χ^2
SPM77	0.09	0.47	0.06	0.22	0.51	0.18	0.08	0.35	0.05	0.15	0.51	0.05
SPM84	0.16	0.58	0.19	0.37	0.74	0.36	0.13	0.49	0.16	0.34	0.76	0.22
JONSWAP	0.06	0.48	0.04	0.15	0.54	0.08	0.03	0.37	0.04	0.14	0.59	0.03
CEM	-0.02	0.47	0.01	0.02	0.53	0.01	-0.05	0.36	0.06	-0.04	0.59	0.02
Wilson	0.07	0.46	0.03	0.17	0.50	0.13	0.05	0.33	0.03	0.09	0.51	0.02

Validation of GENER for wave climate evaluation

Figure 5 shows that H_s distributions evaluated using GENER with the CEM formulation are generally comparable to measured H_s distributions. The best fit is obtained at buoy C45138 (Figure 5d) which corresponds to the longest wave time series and also the less affected by wave-bottom interactions (deepest waters). As shown in Figure 6, the quantiles distribution fit benefits from using the whole validation dataset (1991-2012), instead of a shorter duration set (2010-2012) as available from AWACs. This could possibly be explained by the fact that on the long-term, the low bias in H_s time series computed with GENER may overcome GENER non-negligible accuracy errors (high RMSE). Therefore, maximizing the length of simulated H_s time series with GENER should allow a refinement in wave climate evaluation in deep water on the GSL. The shorter datasets at AWAC sites and consequently the smaller number of high H_s could explain why the highest quantiles of the distributions are not as well represented at these validation sites as it is at site C45138 (Figure 5).

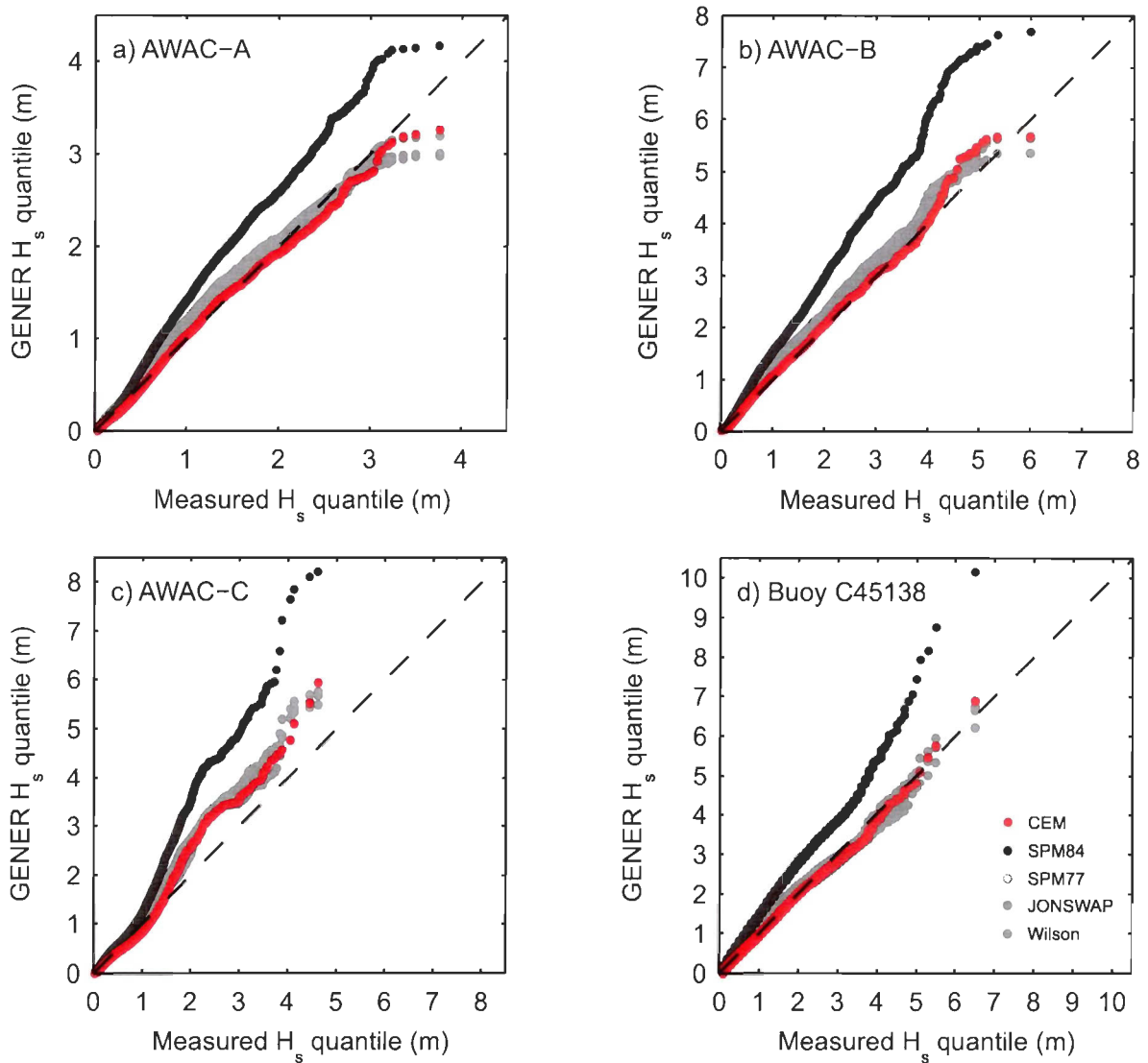


Figure 5: Q-Q plots of measured H_s and simulated H_s with GENER at each validation site: a) AWAC-A, b) AWAC-B, c) AWAC-C and d) buoy C45138.

Figure 7 shows the estimation of extreme wave heights at site C45138 performed with GPD for both reference and simulated H_s time series from 1991 to 2012 (April to November only). A 3.5-m threshold is used for both POT analyses. There are some disparities between the reference and model (determined from GENER outputs) POT data. Nevertheless, the GPD fitted with the model POT H_s is favorably comparable to the GPD fitted with the reference POT H_s . Indeed, considering the significant uncertainties for events with low

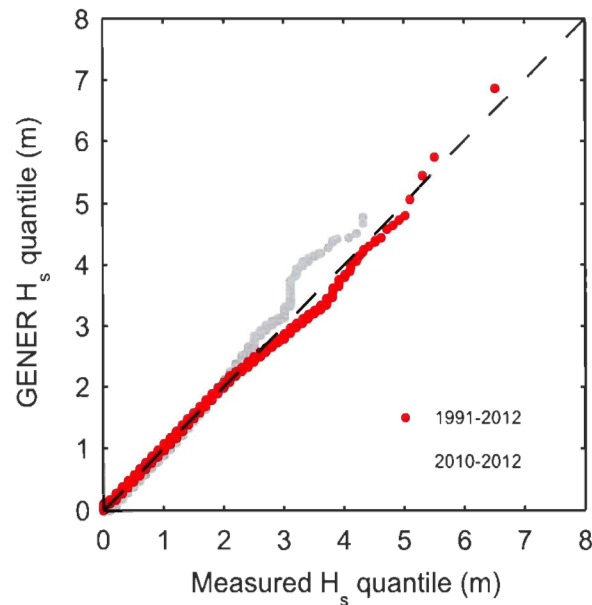


Figure 6: Q-Q plot of simulated H_s with GENER at validation site C45138.

exceedence probabilities and the fact that the model GPD is well within the 95% confidence interval of the reference GPD, extreme wave analysis performed either from GENER output or from wave measurements appear to be equivalent at site C45138. Unfortunately, no additional long-term wave measurements time series are available on the GSL for further validations of extreme wave heights analysis realized with GENER outputs.

2.2.4.3 Wave climate estimation on the Gulf of St. Lawrence with GENER

The extreme wave heights analysis is repeated on a regular 15-km resolution grid over the GSL in order to estimate the wave climate from simulated wave time series for the 1979-2012 period. GENER is used with the CEM formulation and forced with the corrected and preprocessed MERRA U_{10} . A POT analysis is produced for each grid point with a threshold equal to the 93% percentile of the local H_s time series and a GPD is then fitted. Figure 8 presents the spatial distribution of the 50-yr (50 year return period) H_s for the GSL and the SLE. GENER modeled twelve months per year without considering wave-ice interactions

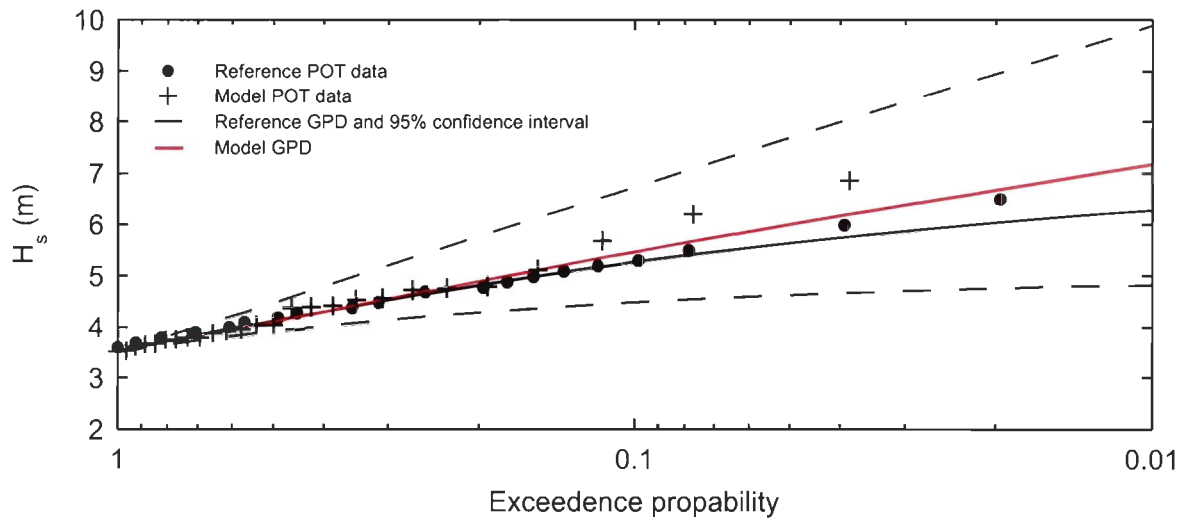


Figure 7: Comparison of extreme wave estimation at C45138 site with GPD from both measured and simulated H_s .

during winter, therefore the real 50-yr H_s may be lower. It is also important to keep in mind that only deep water estimations should be reasonably accurate since wave hindcasting with GENER doesn't include wave-bottom interactions. The 50-m and 100-m bathymetric contour lines give an idea of the potential application domain of GENER on the GSL. Nevertheless, these results computed from the 34 years hindcasts do not present evident inconsistency. 50-yr H_s are larger in the southeastern part of the GSL and smaller in the northwestern part of the GSL and SLE as expected from the geography of the area. When compared to the measured H_s quantiles at the different validation sites (Figure 5) and considering the length of the different datasets, estimated 50-yr H_s appear to be reasonable except at site AWAC-C where it seems overestimated.

2.2.5 Discussion

With the preprocessing wind algorithm, GENER can be forced by overwater bi-dimensional winds fields from atmospheric models, as in the case of spectral wave models. It is an important improvement for the wind input selection over the widespread

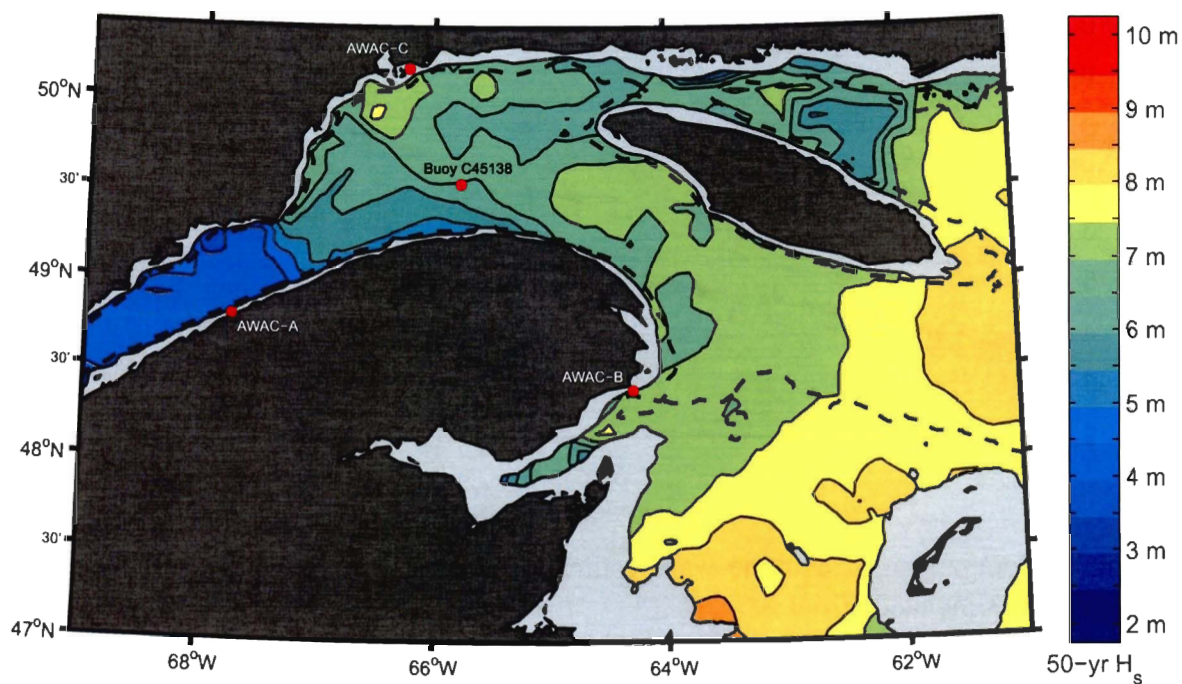


Figure 8: Spatial distribution of estimated 50-yr H_s on the western half of the GSL and SLE computed from wave hindcasts (1979-2012, January to December) with GENER and bathymetric contour lines (black solid lines (filled in light gray): -50 m, black dashed lines: -100 m).

approach of using a nearby onshore weather station wind dataset. When forced by the corrected MERRA U_{10} , GENER leads to acceptable long-term wave heights distributions (compared with available wave measurements) except at site AWAC-C, where GENER seems to overestimate H_s . The AWAC mooring positions (selected for the study of coastal erosion problems) are not optimal for deep water validation of a parametric wave model, especially for AWAC-C, which area presents a complex bathymetry. During the project, wave simulations with the spectral wave model SWAN (Simulating Wave Nearshore) in the coastal regions around AWACs locations demonstrated that wave measured at AWACs are usually refracted and partially damped due to the relatively shallow depths of moorings. Therefore, this constitutes probably the main explanation to the observed overestimation of H_s with AWAC-C dataset.

The different wind-wave formulations procured relatively equivalent unbiased H_s , except for SPM84, which globally leads to overestimation. The adjustment factor for wind velocities based on the surface wind stress included in SPM84 (CERC, 1984), but criticized by Bishop et al. (1992) and Kamphuis (2010), could explain the disagreement of the SPM84 formulation. Although the original CEM method was not recommended by Etemad-Shahidi et al. (2009), in the present study, it proved to give good overall H_s estimation on the GSL and was consequently favored over the other wind-fetch formulations.

MERRA offshore U_{10} needed to be corrected with empirical correction factors estimated from a limited number of offshore validation sites. Regional data from GEM (Global Environmental Multiscale model) from Environment Canada, an integrated forecasting and data assimilation system, could possibly provide more accurate U_{10} forcing for GENER without the need of empirical correction factors. Thus, validation of GENER with GEM winds will be undertaken in future work. In the performed extreme value analyses for the 1979-2012 period, GSL wave climate was assumed stationary even though trends in the regional wave climate could exist. However, Hundedcha et al. (2008) showed that for the 1979-2004 period, changes in extreme annual wind speed on the GSL are generally not significant, so the stationary assumption of the GSL wave climate appears to be reasonable.

The spatial distribution of estimated 50-yr H_s on the GSL (Figure 8) neglects the integration of two important parameters regarding wave climate evaluation on the area. Neither the seasonal ice cover nor swell were taken into account in the wave hindcasts performed with GENER. Assuming an always ice free wave generation domain on the GSL remains conservative for coastal engineering application even more since the average trend lines up toward a global reduction of the seasonal ice cover on the GSL with climate change (Savard et al., 2009). Swell is obviously omitted in wave simulations with a parametric model like GENER which could certainly affect the accuracy of wave climate estimations. Nevertheless, long-term validation of GENER wave outputs with waves measured at buoy

C45138 which are likely to include a swell component is satisfactory. Therefore, swell may not be a major contributor to extreme wave heights, at least, in the northwestern part of the GSL.

Validation of wave climate estimated from GENER output is limited (only 1 site) considering the size of the GSL and its complex geography. As stated earlier, long-term wave measurement on the GSL are scarce. Environment Canada operational wave model for the GSL (Jacob et al., 2002) could potentially provide wave hindcasts on about a decade (2003-2012) for comparisons with GENER outputs. However, Environment Canada model is forced by 40-m winds from GEM (regional) and recent comparisons with wave measurements showed that it is positively biased for H_s . Therefore, to validate GENER with this model as a reference, GENER should either be forced by the same winds (GEM at 40-m) or the reference H_s would have to be corrected after further validations. This could allow a better characterization of GENER performance in evaluating wave climate at deep water sites on the GSL and an extension of its application domain.

2.2.6 Conclusions

Despite the increasing use of spectral wave models, this study shows that parametric wave models like GENER still deserve attention, particularly to achieve regional wave climate evaluation at deep water locations. Even if additional validations in deep water locations are recommended, we consider that GENER produces acceptable long-term wave climate estimations. The method presented in this paper allows computing of multi-decadal wave hindcasts (34 years) and extreme wave analyses on the GSL, resulting in a wave atlas as presented in Figure 8, to be performed within 24-h of computing time on a personal computer. The developed wind preprocessing algorithm makes possible the forcing of GENER with any gridded offshore wind data available on the GSL with a sufficient spatial resolution. It is a valuable progress in the use of parametric wave models since it allows taking in consideration the spatial variability of offshore winds over the wave generation

domain. The combined use of GENER and the wind preprocessing algorithm is therefore an interesting tool for wave climate evaluation.

An ongoing project studies effects of future climate changes on GSL wave climate using GENER and the wind preprocessing algorithm to simulate waves on 50, 100 or even 150 years with past and future wind data from climate models. Different climate scenarios will be analyzed with still reasonable computing time and will consequently reduce uncertainties on future wave climate evaluation for the GSL. Coastal dynamics and coastal engineering studies on the GSL will necessarily benefit from the upcoming results.

2.2.7 Acknowledgments

This project was funded by the Ministère des Transports du Québec and by a master research scholarship from the Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT). A wave monitoring project at ISMER funded by the Ministère de la Sécurité publique du Québec provided AWACs wave measurements for the study. We thank James Caveen (ISMER) for his important contribution in updating GENER source code.

CHAPITRE III

CLIMAT DE VAGUES RÉCENT ET CHANGEMENTS FUTURS ANTICIPÉS DANS LES EAUX SAISONNIÈREMENT ENGLACÉES DU GOLFE DU ST-LAURENT, CANADA

Benoit Ruest, Urs Neumeier, Dany Dumont, Eliott Bismuth

3.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DE L'ARTICLE II

Une nouvelle méthode est développée pour évaluer le climat de vagues dans le golfe du Saint-Laurent (GSL) en considérant l'atténuation des vagues par la glace de mer. Les sorties de glace d'un modèle océanique régional sont utilisées pour atténuer, en post-traitement, les séries temporelles des hauteurs significatives de vagues simulées pour des conditions libres de glace. Des données de réanalyse sont utilisées pour simuler le climat de vagues du GSL avec un modèle paramétrique de vagues pour la période 1981-2010 avec et sans l'atténuation par la glace de mer. Les sorties de deux simulations du Modèle Régional Canadien du Climat sont aussi utilisées pour évaluer comment le climat de vagues du GSL pourrait évoluer au cours du 21^e siècle selon le scénario SRES-A2 d'émission de gaz à effet de serre. Les résultats montrent que la glace de mer aurait réduit les hauteurs significatives de vagues extrêmes sur le GSL d'environ 12% en moyenne sur la période 1981-2010, mais son impact sur le climat de vagues devrait devenir négligeable d'ici 2100, sauf dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Au cours du 21^e siècle, une augmentation des hauteurs significatives de vague extrêmes sur le GSL devrait survenir entièrement à cause de la réduction de la glace de mer. Par contre, peu de changements dans le climat de vagues extrêmes sont anticipés en réponse à

des changements dans le régime des vents sur le GSL. Pour les applications futures en génie côtier, le climat de vagues du GSL devrait être évalué en supposant une mer libre de glace afin d'y intégrer l'impact probable des changements climatiques futurs.

Cet article intitulé *Recent wave climate and expected future changes in the seasonally ice-infested waters of the Gulf of St. Lawrence, Canada* a été corédigé par moi-même, par les professeurs Urs Neumeier et Dany Dumont et par l'étudiant à la maîtrise Eliott Bismuth. Il sera soumis prochainement à la revue *Coastal Engineering* pour publication. Comme premier auteur, j'ai réalisé la recherche documentaire sur l'état de l'art, j'ai fait l'acquisition et le traitement des données de modèles atmosphériques, j'ai développé l'essentiel de la méthode (sauf la section portant sur le traitement de la glace de mer) et j'ai réalisé les simulations de vagues et les évaluations climatiques. J'ai également pensé, organisé et rédigé l'essentiel de l'article. En tant que deuxième auteur, Urs Neumeier a traité les sorties de glace du modèle océanique régional du GSL afin de me fournir des coefficients d'atténuation des vagues par la glace. Il a également révisé l'article et m'a fait part de suggestions très pertinentes. Dany Dumont, pour sa part, s'est impliqué activement dans cet article dès l'étape de planification, puis en le révisant. Ses commentaires ont grandement contribué à le paufiner. Eliott Bismuth, pour sa part, a développé une méthode empirique d'évaluation de l'atténuation des vagues par la glace en post-traitement dans le cadre de sa maîtrise. Urs Neumeier s'est inspiré de cette méthode pour le calcul des coefficients d'atténuation des vagues par la glace. J'ai présenté les principaux résultats de cet article sous forme d'affiches scientifiques au 49^e Forum science environnement du ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) ayant comme thème « Un climat en évolution – Le Québec en adaptation » (octobre 2013) et à la 12^e assemblée annuelle de Québec-Océan (novembre 2013).

Mots-clés : *climat de vagues, changements climatiques, modèle paramétrique de vagues, glace de mer, interactions vagues-glace, golfe du Saint-Laurent.*

3.2 RECENT WAVE CLIMATE AND EXPECTED FUTURE CHANGES IN THE SEASONALLY ICE-INFESTED WATERS OF THE GULF OF ST. LAWRENCE, CANADA

3.2.1 Abstract

A new method is developed to evaluate the wave climate in the Gulf of St. Lawrence (GSL) with the consideration of wave attenuation by sea ice. Ice concentrations outputs from a regional oceanic model are used to attenuate, in post-processing, significant wave heights (H_s) time-series simulated with a parametric wave model for ice-free conditions. Reanalysis data is used to compute GSL wave climate for the 1981-2010 period with and without wave attenuation by sea ice. Outputs from two simulations from the Canadian Regional Climate Model are also used to evaluate how GSL wave climate should evolve during the 21st century according to the SRES-A2 greenhouse gases emission scenario. Results show that sea ice has reduced extreme H_s on the GSL by about 12% on average over the 1981-2010 period but its impact on wave climate should become negligible by 2100 except in the St. Lawrence Estuary. Over the 21st century, an increase of extreme H_s on the GSL should be expected mostly because of the reduction of sea ice. On the other hand, little changes in the extreme wave climate should be expected as a response to changes in the wind regime over the GSL. For future coastal engineering applications, the GSL wave climate should be evaluated by supposing an ice-free sea to integrate the likely impact of future climate changes.

Keywords: *wave climate, climate change, parametric wave model, sea ice, wave-ice interactions, Gulf of St. Lawrence.*

3.2.2 Introduction

Most coastal engineering applications require knowledge of the local wave climate. This information is generally obtained by analyzing historic wave measurements nearby the study site, when long-term data is available, or from wave model hindcasts, when it is not.

These approaches assume stationarity in the wave climate over time by considering that recent-past wave climate is a valid estimation of the upcoming wave climate over the next 100 years for example. In a context of climate change (IPCC, 2013), this assumption is questionable since future changes in both global and regional wave climates are expected (Weisse and von Storch, 2010). Analysis of oceanic wave data from the last few decades have shown trends in the wave climate (Komar et al., 2009). Non-stationarity in sea level is generally taken into account by coastal engineers by extrapolating recent-past trends on sea level rise to the future (Ewing, 2009; Knuuti, 2002). However, estimating climate change impact on wave climates is much more complex and is therefore surrounded by large uncertainties (Nicholls et al., 2008).

The Gulf of St. Lawrence (GSL), Canada is a semi-enclosed sea, which goes through partial sea ice cover from December to March. Current GSL wave climate is not well characterized since the presence of sea ice increases the complexity of both wave measurements and modelling. Wave measurements are scarce in the area and because wave buoys are removed during winter to avoid damages by sea ice, the only long-term wave time-series is incomplete. Since 2010 there are wave measurements over full years at a few sites using moored Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) but those datasets are still too short for wave climate assessment. Wave hindcasting over full annual cycles does not appear either as a better solution since modeling waves in ice-infested conditions requires the integration of wave-ice interactions in wave models, which is still an active research and development topic. It is a complex problem since in addition to thermodynamical aspects of sea ice formation and melting, sea ice is mechanically influenced by waves. On the other hand, waves are themselves influenced by the ice during their generation and propagation (Squire, 2007; Dumont et al., 2011). For those reasons, coastal engineers working on the GSL have historically used wave climate evaluation methods that avoid explicitly considering the effects of sea ice. Although the harshest wind conditions in the area generally occur in winter (Hundecha et al., 2008; Wang et al., 2006), they consider the likely presence of land-fast ice as an additional defence against wave action on coastal structures

or shorelines. Thus, they generally avoid taking into account the contribution of the winter season for regional wave climate evaluation (Ouellet and Drouin, 1991). This assumption was perhaps reasonable a few decades ago, but recent temporal and spatial reductions in the seasonal ice cover in the GSL (Galbraith et al., 2013; Johnston et al., 2005; Savard et al., 2009) and further reductions to come due to global warming make it arguable now.

This paper aims (1) to provide an up-to-date characterization of the regional deep-water wave climate that integrates the influence of sea ice and (2) to show how climate change is likely to influence it over the 21st century. It also proposes a new method to estimate the impact of sea ice on the wave climate.

Recent work demonstrated the benefit of using a parametric wave model (GENER) forced with reanalysis wind data to evaluate deep-water wave climate in the GSL with minimal computing time (Ruest et al., 2013). However, the effect of the seasonal ice cover was not taken into account. Here, a new method is used as a post-processing step applied to wave model outputs to integrate wave attenuation by sea ice. This approach is first used with reanalysis data to define the wave climate over the recent-past period (1981-2010) and then with regional climate model projections over the 1981-2100 period to evaluate how the wave climate could possibly evolve.

3.2.3 Study area

The Gulf of St. Lawrence (GSL, Figure 9), Eastern Canada, is a semi-enclosed sea with wind fetches up to a few hundreds of kilometers and characterized nowadays by the presence of sea ice of the order of 0.5-m of thickness in winter (Saucier et al., 2003). Despite the important interannual variability of the sea ice coverage in the GSL, sea ice generally appears in western and northern GSL to reach a maximum extent in March. In spring, sea ice presence can remain in the GSL waters until mid-April and even longer (Hill et al., 2002). The GSL is connected to the Atlantic Ocean via Cabot and Belle Isle straits (Figure 9), but the

most important waves are generated within it rather than entering from open ocean. Because of the GSL size, swell is not such an important part of the wave energy compared to open ocean coasts (Bryant and McCann, 1972).

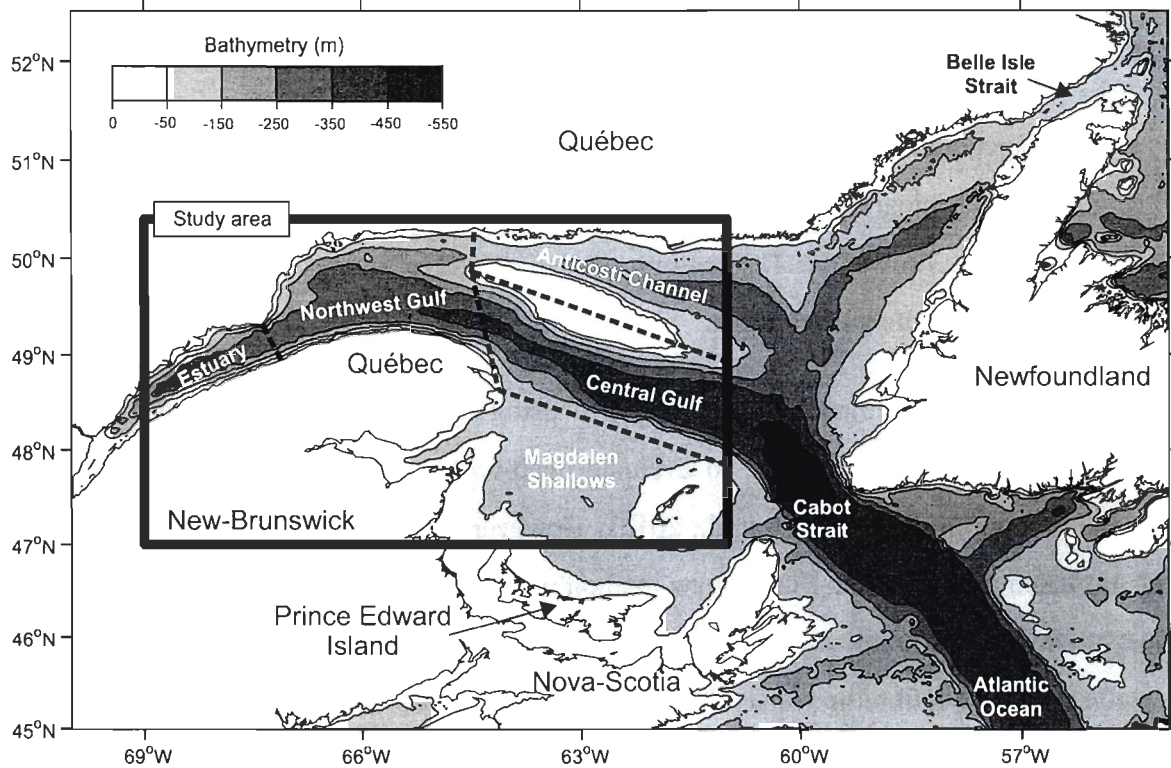


Figure 9: Location of the study area in the Gulf of St. Lawrence and relevant oceanographic zones.

The study focuses mainly on the northwestern region of the GSL because the lack of additional wave measurements datasets constrained previous validations of the method only to this area (Ruest et al., 2013). Figure 9 locates the study area relative to the entire GSL and presents relevant oceanographic regions inspired from Galbraith et al. (2013). Hereafter, references to GSL correspond solely to the study area.

This study investigates only deep-water wave climate. Nevertheless, it still covers most of the GSL which is in general over 100-m deep, except for the Magdalen Shallows and the western part of the Anticosti Channel. We have selected the 50-m bathymetric contour line

(Figure 9) as the limit between deep-waters and shallow waters for this study. Therefore, only results from regions of GSL deeper than 50-m are presented in this paper where wave-bottom interactions should be minimal.

3.2.4 Methodology

To evaluate wave climates over 30 years periods, we compute, with the parametric wave model GENER, significant wave heights (H_s) from modeled 10-m winds (U_{10}), and then take into account the influence of sea ice, mostly attenuation, using ice concentrations outputs from a regional ocean model (ROM) as a post-processing step (Figure 10). We used a parametric wave model instead of a state-of-the-art spectral wave model in order to be able to perform an ensemble of simulations over multidecadal periods while keeping computing time minimal.

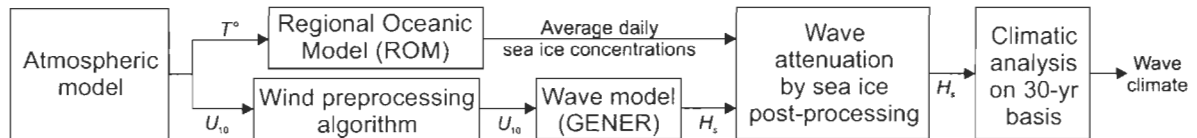


Figure 10: Diagram of the methodology adopted for wave climate evaluation at a given location. Temperatures (T°) and wind velocities (U_{10}) are used to obtain ice concentrations and wave heights (H_s).

3.2.4.1 Wave simulations

Wave model

GENER, computes time-series of H_s , significant wave period and mean wave direction at one location. Directions are discretized in 16 sectors of 22.5° and the only required inputs are U_{10} time-series (velocity and direction) and the 16 effective fetch distances associated with every directional sector, evaluated in accordance with Saville

(1954). Five wind-fetch formulations are implemented in the model. The validation work of GENER done by Ruest et al. (2013) suggests that the wind-fetch formulation proposed in the Coastal Engineering Manual (CEM, Resio et al., 2002) is the preferred one for the GSL. A complete description of GENER is given in Ruest et al. (2013). Although the model is generally only run at one location, it can also be run as a batch on a grid in order to produce bi-dimensional representations of wave parameters with still very reasonable computing costs. In this study, GENER is run on a regular 15-km grid over the study area with the CEM wind-fetch formulation.

GENER does not integrate either swell, wave-bottom or wave-current interactions, which limits the domain of application. However, it yields fair evaluation of long-term wave climate statistics in semi-enclosed seas like the GSL (Ruest et al., 2013), which explains why it is still widely used by coastal engineers working in the region.

GENER was initially developed by Desjardins and Ouellet (1984) and used with wind data from land based weather stations nearby the study sites. In order to use GENER with offshore bi-dimensional wind fields from atmospheric models, Ruest et al. (2013) have developed a preprocessing wind algorithm for GENER. It computes, for each time-step, a representative wind by averaging only the offshore wind vectors likely to generate waves propagating toward the study site. Wind vector directions and positions (relative to the study site) as well as coastline positions are taken into account in the averaging method.

The preprocessing wind algorithm of Ruest et al. (2013) is used in the present work but in a slightly modified way. For each time step, averaged wind vectors (root mean square of wind velocities and mean wind direction) are still evaluated for 16 directional sectors from offshore wind vectors located within their respective selection boundary. Each selection boundary is still a 90° sector with a radius equal to the effective fetch in the given direction. In this study, from the 16 averaged wind vectors, the one having the largest velocity component in the straight direction to the study site is kept at each time step. Ultimately, the algorithm

still produces a time-series of representative wind vectors for wave simulation with GENER at the study site.

Fetches used by GENER are limited to 500-km as a maximum. The preprocessing wind algorithm averages wind vectors from the whole GSL, even outside the study area (Figure 9).

Wind forcing

Wind data from two kinds of atmospheric models were used for wave simulation with GENER: (1) reanalysis wind data to compute a baseline regional wave climate for the recent-past period, and (2) regional climate model wind data to evaluate impact of future long-term climate change on the regional wave climate.

Ruest et al. (2013) produced long-term (1979-2012) wave simulation over the GSL using GENER and the preprocessing wind algorithm with wind data from the Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA, Rienecker et al., 2011). They showed that MERRA hourly U_{10} are underestimating wind speeds over the GSL but are in good agreement regarding directions, especially for the strongest wind events. Wind fields are almost always underestimated by atmospheric models over enclosed marine basins with bias depending on the distance to land (Cavaleri and Bertotti, 2004). Therefore, in their work, Ruest et al. (2013) have adjusted the reanalysis wind dataset by applying linear corrections to wind velocities according to comparisons with two wind measurements time-series. The lack of additional offshore wind observations forced them to assume that these two different linear corrections were applicable to the whole GSL. Nevertheless, comparisons with wave measurements at four different sites showed that GENER, when forced by the adjusted MERRA U_{10} , produces quite reasonably accurate deep-water H_s simulations on the GSL to achieve wave climate evaluation.

The MERRA U_{10} adjustment approach is improved for the present study. The Canadian regional forecast system (GEM-regional, Mailhot et al., 2006) based on the Global

Environmental Multiscale model (GEM, Côté et al., 1998a,b) is still used for most physical oceanographic studies on the GSL that requires reliable atmospheric forcing (e.g., Smith et al., 2013). However, GEM-regional forecasts exists only since 1997 which is insufficient for climate assessment. Thus, GEM-regional U_{10} , considered here as the reference, are interpolated on the MERRA grid over the GSL for the period 1997-2011. Every GEM-regional U_{10} value is then paired with MERRA U_{10} and a quadratic polynomial correction function is computed for each grid point. These correction functions are applied to MERRA wind speeds for the whole 1979-2012 period. Corrected MERRA U_{10} are then used for wave simulation with GENER to characterize recent-past GSL wave climate.

Global climate models (GCM) have a too low spatial resolution to simulate waves in regions with wind fields strongly influenced by nearby lands (Lionello et al., 2008). High-resolution (e.g. 50-km) regional climate models (RCM) can however allow the simulation of reliable H_s space and time variability in enclosed seas where local orographic effects can influence wind patterns (Lionello and Sanna, 2005; Winterfeldt and Weisse, 2009). The Canadian Regional Climate Model 4.2.3 (CRCM, Caya and Laprise, 1999; Music and Caya, 2007) operated by the Ouranos consortium is the climate model chosen for the study based on its fair spatial resolution (45-km). From the different CRCM simulations performed by Ouranos, only two (CRCM-aev and CRCM-ahj, 1961-2100) have a sufficiently high temporal resolution (3-hr) to use wind data for wave simulations. The main difference between the two simulations is the driving GCM. CRCM-aev is driven by the third version of the Canadian Coupled Global Climate Model (CGCM3, Scinocca et al., 2008) while CRCM-ahj is driven by ECHAM5 (Jungclaus et al., 2006). Both driving GCMs follow the scenario A2 from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report on Emission Scenario (SRES, Nakicenovic et al., 2000). The SRES-A2 scenario corresponds to a high emission scenario of greenhouse gases.

3.2.4.2 Wave attenuation by sea ice

Sea ice influences waves mainly through scattering their energy as they propagate and by reducing open-water fetches available for wave generation by wind. Wave scattering leads to an exponential decay in space which depends on different factors including wave frequency and ice floes characteristics (concentration, size and thickness) (Squire et al., 1995; Squire, 2007; Tolman, 2003). Short waves are known to experience more attenuation during their propagation through ice infested waters than long waves (Liu and Mollo-Christensen, 1988; Squire, 2007). Long waves are also reduced by an ice cover because of the shortened fetches (Wadhams, 1983).

There is no unique way to evaluate a wave climate in seasonally ice-infested waters (Tuomi et al., 2011). For example, different approaches have been followed over the years for wave climate studies in the Baltic Sea, another seasonally ice covered sea. Broman et al. (2006) have based their wave statistics directly on available wave measurements, even if wave time-series do not integrate the ice season. The same method can also be applied to wave simulations performed only for the ice-free period (as it was historically done in the GSL). Tuomi et al. (2011) have preferred to base their statistics on full year datasets by setting wave heights to zero in the presence of sea ice (ice concentration larger than 30%). Other studies, such as Soomere and Räämet (2014), simply avoided considering sea ice in their wave climate evaluation by simulating waves on an ice-free sea over full annual cycles.

All of these methods are based on the hypothesis that waves and significant sea ice concentrations cannot coexist, which oversimplifies the reality. A more accurate approach would model waves in ice-infested waters and wave statistics would then be evaluated from the wave time-series produced. Tolman (2003) have proposed a simple linear wave attenuation formulation, which can be integrated in spectral wave models, and which is based solely on the ice concentration, since wave decay rates are expected to increase strongly with ice concentration. Sea ice concentration is not the only parameter affecting

wave attenuation by sea ice, but it is the easiest to observe and the most widely available in ice charts and ocean-ice models. More elaborated wave-ice models are in development (e.g. Wang and Shen, 2013; Williams et al., 2013a,b) and their implementation in operational wave models is ongoing (e.g. Bidlot et al., 2013). However, these new formulations generally require additional sea ice data than only its concentration.

In this study, a different approach is preferred: instead of directly implementing a wave-ice formulation within GENER, waves are simulated on an assumed ice-free GSL and the influence of sea ice on waves is applied to the resulting wave time-series as a post-processing step.

Sea ice data

Daily charts of ice concentrations and distributions, as produced by the Canadian Ice Service, are available numerically for the GSL since 2002, which is insufficient for wave or ice climate assessment. Therefore, we use ice concentrations outputs of the Regional Oceanic Model (ROM) for the GSL, which is operated at ISMER. The ROM models the circulation of water masses on the GSL on a 5-km resolution cartesian grid and includes dynamic and thermodynamic processes of sea ice formation, transport and melting (Saucier et al., 2003). Senneville et al. (2013) used an improved version of this model to study sea ice evolution in the GSL for future climate changes. They have forced the ROM with two simulations from the CRCM covering 1981-2100 (CRCM-aev and CRCM-ahj), after performing a quantile-quantile monthly bias correction of the air temperature for CRCM-aev. Recently, Simon Senneville (ISMER) also carried out a ROM simulation forced with the North American Regional Reanalysis (NARR, Mesinger et al., 2006) covering the 1981-2010 period. This study uses daily-averaged ice concentrations outputs of these three ROM simulations. Ice concentrations computed from NARR forcing are used with waves simulated from MERRA wind forcing. Ice concentrations evaluated from either CRCM-aev or CRCM-ahj forcing are used with waves computed from the corresponding CRCM simulation wind forcing.

Wave attenuation post-processing

In this study, wave attenuation at one location is based on the largest daily-averaged ice concentration computed from all ROM grid points within either a 50-km or a 100-km radius (excluding some embayments and area located behind islands). An attenuation coefficient is calculated from this average ice concentration using a linear attenuation function with no attenuation for ice concentration lower than 3% and complete attenuation for ice concentration larger than 50%. The 3% threshold is used to take into account that land-fast ice, which generally appears first and disappears last, has limited influence on deep water wave conditions. Linear interpolation of wave attenuation coefficients is performed between daily values to get hourly attenuation coefficients. These are then applied in post-processing to H_s time-series computed by GENER to produce wave data that includes attenuation by sea ice.

3.2.4.3 Climate change assessment

Long-term statistics

Defining a wave climate requires long-term statistics evaluated from at least 30-yr long time-series (observations or simulations). For coastal engineering applications, H_s with return period of a few decades to a century is usually the information required for wave climate characterization at a study site. Here, the 50-yr H_s is the main wave climate indicator presented in the results. Since its estimation requires fitting an extreme value distribution, which necessarily introduces an additional layer of uncertainty, the 99% percentile H_s (99% H_s) of the wave time-series, which corresponds to H_s exceeded about 88 hours per year, is also presented.

Hemer et al. (2011) recommend using 30-yr time-slices to project wave climate evolution. In this study, two 30-yr climatic periods were chosen for wave climate evaluation:

1981-2010 (recent-past) and 2071-2100 (future). While the evaluation of the 99% H_s for a given period is quite straightforward, the estimation of the 50-yr H_s is performed with Generalized Pareto Distributions (GPD, Coles, 2001). GPDs and their 95% confidence intervals (CI) are fitted on independent extreme wave events sampled by the Peak Over Threshold (POT, Smith, 1984) method with a minimum time lag of 48-h between consecutive events. It was shown that the 93rd percentile of the significant wave heights 93% H_s of a time-series is generally an adequate threshold for the POT in the GSL allowing a reasonable balance between bias and variance in the fitted GPDs (Ruest et al., 2013). This approach is used here to fit automatically GPDs for each dataset and then to evaluate extreme H_s .

Wave climate changes

To detect changes in the GSL deep-water wave climate, 30-yr statistics of 2071-2100 are compared with those from 1981-2010 (considered here as the reference). Wave climates with and without consideration of wave attenuation by sea ice for a given period are also compared. Relative differences in both 99% H_s and 50-yr H_s are computed as $\Delta H_s = [(H_B - H_A)/H_A] \times 100$, where ΔH_s denotes changes in H_s (in %), while H_A and H_B are respectively H_s from the reference wave climate and from the scenario to be compared.

The Mann-Whitney test, generally favored for non-normal distributions, is used to check if differences are statistically significant at the 95% confidence level (Von Storch and Zwiers, 2001). For the 99% H_s variations, the test is used to compare the two distributions of 30 annual 99% H_s . For the 50-yr H_s variations, the statistical significance is verified using the Mann-Whitney test on extreme wave events distributions for both climatic periods. Both distributions are made from the 50 largest wave events in term of H_s taken from the POT sampling. In addition, since the fitting of the GPD includes a confidence interval (CI) around the computed value, the range of the 95% CI is compared to the magnitude of the

climate change signal on 50-yr H_s . Points where changes are statistically significant or larger than the reference GPD 95% CI are highlighted on the results figures.

3.2.5 Results

3.2.5.1 Recent-past GSL wave climate

Figure 11 presents the GSL wave climate (99% H_s and 50-yr H_s) for the 1981-2010 period computed with wind and temperature forcing from MERRA reanalysis. Both an ice-free scenario (Figures 11a and 11b) and one with the consideration of wave attenuation by sea ice (from NARR forcing, Figures 11c and 11d) are shown. Figures 11e and 11f illustrate differences between the wave climate with and without attenuation by sea ice. In the Estuary, 99% H_s and 50-yr H_s are respectively of the order of 1-2 m and 2.5-4 m while they are of the order of 2-4 m and 4.5-8 m for the rest of the GSL. Direct comparison of H_s contours between wave climates computed with and without attenuation by sea ice does not explicitly show how much the presence of sea ice influence the GSL wave climate. However, the impact of sea ice on the wave climate is statistically significant on the whole GSL domain (points marked with a “x” on Figures 11e and 11f). Indeed, considering the GSL ice-free increases 99% H_s by 8-16%. Regarding 50-yr H_s , the main trend is an increase of the order of about 10%, but the pattern is rather irregular spatially (potentially due to the automated fitting of GPDs). None of the differences between the two wave climates are larger than the GPD 95% CI.

3.2.5.2 GSL wave climate evolution with climate changes

In order to evaluate how potential changes in the regional wind regime during the 21st century could impact GSL wave climate, waves are simulated with GENER forced by U_{10} from CRCM-aev and CRCM-ahj. Wave climates were then computed for the 1981-2010 and

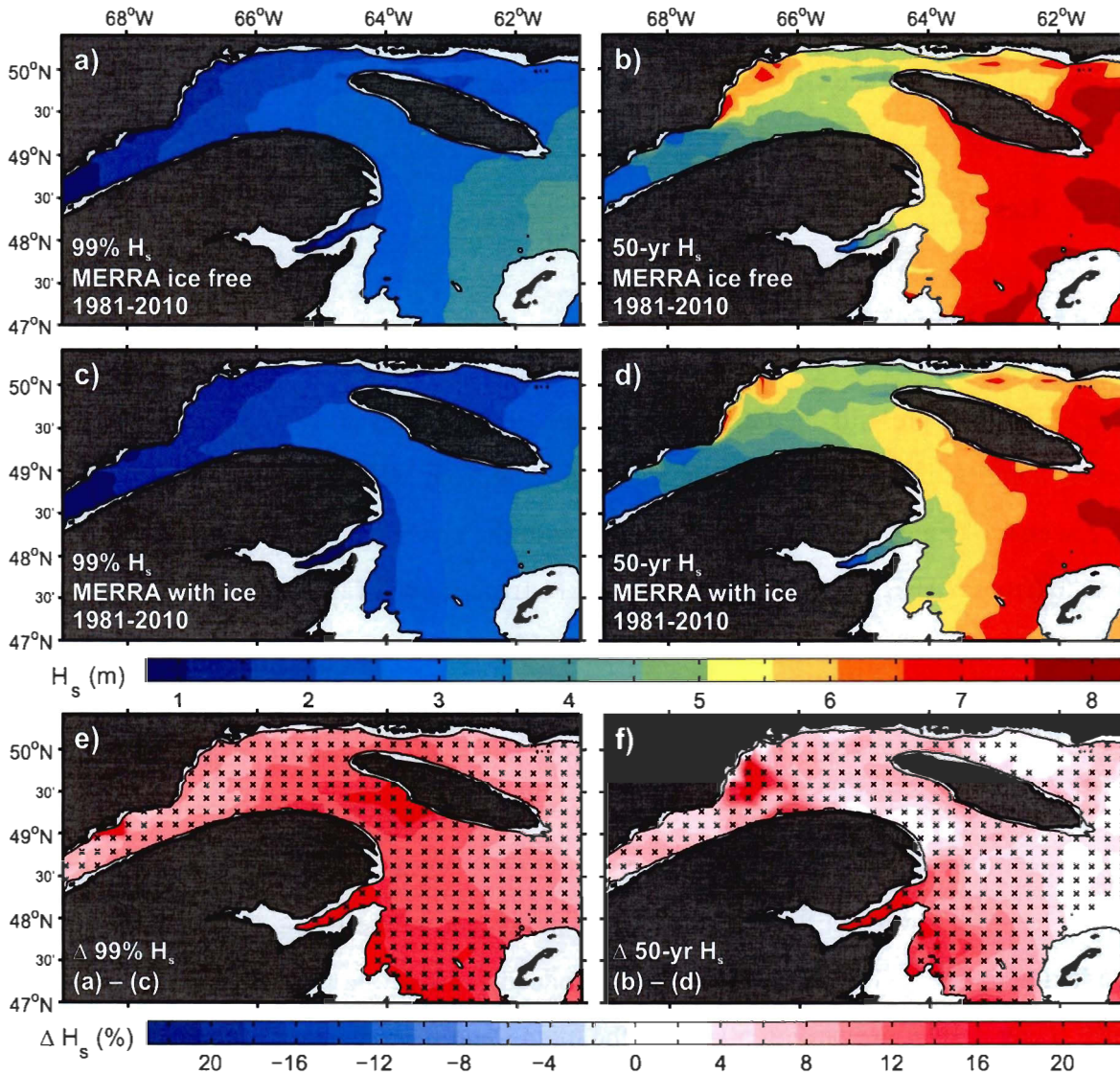


Figure 11: Recent-past GSL deep-water wave climate (99% H_s and 50-yr H_s) evaluated with MERRA forcing for ice-free conditions (a and b) and for annually ice-infested conditions (c and d) and relative differences (ice-free – ice-infested) in percent between both conditions (e and f). Points marked with an “x” are statistically significant at 95% confidence level (e and f).

2071-2100 periods assuming no attenuation by sea ice. GCMs generally induce systematic errors in the datasets they produce. Indeed, CRCM wind fields used in this study are likely to be biased. The assumption that systematic errors in GCM simulations are constant over the simulation period is generally accepted in climate change studies but has not been fully

demonstrated (Charles et al., 2012). In this study, wind fields from CRCM were not corrected before simulating waves. Consequently, absolute values of H_s obtained from climatic simulations might not be reliable. Therefore, they are not directly presented in the results. On the other hand, assuming that systematic errors in CRCM simulations are stationary, relative changes between wave climates from different climate periods (evaluated from the same CRCM simulation) should be meaningful.

Figures 12 and 13 show respectively relative changes between the two climatic periods for the 99% H_s and the 50-yr H_s . The left panels show only the wind-evolution consequences with continuous ice-free conditions. Regarding the 99% H_s , for the CRCM-aev simulation (Figure 12a), most changes are negative and not statistically significant. However, from the few points with statistically significant changes, the majority is located in the Central Gulf or on the Magdalen Shallows and represents a 2-5% decrease. On the other hand, for the CRCM-ahj simulation (Figure 12c), statistically significant changes are mostly positive of 2-6% (Central Gulf and Anticosti Channel) except in the Estuary where a few negative changes are found. Regarding changes in the 50-yr H_s , for the CRCM-aev simulation (Figure 13a), changes are rather irregular spatially (both negative and positive). However, most changes are not statistically significant and are all within the GPD 95% CI. For the CRCM-ahj simulation (Figure 13c), most changes are positive and statistically significant (except in the Estuary). Positive changes are of the order of 4-18% and very few are larger than the GPD 95% CI. Therefore, without ice consideration, wave climate changes are small, mostly non-significant and of opposite sign depending the simulation and the region.

In addition to the evolution of the wind regime with climate change, the evolution of the annual sea ice cover (concentration and duration) can also influence the regional wave climate. Therefore, wave attenuation by sea ice coefficients (cf. section 3.2.4.2) are applied to simulated wave time-series. Attenuation coefficients from each CRCM simulation (aev and ahj) are applied to waves evaluated with wind data from the same climatic simulation.

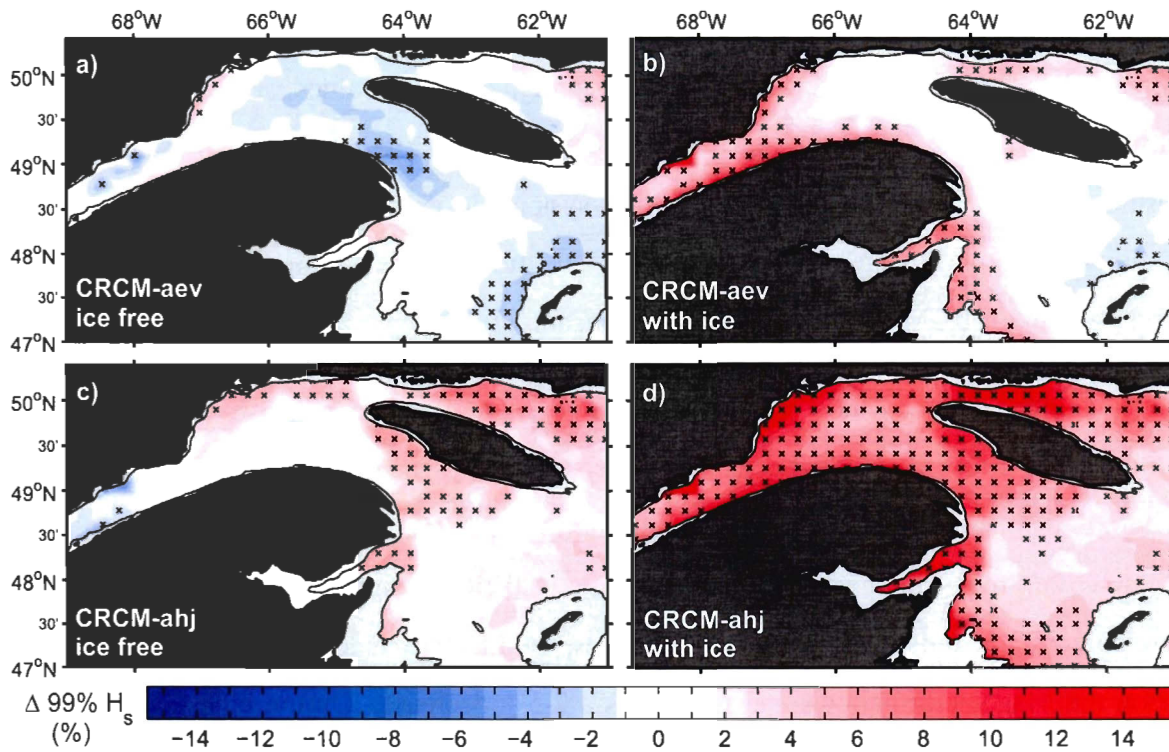


Figure 12: Climate change impact on GSL 99% H_s (2071-2100 – 1981-2010) for CRCM-aev and CRCM-ahj simulations with and without sea ice consideration. Points marked with an “x” have changes statistically significant at 95% confidence level.

Figure 12 (right panels) shows relative changes between climatic periods 1981-2010 and 2071-2100 for the 99% H_s (considering wave attenuation by sea ice). For the CRCM-aev simulation changes in 99% H_s (Figure 12b) are negligible on most of the GSL (Northwest and Central Gulf and eastern Magdalen Shallows). However, in the Estuary, on the western Magdalen Shallows and on northern Anticosti Channel, changes are significantly positive (3-8%) increasing approaching the shorelines. Negative changes (2-3%) are found on the most eastern section of the Central Gulf and Magdalen Shallows. Regarding the CRCM-ahj simulation, changes in 99% H_s (Figure 12d) are mostly positive of the order of 3-12% and statistically significant over most of the GSL (not in the northeastern Magdalen Shallows and in the eastern Central Gulf). As for the CRCM-aev simulation, the magnitude of the differences is larger near the shorelines.

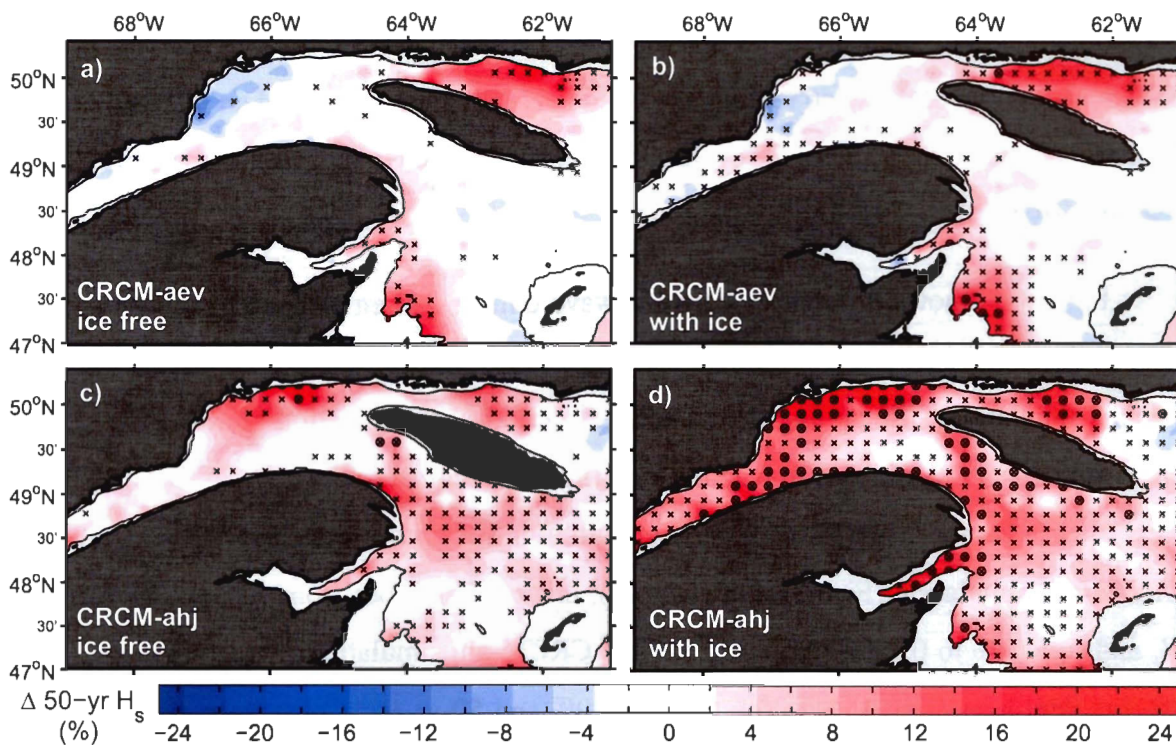


Figure 13: Climate change impact on GSL 50-yr H_s (2071-2100 – 1981-2010) for CRCM-aev and CRCM-ahj simulations with and without sea ice consideration. Points marked with an “x” have changes statistically significant at 95% confidence level and those also marked with an “o” have changes larger than GPD 95% CI.

Regarding changes in the 50-yr H_s with the consideration of sea ice, for the CRCM-aev simulation (Figure 13b), changes are both positive and negative. About half of changes are statistically significant and mostly positive (2-22%), but very few are larger than the GPD 95% CI. The largest changes are found in southern Magdalen Shallows and in the Anticosti Channel. A few points in the northwestern part of the Northwest Gulf and in the Estuary have small reductions in the 50-yr H_s . For the CRCM-ahj simulation (Figure 13d), apart from a few local exceptions, changes are all statistically significant and positive and of the order of 4-24%. About 2/3 of changes are larger than the GPD 95% CI.

Comparing left panels to right panels on both Figures 12 and 13 shows that considering wave attenuation by sea ice when evaluating climate change impact on GSL wave climate increases the number of statistically significant positive changes (for the 1981-2100 period).

While there is not a clear trend on possible changes in the wave climate when considering only the evolution of the wind regime, the trend generally lines up toward an increase of both 99% H_s and the 50-yr H_s if sea ice evolution is also considered in the wave climate evaluation (particularly for the CRCM-ahj simulation).

Figure 14 shows differences between wave climates when evaluated with or without attenuation by sea ice for both climatic periods (1981-2010 and 2071-2100) and for both CRCM simulations. Regarding the recent-past period, the attenuation of waves by sea ice has a statistically significant impact on the GSL wave climate with a gradient going from west to east (larger in the Estuary and negligible in the easternmost part of GSL). For the CRCM-aev simulation (Figures 14a and 14b), this gradient goes from 13% to 0% for 99% H_s and from 7% to 0% for 50-yr H_s . For the CRCM-ahj simulation (Figures 14e and 14f), this gradient goes from 15% to 0% for both 99% and 50-yr H_s . Conversely, for the end of the 21st century (2071-2100), wave attenuation by sea ice has a minimal impact on the GSL wave climate for both CRCM-aev (Figures 14c and 14d) and CRCM-ahj (Figures 14g and 14h) simulations. A few locations still have statistically significant changes concentrated in the Estuary, particularly for the CRCM-ahj simulation. For the rest of the GSL, the effect of sea ice on the wave climate is nil.

3.2.6 Discussion

The evaluation of 50-yr H_s requires the fitting of GPDs, which introduces additional uncertainties (represented with the 95% CI) to those produced by atmospheric models, by ROM ice outputs and by wave simulations. Furthermore, most changes found in 50-yr H_s are within the spread of the CI. Results obtained from 50-yr H_s are difficult to analyze since they present spatial irregularities potentially inherited from the automated GPD fitting and the relatively large 95% CI on 50-yr H_s . Therefore, we focus especially on the results based on the 99% H_s in the discussion. Those results are more uniform over the GSL, which allows a better generalization of the conclusions.



Figure 14: Impact of sea ice on GSL wave climate. Relative differences, in percent, between wave climate evaluated with ice-free and annually ice-infested conditions (ice-free – ice infested) for CRCM-aev and CRCM-ahj simulations and for both 1981-2010 and 2071-2100 climatic periods. Points marked with an “x” have changes statistically significant at 95% confidence level and those also marked with an “o” have changes larger than GPD 95% CI.

All climatic simulations were undertaken following the SRES-A2 greenhouse gases emission scenario. It is a high emission scenario with a larger increase rate of temperatures compared to other scenarios, but is still realistic (Nakicenovic et al., 2000). Nevertheless, the use of the SRES-A2 scenario is conservative for most coastal engineering applications because it is likely to amplify possible changes in the wave climate (Charles et al., 2012; Wang and Swail, 2006b).

The method followed for wave attenuation by sea ice is based on an arbitrary cut-off ice concentration threshold of 50% for complete H_s attenuation. Tolman (2003) have proposed 75% without any objective guidance and other studies have used 30% (e.g. Groll et al., 2014; Tuomi et al., 2011). We have performed a sensitivity analysis using cut-off thresholds of 30%, 50% and 70% and concluded that this parameter has a limited influence on the GSL wave climate relatively to the variability associated to the choice of a climate simulation forcing. Moreover, the 50% value appears realistic for the GSL: with such an ice concentration on either a 50-km or 100-km radius, very few waves should be generated locally and waves propagating through these ice-infested waters should decay significantly. To improve this approach conceptually, ice concentrations could be computed, at a given time step, only from the sector oriented toward waves origin and having a radius equal to the effective fetch in that direction (at the given time step). Nevertheless, considering ROM ice outputs uncertainties and the difficulty to accurately define a fetch in presence of partial ice cover, this conceptual improvement of the method should not reduce uncertainties in the results.

Results obtained from simulations using MERRA reanalysis forcing show that in the GSL, a semi-enclosed sea, the wave climate is strongly related to fetch distances. The smallest waves are found in the Estuary, where the shortest fetches in the study area are also found. The GSL wave climate is sensitive to both changes in wind magnitude and direction. Indeed, a small shift in the wind direction can lead to a significant change in the fetch distances for a given location. In addition, MERRA results show that wave attenuation by sea ice is significant in the GSL for the recent-past period (1981-2010). GSL sea ice

modeled with the ROM (NARR forcing) reduces 99% H_s on average by about 12% compared to a complete ice-free sea. The reduction is smaller and has a clearer gradient going from west to east with climate models forcing (CRCM-aev and CRCM-ahj) for the recent-past. However, with climate change, wave attenuation by sea ice is very likely to decrease considerably or to disappear even completely. Indeed, results obtained from both CRCM simulations suggest that wave attenuation by sea ice (evaluated empirically) could have very minimal impact on the deep-water wave climate by the end of the ongoing century except in the Estuary. This is consistent with GCMs predictions that suggest a significant reduction in both sea ice extend and length of ice season in the GSL within 2050 (Forbes et al., 2002).

Regarding possible changes in the GSL wave climate caused exclusively by changes in the wind regime, results show mostly insignificant changes. Conclusions are rather contradictory on 99% H_s evolution depending on the considered CRCM simulation even if both are based on the same climate change scenario. 99% H_s generally decreases with CRCM-aev and increases with CRCM-ahj. GCM uncertainties could explain a part of the observed differences in the wave climate change signal (strictly related to wind evolution) between CRCM-aev and CRCM-ahj simulations. Both CRCM simulations are forced at their boundaries by two different GCMs and it was shown, in the past, that uncertainties related to GCMs are quite large for wave climate change studies. Indeed, differences among GCMs (for the same climate change scenario) can even be larger than differences among simulations with different climate change forcing scenarios from a single GCM (Grabemann and Weisse, 2008). Therefore, from the two used simulations, it is rather difficult to tell undoubtedly whether future changes in the wind regime could have a positive, a negative, or a negligible impact on the GSL wave climate.

Hemer et al. (2013) and Wang et al. (2004) have both conducted wave climate change studies over the 21st century at different scales (global and North Atlantic ocean) and both include the Canadian east coast and a part of the GSL in their study domain. Even if the

scale of their studies is probably too large to adequately deal with the complex geography of the GSL, they can at least provide further information on the possible GSL wave climate evolution due to changes in the wind regimes. Their results point toward either no change or a decrease of H_s in the region. The GSL autumn and winter cyclone activity has a significant negative correlation with the North Atlantic Oscillation (NAO, Wang et al., 2006). It means that a positive phase of the NAO index is generally related to a weaker cyclone activity in the region (less frequent extreme wind events). Moreover, climate change is associated with a more frequent occurrence of the positive phase of the NAO index in the future (Wang et al., 2004). Consequently, considering only NAO index evolution with climate change and minimal changes in storm tracks, strong wave events in the GSL should not be expected to increase. Therefore, these results, in addition to ours, suggest that there is no evidence for an increase of extreme wave climate in the GSL due to potential changes in the wind regime alone.

When both changes in wave attenuation by sea ice and changes in the wind regime over the 21st century are taken into account to evaluate the GSL wave climate change, the average trend for both CRCM-aev and CRCM-ahj simulations is a significant increase of 99% H_s between 1981 and 2100. Most of these expected changes in the GSL wave climate are very likely to be mainly caused by the anticipated reduction of wave attenuation by sea ice over the ongoing century rather than by changes in the wind regimes. Therefore, we think that deep-water wave climate evaluated from recent-past wind conditions, like the MERRA reanalysis for 1981-2010, without wave attenuation by sea ice, should be a reasonably accurate estimation of the upcoming GSL wave climate.

Our results point out that sea ice can be a crucial factor to consider in wave climate change studies for seasonally ice-infested waters. The impact of sea ice evolution can even surpass the impact of changes in the wind regime on the future wave climate evolution. For about a decade, future wave climate evolution has been studied at both global and regional scales, but the impact of sea ice on waves was generally neglected. Recently, Hemer et al.

(2013) have considered sea ice in his global wave climate change study like Groll et al. (2014) and Groll and Hünicke (2012) have done respectively for the North Sea and the Baltic Sea. They have simply used sea ice concentrations to determine whether a grid point is coded as an ice-free sea point or as a land point based on a single cut-off ice concentration. We think that our approach, which linearly attenuates waves in post-processing relatively to the neighboring average sea ice concentration, is a step further for wave climate studies in ice-infested waters. It remains relatively simple and could be used elsewhere. However, using this method in seas where wave conditions are strongly influenced by swell may not be adequate.

Our study investigates climate change impact on GSL wave climate, but is limited to the current availability of regional climate model data that have sufficient temporal and spatial resolution and covering 1981-2100. With only two regional climate simulations, both based on the SRES-A2 scenario, uncertainties remain important. Therefore, further validation of the results should be undertaken as soon as additional climate forcing data with sufficient spatial and temporal resolution will be available. Considering that sea ice evolution appears to be the main factor contributing to the GSL wave climate change signal, the SRES-A2 scenario, which makes sea ice impact on the GSL wave climate completely negligible by the end of 21st century, is likely to be a worst case scenario for sea ice in the region.

Results shown in this paper are only valid in deep-waters, which limits necessarily their direct application in coastal engineering since they do not integrate wave-bottom interactions. Further nearshore wave simulations with spectral wave models are therefore required for coastal engineering applications and our results provide interesting information to guide this future work. First, the presence of offshore sea ice in the GSL could be neglected for future wave climate estimation without increasing H_s unreasonably (except in the Estuary). However, land-fast ice and ice-foot could still develop along GSL shorelines throughout the 21st century and should consequently not be neglected in coastal studies (Senneville et al., 2013). In addition, since there is no apparent need to take into account the possible future changes in the GSL wind regime (according to the CRCM-aev and

CRCM-ahj simulations), wave simulations in the GSL should be undertaken with fully adjusted and reliable reanalysis wind forcing instead of RCM wind forcing.

3.2.7 Conclusions

This study presented an up-to-date characterization of the GSL wave climate which includes the influence of the seasonal sea ice. It is also the first evaluation of the future climate changes impact on the GSL wave climate. Sea ice has reduced significantly extreme H_s on the GSL over 1981-2010 by about 12% on average. However, wave attenuation by sea ice should become negligible by 2100 with climate changes, except in the Estuary. This should induce increases of future extreme H_s in the GSL wave climate mainly of the order of 5-10% (with spatial variability). On the other hand, future changes in the wind regime should have an insignificant impact on the GSL wave climate over the 21st century. Thus, we consider that sea ice should be neglected for wave climate evaluation in the GSL for future coastal engineering applications to take into account forthcoming climate changes.

3.2.8 Acknowledgments

This project is a contribution to the research program of Québec-Océan and was funded by the government of Québec (Ministère des Transports du Québec). B. Ruest received research scholarships from the Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FRQNT) and from the National Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC). We thank the Ouranos consortium for providing CRCM simulations data as well as Simon Senneville and Simon St-Onge Drouin (ISMER) for their work on the ROM sea ice simulations for the GSL and for the sharing of their sea ice data. We are also very grateful toward Adrien Lambert for his interest and its ideas regarding the project and toward the important contribution of James Caveen (ISMER) for updating GENER source code.

CHAPITRE IV

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le développement d'un nouvel algorithme de prétraitement du vent permet maintenant de forcer des modèles paramétriques de vagues par les champs de vents marins de modèles atmosphériques. Il calcule, à chaque pas de temps, un vecteur vent représentatif d'un champ de vents 2D spécialement adapté à la simulation des vagues à un site donné avec un modèle comme GENER. Pour ce faire, l'algorithme moyenne seulement les vecteurs vents marins susceptibles de générer des vagues qui se propageraient vers le site d'intérêt à un instant donné.

L'algorithme de prétraitement des vents permet, dans un premier temps, d'améliorer conceptuellement le forçage par le vent dans GENER comparativement à l'utilisation directe des vents de stations météorologiques (méthode employée traditionnellement). Dans un second temps, l'algorithme peut, dans certains cas, engendrer une amélioration des hauteurs significatives de vagues (H_s) simulées par GENER. Par exemple, le Tableau 3 et la Figure 15 démontrent que l'algorithme de prétraitement des vents améliore les performances de GENER comparativement à l'utilisation du vent le plus près au site de la bouée C45138, particulièrement en ce qui a trait à la distribution statistique des H_s à long terme. En effet, même si le RMSE sur les H_s demeure sensiblement inchangé, le fait d'utiliser l'algorithme de prétraitement des vents réduit le biais et le χ^2 des H_s (Tableau 3) et améliore considérablement le diagramme Quantile-Quantile pour les événements extrêmes (Figure 15). Toutefois, l'algorithme pourrait encore être amélioré puisqu'il ne peut assurer

que le vent fourni à GENER soit véritablement celui pouvant produire les vagues les plus importantes à un instant donné. En effet, un vent faible soufflant sur un long fetch peut, dans certains cas, générer des vagues plus importantes que celles générées par un vent plus fort soufflant sur un fetch plus court (Donelan, 1980). L'intégration directe de l'algorithme de prétraitement des vents dans GENER pourrait permettre la simulation des vagues simultanément sur tous les secteurs (avec leur vent représentatif respectif à chaque pas de temps) et ainsi déterminer les conditions de vagues maximales. Toutefois, il faudrait non seulement tenir compte de la vitesse du vent et du fetch, mais aussi de la durée du vent et de l'historique des vagues.

Tableau 3: Comparaison des performances de GENER (formule de fetch du CEM) pour simuler les H_s à partir des vents MERRA ajustés avec et sans l'utilisation de l'algorithme de prétraitement du vent au site de la bouée C45138 sur la période 1991-2012 (avril à décembre).

	Bias (m)	RMSE (m)	χ^2
Point de vent MERRA le plus près	0.11	0.58	0.09
Champ de vent MERRA traité par l'algorithme de prétraitement	0.04	0.59	0.02

Dans l'EGSL, le modèle paramétrique GENER (utilisé avec l'algorithme de prétraitement du vent) simule de manière satisfaisante les distributions à long terme des H_s au large lorsqu'il est forcé par des vents de réanalyse préalablement corrigés. Bien que la plupart des formules de fetch donnent des résultats relativement équivalents, la méthode du *Coastal Engineering Manual* (CEM) utilisée avec des fetchs pondérés calculés selon Saville (1954) est la plus recommandée. Celle du *Shore Protection Manual* de 1984 (SPM84) (utilisée avec les mêmes fetchs pondérés) est plutôt à éviter. Dans aucun cas, GENER ne doit être utilisé en eaux peu profondes puisque cela peut engendrer une surestimation importante des H_s (surtout pour les événements extrêmes). La validation avec des séries de vagues à long terme sur l'EGSL est relativement limitée à cause du manque de données supplémentaires. Il serait donc pertinent de bonifier la validation du modèle sur d'autres

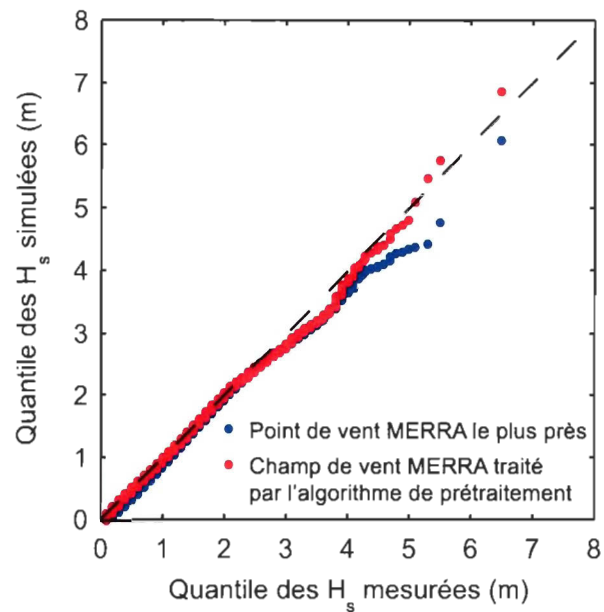


Figure 15: Diagramme Quantile-Quantile comparant les performances de GENER (formule de fetch du CEM) pour simuler les H_s à partir des vents MERRA ajustés avec et sans l'utilisation de l'algorithme de prétraitement du vent au site de la bouée C45138 sur la période 1991-2012 (avril à décembre).

domaines marins où la houle est peu présente et où des mesures de vagues en eaux profondes supplémentaires sont disponibles.

L'utilisation de GENER et de l'algorithme de prétraitement des vents permet la simulation des vagues sur l'ensemble de l'EGSL avec des ressources informatiques modestes tout en maintenant des temps de calcul très raisonnables comparativement aux modèles de vagues spectraux. Toutefois, l'utilisation d'un modèle paramétrique de vagues a ses limites. En effet, bien que la houle soit plutôt limitée dans l'EGSL, certains événements météorologiques en génèrent et celle-ci peut se propager et réfracter autour d'obstacles. Dans ces cas-là, GENER ne peut pas toujours bien estimer les conditions de vagues. C'est entre autres ce qui explique l'erreur quadratique moyenne relativement élevée sur les H_s (de l'ordre de 0.5 m). Toutefois, le biais sur les H_s est faible ce qui fait en sorte que sur de longues périodes (plusieurs années), GENER arrive à bien représenter le climat de vagues. Conséquemment, GENER est un outil plus adapté à la simulation des vagues pour la

caractérisation d'un régime de vagues que pour des applications opérationnelles (ex. prévisions météorologiques marines pour la navigation). Ceci remplit l'objectif 1 de la maîtrise visant à améliorer et à valider le modèle paramétrique de vagues GENER.

L'atténuation des vagues simulées par GENER en post-traitement pour tenir compte de la présence de la glace de mer sur l'EGSL permet d'étendre davantage la portée des applications du modèle paramétrique de vagues. Il s'agit d'une amélioration importante puisque la glace de mer a un impact non négligeable sur le climat de vagues de l'EGSL. Cette méthode (Figure 16) est utilisée avec les sorties de glace du modèle océanique régional de l'EGSL. Cela devrait rendre plus réaliste la caractérisation du climat de vagues du passé-récent (1981-2010) de l'EGSL effectué à partir du forçage par la réanalyse MERRA. La présence de glace de mer réduit de l'ordre de 12% en moyenne les H_s sur cette période.

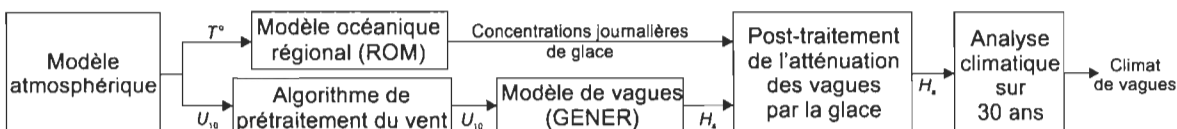


Figure 16: Diagramme de la méthodologie utilisée pour l'évaluation du climat de vagues à un endroit donné. La température de l'air (T°) et la vitesse du vent (U_{10}) sont utilisées pour obtenir les concentrations de glace de mer et les hauteurs significatives de vagues (H_s).

L'utilisation de la même approche avec comme forçage deux simulations climatiques du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) permet d'étudier l'évolution climatique du régime des vagues de l'EGSL au cours du 21^e siècle. Ces simulations montrent que les changements dans le régime des vents au cours de ce siècle ne devraient pas avoir d'impact significatif sur le climat de vagues (Figures 17, 18 et 19). Par contre, la réduction importante des concentrations de glace de mer en hiver comme conséquence de la hausse des températures moyennes pourrait engendrer une augmentation des H_s extrêmes. En fait, l'impact de la glace de mer sur le climat de vagues de l'EGSL devrait devenir négligeable d'ici 2100 sauf dans l'estuaire, où le couvert de glace saisonnier devrait persister (Figures 17, 18 et 19). Conséquemment, le climat de vagues de la période 1981-2010, sans

considération de l'atténuation des vagues par la glace, devrait être une estimation acceptable du climat de vagues de l'EGSL vers 2100. Toutefois, ces résultats sont basés exclusivement sur deux simulations climatiques de vents du MRCC et pour un seul scénario d'émissions de gaz à effet de serre (scénario A2 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). La simplicité et la rapidité de la méthode utilisée font en sorte qu'il sera pertinent de bonifier les résultats obtenus au fur et à mesure que de nouvelles simulations climatiques avec des résolutions spatiales et temporelles suffisantes deviendront disponibles afin de réduire les incertitudes dans ces prévisions climatiques. Ceci remplit l'objectif 2 de la maîtrise visant à évaluer le climat de vagues de l'EGSL et à déterminer comment il pourrait évoluer au cours du 21^e siècle.

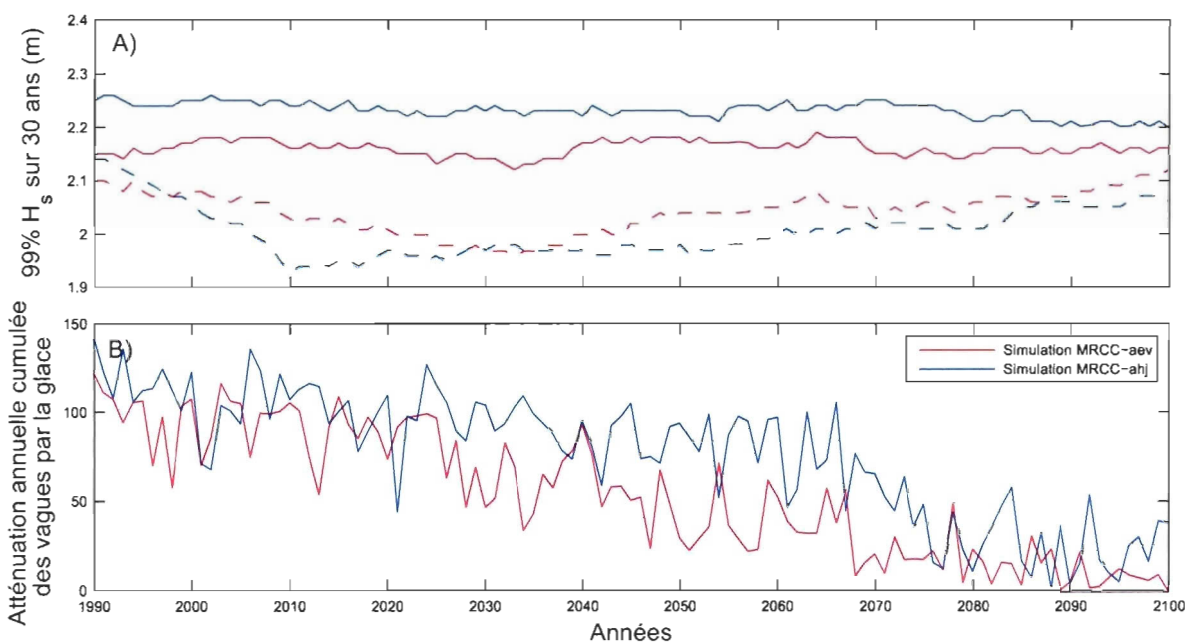


Figure 17: Évolution temporelle, entre 1990 et 2100, du climat de vagues et de la glace de mer dans l'estuaire du Saint-Laurent (48.78°N, 68.23°W) selon les simulations MRCC-aev (rouge) et MRCC-ahj (bleu). A) 99% H_s calculées sur les 30 années précédentes avec (traitillés) et sans (traits pleins) considération de la glace de mer. B) atténuation annuelle cumulée des vagues par la glace.

Considérant que GENER néglige systématiquement la présence de la houle et les interactions des vagues avec le fond, que malgré l'algorithme de prétraitement des vents son

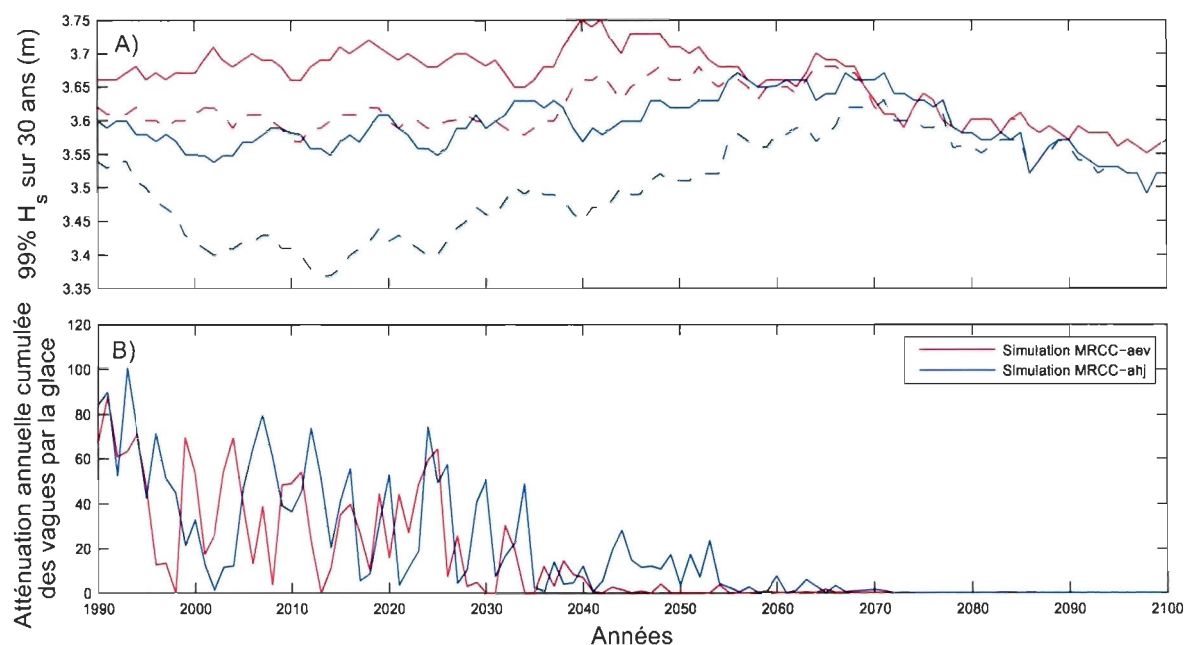


Figure 18: Évolution temporelle, entre 1990 et 2100, du climat de vagues et de la glace de mer dans le nord-ouest du golfe du Saint-Laurent (49.74°N , 65.83°W) selon les simulations MRCC-aev (rouge) et MRCC-ahj (bleu). A) 99% H_s calculées sur les 30 années précédentes avec (traitillés) et sans (traits pleins) considération de la glace de mer. B) atténuation annuelle cumulée des vagues par la glace.

forçage par le vent demeure très simpliste comparativement à ce qui est possible avec les modèles de vagues spectraux, et que la méthode d'atténuation des vagues par la glace en post-traitement simplifie énormément la dynamique des interactions vagues-glace, il y a encore place à amélioration dans l'étude du régime des vagues de l'EGSL. À court terme, les résultats obtenus avec GENER pourraient servir de forçage au large pour des modèles de vagues côtiers. Cela permettrait de simuler les vagues en eaux peu profondes, soit le secteur d'intérêt dans la plupart des études de dynamique côtière ou de génie côtier. Éventuellement, l'étude du climat de vagues de l'EGSL pourrait être refaite entièrement en utilisant uniquement un modèle de vagues spectral pour ainsi produire un atlas de vagues complet (eaux profondes et peu profondes). Pour ce faire, il faudrait idéalement que l'atténuation des vagues par la glace soit implémentée directement dans le modèle de

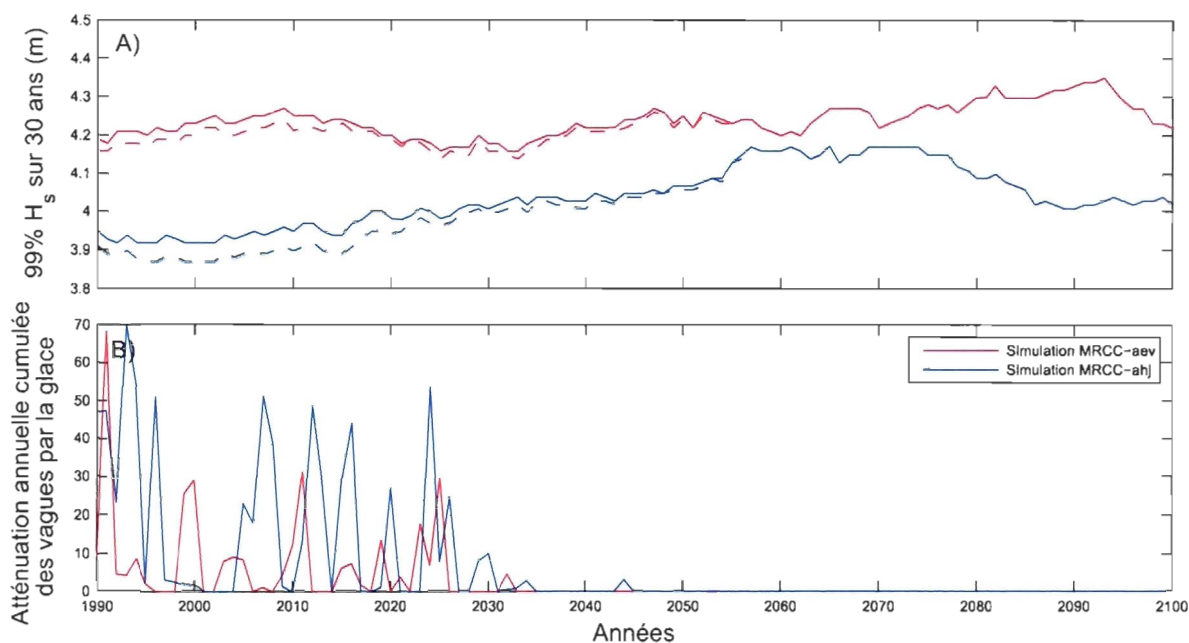


Figure 19: Évolution temporelle, entre 1990 et 2100, du climat de vagues et de la glace de mer dans le golfe du Saint-Laurent central (48.46°N , 62.71°W) selon les simulations MRCC-aev (rouge) et MRCC-ahj (bleu). A) 99% H_s calculées sur les 30 années précédentes (traitillés) et sans (traits pleins) considération de la glace de mer. B) atténuation annuelle cumulée des vagues par la glace.

vagues. Toutefois, cette approche nécessitera des ressources informatiques et des temps de calcul beaucoup plus importants que ce qui a été requis pour la présente étude.

De plus, cette étude n'a examiné en détail seulement les H_s et a négligé les directions et les périodes des vagues qui fournissent pourtant de l'information complémentaire pour la caractérisation d'un climat de vagues. Par exemple, des changements dans le régime des vents pourraient engendrer une évolution des directions dominantes des vagues au large sans pour autant que le climat des hauteurs significatives de vagues ne varie. Conséquemment, sans intensification des H_s , des changements dans la dynamique sédimentaire côtière pourraient alors survenir. Toutefois, Neumeier et al. (2013) ont étudié l'évolution possible des directions des vagues à cinq sites de l'EGSL au cours du 21^e siècle et ils ont constaté que les directions dominantes de vagues restent à peu près inchangées. L'étude de la variabilité saisonnière du climat de vagues pourrait aussi être intéressante puisque la séquence chronologique des

événements extrêmes de vagues (ex. l'espace de temps entre les tempêtes) a de l'influence, par exemple, sur les taux d'érosion et d'accrétion des plages.

Néanmoins, ces résultats auront des répercussions en génie côtier, dans l'étude des processus d'érosion côtière et en gestion intégrée de la zone côtière puisqu'il s'agit de la première tentative d'évaluer l'impact des changements climatiques sur le climat de vagues de l'EGSL. Il est maintenant possible de prendre en considération l'évolution probable du climat de vagues de l'EGSL avec les changements climatiques dans différentes études à l'instar de ce qui est fait pour l'évolution du niveau de la mer. Bien que la méthode basée essentiellement sur l'utilisation de GENER et de l'algorithme de prétraitement du vent soit développée avant tout pour l'EGSL, elle pourra également servir pour l'étude du climat de vagues sur d'autres mers fermées ou semi-fermées et sur des lacs.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Baird, W. F. and Glodowski, C. W. (1978). Estimation of wave energy using a wind wave hindcast technique. In: *Proceedings of International Symposium on Wave and Tidal Energy*, pages 39–54, Canterbury.
- Baird, W. F., Readshaw, J. S., and Sayao, O. J. (1986). Nearshore sediment transport predictions, Stanhope Lane, PEI. Technical report, Canadian Coastal Sediment Study, National Research Council, Report C2S2-21, Ottawa, Canada.
- Balakrishnan, N., Voinov, V., and Nikulin, M. S. (2013). *Chi-squared Goodness of Fit Tests with Applications*. Academic Press, Boston.
- Benoit, M., Marcos, F., and Becq, F. (1996). Development of a third generation shallow-water wave model with unstructured spatial meshing. In: *Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering*, pages 465–478. American Society of Civil Engineers.
- Bernatchez, P. and Dubois, J.-M. M. (2004). Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. *Géographie physique et Quaternaire*, 58(1):45–71.
- Bidlot, J.-R., Doble, M. J., and Tang, Y. (2013). Inclusion of sea ice attenuation in an operational wave model. In: *13th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting and 4th Coastal Hazard Symposium*, page 23.
- Bishop, C. T. (1983). Comparison of Manual Wave Prediction Models. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 109(1):1–17.
- Bishop, C. T. and Donelan, M. A. (1989). Wave Prediction Models. In: Lakhan, V. C. and Trenhaile, A. S., editors, *Applications in Coastal Modelling*, chapter 4, pages 75–105. Elsevier, New York.
- Bishop, C. T., Donelan, M. A., and Kahma, K. K. (1992). Shore protection manual's wave prediction reviewed. *Coastal Engineering*, 17:25–48.
- Booij, N., Ris, R. C., and Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4):7649–7666.
- Bretschneider, C. L. (1952). Revised wave forecasting relationships. In: *Proceedings of the 2nd Conference on Coastal Engineering*, pages 1–5. Council on Wave Research.
- Bretschneider, C. L. (1958). Revisions in wave forecasting: Deep and shallow water. In: *Proceedings of the 6th Conference on Coastal Engineering*, pages 30–67. Council on Wave Research.

- Broman, B., Hammarklint, T., Rannat, K., Soomere, T., and Valdmann, A. (2006). Trends and extremes of wave fields in the north-eastern part of the Baltic Proper. *Oceanologia*, 48(S):165–184.
- Bryant, E. A. and McCann, S. B. (1972). A Note on Wind and Wave Conditions in the Southern Gulf of St. Lawrence. *Maritime Sediments*, 8(3):101–103.
- Caires, S. and Sterl, A. (2005). 100-Year Return Value Estimates for Ocean Wind Speed and Significant Wave Height from the ERA-40 Data. *Journal of Climate*, 18(7):1032–1048.
- Cavaleri, L. and Bertotti, L. (2004). Accuracy of the modelled wind and wave fields in enclosed seas. *Tellus A*, 56(2):167–175.
- Caya, D. and Laprise, R. (1999). A Semi-Implicit Semi-Lagrangian Regional Climate Model: The Canadian RCM. *Monthly Weather Review*, 127(3):341–362.
- CERC (1977). *Shore Protection Manual*. USACE, Coastal Engineering Research Center, Washington.
- CERC (1984). *Shore Protection Manual*. USACE, Coastal Engineering Research Center, Washington.
- Charles, E., Idier, D., Delecluse, P., Déqué, M., and Cozannet, G. (2012). Climate change impact on waves in the Bay of Biscay, France. *Ocean Dynamics*, 62(6):831–848.
- Coles, S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer, London.
- Côté, J., Desmarais, J.-G., Gravel, S., Méthot, A., Patoine, A., Roch, M., and Staniforth, A. (1998a). The Operational CMC–MRB Global Environmental Multiscale (GEM) Model. Part II: Results. *Monthly Weather Review*, 126(6):1397–1418.
- Côté, J., Gravel, S., Méthot, A., Patoine, A., Roch, M., and Staniforth, A. (1998b). The Operational CMC–MRB Global Environmental Multiscale (GEM) Model. Part I: Design Considerations and Formulation. *Monthly Weather Review*, 126(6):1373–1395.
- Desjardins, L. and Ouellet, Y. (1984). Modèles numériques utilisés pour la conception des ouvrages maritimes. In: *Comptes rendus du Colloque sur la simulation numérique appliquée au domaine de la ressource hydrique, dans le cadre du 52e congrès annuel de l'ACFAS*, pages 187–224. Centre de recherches sur l'eau, Université Laval.
- Donelan, M. A. (1980). Similarity theory applied to the forecasting of wave heights, periods and directions. In: *Proceedings of the Canadian Coastal Conference*, pages 47–61. National Research Council of Canada.
- Dumont, D., Kohout, A. L., and Bertino, L. (2011). A wave-based model for the marginal ice zone including a floe breaking parameterization. *Journal of Geophysical Research*, 116:1–12.

- Dupuis, L. and Ouellet, Y. (1999). Pr evision des vagues dans l'estuaire du Saint-Laurent   l'aide d'un mod le bidimensionnel. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 26:713–723.
- Etemad-Shahidi, A., Kazeminezhad, M. H., and Mousavi, S. J. (2009). On the prediction of wave parameters using simplified methods. *Journal of Coastal Research*, SI(56):505–509.
- Ewing, L. (2009). Sea Level Rise: Major Implications to Coastal Engineering and Coastal Management. In: Kim, Y. C., editor, *Handbook of coastal and ocean engineering*, chapter 36, pages 997–1021. World Scientific Publishing, New Jersey.
- Fleming, C. A., Philpott, K. L., and Pinchin, B. M. (1984). Evaluation of coastal sediment transport estimation techniques, Phase I: Implementation of alongshore sediment transport models and calibration of wave hindcasting procedure. Technical report, Canadian Coastal Sediment Study, National Research Council, Report C2S2-10.
- Forbes, D. L., Manson, G. K., Chagnon, R., Solomon, S. M., van der Sanden, J. J., and Lynds, T. L. (2002). Nearshore ice and climate change in the southern Gulf of St. Lawrence. In Squire, V. and Langhorne, P., editors, *Ice in the Environment: Proceedings 16th IAHR International Symposium on Ice*, pages 344–351. International Association of Hydraulic Engineering and Research.
- Forbes, D. L., Parkes, G. S., Manson, G. K., and Ketch, L. A. (2004). Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. *Marine Geology*, 210(1–4):169–204.
- Galbraith, P. S., Chass , J., Larouche, P., Gilbert, D., Brickman, D., Pettigrew, B., Devine, L., and Lafleur, C. (2013). Physical Oceanographic Conditions in the Gulf of St. Lawrence in 2012. Technical report, DFO Canadian Science Advisory Secretariat Research Document 2013/026.
- Goda, Y. (2003). Revisiting Wilson's Formulas for Simplified Wind-Wave Prediction. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 129(2):93–95.
- Grabemann, I. and Weisse, R. (2008). Climate change impact on extreme wave conditions in the North Sea: an ensemble study. *Ocean Dynamics*, 58(3-4):199–212.
- Groll, N., Grabemann, I., and Gaslikova, L. (2014). North Sea wave conditions: an analysis of four transient future climate realizations. *Ocean Dynamics*, 64(1):1–12.
- Groll, N. and H nricke, B. (2012). Baltic Sea wave conditions in a changing climate. In: *EGU General Assembly 2012*. European Geosciences Union.
- Gunturu, U. B. and Schlosser, C. A. (2012). Characterization of wind power resource in the United States. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(20):9687–9702.

- Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., E, C. D., Enke, K., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W., and Walden, H. (1973). Measurements of wind-wave-growth and swell decay during the joint North Sea wave project (JONSWAP). *Deutsche Hydrografische Zeitschrift*, Supp. A8(12):1–95.
- Hasselmann, K., Sell, W., Ross, D. B., and Müller, P. (1976). A Parametric Wave Prediction Model. *Journal of Physical Oceanography*, 6(2):200–228.
- Hawkes, P. J. (1987). A Wave Hindcasting Model. In: *Modelling the Offshore Environment*, pages 73–88. Society for Underwater Technology.
- Hemer, M. A., Katzfey, J., and Trenham, C. E. (2013). Global dynamical projections of surface ocean wave climate for a future high greenhouse gas emission scenario. *Ocean Modelling*, 70:221–245.
- Hemer, M. A., Wang, X. L., Weisse, R., and COWCLIP-Team (2011). WCRP-JCOMM Workshop on Coordinated Global Wave Climate Projections (COWCLIP). Technical report, WMO/TD-No. 1581, Geneva, Switzerland.
- Hill, B. T., Ruffman, A., and Drinkwater, K. (2002). Historical record of the incidence of sea ice on the Scotian Shelf and the Gulf of St. Lawrence. In: Squire, V. and Langhorne, P., editors, *Ice in the Environment: Proceedings 16th IAHR International Symposium on Ice*, pages 313–320, Dunedin, New Zealand. International Association of Hydraulic Engineering and Research.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press, New York.
- Hundecha, Y., St-Hilaire, A., Ouarda, T. B. M. J., El Adlouni, S., and Gachon, P. (2008). A Nonstationary Extreme Value Analysis for the Assessment of Changes in Extreme Annual Wind Speed over the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(11):2745–2759.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jacob, D., Perrie, W., Toulany, B., Saucier, F., Lefavre, D., and Turcotte, V. (2002). Wave Model Validation in the St. Lawrence River Estuary. In: *Proceedings of the 7th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, pages 477–483.
- Johnston, D. W., Friedlaender, A. S., Torres, L. G., and Lavigne, D. M. (2005). Variation in sea ice cover on the east coast of Canada from 1969 to 2002: climate variability and implications for harp and hooded seals. *Climate Research*, 29(3):209–222.

- Jonathan, P. and Ewans, K. (2013). Statistical modelling of extreme ocean environments for marine design: A review. *Ocean Engineering*, 62:91–109.
- Jungclauss, J. H., Keenlyside, N., Botzet, M., Haak, H., Luo, J.-J., Latif, M., Marotzke, J., Mikolajewicz, U., and Roeckner, E. (2006). Ocean Circulation and Tropical Variability in the Coupled Model ECHAM5/MPI-OM. *Journal of Climate*, 19(16):3952–3972.
- Kamphuis, J. W. (2010). *Introduction to Coastal Engineering and Management*. World Scientific, Singapore, 2nd edition.
- Knuuti, K. (2002). Planning for Sea Level Rise: U.S. Army Corps of Engineers Policy. In: Ewing, L. and Wallendorf, L., editors, *Proceedings of the Solutions to Coastal Disasters 2002 Conference*, pages 549–560. American Society of Civil Engineers.
- Komar, P. D., Allan, J. C., and Ruggiero, P. (2009). Ocean Wave Climates: Trends and Variations Due to Earth's Changing Climate. In: Kim, Y. C., editor, *Handbook of coastal and ocean engineering*, chapter 35, pages 971–995. World Scientific Publishing, New Jersey.
- Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M. A., Hasselmann, K., Hasselmann, S., and Janssen, P. A. E. M. (1994). *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Komen, G. J. and Hasselmann, K. (1984). On the Existence of a Fully Developed Wind-Sea Spectrum. *Journal of Physical Oceanography*, 14(8):1271–1285.
- Le Roux, J. P. (2009). Characteristics of developing waves as a function of atmospheric conditions, water properties, fetch and duration. *Coastal Engineering*, 56:479–483.
- Lionello, P., Cogo, S., Galati, M. B., and Sanna, A. (2008). The Mediterranean surface wave climate inferred from future scenario simulations. *Global and Planetary Change*, 63(2–3):152–162.
- Lionello, P. and Sanna, A. (2005). Mediterranean wave climate variability and its links with NAO and Indian Monsoon. *Climate Dynamics*, 25(6):611–623.
- Liu, A. K. and Mollo-Christensen, E. (1988). Wave Propagation in a Solid Ice Pack. *Journal of Physical Oceanography*, 18(11):1702–1712.
- Mailhot, J., Bélair, S., Lefaiivre, L., Bilodeau, B., Desgagné, M., Girard, C., Glazer, A., Leduc, A. M., Méthot, A., Patoine, A., Plante, A., Rahill, A., Robinson, T., Talbot, D., Tremblay, A., Vaillancourt, P., Zadra, A., and Qaddouri, A. (2006). The 15-km version of the Canadian regional forecast system. *Atmosphere-Ocean*, 44(2):133–149.
- Mathiesen, M., Goda, Y., Hawkes, P. J., Mansard, E., Martín, M. J., Peltier, E., Thompson, E. F., and Van Vledder, G. (1994). Recommended practice for extreme wave analysis. *Journal of Hydraulic Research*, 32(6):803–814.

- Mazas, F. and Hamm, L. (2011). A multi-distribution approach to POT methods for determining extreme wave heights. *Coastal Engineering*, 58(5):385–394.
- Mesinger, F., DiMego, G., Kalnay, E., Mitchell, K., Shafran, P. C., Ebisuzaki, W., Jović, D., Woollen, J., Rogers, E., Berbery, E. H., Ek, M. B., Fan, Y., Grumbine, R., Higgins, W., Li, H., Lin, Y., Manikin, G., Parrish, D., and Shi, W. (2006). North American Regional Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(3):343–360.
- Moeini, M. H. and Etemad-Shahidi, A. (2006). Evaluation of SWAN numerical model & SPM method for wave hindcasting. In: *7th International Conference on coasts, ports and marine structures*, pages 123–129.
- Music, B. and Caya, D. (2007). Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrometeorology*, 8(5):969–988.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grubler, A., Jung, T. Y., and Kram, T. (2000). *Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Neumeier, U., Ruest, B., Lambert, A., Bismuth, E., Dumont, D., Jacob, D., Savard, J.-P., and Joly, S. (2013). Modélisation du régime des vagues du golfe et de l’estuaire du Saint-Laurent pour l’adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques. Technical report, Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, 253 pages.
- Nicholls, R. J., Wong, P., Burkett, V., Woodroffe, C. D., and Hay, J. (2008). Climate change and coastal vulnerability assessment: scenarios for integrated assessment. *Sustainability Science*, 3(1):89–102.
- OCDI (2002). *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*. The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, Daikousha Printing.
- Ouellet, Y. and Drouin, A. (1991). Définition des conditions de vagues pour la conception d’un havre de pêche à Sept-îles. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18(5):851–863.
- Resio, D. T., Bratos, S. M., and Thompson, E. F. (2002). Meteorology and Wave Climate. In: Vincent, L. and Demirbilek, Z., editor, *Coastal Engineering Manual*, chapter II-2, pages 1–72. Engineering Manual 1110-2-1100, USACE, Washington, DC.
- Resio, D. T. and Vincent, C. L. (1977). Estimation of Winds Over the Great Lakes. *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, 103:265–285.

- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., Bosilovich, M. G., Schubert, S. D., Takacs, L., Kim, G.-K., Bloom, S., Chen, J., Collins, D., Conaty, A., da Silva, A., Gu, W., Joiner, J., Koster, R. D., Lucchesi, R., Molod, A., Owens, T., Pawson, S., Pegion, P., Redder, C. R., Reichle, R., Robertson, F. R., Ruddick, A. G., Sienkiewicz, M., and Woollen, J. (2011). MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *Journal of Climate*, 24(14):3624–3648.
- Ris, R. C., Holthuijsen, L. H., and Booij, N. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4):7667–7681.
- Ruest, B., Neumeier, U., Dumont, D., and Lambert, A. (2013). Wave climate evaluation in the Gulf of St. Lawrence with a parametric wave model. In: Bonneton, P. and Garlan, T., editors, *Coastal Dynamics 2013*, pages 1363–1374. SHOM.
- Saucier, F. J., Roy, F., Gilbert, D., Pellerin, P., and Ritchie, H. (2003). Modeling the formation and circulation processes of water masses and sea ice in the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C8):3269.
- Savard, J.-P., Bernatchez, P., Morneau, F., and Saucier, F. J. (2009). Vulnérabilité des communautés côtières de l'est du Québec aux impacts des changements climatiques. *La Houille Blanche*, 2009(2):59–66.
- Saville, T. (1954). The Effect of Fetch Width on Wave Generation. Technical report, USACE, Beach Erosion Board.
- Scinocca, J. F., McFarlane, N. A., Lazare, M., Li, J., and Plummer, D. (2008). Technical Note: The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(23):7055–7074.
- Senneville, S., St-Onge Drouin, S., Dumont, D., Bihan-Poudec, A.-C., Belemaalem, Z., Corriveau, M., Bernatchez, P., Bélanger, S., Tolszczuk-Leclerc, S., and Villeneuve, R. (2013). Rapport final : modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques. Technical report, Réalisé pour le compte du Ministère des Transports du Québec.
- Smith, G. C., Roy, F., and Brasnett, B. (2013). Evaluation of an operational ice–ocean analysis and forecasting system for the Gulf of St Lawrence. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(671):419–433.
- Smith, R. L. (1984). Threshold Methods for Sample Extremes. In: Tiago de Oliveira, J., editor, *Statistical Extremes and Applications*, pages 621–638. Reidel, Dordrecht.
- Soomere, T. and Räämet, A. (2014). Decadal changes in the Baltic Sea wave heights. *Journal of Marine Systems*, 129(0):86–95.

- Squire, V. A. (2007). Of ocean waves and sea-ice revisited. *Cold Regions Science and Technology*, 49(2):110–133.
- Squire, V. A., Dugan, J. P., Wadhams, P., Rottier, P. J., and Liu, A. K. (1995). Of Ocean Waves and Sea Ice. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 27(1):115–168.
- Sutherland, J. and Wolfe, J. (2002). Coastal Defence Vulnerability 2075. Technical report, HR Wallingford, Report SR 590.
- Sverdrup, H. U. and Munk, W. H. (1947). Wind, sea, and swell: Theory of relations for forecasting. Technical report, US Hydrographic Office.
- Swail, V. R. and Cox, A. T. (2000). On the Use of NCEP–NCAR Reanalysis Surface Marine Wind Fields for a Long-Term North Atlantic Wave Hindcast. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(4):532–545.
- Teena, N. V., Sanil Kumar, V., Sudheesh, K., and Sajeev, R. (2012). Statistical analysis on extreme wave height. *Natural Hazards*, 64(1):223–236.
- Tolman, H. L. (1989). The numerical model WAVEWATCH: a third generation model for the hindcasting of wind waves on tides in shelf seas. Technical Report Rep. no. 89-2, Delft University of Technology, Rep. no. 89-2.
- Tolman, H. L. (2003). Treatment of unresolved islands and ice in wind wave models. *Ocean Modelling*, 5(3):219–231.
- Tuomi, L., Kahma, K. K., and Pettersson, H. (2011). Wave hindcast statistics in the seasonally ice-covered Baltic Sea. *Boreal Environment Research*, 16(6):451–472.
- Von Storch, H. and Zwiers, F. W. (2001). *Statistical analysis in climate research*. Cambridge University Press.
- Wadhams, P. (1983). A mechanism for the formation of ice edge bands. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 88(C5):2813–2818.
- WAMDI (1988). The WAM Model—A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. *Journal of Physical Oceanography*, 18(12):1775–1810.
- Wang, R. and Shen, H. (2013). On Developing a Continuum Model for Wave Propagation in Ice Covered Seas. In: Huang, W., Wang, K.-H., and Chen, Q. J., editors, *Coastal Hazards*, pages 24–32. American Society of Civil Engineers.
- Wang, X. L. and Swail, V. R. (2006a). Climate change signal and uncertainty in projections of ocean wave heights. *Climate Dynamics*, 26(2-3):109–126.

- Wang, X. L. and Swail, V. R. (2006b). Historical and possible future changes of wave heights in Northern hemisphere oceans. In: Perrie, W., editor, *Atmosphere Ocean Interactions : Volume 2*, pages 185–210. WIT Press, Boston.
- Wang, X. L., Wan, H., and Swail, V. R. (2006). Observed Changes in Cyclone Activity in Canada and Their Relationships to Major Circulation Regimes. *Journal of Climate*, 19:896–915.
- Wang, X. L., Zwiers, F. W., and Swail, V. R. (2004). North Atlantic Ocean Wave Climate Change Scenarios for the Twenty-First Century. *Journal of Climate*, 17(12):2368–2383.
- Weisse, R. and von Storch, H. (2010). *Marine Climate and Climate Change. Storms, Wind Waves and Storm surges*. Praxis Publishing, Chichester, UK.
- Williams, T. D., Bennetts, L. G., Squire, V. A., Dumont, D., and Bertino, L. (2013a). Wave–ice interactions in the marginal ice zone. Part 1: Theoretical foundations. *Ocean Modelling*, 71:81–91.
- Williams, T. D., Bennetts, L. G., Squire, V. A., Dumont, D., and Bertino, L. (2013b). Wave–ice interactions in the marginal ice zone. Part 2: Numerical implementation and sensitivity studies along 1D transects of the ocean surface. *Ocean Modelling*, 71:92–101.
- Willmott, C. J. (1982). Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11):1309–1313.
- Wilson, B. W. (1965). Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December, 1959. *Deutsche Hydrografische Zeitschrift*, 18(3):114–130.
- Winterfeldt, J. and Weisse, R. (2009). Assessment of Value Added for Surface Marine Wind Speed Obtained from Two Regional Climate Models. *Monthly Weather Review*, 137(9):2955–2965.
- WMO (1998). *Guide to wave analysis and forecasting*. World Meteorological Organization, Genève, 2nd edition.

ANNEXE A

FORMULES DE FETCH IMPLÉMENTÉES DANS GENER

La croissance des vagues en eaux profondes peut soit être limitée par la longueur du plan d'eau dans la direction sur laquelle le vent souffle sans rencontrer d'obstacle (le fetch), soit par la durée durant laquelle le vent souffle ou soit par la vitesse des vents lorsque les conditions de développement complet sont atteintes (Kamphuis, 2010). Pour ces différents stades de développement des vagues, les formules de fetch permettent de calculer les conditions de vagues en eaux profondes (hauteur de vagues et période) à partir des conditions de vent (vitesse et durée) et du fetch géographique dans la direction du vent. Pour ce faire, en plus du fetch géographique, un fetch effectif (F_{eff}) est calculé en premier selon la vitesse et la durée du vent. Le plus court entre les deux fetchs (géographique ou effectif) est ensuite utilisé pour l'application des formules de fetch.

Dans GENER, les fetchs géographiques (pour 16 directions) correspondent à des fetchs pondérés. Il ne s'agit donc pas directement de la distance à la côte mesurée dans une direction donnée, mais d'une distance pondérée qui tient compte de la variabilité spatiale du trait de côte calculée selon la méthode de Saville (1954) recommandée par OCDI (2002). Pour ce faire, les distances à la côte sont mesurées sur des radiales à des intervalles de 3° sur un secteur compris entre -42° et +42° et centré sur la direction d'intérêt, puis le fetch pondéré

(pour la direction d'intérêt) est calculé par

$$F = \bar{G} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{14} \sum_{i=0}^{14} (G_i - \bar{G})^2 \right)^{0.5}$$

où

$$\bar{G} = \frac{1}{15} \sum_{i=0}^{14} G_i$$

$$G_i = \frac{\sum_{k=-i}^i F_k (\cos \theta_k)^2}{\sum_{k=-i}^i \cos \theta_k}$$

où θ est l'angle par rapport à la direction d'intérêt et où F_θ est le fetch dans cette direction. Il est important de noter que les fetchs pondérés ainsi calculés sont utilisés pour l'application de toutes les formules de fetch même si certaines méthodes recommandent plutôt d'utiliser soit le fetch direct dans une direction la donnée ou un fetch pondéré d'une autre manière. Cela correspond à la pratique habituelle pour les simulations de vagues avec GENER dans l'estuaire et dans le golfe du Saint-Laurent.

Les formules de fetch permettent de calculer les hauteurs significatives des vagues (H_s en m) ainsi que les périodes du pic d'énergie des spectres de vagues (T_p en s) ou les périodes significatives des vagues (T_s en s). Dans GENER, ce sont toujours les T_s qui sont données en sorties en convertissant les T_p en T_s selon ce qui est proposé par CERC (1984) :

$$T_s = 0.95T_p$$

Les données d'entrée requises pour appliquer les formules de fetch sont la vitesse du vent à 10 m (U en m/s), la durée des vents (t en s), les fetchs pondérés (F en m) et l'accélération gravitationnelle (g en m/s²). Les différentes formules de fetchs implémentées dans le modèle pour les simulations des vagues en eaux profondes sont décrites dans les sections qui suivent.

Méthode SMB (SPM77)

Sverdrup and Munk (1947) ont développé la première méthode de prédiction des vagues ayant été largement utilisée. Elle a ensuite été révisée par Bretschneider (1952, 1958). Elle est couramment appelée la méthode SMB (pour Sverdrup-Munk-Bretschneider) et a été recommandée dans le *Shore Protection Manual* de 1977 (CERC, 1977). La valeur du F_{eff} selon les conditions de vent est d'abord déterminée en résolvant

$$\frac{gt}{U} = 6.5882 \exp \left[\left((0.0161x^2 - 0.3692x + 2.2024)^{1/2} + 0.8798x \right) \right]$$

où

$$x = \ln \left(\frac{gF_{eff}}{U^2} \right)$$

puis les deux équations suivantes sont utilisées pour calculer H_s et T_s (F est remplacé par F_{eff} si $F > F_{eff}$) :

$$\frac{gH_s}{U^2} = 0.283 \tanh \left[0.0125 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.42} \right]$$

$$\frac{gT_s}{2\pi U} = 1.20 \tanh \left[0.077 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.25} \right]$$

Méthode de Wilson

La méthode de Wilson (Wilson, 1965) est en fait une extension de la méthode SMB qui est recommandée par Goda (2003); OCDI (2002). La condition pour avoir des conditions de

croissance des vagues limitées par le fetch est la suivante

$$\frac{gt}{U} = \int_0^{gF_{eff}/U^2} \frac{d(gF_{eff}/U^2)}{gT_s/4\pi U}$$

mais peut se simplifier à

$$\frac{tU}{F_{eff}} = 43 \left(\frac{gF_{eff}}{U^2} \right)^{-0.27}$$

sans engendrer des écarts importants (Goda, 2003). Le F_{eff} peut donc être calculé en résolvant l'équation précédente. Les deux équations suivantes sont ensuite utilisées pour calculer H_s et T_s (F est remplacé par F_{eff} si $F > F_{eff}$) :

$$\frac{gH_s}{U^2} = 0.30 \left\{ 1 - \left[1 + 0.004 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \right]^{-2} \right\}$$

$$\frac{gT_s}{2\pi U} = 1.37 \left\{ 1 - \left[1 + 0.008 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/3} \right]^{-5} \right\}$$

Méthode de JONSWAP

Les données obtenues durant le Joint North Sea Wave Project (JONSWAP, Hasselmann et al., 1973), ont permis le développement de la méthode de JONSWAP (Hasselmann et al., 1976) pour la prévision des vagues. D'abord, la durée du vent t est limitée selon la condition

$$\frac{gt}{U} \leq 71500$$

puis la valeur du F_{eff} selon les conditions de vent est déterminée en résolvant :

$$\frac{gt}{U} = 68.8 \left(\frac{gF_{eff}}{U^2} \right)^{2/3}$$

Les deux équations suivantes sont ensuite utilisées pour cacluler H_s et T_p (F est remplacé par F_{eff} si $F > F_{eff}$) :

$$\frac{gH_s}{U^2} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.0016 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/2} \\ 0.2433 \end{array} \right.$$

$$\frac{gT_p}{U^2} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.2857 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{1/3} \\ 8.134 \end{array} \right.$$

Méthode du Shore Protection Manual de 1984 (SPM84)

La méthode du *Shore Protection Manual* de 1984 (CERC, 1984) se base essentiellement sur la méthode de JONSWAP (Hasselmann et al., 1976). La seule différence est que le vent U est ajusté préalablement comme suit et que le vent ajusté U_A remplace U dans les autres formules.

$$U_A = 0.71U^{1.23}$$

Méthode du Coastal Engineering Manual (CEM)

Pour appliquer la méthode du *Coastal Engineering Manual* (Resio et al., 2002), il faut d'abord calculer la vitesse de cisaillement u_* à partir du coefficient de traînée C_D avec les

équations suivantes

$$C_D = 0.001 (1.1 + 0.035U)$$

$$u_* = U (C_D)^{1/2}$$

Par la suite, il faut déterminer si la croissance des vagues est limitée par le fetch en comparant t à t_{min} avec

$$t_{min} = 77.23 \frac{F^{0.67}}{U^{0.34} g^{0.33}}$$

Si la croissance est limitée par la durée ($t \leq t_{min}$), un F_{eff} doit être calculé en résolvant l'équation suivante :

$$\frac{gF_{eff}}{u_*^2} = 5.23 \times 10^{-3} \left(\frac{gt}{u_*} \right)^{3/2}$$

Finalement, les deux équations suivantes sont utilisées pour calculer H_s et T_p (F est remplacé par F_{eff} si $F > F_{eff}$) :

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.0413 \left(\frac{gF}{u_*^2} \right)^{1/2} \\ 211.5 \end{array} \right.$$

$$\frac{gT_p}{u_*} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.751 \left(\frac{gF}{u_*^2} \right)^{1/3} \\ 239.8 \end{array} \right.$$

ANNEXE B

PERFORMANCES DE GENER RELATIVEMENT À SWAN POUR UNE SIMULATION IDÉALISÉE

Introduction

Les méthodes empiriques (formules de fetch) utilisées pour l'évaluation des conditions de vagues fonctionnent essentiellement de manière stationnaire, c'est-à-dire pour des conditions de vents constantes dans le temps. GENER rend dynamique l'utilisation des formules de fetch en permettant la variabilité des vitesses et des directions du vent dans le temps et la variabilité des distances de fetch en fonction de la direction du vent. Pour ce faire, en plus d'appliquer une formule de fetch pour permettre la génération et la croissance des vagues dans la direction du vent, GENER conserve un historique des conditions de vagues (hauteurs et périodes) précédentes sur chacun des 16 secteurs directionnels qu'il fait décroître linéairement dans le temps (basé sur le temps que les vagues d'une période donnée prennent pour franchir la distance de fetch en eau profonde). La sommation de la contribution énergétique des vagues provenant des 16 directions (celle actuelle ainsi que celles passées, mais pas encore complètement décrues) est alors utilisée pour déterminer la hauteur de vagues (proportionnelle au carré de l'énergie) en prenant comme période et direction celles du secteur avec la plus grande contribution énergétique. Cette approche repousse les limites d'application des formules de fetch et il est nécessaire de s'assurer qu'elle soit cohérente.

C'est pourquoi nous avons évalué les performances de GENER, en particulier l'implémentation permettant l'application dynamique des formules de fetch, relativement au modèle de vagues de 3^e génération SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*, Booij et al., 1999; Ris et al., 1999) ici considéré comme la référence.

Les modèles de vagues de 3^e génération peuvent tenir compte de la variabilité spatiale des vents en recevant comme entrée des champs de vents bidimensionnels. Toutefois, GENER peut seulement être forcé par une série de vecteurs vents (vitesses et directions) en un point, cela nécessite donc de faire l'hypothèse que les vents sont spatialement uniformes sur tout le domaine de génération des vagues à un instant donné. C'est pourquoi une simulation SWAN est réalisée avec comme conditions de vents, un champ de vents spatialement uniforme à chaque pas de temps (voir Figure 20). Il s'agit en fait des vecteurs vent utilisés pour le forçage de GENER, mais répétés sur une grille bidimensionnelle. De plus, la forme du plan d'eau est idéalisée. Il s'agit simplement d'une mer rectangulaire de dimensions 200×100 km et de profondeur infinie. Le point d'intérêt où les séries chronologiques de vagues produites par les deux modèles sont comparées est situé au centre du rectangle (croix rouge sur la Figure 20). Les vents utilisés et considérés uniformes sur l'ensemble de la mer rectangulaire sont ceux de la station météo de l'aéroport des Îles-de-la-Madeleine (identifiant 71710 de l'Organisation météorologique mondiale) sur deux années complètes (2010 et 2011). SWAN est utilisé avec la génération par le vent selon Komen and Hasselmann (1984) avec une résolution spatiale de 10 km sur tout le domaine et une résolution temporelle de 1 heure (`deltc` de la commande COMPUTE). Le spectre d'énergie des vagues est discrétisé en 64 directions et 35 groupes de fréquences (comprises entre 0.02 et 0.5 Hz). GENER est utilisé avec les différentes formulations implémentées et présentées à l'Annexe A (SPM77, SPM84, JONSWAP, Wilson, CEM) et avec une résolution temporelle de 1 heure également.

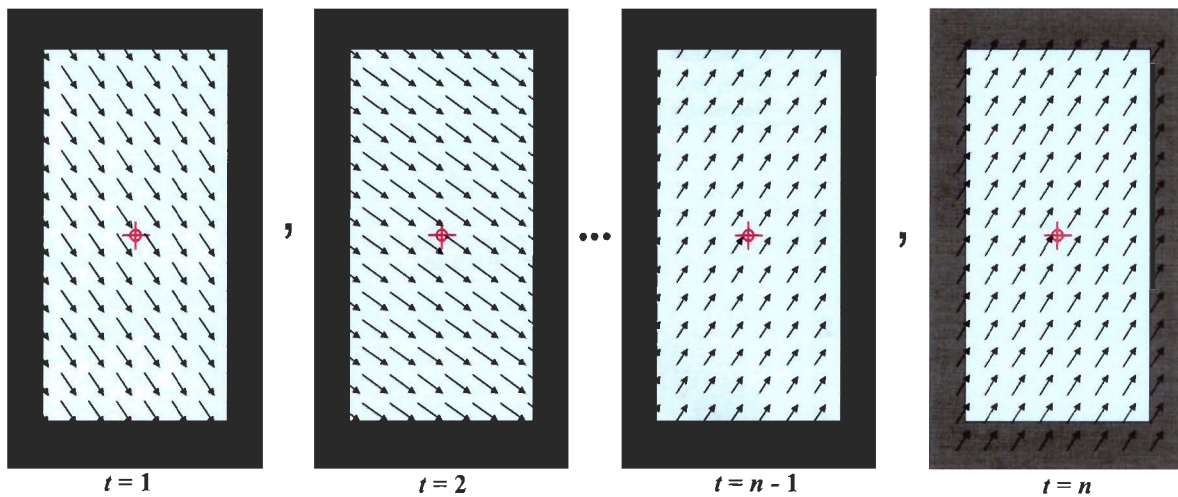


Figure 20: Schéma de la simulation idéalisée réalisée à différents pas de temps. Le secteur en bleu pâle représente le domaine marin de dimensions 200×100 km et de profondeur infinie, les vecteurs représentent les vents de la station météo 71710 à chaque pas de temps t et la croix rouge représente le point d'intérêt où les séries de vagues produites par SWAN et GENER sont comparées.

Résultats

La Figure 21 présente la performance de GENER (méthode de Wilson) pour la simulation des hauteurs significatives de vagues (H_s) relativement aux sorties de SWAN pour les deux ans. De manière générale, GENER arrive à représenter raisonnablement bien les H_s . En effet, la régression linéaire dont le coefficient de détermination (R^2) est de 0.80 s'approche de la droite $y = x$. De plus, le Tableau 4 montre que le biais est faible (-0.09 m) et que l'erreur est acceptable (biais absolu de 0.21 m et le *Root Mean Square Error* (RMSE) de 0.28 m). Le Tableau 4 permet aussi de constater que les différentes formules de fetch donnent des résultats relativement équivalents.

La Figure 22, pour sa part, permet de comparer les séries chronologiques de vagues simulées par GENER (méthodes de SPM84 et Wilson) à celles simulées par SWAN pour les H_s et pour les directions des vagues. Globalement, GENER arrive à bien représenter les différents évènements de vagues de la série relativement à SWAN. En effet, les différentes

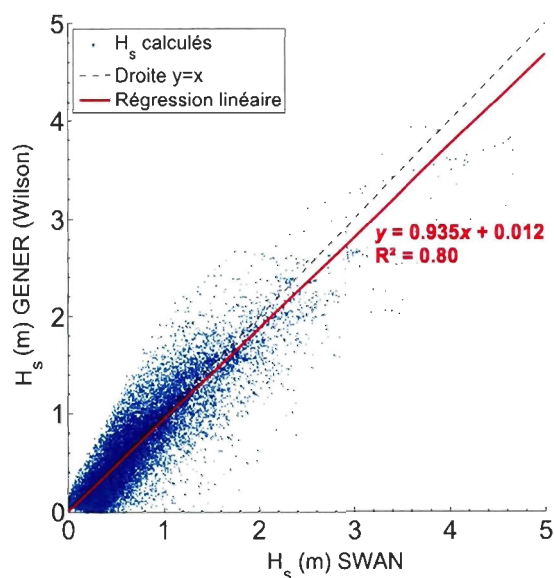


Figure 21: Comparaison des hauteurs significatives de vagues simulées avec GENER (méthode de Wilson) et avec SWAN pour les vents de la station météo 71710 (2010-2011). Nuage de points (données horaires) et régression linéaire.

Tableau 4: Valeurs des critères de comparaison statistiques entre les H_s simulées avec SWAN et avec GENER (pour les cinq formules de fetch).

	Formules de fetch				
	SPM77	SPM84	JONSWAP	CEM	Wilson
Biais (m)	0.06	0.00	-0.08	-0.15	-0.09
Biais absolu (m)	0.21	0.27	0.23	0.24	0.21
RMSE (m)	0.28	0.35	0.30	0.32	0.28

courbes sont généralement en phase dans le temps l'une par rapport à l'autre autant pour les H_s que pour les directions des vagues. Toutefois, il y a beaucoup plus de fluctuations des H_s avec GENER qu'avec SWAN. GENER semble donc être plus sensible aux variations du vent que SWAN, avec une croissance et une décroissance plus rapide des vagues. De plus, il y a une plus grande persistance des vagues avec SWAN qu'avec GENER ; parfois GENER ne produit pas de vagues alors que dans SWAN, il reste presque toujours un minimum d'agitation. Malgré la discrétisation des directions aux 22.5° dans GENER, les directions de

vagues qu'il produit dans les simulations du cas idéalisé correspondent assez bien à celles produites par SWAN.

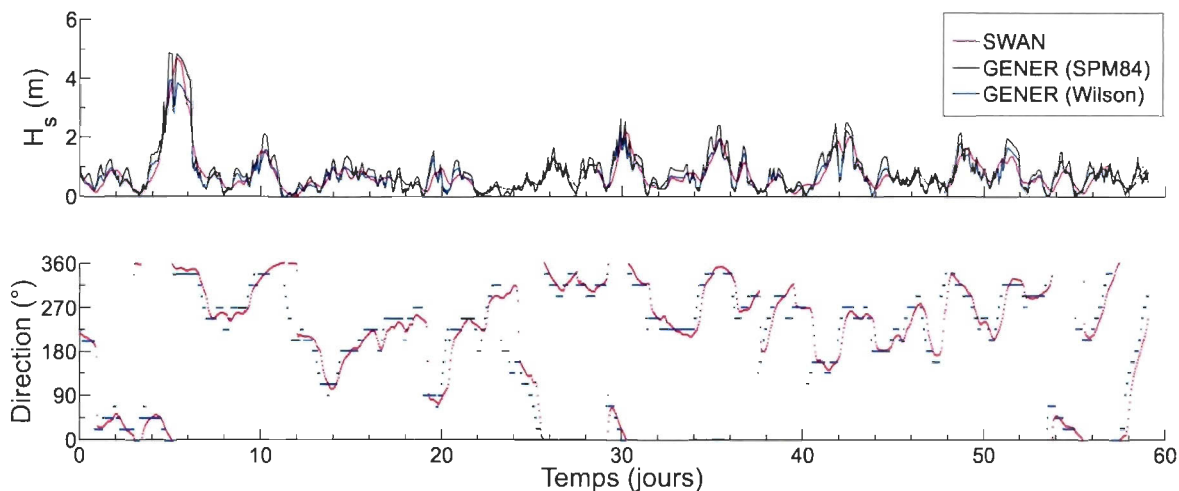


Figure 22: Comparaison des séries chronologiques des hauteurs significatives et des directions des vagues simulées avec GENER (méthodes du SPM84 et de Wilson) et avec SWAN pour les vents de la station météo 71710 (2010-2011).

La Figure 22 montre également que le fait d'utiliser une formule de fetch plutôt qu'une autre peut engendrer des écarts importants dans les H_s simulées, surtout pour les événements de fortes vagues. En effet, la méthode SPM84 surestime la plupart des événements de vagues moyens alors qu'elle permet de mieux représenter les événements extrêmes par rapport à la méthode de Wilson. Cela montre que l'erreur associée au choix de la formule de fetch à utiliser dans GENER peut être plus grande que l'erreur associée à l'implémentation dynamique des formules de fetch dans le modèle (considérant des conditions idéalisées). Ainsi, il est essentiel de s'assurer que la formule de fetch utilisée avec GENER est adéquate avant d'entreprendre des simulations.

Conclusions

Considérant le fait que les simulations idéalisées avec GENER ne prennent que quelques secondes de temps de calcul alors qu'elles nécessitent quelques heures avec

SWAN (pour les deux années de simulation sur le même ordinateur), GENER produit des résultats très satisfaisants. Pour des simulations de plusieurs décennies sur un domaine spatial plus important, l'utilisation de GENER est donc très avantageuse pour maintenir des temps de calcul raisonnables tout en produisant des résultats sensés. Toutefois, dans une situation réelle avec des champs de vents variables spatialement et une mer de géographie plus complexe, les écarts entre GENER et SWAN seraient probablement plus importants. C'est la raison pour laquelle il est pertinent d'améliorer le forçage du vent dans GENER. En effet, considérer que le vent local, près d'un site d'étude, est représentatif des vents qui génèrent les vagues à un instant donné est nécessairement limitant par rapport à l'utilisation de champs de vents marins qui couvrent l'ensemble du domaine de génération des vagues. Le développement d'une nouvelle approche permettant d'utiliser les champs de vents de modèles atmosphériques comme forçage dans GENER sans pour autant augmenter significativement les temps de calcul est donc recommandé (voir chapitre 2).

ANNEXE C

CODE SOURCE MATLAB DE L'ALGORITHME DE PRÉTRAITEMENT DU VENT DÉVELOPPÉ POUR GENER

Les lignes ci-dessous présentent le code source MATLAB (version R2011b) développé dans le but de forcer GENER avec des champs de vents répartis sur des grilles bidimensionnelles issues de modèles atmosphériques. L'algorithme de prétraitement du vent produit, à partir des champs de vents, une série chronologique de vents (en un point) représentative des conditions de vents à chaque pas de temps afin de simuler les vagues dans GENER. Cet algorithme est appliqué aux vents utilisés comme forçage avant de lancer GENER et permet aussi l'option de générer les fichiers requis pour les simulations avec GENER en lançant les routines MATLAB appropriées.

```
1 function [vent_out] = gener_vent(vent_in,coor_pt,options)
2 %gener_vent Algorithme de generation du vent pour GENEREUX
3 %
4 %   VENT_OUT = GENER_VENT (VENT_IN, COOR_PT, OPTIONS)
5 %
6 % INPUT
7 %
8 % VENT_IN (structure representant la grille de vent en entree et les
          champs suivant)
9 %   .lat   (latitude de chaque point de la grille de vent)
10 %   .lon   (longitude de chaque point de la grille de vent)
11 %   .water (boolean: vrai si point de grille marin)
12 %   .temps (vecteur avec les valeurs de chaque pas de temps des donnees)
13 %   .u     (composante u du vent avec matrice [temps, pts_grille])
14 %   .v     (composante v du vent avec matrice [temps, pts_grille])
15 %
```

```

16 % COOR_PT (vecteur 2x1 avec coordonnees du point ou les vagues seront
      simulees [longitude latitude])
17 %
18 % OPTIONS (options facultatives)
19 %   'gen', 'nomfichiervent.dat' (ecriture du fichier de vent pour
      GENEREUX, le nom du fichier de vent doit avoir au moins 7
      caracteres)
20 %   'fetch' 'nomfichierparam.txt' (ecriture du fichier de parametres pour
      GENEREUX
21 %   'debut', [AAAA MM JJ HH MM SS] (date de debut de l'analyse du vent)
22 %   [0] par default
23 %   'fin', [AAAA MM JJ HH MM SS] (date de fin de l'analyse du vent)
24 %   [Inf] par default
25 %   'xlim', [longitude_min,longitude_max] (limites en longitude de la
      zone d'interet)
26 %   [0 Inf] par default
27 %   'ylim', [latitude_min,latitude_max] (limites en latitude de la zone d
      'interet)
28 %   [0 Inf] par default
29 %
30 % OUTPUT
31 %
32 %   VENT_OUT (series temporelle de vent [temps u v dir vitesse]
33 %
34 % par Benoit Ruest, 2013
35
36
37
38 %% Traitement des options
39
40 % Attribution des valeurs des options
41 i=1;
42 genereux=false;   % si vrai, ecrit le fichier de vent pour GENEREUX
43 fetch_bool=false; % si vrai, ecrit le de fetch pour GENEREUX
44 while i<numel(options)
45     val=options{i+1};
46     switch lower(options{i})
47         case {'gen','-gen'}
48             genereux=true;
49             nom_gener=val;
50         case {'fetch', '-fetch'}
51             fetch_bool=true;
52             nom_param=val;
53         case {'debut','-debut'}
54             debut=val;
55             debut=datenum(debut);
56         case {'fin','-fin'}
57             fin=val;
58             fin=datenum(fin);
59         case {'xlim','-xlim'}

```

```

60         if numel(val)==2
61             lim_x=val;
62         else
63             error('Nombre de donnees incorrect pour l''option %s',
                   options{i})
64         end
65     case {'ylim','-ylim'}
66         if numel(val)==2
67             lim_y=val;
68         else
69             error('Nombre de donnees incorrect pour l''option %s',
                   options{i})
70         end
71     otherwise
72         if ischar(options{i})
73             error ('Option inexistante (''%s'',options{i})
74         else
75             error ('Option inexistante')
76         end
77     end
78     i=i+2;
79 end
80
81
82 % Valeurs par default
83
84 if ~exist('coor_pt','var')
85     error ('Coordonnees du point d''interet manquantes')
86 elseif numel(coor_pt)~=2;
87     error('Coordonnees du point incorrectes')
88 end
89
90 if fetch_bool==true
91     % calcul des fetchs et ecriture du fichier parametres pour GENEUREUX
92     load coast;
93     fetch=(fetch_distance(coast,[coor_pt(2) coor_pt(1)],'file',nom_param,
94                          'nofig','w16','max300'))'/1000;
95     d_ang=360/16;
96     fetch(:,2)=mod((90*pi/180):(-d_ang*pi/180):((-270+d_ang)*pi/180),2*pi
97                 );
98 else
99     load coast;
100    fetch=(fetch_distance(coast,[coor_pt(2) coor_pt(1)],'nofig','w16','
101                          max300'))'/1000;
102    d_ang=360/16;
103    fetch(:,2)=mod((90*pi/180):(-d_ang*pi/180):((-270+d_ang)*pi/180),2*pi
104                );
105 end

```



```

104
105 if ~exist('debut','var')
106     debut=0;
107 end
108
109 if ~exist('fin','var')
110     fin=Inf;
111 end
112
113 if ~exist('lim_x','var') | ~exist('lim_y','var')
114     lim_x=[-Inf Inf];
115     lim_y=[-Inf Inf];
116 end
117
118
119
120 %% Selection des points de vents compris dans l'intervalle long/lat et le
        temps
121
122 if ~isfield(vent_in,'water')
123     sel_points=find(vent_in.lon>=lim_x(1) & vent_in.lon<=lim_x(2) &
        vent_in.lat>=lim_y(1) & vent_in.lat<=lim_y(2));
124 else
125     sel_points=find(vent_in.lon>=lim_x(1) & vent_in.lon<=lim_x(2) &
        vent_in.lat>=lim_y(1) & vent_in.lat<=lim_y(2) &
        vent_in.water);
126
127 end
128
129 sel_temps=vent_in.temps(:)>=debut & vent_in.temps(:)<=fin;
130 vent_out=zeros(sum(sel_temps),3);
131 vent_out(:,1)=vent_in.temps(sel_temps);
132
133
134
135 %% Algorithme de selection des vents par secteurs
136
137 % Selection des points de grille de vent pour chaque direction de fetch
        (16)
138 % Coordonnees du point d'interet
139 lon=coor_pt(1);
140 lat=coor_pt(2);
141 [x0,y0]=deg2utmMOD(lat,mod(lon,360),mod(lon,360));
142 % angle (deg) de part et d'autre du fetch pour la selection des points de
        grille de vent
143 angle=45*pi/180;
144 % Selection points grille de vent du domaine marin
145 points=vent_in.water;
146 sel_fetch=cell(size(fetch,1),1);
147

```

```

148 % Calcul coordonnees X/Y des points de grilles a partir de lon/lat
149
150 [coor.x,coor.y] = deg2utmMOD(vent_in.lat,mod(vent_in.lon,360),mod(lon
    ,360));
151 [coor.a,coor.d] = cart2pol(coor.x-x0, coor.y-y0);
152
153 % Boucle pour determiner les points de grille a moyenner pour chaque
    direction
154 for i=1:size(fetch,1)
155
156     points=find(coor.d<=fetch(i,1)*1000 & abs(mod(coor.a-fetch(i,2)+pi,2*
        pi)-pi)<=angle & vent_in.water);
157
158     % Matrice contenant les points de vents a utiliser pour chaque fetch
159     sel_fetch{i}=points;
160
161 end
162
163
164 % calcul du vent moyen pour chaque secteur
165
166 % trouve le point de vent le plus pres du point d'interet
167 x=(coor_pt(1)-vent_in.lon(sel_points)).*cos(coor_pt(2)/180*pi);
168 y= (coor_pt(2)-vent_in.lat(sel_points));
169 d= (x.^2+y.^2).^0.5;
170 [~, imin]=min(d);
171
172
173 % Boucle de calcul du vent "moyen" pour chaque fetch (RMS)
174 for i=size(sel_fetch,1):-1:1
175
176     % Methode RMS V + dir moy
177     % Selection des points de vent pour le fetch
178     sel=sel_fetch{i};
179
180
181     if ~isempty(sel)
182         u_moy=sqrt(nanmean(vent_in.u(sel_temps,sel).^2,2)) .* sign(
            nanmean(vent_in.u(sel_temps,sel),2));
183         v_moy=sqrt(nanmean(vent_in.v(sel_temps,sel).^2,2)) .* sign(
            nanmean(vent_in.v(sel_temps,sel),2));
184         wind(:,i)=sqrt(nanmean(vent_in.u(sel_temps,sel).^2+vent_in.v(
            sel_temps,sel).^2,2));
185
186     else % si pas de points de vent sur le secteur, vent marin le plus
        pres
187         u_moy=(vent_in.u(sel_temps,sel_points(imin)));
188         v_moy=(vent_in.v(sel_temps,sel_points(imin)));
189         wind(:,i)=sqrt(u_moy.^2+v_moy.^2);
190

```

```

191     end
192
193     direc(:,i)=mod((atan2(v_moy,u_moy)),2*pi);
194
195     windcos(:,i)=wind(:,i).*cos(fetch(i,2)-direc(:,i));
196
197
198 end
199 windcos(windcos<0)=0;
200
201
202
203 %% Selection du vent pour chaque pas de temps
204
205 [~,index]=nanmax(windcos,[],2);
206 serie=zeros(size(windcos,1),2);
207
208 for i=1:size(serie,1)
209     serie(i,1)=wind(i,index(i));
210     serie(i,2)=direc(i,index(i));
211 end
212
213
214 % Vecteur u pour chaque pas de temps
215 vent_out(:,2)=serie(:,1).*cos(serie(:,2));
216 % Vecteur v pour chaque pas de temps
217 vent_out(:,3)=serie(:,1).*sin(serie(:,2));
218
219
220
221 % Direction vent pour chaque pas de temps
222 vent_out(:,4)=mod(-90-(atan2(vent_out(:,3),vent_out(:,2)))*180/pi,360);
223 % Amplitude du vent pour chaque pas de temps
224 vent_out(:,5)=sqrt(vent_out(:,2).^2+vent_out(:,3).^2);
225 vent_out=vent_out(:,[1 4 5]);
226
227
228
229 %% ecriture du fichier de vent pour GENEREUX
230
231 if genereux
232     gener_writeraw(nom_gener,vent_out,'ms')
233 end
234
235
236 function [x,y] = deg2utmMOD(lat,lon,meridian)
237 % [x,y] = deg2utm(Lat,Lon,meridian)
238 %
239 % Description: Function to convert lat/lon vectors into UTM coordinates (
                WGS84).

```

```

240 % Some code has been extracted from UTM.m function by Gabriel Ruiz
      Martinez.
241 %
242 % Inputs:
243 %   Lat: Latitude vector.   Degrees.  +ddd.ddddd WGS84
244 %   Lon: Longitude vector.  Degrees.  +ddd.ddddd WGS84
245 %   meridian: central meridian of the customized UTM zone. It is an
      unique value for all points, no test is done whether
      point is close or far from requested UTM zone.
246 %
247 % Outputs:
248 %   x, y .
249 %
250 % Author:
251 %   Rafael Palacios
252 %   Universidad Pontificia Comillas
253 %   Madrid, Spain
254 % Version: Apr/06, Jun/06, Aug/06, Aug/06
255 % Aug/06: fixed a problem (found by Rodolphe Dewarrat) related to
      southern hemisphere coordinates.
256 % Aug/06: corrected m-Lint warnings
257 %
258 % Dec/09: include optional third input argument zone
259 % May/11: modified by Urs Neumeier to compute UTM for a given meridian
260
261
262 % Argument checking
263 error(nargchk(3, 3, nargin));
264
265 if ~isequal(size(lat),size(lon))
266     error('LAT and LON should have the same size');
267 end
268
269 if numel(meridian)>1 & ~isequal(size(lat),size(meridian))
270     error('LAT and MERIDIAN should have the same size (or MERIDIAN be a
      scalar)');
271 end
272
273 sa = 6378137.000000 ; sb = 6356752.314245;
274 %e = ( ( ( sa ^ 2 ) - ( sb ^ 2 ) ) ^ 0.5 ) / sa;
275 e2 = ( ( ( sa ^ 2 ) - ( sb ^ 2 ) ) ^ 0.5 ) / sb;
276 e2cuadrada = e2 ^ 2;
277 c = ( sa ^ 2 ) / sb;
278 %alpha = ( sa - sb ) / sa;           %f
279 %ablandamiento = 1 / alpha;        % 1/f
280
281 lat = lat * ( pi / 180 );
282 lon = lon * ( pi / 180 );
283
284 meridian=meridian * (pi/180);

```

```

285
286 deltaS = lon - meridian;
287
288 a = cos(lat) .* sin(deltaS);
289 epsilon = 0.5 * log( ( 1 + a ) ./ ( 1 - a ) );
290 nu = atan( tan(lat) ./ cos(deltaS) ) - lat;
291 v = ( c ./ ( ( 1 + ( e2cuadrada * ( cos(lat) ) .^ 2 ) ) ) .^ 0.5 ) *
      0.9996;
292 ta = ( e2cuadrada / 2 ) * epsilon .^ 2 .* ( cos(lat) ) .^ 2;
293 a1 = sin( 2 * lat );
294 a2 = a1 .* ( cos(lat) ) .^ 2;
295 j2 = lat + ( a1 / 2 );
296 j4 = ( ( 3 * j2 ) + a2 ) / 4;
297 j6 = ( ( 5 * j4 ) + ( a2 .* ( cos(lat) ) .^ 2 ) ) / 3;
298 alfa = ( 3 / 4 ) * e2cuadrada;
299 beta = ( 5 / 3 ) * alfa ^ 2;
300 gama = ( 35 / 27 ) * alfa ^ 3;
301 Bm = 0.9996 * c * ( lat - alfa * j2 + beta * j4 - gama * j6 );
302 x = epsilon .* v .* ( 1 + ( ta / 3 ) ) + 500000;
303 y = nu .* v .* ( 1 + ta ) + Bm;
304
305 y(y<0)=9999999+y(y<0);

```