

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement

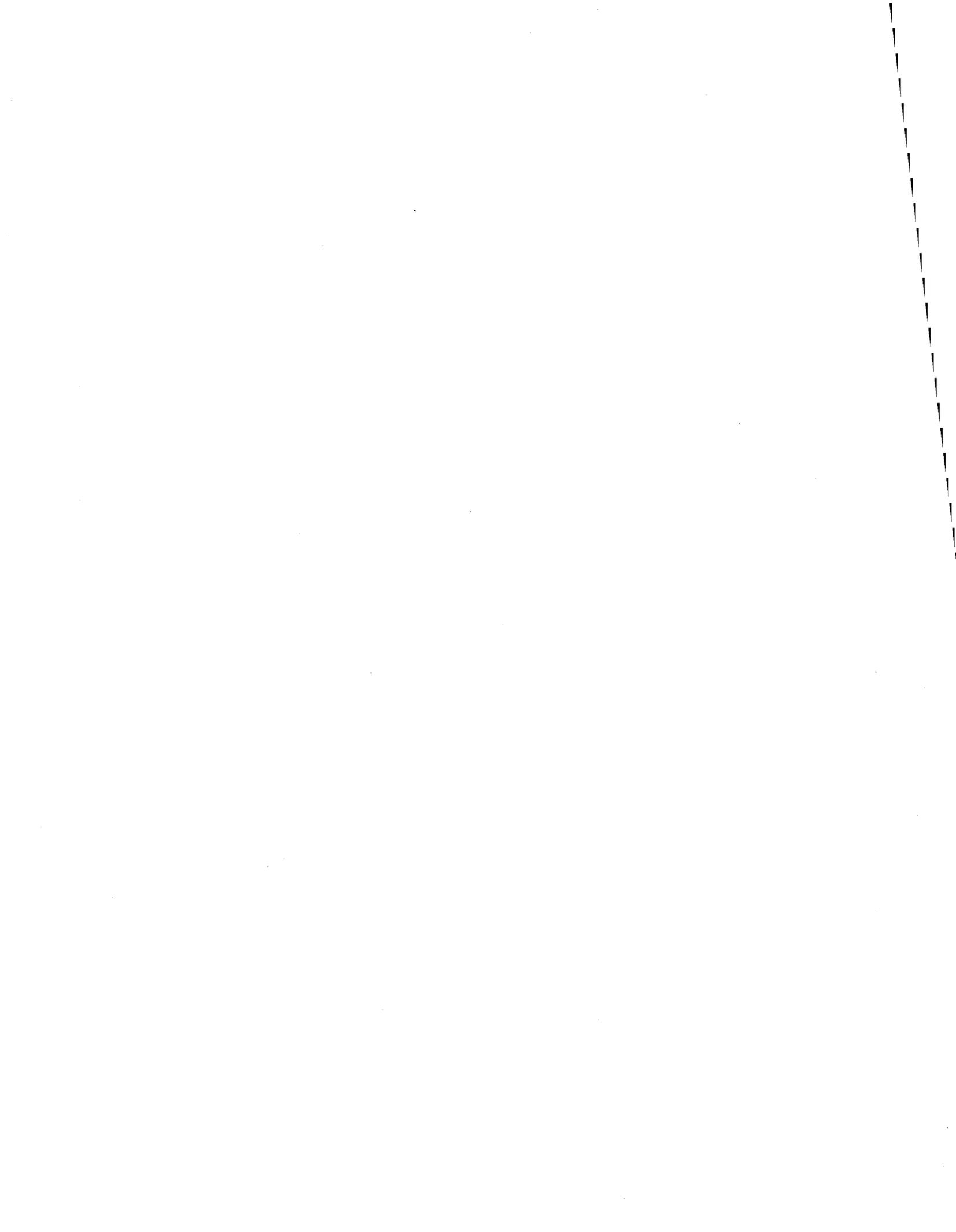
**AUTOMATISATION DE LA PRODUCTION DE CARTES DE CHAMP
DE VENT À PARTIR DE DONNÉES RADARSAT-2 EN RÉGION
CÔTIÈRE : CAS DE L'ÎLE-DU-PRINCE-ÉDOUARD**

Par
Tahiana Ratsimbazafy

Mémoire présentée pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en Sciences de l'Eau

Jury d'évaluation

Directeur de recherche	Monique Bernier INRS, Centre Eau Terre Environnement
Examineur externe	Carlos Lopez-Martinez Université Politechnique de Catalunya
Examineur interne	Karem Chokmani INRS, Centre Eau Terre Environnement



REMERCIEMENTS

Je remercie la Professeure Monique Bernier de m'avoir proposé un sujet de recherche et de m'avoir dirigé et conseillé tout au long de la réalisation de ce mémoire. J'ai bien aimé le sujet et j'ai eu la chance d'apprendre beaucoup plus dans le domaine de la science appliquée, spécialement dans la télédétection radar.

Je remercie les Professeurs Karem Chokmani et Carlos Lopez-Martinez d'avoir accepté d'évaluer ce mémoire.

Je remercie l'Institut National de la Recherche Scientifique de m'avoir accueilli comme étudiant à la maîtrise.

Je suis reconnaissant au réseau WESNet (Wind Energy Strategic Network) d'avoir financé ce projet et de m'avoir offert l'opportunité de publier mes résultats à des conférences.

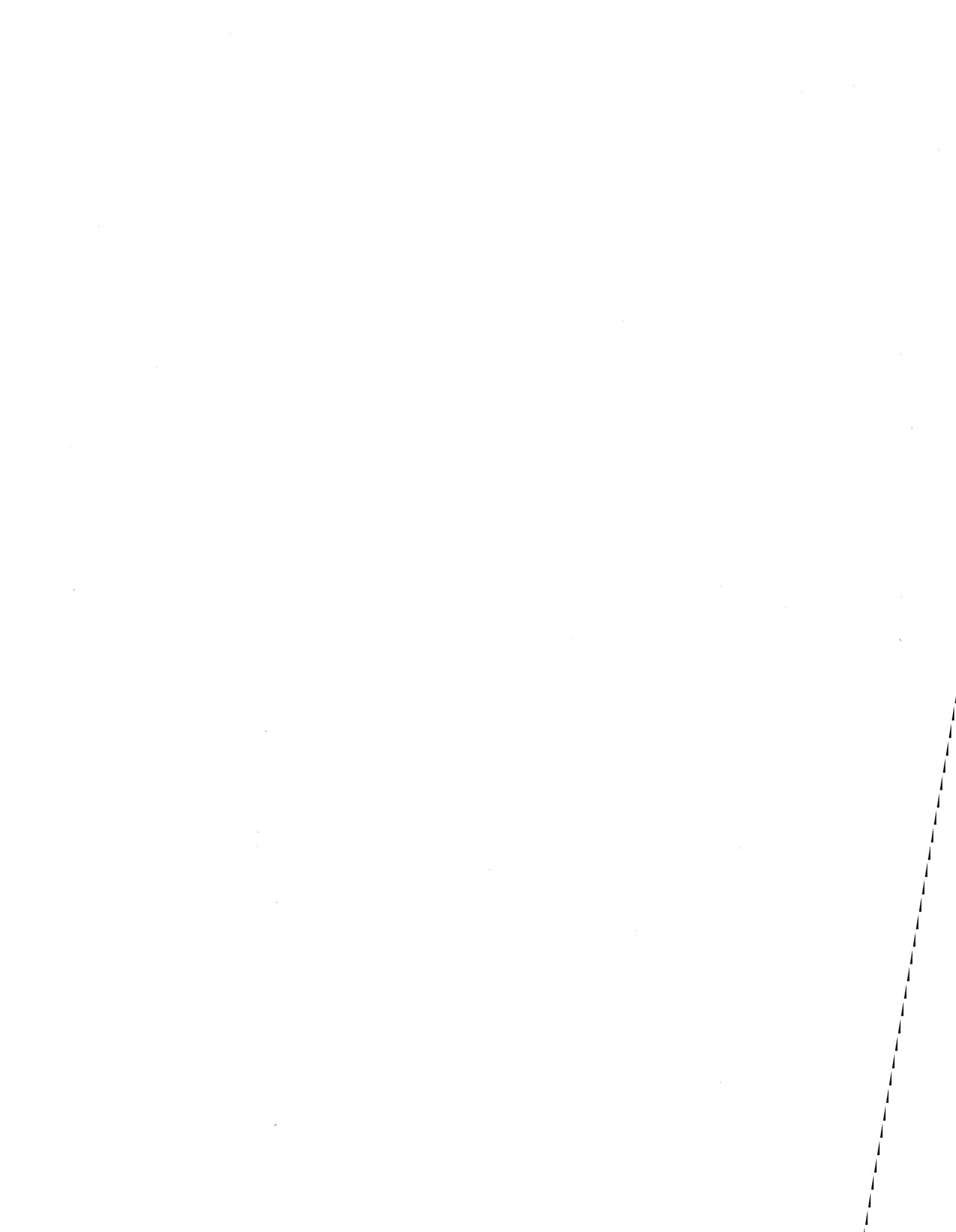
Je remercie « MacDonald, Dettwiler and Associates (MDA) » et l'Agence Spatiale Canadienne d'avoir fourni les images RADARSAT-2 utilisées dans la réalisation de ce travail par le biais du Programme SOAR-Éducation.

Je remercie le Service Hydrique du Canada (SHC) d'avoir fourni des données de bathymétrie pour la caractérisation de l'effet de ce dernier sur l'estimation de la vitesse du vent par l'approche RSO. Je remercie « Wind Institute of Canada (WEICan) » et Environnement Canada pour les données de mâts météorologiques fournies pour la validation de mes résultats.

Je remercie le professeur Yves Gagnon et Mathieu Landry de l'équipe de recherche Chaire K.-C-Irving en développement durable de l'Université de Moncton pour leur collaboration à la réalisation de ce mémoire. Merci pour les discussions fructueuses que nous avons eues lors des deux dernières conférences annuelles (2012 et 2013) de CanWEA (Canadian Wind Energy Association) et de WESNet.

Je remercie ma famille, spécialement ma femme Hasina Tolojanahary, qui m'a soutenu moralement.

Merci à mes amis et au personnel de l'INRS-ETE que j'ai côtoyés au cours de mes études. Merci pour votre accueil chaleureux.



RÉSUMÉ

L'application du Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) dans l'estimation de l'énergie éolienne est une technologie prometteuse pour l'industrie éolienne actuellement en pleine expansion. La taille de la largeur de fauchée des images RSO pouvant atteindre jusqu'à 500km permet d'obtenir des cartes de champ de vent en mer avec une résolution spatiale de 400m. Des procédures opérationnelles ont déjà été mises en place par Environnement Canada pour la cartographie du champ de vent en mer loin des zones côtières. Pour cette étude, une attention particulière est accordée aux zones maritimes côtières, là où la profondeur de la mer est moins importante ($\leq 30\text{m}$) et accessible aux industries de construction de parc éolien. L'Île-du-Prince-Édouard a été choisie comme zone d'étude.

La direction du vent estimée par les algorithmes de calcul basés sur les stries de vent observables sur les images RSO de la surface de l'océan contient deux possibilités quant à l'orientation du sens de déplacement du vent. Cette incertitude sur l'orientation est appelée « ambiguïté 180° ». À part cette ambiguïté, la forme géométrique du fond marin dans les régions côtières ainsi que la profondeur de la mer affectent les formes de vagues locales et par conséquent le coefficient de rétrodiffusion du signal radar qui permet d'estimer la vitesse du vent local. Ce mémoire a deux objectifs principaux : 1) développer une approche pour éliminer l'ambiguïté 180° sans avoir à utiliser de l'information extérieure à l'image ; et 2) évaluer l'effet de la bathymétrie sous-marine sur l'estimation du vent par l'approche RSO et sur la vitesse moyenne à long terme simulée par le modèle météorologique MS Micro.

Pour réaliser les objectifs cités précédemment, vingt-huit scènes RADARSAT-2 composées de dix-huit scènes Standard quad-polarisation et dix ScanSAR-Étroites ont été acquises auprès de « MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd » via le programme SOAR-Education de l'Agence Spatiale Canadienne. Des enregistrements d'un mât météorologique (aux 10 minutes) ont été acquis auprès de « Wind Energy Institute of Canada (WEICan) ». D'autres enregistrements horaires ont été téléchargés sur le site web d'Environnement Canada. Les données sur la profondeur de la mer locale ont été obtenues auprès du Service Hydrique du Canada (SHC). Une carte de la vitesse moyenne à long terme (1957-2000) simulée avec le modèle météorologique microéchelle (MS Micro) a été acquise auprès de l'équipe de recherche de la Chaire K.-C.-Irving en développement durable de l'Université de Moncton.

Une nouvelle méthode pour l'élimination de l'ambiguïté 180° sur la direction du vent est présentée pour la réalisation du premier objectif. Elle permet d'optimiser la production de cartes de vent en mer en réduisant le nombre de données nécessaires dans les calculs. Les directions ont été déterminées avec l'algorithme des Gradients Locaux (GL) sur les images acquises en copolarisation HH. L'ambiguïté est éliminée en faisant une comparaison des phases du signal rétrodiffusé avec une phase de référence. Les résultats obtenus montrent que les phases de référence ϕ_{VV-HH} et ϕ_{VV-HV} sont les meilleures retenues pour éliminer l'ambiguïté 180° lorsqu'elles sont comparées à ϕ_{HV} et ϕ_{HH} respectivement. Les directions du vent extraites avec GL et corrigées de l'ambiguïté 180° avec la nouvelle approche proposée dans cette étude ont été estimés avec une

RMSE de 20,5° et un biais 1,88° lorsque comparé aux enregistrements du mât météorologique de North Cape. Le modèle CMOD5 combiné avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé pour le calcul des vitesses. Un RMSE 2,40 m/s et un biais de -1,62 m/s ont été observés lors de la validation des échantillons de vitesses prises à 25 km au nord-ouest de North Cape.

Pour la réalisation du deuxième objectif, les effets de la variation de la bathymétrie sur la rétrodiffusion radar (vitesse) ont été analysés le long de quelques profils linéaires situés à l'ouest et à l'est de North Cape et proches de West Point. Des cartes de vents RSO à 200 m de résolution ont été réalisées avec les images RADARSAT-2 acquises. Les vitesses de vents RSO et MS Micro ainsi que la profondeur de la mer locale ont été extraites le long de différents profils. Les résultats ont montré que les vitesses RSO calculées sont sous-estimées lorsque la profondeur diminue brusquement dans les dix premiers kilomètres de la côte. Une profondeur de la mer de 15m à 20 m a été considérée comme seuil à partir duquel les vitesses RSO calculées sont comparables à celles calculées en mer loin de la côte (≥ 15 km). Les vitesses de vent calculées avec la version de MS Micro utilisée dans cette étude ne sont pas valides dans les régions à l'intérieur d'une distance de 10 km de la ligne de la côte. Ceci a été considéré comme l'effet du changement brusque de la rugosité de la surface sur le comportement de la version du modèle MS Micro utilisé sur la transition terre-mer.

Mots clés : Radar à Synthèse d'Ouverture, Champs de vent, Ambiguïté 180°, Bathymétrie, région côtière.

ABSTRACT

Application of Synthetic Aperture Radar (SAR) in the estimation of wind energy is a promising technology in the development of wind industry. The large size of the SAR swath, up to 500 km, can provide offshore wind field maps at about 400 m of spatial resolution. Operational procedures have been made by Environment Canada for mapping offshore wind fields. For this study, a particular attention is paid to the shallow sea on coastal areas (depth ≤ 30 m) which are accessible to industries for installing a wind park. The Prince-Edward-Island has been chosen as study area.

Estimation of wind direction from algorithms based on wind streaks in SAR images of the ocean occasions two uncertainty possibilities regarding the orientation of the wind flow. This uncertainty on the direction is called "180 ° ambiguity". In other hand, the geometric shape of the bathymetry in coastal areas and sea depth affect the physical properties of local waves and consequently the radar backscattering coefficient which is related to the local wind speed measurements. The two main objectives of this study are: 1) remove the 180° ambiguity in the extracted wind directions without using ancillary data; and 2) assess the effect of bathymetry on SAR wind speed estimation and on the long term wind speed average simulated by the meteorological model MS Micro.

To achieve the goals previously mentioned, twenty-eight RADARSAT-2 scenes composed of eighteen Standard Quad-polarization and ten ScanSAR-Narrow were acquired from "MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd" via the SOAR-Educational program of the Canadian Space Agency. Records from meteorological mast (10 minutes averaged values) were acquired from "Wind Energy Institute of Canada (WEICan)". Other hourly records were downloaded from the web site of Environment Canada. The local sea depth was obtained from the Canadian Hydrographic Service (CHS). A map of the long term (1957-2000) wind speed average simulated with the meteorological microscale model (MS Micro) has been acquired from the Chair K. -C- Irving Chair in Sustainable Development research team of the University of Moncton.

A new method for the elimination of the 180° ambiguity on the wind directions is presented for the achievement of the first objective. It allows optimizing the existing wind map production by reducing the number of required inputs. Wind directions have been determined by the Local Gradients (LG) algorithm on images acquired in copolarisation HH. The ambiguities were eliminated by comparing the phases of the backscattered signal with a reference phase. The obtained results show that the reference phase ϕ_{VV-HH} and ϕ_{VV-HV} are the best for removing the 180° ambiguity when they are compared to ϕ_{HV} and ϕ_{HH} respectively. The wind directions from the LG and corrected from the ambiguity with our new approach are estimated with an RMSE of 20.5° and a bias 1.88° with respect to the data recorded at the meteorological mast of North Cape. The geophysical model CMOD5 combined with the Hwang polarization ratio has been used for the calculation of wind velocities. A RMSE of 2.40 m/s and a bias -1.62 m/s were observed during the validation of the wind speed samples taken at 25 km at north-west of North Cape from the meteorological mast data records.

For the achievement of the second objective, the effects of the variation of the bathymetry on the radar backscattered (sigma nought) signal were analyzed along few linear profiles oriented from northwest to southeast at North Cape and from west to east at West-Point coastline. Wind maps with a spatial resolution of 200 m have been carried out with the acquired RADARSAT-2 images. The SAR wind speeds related to sigma nought and MS Micro as well as depth of the local sea have been extracted along the different profiles. The results have shown that the calculated SAR wind speeds are under-estimated when the sea depth abruptly decreased in the first ten kilometers of the coast. A sea depth varying between 15m to 20 m has been considered as threshold in calculation of wind speeds near the shore to be comparable to those calculated offshore (≥ 15 km). The wind speeds calculated with the version of MS Micro used in this study are not valid in the regions within a distance of 10 km from the shoreline. This has been considered as the effect of the impulsive change in the roughness of the land-sea transition surface on the behavior of the version MS Micro model used.

Keywords: Wind field, Synthetic Aperture Radar, 180° ambiguity, Bathymetry, Costal areas.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	III
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT.....	VII
TABLE DES MATIÈRES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	XXI
CHAPITRE 1: INTRODUCTION	1
1.1 MISE EN CONTEXTE.....	1
1.2 TRAVAUX ANTERIEURS ET DIFFICULTES RENCONTREES SUR LA CARTOGRAPHIE DU CHAMP DE VENT PAR APPROCHE RSO ..	3
1.2.1 <i>Interactions vent-mer et vaguelette-signal radar.....</i>	<i>3</i>
1.2.2 <i>Approche par Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO).....</i>	<i>4</i>
1.2.3 <i>États de l'art.....</i>	<i>6</i>
1.2.4 <i>Effets secondaires sur l'estimation du vent par approche RSO.....</i>	<i>9</i>
1.2.5 <i>Les défis connus dans la validation de résultats</i>	<i>10</i>
1.3 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	12
CHAPITRE 2: CARTOGRAPHIE DU CHAMP DE VENT PAR RSO.....	13
2.1 INTRODUCTION.....	13
2.2 MODELE DE FONCTIONS GEOPHYSIQUES EN BANDE C (CMOD) POUR LE CALCUL DU CHAMP DE VENT EN MER	14
2.3 DONNEES UTILISEES.....	15
2.3.1 <i>Images Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) RADARSAT-2</i>	<i>15</i>
2.3.2 <i>Lignes côtières.....</i>	<i>17</i>
2.3.3 <i>Données d'enregistrement de mâts météorologiques.....</i>	<i>17</i>
2.4 CALCUL DES CHAMPS DE VENT.....	19
2.4.1 <i>Extraction de la direction du vent et élimination de l'ambiguïté 180° avec l'information de phase dans les images polarimétriques SQ.</i>	<i>21</i>
2.4.2 <i>Extraction de la vitesse du vent sur les images.....</i>	<i>28</i>
2.5 RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	35
2.5.1 <i>Estimation des directions du vent directement des images.....</i>	<i>35</i>
2.5.2 <i>Élimination de l'ambiguïté 180°sur les directions.....</i>	<i>36</i>
2.5.3 <i>Variation des coefficients de rétrodiffusion d'un canal à l'autre</i>	<i>48</i>
2.5.4 <i>Cartes des champs de vitesse.....</i>	<i>50</i>

2.5.5	<i>Validation des directions</i>	53
2.5.6	<i>Validation des vitesses</i>	56
2.6	CONCLUSION.....	61
CHAPITRE 3: ÉVALUATION DES EFFETS DE LA BATHYMETRIE SUR L'ESTIMATION DU VENT		65
3.1	INTRODUCTION.....	65
3.2	ANALYSE DE LA CARTE DE VENT MS MICRO.....	67
3.3	MISE EN EVIDENCE DES EFFETS DE LA BATHYMETRIE.....	70
3.4	ANALYSE DES EFFETS DE LA BATHYMETRIE SUR LES VITESSES CALCULEES SUR LES IMAGES RADARSAT-2.....	71
3.5	CONCLUSION.....	77
CHAPITRE 4: CONCLUSION GENERALE		79
BIBLIOGRAPHIE		83
ANNEXE A : DONNÉES DE VALIDATION DE LA DIRECTION		91
ANNEXE B : CHAMP DE VENT CALCULÉ SUR LES SCÈNES SCANSAR-ÉTROITE		92
ANNEXE C :CHAMP DE VENT CALCULE SUR LES SCENES STANDARDS QUAD-POLARISATION		101
ANNEXE D : RÉSULTATS OBTENUE LORS DES ANALYSES DES PROFILS À NORTH CAPE		119

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Sélection de travaux publiés sur l'estimation de la vitesse de vent par imageries RSO en milieu côtier.....	6
Tableau 2.1 : Scènes ScanSAR-Étroite (SCN) extraites de l'archive du satellite RADARSAT-2.	16
Tableau 2.2 : Scènes Standard Quad-Pol (SQ) nouvellement acquises. Ces données sont au format Single Look Complex (SLC).	17
Tableau 2.3: Valeur de ϕ_{ref} à évaluer pour les méthodes 2 et 3.	27
Tableau 2.4: Valeurs des efficacités lors de leur décroissance lorsque ϕ_{ref} se rapproche de 0°	38
Tableau 2.5: Efficacité pour quelques phases de référence sur l'image de phase de la scène SQ14 du 4 novembre 2012. La résolution spatiale de l'image de phase est 400m.	39
Tableau 2.6: Efficacité pour quelques phases de référence sur l'image de phase de la scène SQ14 du 4 novembre 2012. La résolution spatiale de l'image de phase est 200m.	39
Tableau 2.7: Efficacité de chacune des polarisations pour la méthode 2.	43
Tableau 2.8: Directions du vent calculées sur la scène SQ14 du 4 novembre 2012 acquise à 18h05 co-localisée avec la station météo de North Cape. La vitesse mesurée à 18h00 est de 8,3 m/s.	53
Tableau 2.9: Directions du vent calculées sur la scène SQ9 du 11 novembre 2012 acquise à 18h01 et co-localisée avec la station météo de North Cape. La vitesse mesurée à la station à 18h00 est de 5,6 m/s.	54
Tableau 2.10: Comparaison des moyennes spatiales des directions (10m ASL) calculées au voisinage de la station North Cape sur les scènes ScanSAR-Étroites utilisées.	54
Tableau 2.11: Comparaison de nos résultats statistiques avec ceux présentés dans la littérature.	55
Tableau 3.1 : Valeur de la rugosité en fonction de la classe de l'occupation du sol.	69
Tableau 3.2 : Profil P_1 de vitesse en mer à l'est de North Cape. La vitesse à la station de North Cape était 8,3 m/s à cinq minutes avant l'acquisition de la scène sur laquelle les vitesses RSO extraites sur les profils ont été calculées.	72
Tableau 4.1: Échantillons de données sur les images ScanSAR-Étroites utilisées dans la validation des directions.....	91
Tableau 4.2 : Profil P_2 de vitesse en mer à l'Est de North Cape. La vitesse à la station de North Cape était 8,3 m/s à cinq minutes avant l'acquisition de la scène sur laquelle les vitesses RSO extraites sur les profils ont été calculé.	119

Tableau 4.3 : Profil P ₃ de vitesse en mer à l'Est de North Cape. La vitesse à la station de North Cape était 8,3 m/s à cinq minutes avant l'acquisition de la scène sur laquelle les vitesses RSO extraites sur les profils ont été calculées.....	120
Tableau 4.4 : Profil P ₄ de vitesse en mer à l'est de North Cape. La vitesse à la station de North Cape était 8,3 m/s à cinq minutes avant l'acquisition de la scène sur laquelle les vitesses RSO extraites sur les profils ont été calculées.....	120
Tableau 4.5: Profil P'1 de vitesse à l'ouest de West Point.	121
Tableau 4.6: Profil P'2 de vitesse à l'ouest de West Point.....	122
Tableau 4.7: Profil P'3 de vitesse à l'ouest de West Point.....	124
Tableau 4.8: Profil P'4 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point.	126
Tableau 4.9: Profil P'5 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point.	128
Tableau 4.10: Profil P'6 de vitesse à l'ouest de West Point.....	130
Tableau 4.11: Profil P'7 de vitesse à l'ouest de West Point.....	132
Tableau 4.12: Profil P'8 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point.	134
Tableau 4.13: Profil P'9 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point.	136

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1: Localisation des scènes RADARSAT-2 SQ acquises sur l'Île-du-Prince-Edouard.....	16
Figure 2.2: Position géographique du mât météorologique à la station North Cape (Lat.: 47.06° ; Long: -64.00°) et la station de mesure WEICan (Lat : 47.04°N ; Long : 64.015°W). <i>Google Map™</i>	18
Figure 2.3: Diagramme méthodologique général de l'extraction du champs de vitesse avec les images RADARSAT-2.....	20
Figure 2.4: Diagramme des étapes de prétraitement des images.....	21
Figure 2.5: Histogramme appartenant à une fenêtre de taille 2,4km obtenus avec l'image de gradient à a) 100m, b) 200m, et 400m de résolution respective servant à trouver la direction (avec ambiguïté) du vent dans une fenêtre élémentaire de taille 2,4km. Les ellipsoïdes en couleur rouge indiquent les histogrammes lissés. Les lignes pointillées représentent les directions du grand axe des histogrammes.	24
Figure 2.6: Décalage du signal par rapport à la position de l'antenne en fonction de la phase de référence. La valeur de l'angle phi sur la figure est $\pi/3$ radians. La flèche en couleur rouge indique un déplacement des vagues de Bragg vers la position au nadir de l'antenne et celle en bleu s'éloignant de l'antenne radar. La flèche en noire indique le sens de déplacement du satellite sur son orbite.	26
Figure 2.7: Diagramme du calcul de la vitesse du vent pour les scènes ScanSAR Étroite (HH-HV)...	33
Figure 2.8: Diagramme du calcul de la vitesse du vent pour les scènes Standard Quad-Pol (HH, HV, VV, VH).....	34
Figure 2.9: Image de l'intensité du canal HH de la scène SQ du 04 novembre 2012 à 18h05 (image test). Le cercle coloré en rouge indique des stries linéaires visibles sur l'image.	35
Figure 2.10: Directions calculées avec l'algorithme des Gradient Locaux. Les flèches indiquent l'orientation des directions calculées ayant une ambiguïté. La barre de couleur indique les valeurs de la phase du signal en HH.	36
Figure 2.11: Efficacités utiliser des phases des quatre polarisations (issues de l'image du 4 Novembre 2012 à 18h05) pour l'élimination de l'ambiguïté.	37
Figure 2.12: Correction de la direction avec quatre valeurs choisies de la phase de référence a) $\phi_{ref}=0^\circ$; b) $\phi_{ref}=-1^\circ$; c) $\phi_{ref}=-2^\circ$; d) $\phi_{ref}=-3^\circ$, comparées avec la phase du canal HH. La résolution spatiale de l'image est de 400m et celle de la direction est de 2,4km. La flèche en gras représente la direction et l'orientation du vent sur l'image. Les petites flèches indiquent les directions extraites de l'image. Les ellipses rouges indiquent les directions nouvellement corrigées en passant d'une image à l'autre dans l'ordre a), b),	

c), et d). L'image de phase (400m de résolution) présentée correspond à l'image de phase comparée à la phase de référence $\phi_{ref}=-20^\circ$ 40

Figure 2.13: Correction de la direction avec quatre valeurs choisies de la phase de référence a) $\phi_{ref}=0^\circ$; b) $\phi_{ref}=-1^\circ$; c) $\phi_{ref}=-2^\circ$; d) $\phi_{ref}=-3^\circ$, comparées avec la phase du canal HH. La résolution spatiale de l'image est de 200m et celle de la direction est de 2,4km. La flèche en gras représente la direction et l'orientation du vent sur l'image. Les petites flèches indiquent les directions extraites de l'image. Les ellipses rouges indiquent les directions nouvellement corrigées en passant d'une image à l'autre dans l'ordre a), b), c), et d)..... 41

Figure 2.14: Les petites flèches représentent les directions du vent a) non corrigées, et b) corrigées avec une phase de référence de $\phi_{ref}=-20^\circ$. La flèche en gras représente la direction du vent locale. L'image de fond représente de la phase mesurée en polarisation HH. La barre de couleur indique les valeurs de la phase..... 42

Figure 2.15: Efficacités pour chacune des combinaisons de phase correspondant à la troisième méthode. Les quatre polarisations identifiées par sur les couleurs des barres verticales sont associées aux images de phase des canaux comparées aux phases de référence indiquées en abscisse, selon les critères énoncés par les équations (2.12) et (2.13).... 44

Figure 2.16: Directions corrigées avec les phases de référence (3^e méthode) a) $\phi_{ref}=\phi_{VV-VH}$ comparée à ϕ_{HV} ; b) $\phi_{ref}=\phi_{VV-HV}$ comparée à ϕ_{VH} . La flèche en gras représente la direction du vent locale. Les cercles colorés en rouges indiquent les différences avec les résultats obtenus sur la Figure 2.17a..... 45

Figure 2.17: Directions corrigées avec les phases de référence (3^e méthode) a) $\phi_{ref}=\phi_{VV-HV}$ comparée à ϕ_{HH} ; b) $\phi_{ref}=\phi_{VV-HH}$ comparée à ϕ_{HV} . La flèche en gras représente la direction du vent locale. Les cercles colorés en rouges indiquent les différences avec les résultats obtenus sur la Figure 2.16a..... 45

Figure 2.18: Champ de vent calculé sur la scène SQ du 28 novembre 2012 pour les canaux HH (a, b, c) et VH (d) respectivement. L'ambiguïté sur les directions a été respectivement éliminée en utilisant une phase de référence a) $\phi_{ref}=-|\phi_{VV}|-|\phi_{HV}|$ comparée avec ϕ_{HH}° , b) $\phi_{ref}=\phi_{VV-HH}$ comparée avec ϕ_{HV} , c) $\phi_{ref}=\phi_{VV-HV}$ comparée avec ϕ_{VV} et d) $\phi_{ref}=\phi_{VV-HH}$ comparée avec ϕ_{HV} . La barre de couleur indique les vitesses du vent et les flèches colorées en rouge indiquent la direction et le sens du vent. 46

Figure 2.19: Photo représentative du talus observé qui longe la partie est de la côte à North Cape. Photo : Wind Energy Institute of Canada (WEICan) 48

Figure 2.20: Représentations des coefficients de rétrodiffusion dans les canaux HH, VV, HV et VH de la scène SQ du 4 novembre 2012. La barre de couleur montre les valeurs des coefficients de rétrodiffusion en décibels. La résolution spatiale des données est de 400m..... 49

Figure 2.21: Cartes des champs de vent calculés à partir des canaux a) HH, b) VV, c) HV et d) VH de la scène SQ du 4 novembre 2012 en utilisant respectivement le modèle CMOD5 pour les canaux en copolarisation (avec le ratio de polarisation de Hwang <i>et al.</i> (2010b) pour HH) et le modèle de Vachon <i>et al.</i> (2011) (adapté pour les scènes SQ de RADARSAT-2) pour HV et VH. La résolution des vitesses est de 400m et celle de la direction de 2,4km.....	50
Figure 2.22: Cartes des champs de vent calculés à partir des canaux a) HH, b) VV, c) HV et d) VH de la scène SQ9 du 11 novembre 2012 en utilisant respectivement le modèle CMOD5 pour les canaux en copolarisation (avec le ratio de polarisation de Hwang <i>et al.</i> (2010a) pour HH) et le modèle de Vachon <i>et al.</i> (2011) (adapté pour les scènes SQ de RADARSAT-2) pour HV et VH. La résolution des vitesses est de 400m et celle de la direction est de 2,4km.....	51
Figure 2.23: Carte des champs de vent extraits de l'image RADARSAT-2 ScanSAR du 8 novembre 2012 avec CMOD5. La barre de couleur montrent les valeurs des vitesses du vent.	52
Figure 2.24: Comparaison des directions calculées sur les images ScanSAR-Étroites avec les données enregistrées à la station de North Cape.	55
Figure 2.25: Comparaison des directions du vent calculées sur les images ScanSAR-Étroites avec les données enregistrées à la station de North Cape en éliminant les données correspondant aux journées du 29 octobre 2012 et du 8 novembre 2012.	56
Figure 2.26: Validation des vitesses RSO avec les enregistrements du mât météorologique de North-Cape pour six images ScanSAR. Le point considéré est situé à 1 km du mât.	57
Figure 2.27: Validation des vitesses RSO avec les enregistrements du mât météorologique de North-Cape pour six images ScanSAR. Le point considéré est situé à 10 km du mât.	58
Figure 2.28: Validation des vitesses RSO avec les enregistrements du mât météorologique de North-Cape pour six images ScanSAR. Le point considéré est situé à 25 km du mât.	58
Figure 2.29: Validation des vitesses RSO avec les enregistrements du mât météorologique de North-Cape pour quatre images ScanSAR. Le point considéré est situé à 1 km du mât.	59
Figure 2.30: Validation des vitesses RSO avec les enregistrements du mât météorologique de North-Cape pour quatre images ScanSAR. Le point considéré est situé à 10 km du mât.	60
Figure 2.31: Validation des vitesses RSO avec les enregistrements du mât météorologique de North-Cape pour quatre images ScanSAR. Le point considéré est situé à 25 km du mât.	60
Figure 3.1: Carte du module de vitesse moyenne à long terme simulée par le modèle MS-MICRO avec les données climatiques de 1958 à 2000.	67
Figure 3.2: Carte de l'occupation du sol de l'Île-du-Prince-Édouard extraite de la base de données utilisée pour le calcul des vitesses dans le modèle MS Micro.	69

Figure 3.3: Carte de variation de l'altitude du terrain de l'Île-du-Prince-Édouard extraite de la base de données utilisée pour le calcul des vitesses dans le modèle MS Micro.	70
Figure 3.4: Stations fictives en mer situées sur des profils parallèles aux directions du vent local. Les iso lignes représentent la topographie. P1, P2, P3, P4 sont les profils à l'est de l'île.	72
Figure 3.5: Profil P ₁ de vitesse en mer (en m/s) à l'est de North Cape extrait des quatre polarisations et comparé à celui du modèle MS Micro et de la bathymétrie.	73
Figure 3.6: Profil P ₂ de vitesse en mer (en m/s) à l'est de North Cape, extrait des quatre polarisations et comparé à celui du modèle MS Micro et de la bathymétrie.	74
Figure 3.7: Profil P ₃ de vitesse en mer (en m/s) à l'est de North Cape, extrait des quatre polarisations et comparé à celui du modèle MS Micro et de la bathymétrie.	74
Figure 3.8: Profils P ₄ de vitesse en mer (en m/s) à l'est de North Cape, extraits des quatre polarisations et comparés à celui du modèle MS Micro et de la bathymétrie.	75
Figure 3.9: Carte présentant le profil P' ₁ de vitesse RSO en mer (en m/s) à l'ouest de West Point, Île-du-Prince-Édouard. Les isolignes représentent la profondeur de la mer locale.	76
Figure 3.10: Profils P' ₁ de la vitesse RSO en mer (en m/s) à l'ouest de West Point, Île-du-Prince-Édouard, extraite des quatre polarisations et comparée à celui du modèle MS Micro en fonction de la profondeur de la mer locale.	77
Figure 4.1: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang <i>et al.</i> (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 11 novembre 2011. Les directions (avec ambiguïté 180°) du vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s).	92
Figure 4.2: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang <i>et al.</i> (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 20 mai 2012. Les directions (avec ambiguïté 180°) du vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s).	93
Figure 4.3: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang <i>et al.</i> (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 31 mai 2012. Les directions (avec ambiguïté 180°) du vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s).	94
Figure 4.4: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang <i>et al.</i> (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 06 juin 2012. Les directions (avec ambiguïté 180°) du vents introduites dans	

CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s)..... 95

Figure 4.5: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 13 juin 2012. Les directions (avec ambiguïté 180°) du vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s)..... 96

Figure 4.6: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 14 juillet 2012. Les directions (avec ambiguïté 180°) du vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s)..... 97

Figure 4.7: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 24 juillet 2012. Les directions (avec ambiguïté 180°) du vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s)..... 98

Figure 4.8: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 8 novembre 2012. Les directions (avec ambiguïté 180°) du vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s)..... 99

Figure 4.9: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 29 octobre 2012. Les directions (avec ambiguïté 180°) du vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s)..... 100

Figure 4.10: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 04 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 20,9° à 22,8°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la méthode 3 utilisant $\phi_{ref} = \phi_{VV-HH}$ comparée à ϕ_{HV}° 101

Figure 4.11 : Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 18 octobre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et

VH. L'angle d'incidence varie de 20,9° à 22,7°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la méthode 3 utilisant $\phi_{ref} = \phi_{VV-HH}$ comparée à ϕ_{HV} 102

Figure 4.12: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 18 octobre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 20,9° à 22,8°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$ 103

Figure 4.13: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 25 octobre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 25,8° à 27,6°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$ 104

Figure 4.14: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 25 octobre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 25,8° à 27,6°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$ 105

Figure 4.15: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 11 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 20,9° à 22,8°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la méthode 3 utilisant $\phi_{ref} = \phi_{VV-HH}$ comparée à ϕ_{HV} 106

Figure 4.16: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 11 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 20,9° à 22,8°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$ 107

Figure 4.17: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 11 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 28° à 29,8°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$ 108

- Figure 4.18: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 11 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 28° à 29,7°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$ 109
- Figure 4.19: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 04 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 33,4° à 35,1°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$ 110
- Figure 4.20: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 04 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 33,4° à 35,1°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$ 111
- Figure 4.21: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 28 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 31,3° à 33°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$ 112
- Figure 4.22: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 28 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 31,3° à 32,6°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$ 113
- Figure 4.23: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 18 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 24,6° à 26,4°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$ 114
- Figure 4.24: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 18 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les

flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 24,5° à 26,4°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$ 115

Figure 4.25: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 01 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 31,3° à 33°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$ 116

Figure 4.26: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 01 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 31,4° à 33°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$ 117

Figure 4.27: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 01 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 31,4° à 33°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$ 118

Figure 4.28: Profil P'2 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point. 124

Figure 4.29: Profil P'3 de vitesse à l'ouest de West Point. 126

Figure 4.30: Profil P'4 de vitesse à l'ouest de West Point. 128

Figure 4.31: Profil P'5 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point. 130

Figure 4.32: Profil P'6 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point. 132

Figure 4.33: Profil P'7 de vitesse à l'ouest de West Point. 134

Figure 4.34: Profil P'8 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point. 136

Figure 4.35: Profil P'9 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point. 138

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACSC: Abrupt Change of Surface Condition (Changement brusque de condition de surface)

AGL: Above Ground Level

ASL: Above Sea Level

ASCAT: Advanced SCATterometer

ESA: European Spatial Agency (Agence Spatiale Européenne)

CMOD: C-band Model (Modèle en bande C)

CSA: Canadian Space Agency (Agence Spatiale Canadienne (ASC))

EC: Environnement Canada

ECMFW: European Centre for Medium-Range Weather Forecast

FFT: Fast Fourier Transform (Transformée de Fourier Rapide)

GESIMA: Geesthacht Simulation Model of the Atmosphere

IDW: Inverse Distance Weighted (Pondération Inverse à la Distance)

IFREMER: Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

NDBC: National Data Buoy Center

NOGAPS: Navy Operational Global Atmospheric Prediction System

NRCS: Normalized Radar Cross Section

NWP: Numerical Weather Prediction (Modèle numérique de prévision météo)

MDA : MacDonald, Dettwiler and Associates

MSL: Mean Sea Level (Niveau moyen de la mer)

MS Micro : Mason and Sykes Micro-scale model

RSO: Radar à Synthèse d'Ouverture

RMSE: Root Mean Square Error

SHC: Service Hydrographique du Canada (Canadian Hydrographyc Service (CHS))

SQ: Standard Quad-polarization

SST: Sea Surface Temperature (Température de la surface de la mer)

SWDA: SAR Wind Direction Algorithm

UTM: Universal Transverse Mercator

WESNet: Wind Energy Strategic Network

CHAPITRE 1: INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet «Cartographie à haute résolution de la vitesse du vent en région côtière avec l'imagerie Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) » du réseau de recherche « Wind Energy Strategic Network » (WESNet). Ce dernier utilise des technologies multidisciplinaires dans le but d'améliorer l'évaluation de la ressource éolienne et de permettre l'industrie éolienne de prévoir en avance leur production avant l'installation de leur parc éolien.

Le choix d'une région pour l'installation d'un parc éolien dépend de la connaissance du régime des vents *in situ*. Pour cela, l'évaluation de la ressource éolienne à long terme est indispensable et nécessite des mesures du champ¹ de vent sur une période assez longue (environ 10 ans). Des mâts installés sur des stations météo, des bouées (en mer) sont souvent utilisées pour les mesures des vitesses et directions du vent. Les mâts météorologiques fournissent une série temporelle de mesure du champ de vent sur un point donné et à une certaine hauteur par rapport au niveau du sol ou de la mer.

Le champ de vent à mesurer est une grandeur physique qui varie dans le temps et dans l'espace. En 1998, le coût d'installation d'un mât en mer pour une année de mesures s'élevait à 750 000 euros selon Stoffelen (1998) dans Ben Ticha (2007). L'obtention d'une quantité suffisante de mesures pour caractériser le champ de vent sur une large étendue spatiale en mer constitue un défi dans l'estimation d'énergie éolienne d'une région particulière en mer, selon ces mêmes auteurs.

¹ Grandeur vectorielle caractérisée par sa direction, sens de son orientation, et son intensité

Les régions côtières bénéficient d'un régime de vent provenant de deux milieux différents (terre et mer). Elles ont l'avantage d'être soumises au régime de vent océanique qui apporte plus d'énergie par rapport au vent de type continental. À cause de la faible rugosité de la surface océanique par rapport à la surface terrestre, les forces de frottement produites par la surface de la mer lors du déplacement horizontal de masse d'air au contact de la surface de l'océan sont faibles lorsque comparées à celles produites par la surface terrestre.

Le premier kilomètre de la basse couche de l'atmosphère est le plus en contact avec la surface de la mer. Les échanges d'énergie entre l'océan et l'air donnent naissance à des structures (des stries linéaires, tourbillons, etc.) sur l'océan. La circulation du vent à la surface de l'eau laisse des traces (vaguelettes) dépendant de l'intensité de la vitesse. Les vaguelettes à la surface de l'océan sont en équilibre avec le vent local et sont sensibles aux micro-ondes utilisées par les systèmes RSO installés à bord de satellite (Valenzuela, 1978, Gerling, 1986, Atlas *et al.*, 2001).

Vers les années 90, les ingénieurs en technologie éolienne ont commencé à s'intéresser à l'utilisation des données RSO pour mesurer la vitesse du vent en mer (Gerling, 1986, Vachon *et al.*, 1996, Stoffelen *et al.*, 1997, Vachon *et al.*, 1997, Lehner *et al.*, 1998). Néanmoins, la capacité des imageries RSO à cartographier les vitesses du vent en mer à haute résolution (de l'ordre d'une centaine de mètres) avait déjà été constatée avec la première mission spatiale munie d'un RSO, SeaSAT, en 1978 (Gerling, 1986). Les RSO peuvent offrir la possibilité d'avoir des cartes de vitesse sur une région étendue jusqu'à 500km x 500km (mode d'acquisition ScanSAR de RADARSAT) et ce, avec une résolution spatiale d'environ 500m pour la vitesse (Horstmann *et al.*, 2000a, Choignard *et al.*, 2004). Ils peuvent être utilisés pour mesurer la direction du vent sur la surface (environ 10 m au-dessus) des océans (Winstead *et al.*, 1998, Fichaux *et al.*, 2002, Koch, 2004, Zecchetto *et al.*, 2007).

En milieu côtier, le RSO peut être couplé avec les mesures fournies par les mâts et/ou bouées installés sur les côtes afin d'estimer la ressource éolienne d'une zone proche de la côte sur laquelle un parc éolien pourrait être installé (Choignard *et al.*, 2004, Ricard *et al.*, 2006, Beaucage *et al.*, 2007, Lessard-Fontaine *et al.*, 2010a, Lessard-Fontaine *et al.*,

2010b). Les autres outils utilisés dans l'estimation du vent sont les modèles numériques de la dynamique de l'atmosphère (Jackson *et al.*, 1975, Taylor *et al.*, 1983, Walmsley *et al.*, 1986, Wolters *et al.*, 1995, Benoit *et al.*, 1997, Jacob *et al.*, 1997, Pinard *et al.*, 2005). Ils fournissent des données sur le vent en mer et sur terre. Les données provenant des RSO peuvent servir de validation des résultats de ces modèles numériques de prévision atmosphérique sur les océans (Horstmann *et al.*, 2000b, Furevik *et al.*, 2002b, Horstmann *et al.*, 2002, Wallcraft *et al.*, 2009). Pour comprendre davantage l'utilisation des RSO dans le domaine de l'éolien, une brève introduction à cette technologie est présentée au paragraphe suivant.

1.2 Travaux antérieurs et difficultés rencontrées sur la cartographie du champ de vent par approche RSO

1.2.1 Interactions vent-mer et vaguelette-signal radar

La diffusion des ondes polarimétriques incidentes à la surface de la mer est reliée au vent local (Migliaccio M. *et al.*, 2006) qui dépend des conditions locales. Le déplacement de l'air au contact de l'océan crée des vaguelettes (~cm) et des vagues de gravité (~m) à la surface de la mer locale. Celles-ci augmentent en taille au fur et à mesure qu'elles se déplacent en surface qui n'est pas plane, mais plutôt ondulée. Les vaguelettes sont modulées par des vagues de gravité, lesquelles sont à leur tour modulées par d'autres, plus grandes, créées par des rouleaux atmosphériques (~km), appelées aussi circulation de Langmuir (Portabella Arnús, 2002). La rugosité de la surface de la mer causée par la formation des vaguelettes est à l'origine de la rétrodiffusion du signal radar à la surface de la mer (Valenzuela, 1978). Ce phénomène est appelé : la rétrodiffusion de Bragg. Elle se produit à la surface de l'eau qui est sous l'effet d'une trainée de vent. À leur tour, ces structures (rugosité) influencent l'écoulement de l'air par frottement. L'interaction entre les vagues, les vents et les phénomènes à méso échelle comme les rouleaux atmosphériques font de l'estimation du champ de vent sur l'océan un problème assez complexe (Portabella Arnús, 2002). Horstmann *et al.* (2003) a indiqué que l'état de la rugosité de la surface de l'océan peut être influencé par la présence de pluie, fronts, ou aussi par la glace durant l'hiver. L'imagerie RSO fournit de l'information concernant ces artéfacts par rapport à

d'autres capteurs de plus faible résolution spatiale (~25km) comme les diffusiomètres (Christiansen, 2001, Alpers *et al.*, 2011).

Les coefficients de rétrodiffusions (σ^0) de la mer proche des côtes peuvent être contaminés par la forte rétrodiffusion des pixels terrestres. Dans le cas de résolution spatiale de l'ordre kilométrique, des pixels localisés au voisinage de la ligne côtière peuvent présenter une moyenne de σ^0 provenant de deux cibles de nature différente ; composé de sable pour la partie terrestre d'un côté et de la surface de la mer de l'autre côté (Fetterer *et al.*, 1998, Kara *et al.*, 2007, Kara *et al.*, 2008).

La possibilité d'utilisation d'imageries satellites pour l'estimation du champ de vent sur les côtes dépend de leur résolution spatiale. Pour des images ayant une résolution plus grossière (comme celle des diffusiomètres qui est de l'ordre de 25km), les lignes des côtes sont peu détectables lors de l'extraction de la vitesse du vent. La haute résolution spatiale (50 m à 10 m) de l'imagerie issue des systèmes RSO offre une alternative à la cartographie du vent en région côtière (Choisnard *et al.*, 2004, Horstmann *et al.*, 2005, Loescher *et al.*, 2006, Ricard *et al.*, 2006, Beaucage *et al.*, 2007, Beaucage *et al.*, 2008, Horstmann *et al.*, 2008, Lessard-Fontaine *et al.*, 2010b, Bergeron *et al.*, 2011) parce que l'homogénéité de l'information à l'intérieur de chaque pixel augmente lorsque la taille des pixels est réduite.

1.2.2 Approche par Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO)

Le radar utilise des microondes pour illuminer leurs cibles et enregistre l'amplitude et/ou la phase du signal rétrodiffusé par la cible. L'amplitude et la phase du signal sont restituées de manière à obtenir une image à 2-D de la zone illuminée et peuvent être traitées et interprétées pour extraire des informations utiles pour des applications quelconques. Ce capteur dit actif peut fonctionner de jour comme de nuit (indépendant de l'ensoleillement). Un second avantage de l'utilisation des microondes est leur capacité à traverser les nuages. Cette propriété permet d'acquérir des données dans n'importe quelles conditions atmosphériques. C'est pourquoi le radar peut être utilisé dans des conditions extrêmes de l'atmosphère, comme dans le cas de suivi du typhon Man-Yi (le 11 juillet 2007) à partir d'images acquises par le satellite canadien RADARSAT-1 (Moon *et al.*, 2010).

Plusieurs satellites équipés d'un système radar embarqué ont été mis en orbite. Les États-Unis étaient le premier pays à lancer un satellite (SEASAT) muni d'un capteur RSO en 1978 (Born *et al.*, 1979). La fréquence utilisée était la bande L (1 GHz). Le SIR-A a été mis en orbite en 1981, suivi par SIR-B en 1984 (Christiansen, 2006), et SIR-C en 1994 (Samuel *et al.*, 2004). Ils ont été embarqués sur une navette spatiale américaine pour des fins d'applications : en géologie (Gaddis *et al.*, 1989), mesure de vitesse de vent en mer (Gerling, 1986), en océanographie (Gade *et al.*, 1996, Ufermann *et al.*, 1999b, Ufermann *et al.*, 1999a), mesure de hauteur de pluie (R. K. Moore, 1997), cartographie de glace (Forster *et al.*, 1996). En 1991, l'Agence Spatiale Européenne (ESA) a lancé ERS-1 ; suivi de JERS-1 (Japon) en 1992, ERS-2 et RADARSAT-1 (Canada) en 1995, ASAR-ENVISAT (Europe) en 2002 (Samuel *et al.*, 2004), PALSAR (Japon) en 2006 (Rosenqvist *et al.*, 2007), RADARSAT-2 (Canada) en 2007 (Morena *et al.*, 2004), Cosmo-SkyMed (Italie) en 2007 (Covello *et al.*, 2008) et TerraSAR-X (Allemagne) en 2007 (Buckreuss *et al.*, 2009). Le lancement RADARSAT-Constellation est prévu pour 2018 d'après l'Agence Spatiale Canadienne et « MacDonald, Dettwiler & Associate, Ltd ».

L'interaction du signal incident avec une cible quelconque produit d'autres états de polarisation du signal rétrodiffusé. Dans le cas de l'océan, les cibles sensibles à la bande C sont formées par les vagues capillaires (vagues à l'échelle de Bragg) créées instantanément par le vent local (Valenzuela, 1978, Portabella *et al.*, 2002, Christiansen *et al.*, 2006). En polarimétrie, ces cibles sont appelées des cibles distribuées (Mott, 2006). Les signaux émis par le radar interagissent différemment avec leurs cibles selon la fréquence du signal utilisée et son angle d'incidence sur la cible. Les signaux rétrodiffusés sur la mer sont caractérisés par son coefficient de rétrodiffusion qui dépend de la rugosité formée par les vaguelettes à la surface de l'eau. L'amplitude des signaux rétrodiffusés a toujours été utilisée pour cartographier le champ de vent en mer (Unal *et al.*, 1991, Vachon *et al.*, 2000b, Choisnard *et al.*, 2003, Beaucage *et al.*, 2008, Bergeron *et al.*, 2011). Le paragraphe suivant résume quelques résultats dans l'estimation du champ de vent en mer (en région côtière) depuis les années 2000.

1.2.3 États de l'art

L'approche par RSO offre une précision intéressante dans l'estimation des paramètres du champ de vent (vitesse et direction), lorsque comparée à l'approche utilisant des diffusiomètres (Fetterer *et al.*, 1998). Le RSO peut offrir la possibilité de produire des cartes de vent à une résolution spatiale de l'ordre d'une centaine de mètres (~400m) (Choisnard *et al.*, 2004, Hasager *et al.*, 2005, Lessard-Fontaine *et al.*, 2010a, Bergeron *et al.*, 2011). Les cartes de vent obtenues avec les diffusiomètres ont une résolution spatiale environ 25km et 12,5km (Tang *et al.*, 2004). Un résumé de quelques travaux sur l'évaluation du potentiel des images RSO pour mesurer le champ de vent est présenté au Tableau 1.1.

Tableau 1.1: Sélection de travaux publiés sur l'estimation de la vitesse de vent par imageries RSO en milieu côtier.

Auteurs et années de publication	Images utilisées	Méthode d'extraction de la direction	Modèle utilisé pour le calcul de vitesse	Données de validation	RMSE (*) ou écart-type (**)	Biais (*) ou moyenne de la différence (**)
(Monaldo <i>et al.</i> , 2001)	2862 scènes RADARSAT-1	- NOGAPS	CMOD4 avec pol-ratio de Kirchhoff	Bouées	1,76m/s (**)	0,85m/s (**)
		- Bouées			2,32m/s (**)	0,61m/s (**)
(Horstmann <i>et al.</i> , 2002)	- 159 scènes ERS1/2 - 20 scènes RADARSAT-1	Gradients Locaux	CMOD4	REMO	38,4°(*) ; 3,43m/s(*)	0,9°(*) ; 1,71m/s(*)
				HIRLAM	21,6°(*) ; 3,47m/s(*)	-3,5°(*) ; -0,81m/s(*)
(Choisnard <i>et al.</i> , 2003)	6 scènes RADARSAT-1	Interpolation spline biharmonique de données QuikSCAT et bouées	CMOD-IFR2 avec pol-ratio de Kirchhoff	Bouées	2,13m/s(*)	0,25m/s(*)
				QuickSCAT	1,30m/s(*)	0,05m/s(*)
(Choisnard <i>et al.</i> , 2004)	10 scènes RADARSAT-1	Interpolation spline biharmonique de données QuikSCAT et bouées	CMOD-IFR2 avec pol-ratio de Kirchhoff	Bouées	2,16m/s(*)	1,84m/s(*)
				Mât	2,52m/s(*)	-0,33m/s(*)
				QuickSCAT	1,55m/s(*)	0,21m/s(*)
(Koch <i>et al.</i> , 2006)	633 scènes ERS-1/2	- Gradient Locaux - REMO	CMOD4	REMO	17,6° (**) ; 2,92m/s(*)	-0,5° (**) ; -1,54m/s(*)
(Beaucage <i>et al.</i> , 2007)	14 scènes RADARSAT-1	Interpolation de mesures <i>in situ</i> et de QuikSCAT	CMOD-IFR2	MC2	16° (*) 2,07m/s(*)	6° (*) 0,13m/s(*)
(Bergeron <i>et al.</i> , 2011)	9 scènes RADARSAT-2	Gradient Locaux	CMOD5 avec pol-ratio de Hwang	Bouées	25,67°(*) ; 1,30m/s(*)	0,58m/s(*)
				QuickSCAT	17,58°(*) ; 1,42m/s(*)	0,04m/s(*)

Auteurs et années de publication	Images utilisées	Méthode d'extraction de la direction	Modèle utilisé pour le calcul de vitesse	Données de validation	RMSE (*) ou écart-type (**)	Biais (*) ou moyenne de la différence (**)
(Zhang <i>et al.</i> , 2012)	534 scènes RADARSAT-2	Inversion de CMOD5.N	C-2PO	Bouées	22,49°(*) ; 1,39m/s(*)	1,65°(*) ; 0,04°(*)

Note : Afin d'évaluer la précision de leurs résultats, certains auteurs utilisent les paramètres statistiques comme l'écart-type et la moyenne de la différence entre les éléments de deux séries de valeurs à savoir les valeurs estimées et les valeurs mesurées ; et d'autres utilisent l'erreur (RMSE) et le biais.

Les résultats de (Monaldo *et al.*, 2001) présentés au Tableau 1.1 ont été obtenus avec des images RADARSAT-1 acquises sous angles d'incidence entre 25° et 45°. Pour contourner au problème d'ambiguïté sur l'orientation des directions extraites directement dans les images RSO, l'auteur a utilisé des directions (avec orientation) provenant de source extérieure aux images utilisées : soit le modèle météorologique NOGAPS (Hogan *et al.*, 1991) et des bouées installées sur les côtes est des États-Unis. La limite de cette approche réside dans la résolution spatiale (faible) du modèle utilisé, soit environ 1° x 1° en latitude-longitude. Afin de pouvoir estimer le vent sur les côtes à l'aide d'images RSO, l'auteur a utilisé des directions mesurées directement par des bouées installées *in situ*. Mais, malgré la disponibilité de données de mesures en mer à l'approche des côtes, l'auteur a noté que les directions enregistrées par ces bouées représentent des fluctuations locales et introduisent des incertitudes sur l'estimation des vitesses avec les modèles de fonction géophysique.

Dans l'étude de (Horstmann *et al.*, 2002), l'ambiguïté 180° sur la direction du vent a été éliminée en utilisant des données issues de modèles météorologiques et considérant l'orientation du traîné (une zone à la surface de la mer située derrière la côte par rapport à l'arrivée du vent). Il a été noté que les principales sources d'erreur lors de la comparaison des résultats obtenus avec les images ERS1/2 avec les données fournies par le modèle REMO (Jacob *et al.*, 1997) étaient la faible résolution spatiale de ce modèle (~0,5°, soit ~55km). L'effet du relief avoisinant la côte a été sous-estimé par le modèle. Les modèles météorologiques REMO (Jacob *et al.*, 1997) et HIRLAM (Wolters *et al.*, 1995) sont des modèles de prévision météorologique (NWP). L'auteur a utilisé le ratio de polarisation de

Thompson (Thompson *et al.*, 1999) avec le modèle de fonction géophysique² CMOD4 pour le calcul des vitesses de vent sur les images ScanSAR en polarisation HH issues de RADARSAT-1.

Selon les travaux de (Choisnard *et al.*, 2003, Choisnard *et al.*, 2004), l'ordre de grandeur de la RMSE des vitesses lorsque comparée à des données de bouées est de 2,13m/s et 2,16m/s respectivement en utilisant des directions de vent interpolées provenant de QuikSCAT et des données de bouées *in situ*. Ces vitesses ont été calculées sur des images monopolarisation HH de RADARSAT-1 avec le modèle CMOD-IFR2 (Quilfen *et al.*, 1998) couplé avec le ratio de polarisation de Kirchhoff (Thompson *et al.*, 1999). Les valeurs de RMSE dans cette étude sont comparables à ceux obtenus par Monaldo *et al.* (2001) (RMSE = 2,32m/s) qui utilisait des directions issues de bouées.

Dans l'étude faite par Koch *et al.* (2006) la valeur du RMSE associée aux vitesses a augmenté (RMSE : 3,07m/s ; biais : -1,64m/s) lorsque la direction provenant du modèle REMO a été utilisée à l'entrée de CMOD4. La faible résolution spatiale du modèle atmosphérique (~55 km) utilisé par rapport à celle des cartes de vent RSO (400 m) avait été considérée parmi d'autres paramètres (exemple : le décalage temporel entre les images et les valeurs simulées par le modèle numérique) comme source d'erreur.

Le modèle CMOD avait été initialement créé (Long, 1985) et calibré avec des données de diffusiomètres en polarisation VV des satellites européens ERS-1 (Unal *et al.*, 1991). Il n'existe pas encore de modèle géophysique spécifique pour la polarisation horizontale HH. Par conséquent, une adaptation (utilisation d'un ratio de polarisation) avait été faite pour les données en polarisation HH, comme le cas de RADARSAT (Thompson *et al.*, 1999). Cette adaptation est nécessaire parce que le modèle CMOD a été créé pour des images acquises en polarisation VV et il ne peut pas être appliqué directement sur des images en polarisation HH. Pourtant, le ratio de polarisation à utiliser avec le modèle géophysique en

² C'est une fonction mathématique qui relie le coefficient de rétrodiffusion radar avec l'angle d'incidence du signal radar, la vitesse, et la direction du vent. CMOD est une fonction géophysique conçu pour les données de diffusiomètre acquises en bande C et elle est utilisée pour les données RSO. Plusieurs versions ont été développées dans la littérature.

bande C (voir chapitre 3) varie d'un jeu de données à l'autre (Vachon *et al.*, 2000b, Monaldo *et al.*, 2001, Bergeron *et al.*, 2011). Pour le cas des données RADARSAT-1, celui de Kirchhoff est le plus adéquat (Vachon *et al.*, 2000b, Choisnard *et al.*, 2003) tandis que celui de Hwang *et al.* (2010a) est considéré comme étant adapté pour les données de RADARSAT-2 (Bergeron *et al.*, 2011).

1.2.4 Effets secondaires sur l'estimation du vent par approche RSO

La présence des vagues de gravité derrière une île montagneuse est un effet de la topographie sur l'écoulement de l'air dans la basse couche de l'atmosphère (Vachon *et al.*, 1994b). Ces vagues ont une longueur d'onde de l'ordre d'une dizaine de kilomètres sur les images RSO et sont persistantes dans le temps par rapport à celles qui apparaissent instantanément sous l'effet des vents locaux. En modulant les vagues de longueur d'onde centimétrique, l'angle d'incidence local du signal est biaisé et par la suite la vitesse est sous-estimée. L'orographie avait été signalée dans comme étant le paramètre ayant le plus d'influence sur la vitesse du vent proche des côtes (Ricard, 2005, Ricard *et al.*, 2006). Les descriptions et analyses des effets du relief sur l'estimation des vitesses de vent par RSO proche des côtes sont présentées dans Vachon *et al.* (1994b) et Holt (2004).

La propagation des ondes mécaniques à la surface de l'océan peut être affectée par la topographie du fond marin (Alpers *et al.*, 1984). À l'approche des côtes, la profondeur marine devient progressivement faible jusqu'à devenir nulle sur les plages. Les vagues déferlent lorsque le rapport entre leur hauteur et la profondeur locale est compris entre 0,3 et 0,8 (Christiansen, 2006). Des effets d'autres vagues (vagues de surface et vagues internes) viennent moduler les vagues de Bragg. Sous l'effet des vagues de surface avec des périodes plus longues, l'angle d'incidence du signal incident est localement modifié. Ces vagues font varier la taille des vagues de Bragg. Elles sont plus courtes (comprimées) au niveau des creux et plus longues (étirées) sur les crêtes. Le moyennage par groupe de pixel sur l'image RSO est connu pouvant réduire les effets des vagues de surface. Des vagues internes et des courants peuvent apparaître dans la colonne d'eau lorsqu'un gradient de température (résultant du réchauffement de la surface) ou de salinité apparaît (Christiansen, 2006). Selon l'orientation de déplacement du courant par rapport à celui des vagues à la surface, les courants internes peuvent changer la forme des vagues. Lorsque

ces dernières se déplacent dans le même sens que les courants, elles peuvent être étirées et leur longueur d'onde augmente. Par contre, lorsqu'elles sont en sens inverse du courant, elles sont comprimées et la longueur d'onde diminue. Les mesures de la rétrodiffusion deviendraient ainsi biaisées. Les vagues de gravité se propageant depuis le large vers la côte changent progressivement de propriétés physiques. Le nombre d'ondes des vagues décroît lorsque la profondeur est réduite (Fan *et al.*, 2008). La connaissance de la bathymétrie sous-marine pourrait apporter de l'information sur le biais qu'elle apporte aux mesures de la rétrodiffusion RSO à la surface. La bathymétrie est un paramètre à considérer dans l'estimation de la vitesse du vent en milieu côtier.

1.2.5 Les défis connus dans la validation de résultats

Les vitesses et les directions du vent sont enregistrées quotidiennement par des mâts installés sur des stations météo (mâts sur terre), ou des bouées en milieu marin côtier. Quelques fois, des données issues de bateaux sont utilisées (Vachon *et al.*, 1996) pour valider les champs de vent estimés avec les images RSO. Le manque de résolution spatiale des données issues des réseaux de mesures formées par les mâts météorologiques, bouées et celles provenant des bateaux rend difficile la validation des résultats RSO ainsi que ceux des sorties des modèles numériques (NWP) (Portabella Arnús, 2002, Yu *et al.*, 2006).

La disponibilité des données satellitaires acquises par les RSO a aidé les scientifiques pour contourner le problème de manque de données de mesures en mer. L'amélioration des périodes de révolution des satellites, la largeur de leurs fauchées et la résolution spatiale des données RSO ont rendu disponible une quantité importante de données qui peuvent servir pour piloter les modèles atmosphériques et/ou pour valider leurs résultats. Les données RSO ont été reconnues pour leur potentiel à estimer la vitesse du vent en région côtière (Ricard *et al.*, 2006, Beaucage *et al.*, 2007, Lessard-Fontaine *et al.*, 2010b). Malgré tout, en région côtière, des effets secondaires perturbent la relation physique entre le coefficient de rétrodiffusion radar et le vent local et rendent la validation des modèles une tâche compliquée.

Le présent travail est orienté dans l'automatisation de l'estimation du champ de vent (vitesse et direction) en régions côtières. Le calcul des vitesses de vent peut se faire à

l'aide du modèle en bande C (CMOD) (Long, 1985, Unal *et al.*, 1991, Vachon *et al.*, 2000b, Choisnard *et al.*, 2004, Beaucage *et al.*, 2007, Bergeron *et al.*, 2011). Mais le modèle nécessite une connaissance à priori des directions du vent afin de pouvoir calculer leur vitesse. Elles seront déterminées en utilisant la méthode des Gradients Locaux (Koch, 2004, Bergeron *et al.*, 2011) qui rehaussent les orientations des structures linéaires présentes sur l'image elle-même. Une ambiguïté 180° demeure toutefois sur les directions du vent calculées. Celle-ci peut être résolue en considérant les directions fournies par d'autres sources extérieures comme les données de bouées (Bergeron *et al.*, 2011), ou bien par l'effet de sillage observé à côté d'une île quelconque sur l'image. Une procédure opérationnelle a déjà été mise en place par Environnement Canada pour l'estimation du champ de vent au large de l'océan en utilisant des images RSO et les cartes de champs de vent sont accessible sur demande à travers le site web <http://cwind.ca>. L'ambiguïté sur la direction du vent est éliminée par l'utilisation de données extérieures aux images ; soit par des diffusiomètres, sorties de modèle météorologique, bouées et/ou mâts météorologiques installés en mer (Furevik *et al.*, 2002a). Pour réduire le temps de traitement des données ainsi que le coût de l'estimation du vent, un algorithme servant à corriger automatiquement cette ambiguïté devrait être développé, et ce en utilisant que les informations contenues dans l'image utilisée.

À ce propos, une nouvelle méthode pour l'élimination de l'ambiguïté a été récemment proposée par Zhang *et al.* (2012). Elle est basée sur la caractéristique de la symétrie impaire (par rapport à la direction du vent) du coefficient de corrélation polarimétrique (PCC) entre les images en copolarisation et en polarisation croisée. Le PCC est un nombre complexe calculé à partir des éléments de la matrice de rétrodiffusion. Les directions sont d'abord déterminées par inversion de CMOD5.N³ (Hersbach, 2010) en utilisant des vitesses calculées sur les canaux en polarisation croisée par le biais du modèle de Vachon et Wolf (Vachon *et al.*, 2011). L'ambiguïté 180° sur la direction est ensuite éliminée en utilisant des critères sur le signe algébrique de la partie réelle et imaginaire du PCC. L'étude statistique effectuée sur les directions calculées a donné un

³ Une version récente du modèle géophysique CMOD5, mais qui fonctionne avec un état neutre de l'atmosphère.

biais de $1,65^\circ$ et un RMSE de $22,49^\circ$ (comparaison avec des observations de bouée *in situ*). Lorsque les directions calculées ont été introduites dans CMOD5.N, les vitesses obtenues sont cohérentes avec celles données par le modèle C-2PO⁴. Lors de la comparaison des résultats (CMOD5.N versus C-2PO), l'auteur a constaté un biais de $-0,05$ m/s et un RMSE de $1,84$ m/s (Zhang *et al.*, 2012).

1.3 Objectifs de la recherche

Cette étude vise en particulier de :

- 1) Cartographier (~ 400 m de résolution et ~ 200 m de résolution) les champs de vent proches des côtes de l'Île-du-Prince-Édouard à l'aide des images SQ et ScanSAR-Étroite de RADARSAT-2.
- 2) Évaluer l'effet de la bathymétrie sur l'estimation du vent par l'approche RSO et sur la vitesse moyenne à long terme fournie par le modèle MS Micro.

Le premier objectif est présenté au chapitre 2. Les détails concernant la cartographie du champ de vent en mer sont développés. Une nouvelle approche servant à l'élimination de l'ambiguïté sur les directions du vent calculées est présentée. Le chapitre 3 porte sur l'analyse des effets de la variation de la profondeur de la mer sur les vitesses estimées par la technique RSO, ainsi que sur la vitesse moyenne à long terme de l'année 1958 à 2000 simulée par le modèle microéchelle MS Micro. La conclusion générale est présentée au chapitre 4.

Nous proposons d'utiliser les informations de phase des échos radars des images RSO en format « Single Look Complex (SLC) » pour éliminer l'ambiguïté 180° sur la direction du vent.

⁴ Nomination après le terme anglais « C-band Cross-Polarized Ocean backscatter model ».

CHAPITRE 2: CARTOGRAPHIE DU CHAMP DE VENT PAR RSO

2.1 Introduction

À cause de l'inégalité de la répartition de la lumière (énergie solaire) sur la Terre, la température et la pression de l'air dans l'atmosphère varient dans l'espace et le temps. L'atmosphère peut être assimilée à un fluide qui est en mouvement d'écoulement permanent sur la surface terrestre et sur la mer. La surface de l'océan est le milieu où les deux fluides (air et eau de mer) de nature différente et non miscible sont en contact. De l'énergie (mécanique et calorifique) et de la matière y sont échangées en permanence. Des phénomènes à grande échelle (de l'ordre kilométrique) se produisant dans la basse couche de l'atmosphère (soit le premier kilomètre) peuvent laisser des structures géométriques (stries linéaires, structures moutonnées) à la surface de la mer sous-jacente. Les structures linéaires sur l'océan sont les produits des mouvements de déplacements verticaux de l'air dans l'atmosphère causés par des rouleaux atmosphériques (Mourad *et al.*, 1996) ou des vagues de gravités atmosphériques (Vachon *et al.*, 1994a). Il a été démontré que les structures linéaires observées sur les images RSO peuvent être utilisées pour déterminer les directions du vent local et éliminer l'ambiguïté sur la direction en utilisant des données extérieures à l'image considérée (Lehner *et al.*, 1998, Fichaux *et al.*, 2002, Koch, 2004, Horstmann *et al.*, 2008). Une nouvelle approche pour éliminer l'ambiguïté est proposée et testée dans ce chapitre.

À part les structures géométriques causées par des phénomènes à mésoéchelles observables sur les images RSO, des vaguelettes créées par le vent local sont connues comme les principales causes de la rétrodiffusion du signal radar au-dessus de la surface océanique. La puissance du signal rétrodiffusé dépend de la rugosité de la surface de

l'eau sous l'effet du vent. Des modèles géophysiques pour différentes bandes (bande L, bande C, bande X) ont été créés pour estimer les vitesses du vent (Stoffelen *et al.*, 1997, Shimada *et al.*, 2003, Shimada *et al.*, 2004, Hersbach *et al.*, 2007, Isoguchi *et al.*, 2009, Nirchio, 2013). Dans cette étude, le modèle en bande C (CMOD5) (Hersbach *et al.*, 2007) a été utilisé vu que les données radar obtenues ont été acquises dans la bande C.

2.2 Modèle de Fonctions Géophysiques en bande C (CMOD) pour le calcul du champ de vent en mer

Le modèle CMOD est utilisé pour la cartographie du vent en mer. Ce modèle a été créé en 1985 (Long, 1985). Il sert à extraire la vitesse du vent sur des images RSO en bande C, en polarisation VV. Différents rapports de polarisation ont été proposés pour le cas de la polarisation HH (Thompson *et al.*, 1999, Thompson *et al.*, 2000). Pour une fréquence et une polarisation donnée, le coefficient de rétrodiffusion peut être exprimé comme une fonction de l'angle d'incidence du signal, l'angle entre la visée du satellite et le vecteur vitesse du vent, et le module de la vitesse du vent à 10 m au-dessus de la surface de l'eau. Ce modèle a été calibré avec les données du satellite européen ERS-1. Deux versions ont été créées : CMOD-1 et CMOD-2. Les développements détaillés de ces modèles sont décrits dans Liu *et al.* (1994) ainsi que les améliorations apportées par une deuxième version. À l'Institut Français d'Étude de la Mer (IFRMER), le modèle CMOD-IFR2 a été calibré avec des données en polarisation VV des diffusiomètres de la série de satellites ERS-1/2.

Le modèle CMOD-5 a été défini à l'issue de l'utilisation des données de diffusiomètre à bord du satellite ERS-2 et des données colocalisées ECMWF (Hersbach *et al.*, 2007). D'autres versions ont été introduites ; CMOD-5.N (Hersbach, 2010) en considérant l'état de stratification de l'atmosphère, CMOD5.H (Soisuvarn *et al.*, 2013) adaptation de CMOD5.N aux coefficients de rétrodiffusion de ASCAT sensible aux vitesses de vent supérieur à 15m/s. CMOD5 calcule la vitesse du vent en ignorant la stabilité de l'atmosphère, parce que ce dernier a été déjà considéré dans les vitesses utilisées lors de la détermination des coefficients dans le modèle CMOD5 (Hersbach *et al.*, 2007). C'est pour cette raison qu'il a été choisi pour être utilisé dans ce travail. Le modèle CMOD

(Modèle en bande C pour une polarisation VV) a la forme générale indiquée dans l'équation 2.1.

$$\sigma_{VV}^0(\theta, U_{10}, \varphi) = A_0(\theta, U_{10})[1 + A_1(\theta, U_{10}) \cos \varphi + A_2(\theta, U_{10}) \cos 2\varphi]^{1,6} \quad (2.1)$$

Où :

σ_{VV}^0 : Coefficient de rétrodiffusion radar en polarisation VV.

U_{10} : Vitesse du vent à 10m au-dessus de la surface de l'eau.

θ : Angle d'incidence du signal radar.

φ : Direction du vent par rapport à la direction azimutale de l'antenne radar.

A_0, A_1, A_2 : Coefficients dépendant de l'angle d'incidence et de la vitesse du vent. Leurs valeurs pour CMOD-5 sont présentées dans (Hersbach *et al.*, 2007).

2.3 Données utilisées

2.3.1 Images Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) RADARSAT-2

Un nombre total de 28 scènes RADARSAT-2 ont été acquises auprès de MDA via le programme SOAR-Éducation de l'Agence spatiale canadienne. Le satellite passe au-dessus de la zone d'étude (l'Île-du-Prince-Edouard) avec une orbite ascendante à environ 18 h (heure local) et avec une orbite descendante à 6h (heure local).

Deux types d'images ont été acquis : ScanSAR-Étroite (SCN) et Standard Quad-Pol (SQ). Leurs caractéristiques respectives sont présentées dans les documents de description des produits RADARSAT-2 (Slade, 2009).

Les données polarimétriques contiennent des informations sur la différence de phase entre les signaux incidents et rétrodiffusés. Elles offrent plus d'avantages par rapport aux images en monopolarisation (HH) acquises par RADARSAT-1. Le satellite canadien RADARSAT-2 est le premier satellite muni d'un système RSO capable d'enregistrer les informations de phase dans quatre canaux (HH, HV, VH, VV) selon des modes de fonctionnement spécifique (Fine Quad-polarisation ; Standard Quad-polarisation). Les

images en polarisation croisée de RADARSAT-2 ont été déjà testées pour l'estimation de la vitesse du vent (Hwang *et al.*, 2010a, Hwang *et al.*, 2010b, Bergeron *et al.*, 2011, Vachon *et al.*, 2011). Toutefois, la détermination de l'orientation du vent, sans information extérieure à l'image elle-même sur les directions du vent calculées par l'algorithme des gradients locaux (Koch, 2004) ou par transformation de Fourier (FFT) (Kim *et al.*, 2002, Moon *et al.*, 2010) n'était pas possible. La liste des scènes acquises est présentée aux Tableau 2.1 et Tableau 2.2.



Figure 2.1: Localisation des scènes RADARSAT-2 SQ acquises sur l'île-du-Prince-Edouard.

Tableau 2.1 : Scènes ScanSAR-Étroite (SCN) extraites de l'archive du satellite RADARSAT-2.

Scènes RSO	Faisseau	dates	Heures locales	polarisations
ScanSAR (SCN)	SNB	11 novembre 2011	6h14mn49s	HH-HV
ScanSAR (SCN)	SNB	20 mai 2012	18h04mn59s	HH-HV
ScanSAR (SCN)	SNB	31 mai 2012	6h23mn24s	HH-HV
ScanSAR (SCN)	SNB	6 juin 2012	18h09mn15s	HH-HV
ScanSAR (SCN)	SNB	13 juin 2012	18h04mn59s	HH-HV
ScanSAR (SCN)	SNB	14 juillet 2012	18h00mn49s	HH-HV
ScanSAR (SCN)	SNB	24 juillet 2012	18h09mn14s	HH-HV
ScanSAR (SCN)	SNB	29 octobre 2012	6h19mn04s	HH-HV
ScanSAR (SCN)	SNB	29 octobre 2012	6h19mn04s	HH-HV
ScanSAR (SCN)	SNB	15 novembre 2012	6h23mn25s	HH-HV
ScanSAR (SCN)	SNB	29 octobre 2012	6h19mn04s	HH-HV

Tableau 2.2 : Scènes Standard Quad-Pol (SQ) nouvellement acquises. Ces données sont au format Single Look Complex (SLC).

Scènes RSO	Faisseau	Dates	Heures locales	Polarisations
Standard Quad	SQ3	18 octobre 2012	6h40mn18s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ3	18 novembre 2012	6h40mn20s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ7	25 octobre 2012	6h36mn04s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ7	25 octobre 2012	6h36mn07s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ3	11 novembre 2012	6h40mn17s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ3	11 novembre 2012	6h40mn20s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ9	11 novembre 2012	18h01mn21s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ9	11 novembre 2012	18h01mn24s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ12	1er novembre 2012	6h31mn52s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ12	1er novembre 2012	6h31mn55s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ12	1er novembre 2012	6h31mn58s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ6	18 novembre 2012	17h57mn06s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ6	18 novembre 2012	17h57mn09s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ12	28 novembre 2012	18h05mn28s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ12	28 novembre 2012	18h05mn31s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ14	4 novembre 2012	18h05mn30s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ14	4 novembre 2012	18h05mn33s	HH-VV-HV-VH
Standard Quad	SQ14	4 novembre 2012	18h05mn36s	HH-VV-HV-VH

2.3.2 Lignes côtières

Avant de calculer les vitesses et directions du vent en mer, il est nécessaire de masquer la partie terrestre sur les images. Des données contenant les lignes côtières ont été utilisées pour la création de masques. Ces données ont été faites par Wessel *et al.* (1996) et sont connues sous le nom : *Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography database* (GSHHG). Une version en pleine résolution (environ 1:100 000) a été téléchargée du site web du *National Geographic Data Center*; National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

2.3.3 Données d'enregistrement de mâts météorologiques

Des données horaires de vitesses et directions du vent enregistrées par un mât installé à la station météorologique d'Environnement Canada à North Cape ont été téléchargées sur le site web www.meteo.gc.ca. D'autres données (moyennées toutes les dix minutes) ont été fournies par WEICan (Wind Energy Institute of Canada). Toutefois, il existe des moments où le mât de WEICan n'a pas pu enregistrer de données à cause de problème

des instruments de mesure. Ces deux catégories de données d'enregistrement ont donc été utilisées conjointement pour éviter un manque de données pour valider les résultats.

La station météo au North Cape est localisée à la latitude $47,06^\circ$ et longitude $-64,00^\circ$, et la station de mesure WEICan sur la latitude 47.04°N longitude 64.015°O . La station météo se trouve sur la pointe de l'île (à $\sim 85\text{m}$ de la ligne de côte suivant la direction 303° ; à $\sim 150\text{m}$ suivant la direction 305° ; et à $\sim 125\text{m}$ suivant la direction 84°). La vitesse mesurée à la station est ainsi supposé la même que le vent en mer, car la longueur de « fetch » associée à l'action de la rugosité de la surface autour de la station peut être négligée. L'absence de topographie prononcée dans la région de North Cape appuie l'hypothèse annoncée précédemment. Les données du mât de North Cape sont ainsi prises pour valider les directions calculées par l'algorithme des gradients locaux sur les images co-localisées avec la station.



Figure 2.2: Position géographique du mât météorologique à la station North Cape (Lat.: 47.06° ; Long: -64.00°) et la station de mesure WEICan (Lat : 47.04°N ; Long : 64.015°W). Google MapTM

2.4 Calcul des champs de vent

Il existe trois différentes approches pour extraire les caractéristiques du champ de vent en mer (He *et al.*, 2005). La première est basée sur la relation entre la vitesse du vent à 10m au-dessus de la surface moyenne de la mer (MSL), la longueur d'onde seuil détectable en azimut et le spectre des vagues sur l'océan (Kerbaol *et al.*, 1998, Vachon *et al.*, 2000a). Selon ces auteurs, la composante en azimut du mouvement des vagues de gravité sur la surface de la mer peut créer des distorsions sur l'image à cause de la dépendance de la résolution azimutale de l'image au mouvement relatif entre le satellite et les vagues. Sachant que les vagues de Bragg (cible des signaux en bande C) sont modulées par les vagues de gravité, la vitesse de vent associé aux vagues de Bragg sont ainsi reliées à la longueur d'onde seuil détectable dans la direction azimutale. La deuxième utilise une méthode d'inversion optimale afin d'estimer le champ de vent (Portabella *et al.*, 2002). Cette méthode utilise un modèle statistique dans lequel une fonction coût est minimisée. La fonction à minimiser contient les paramètres : coefficient de rétrodiffusion RSO ; fonction géophysique CMOD4 ; directions à 25km de résolution spatiale issue de SWDA (Fetterer *et al.*, 1998) ; données de champs de vent provenant de bouées ou de modèle météorologique. Le troisième utilise uniquement un modèle de fonction géophysique avec des directions de vent provenant de modèle météorologique ou de diffusiomètre ou de mesures de bouée *in situ*. C'est ce dernier qui sera utilisé dans cette étude à cause de sa simplicité par rapport aux deux autres méthodes. Les directions à utiliser seront extraites à partir de l'image elle-même et leurs orientations seront déterminées avec des informations sur la même image.

Les images acquises ont été d'abord prétraitées avant d'être utilisées dans les différents processus menant à la détermination du champ de vents. Le processus général suivi pour l'extraction de la vitesse sur les images est présenté à la Figure 2.3. Chacune des scènes acquises a été préalablement projetée en UTM dans PCI-Geomatica en utilisant le modèle de Toutin (2004). Deux types d'images de résolution spatiale différente ont été extraits pour chacune des scènes.

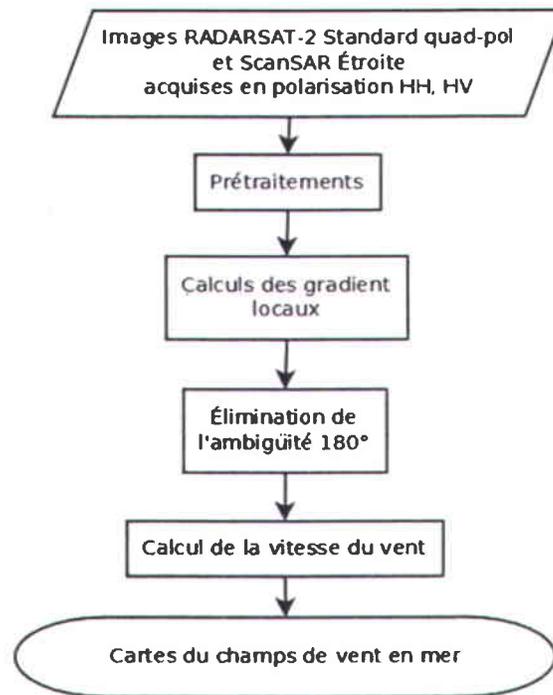


Figure 2.3: Diagramme méthodologique général de l'extraction du champ de vitesse avec les images RADARSAT-2.

L'une est utilisée pour extraire les directions et l'autre pour les calculs des vitesses (voir Figure 2.4 à la page suivante). Les images SQ (haute résolution) dédiées au calcul des vitesses ont été projetées sur une grille de 25 m, puis un filtre bilinéaire a été utilisé lors de l'orthorectification. Les autres, pour l'extraction des directions, ont été projetées sur une grille d'espacement de 100m. Le filtre B^4 (détails dans prochaine la section de ce mémoire) défini par Koch (2004) a été utilisé lors de l'orthorectification des images pour le calcul des directions. Le ré-échantillonnage des scènes SCN a été fait à 100m pour la détermination des directions et les vitesses. Les filtres appliqués sur les images SCN et SQ sont les mêmes. La projection et les filtrages constituent le prétraitement à la Figure 2.4.

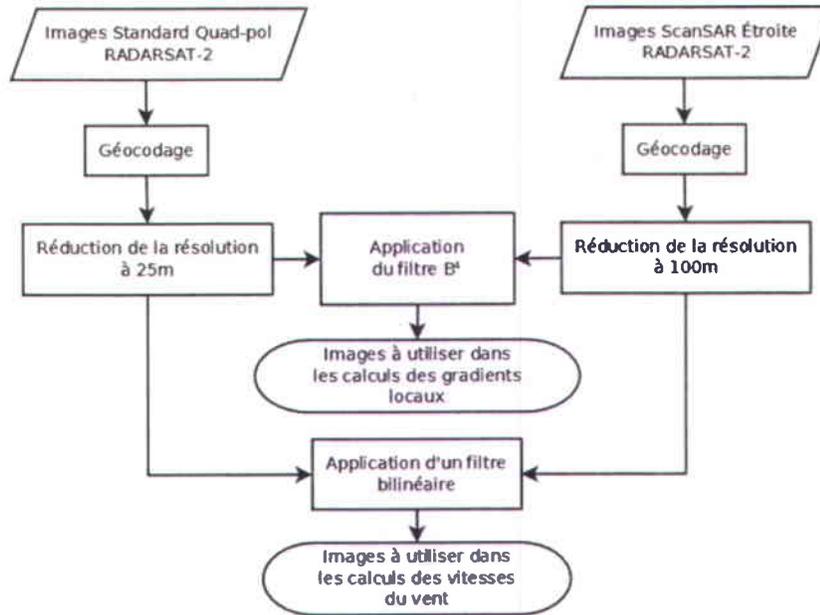


Figure 2.4: Diagramme des étapes de prétraitement des images.

2.4.1 Extraction de la direction du vent et élimination de l'ambiguïté 180° avec l'information de phase dans les images polarimétriques SQ.

L'inversion du modèle géophysique pour le calcul de la vitesse requiert *a priori* la connaissance de la direction du vent, l'angle d'incidence du signal radar sur la cible et enfin le coefficient de rétrodiffusion. L'algorithme de calcul des gradients locaux a été utilisé pour obtenir une carte des directions du vent. L'opérateur élémentaire de base utilisé dans cet algorithme est l'opérateur de Sobel optimisé. Cet opérateur est une matrice de taille 3x3.

$$D_x = \frac{1}{32} \begin{pmatrix} 3 & 0 & -3 \\ 10 & 0 & -10 \\ 3 & 0 & -3 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Ce filtre consiste à détecter des contours sur une image. Le transposé de cette matrice (Équation (2.3)) est calculé afin de construire l'opérateur (Équation (2.4)) servant à calculer les gradients sur l'image en amplitude de 100m de résolution prétraités. Cet opérateur est une matrice dont les éléments sont des nombres complexes.

$$D_y = D_x^T \quad (2.3)$$

$$D = D_x + iD_y \quad (2.4)$$

i est le nombre complexe défini par $i^2 = -1$

Les gradients sont calculés en appliquant l'opérateur D sur chacun des pixels sur l'image à 100m de résolution spatiale prétraités pour obtenir le gradient G' (Équation (2.5)). G' est élevée au carré et sa résolution est dégradée de moitié (de 100m à 200m) pour obtenir G'' à 200m de résolution (Équation (2.6)). La résolution spatiale de l'image représentante de la valeur absolue du carré de G' est réduite de moitié pour obtenir de G''' (Équation (2.10)), un paramètre nécessaire pour le test de qualité du gradient (Koch, 2004). La réduction de la résolution spatiale des images est effectuée en appliquant l'opérateur $R_{|2}$ (Équation (2.8)). Toutes les équations énumérées dans ce paragraphe figurent dans l'ouvrage de Koch (2004).

$$G' = g'_{mn} = (D_x + iD_y)(A) \quad (2.5)$$

$$G'' = g''_{m'n'} = R_{|2}((g'_{mn})^2) \quad (2.6)$$

$$G''' = g'''_{m'n'} = R_{|2}(|(g'_{mn})^2|) \quad (2.7)$$

$$R_{|2} = B^2 S_{|2} B^4 \quad (2.8)$$

L'application de $R_{|2}$ sur une image consiste à lisser l'image avec B^4 , réduire à moitié la résolution de l'image, et ensuite effectuer un lissage de l'image résultante avec B^2 .

$S_{|2}$ est une indication de réduction à moitié de la résolution de l'image lors de l'application de l'opérateur $R_{|2}$ sur l'image.

Les expressions de B^2 et B^4 données par Koch (2004) sont les suivants :

$$B^2 = \frac{1}{16} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

$$B^4 = \frac{1}{256} \begin{pmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

L'image en amplitude (à 100m de résolution) est reprise pour construire un filtre F pour filtrer les structures qui ne sont pas causées par le vent sur l'image. La résolution de l'image à 100m est dégradée à 200m puis à 400m. À chacune des images correspondant à ces résolutions spatiales, quatre paramètres f_1 , f_2 , f_3 et f_4 sont construites afin d'obtenir F par l'équation (2.11). La manière dont ces paramètres ont été calculés et expliqués en détail dans Koch (2004).

$$F = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 f_i^2} \quad (2.11)$$

Il est à noter que les filtres F correspondant à la résolution 100m, 200m, et 400m respective sont des images de même taille et résolution que les images de gradients correspondantes. Lors des filtrages, chacune des valeurs de pixel de F est comparée à un seuil de valeur égale à 0,6. Les valeurs des pixels des images des gradients localisées au même emplacement que les valeurs de F inférieure à 0,6 sont considérées invalides. Les images de gradient résultant représentent ainsi les structures causées uniquement par le vent. Les étapes de calcul détaillé suivant sont appliquées sur chacune des images de gradient 100m, 200m, et 400m de résolution respective filtrés par F . Ces images sont subdivisées en des fenêtres de taille 2,4km.

Deux indices de qualités présentés dans Koch (2004) sont calculés pour chacun des gradients sur l'image. Sur le plan complexe formé par les parties réelles et imaginaires des éléments des gradients ainsi calculés. L'angle 360° formés par les différentes possibilités de direction sur ce plan est subdivisé en 72 intervalles (bins) de taille 5° chacun. La somme des produits de G'' avec ces deux indices de qualité sur chaque intervalle est présentée sur ce plan complexe pour former un histogramme circulaire à deux dimensions. L'histogramme est filtré par une série de filtres binaires qui sont définis dans Koch (2004).

Les directions des grands axes des ellipsoïdes sur la Figure 2.5 correspondent à la valeur maximum de l'amplitude des histogrammes respectifs. La direction du vent recherché dans la fenêtre 2,4km est celle perpendiculaire au gradient.

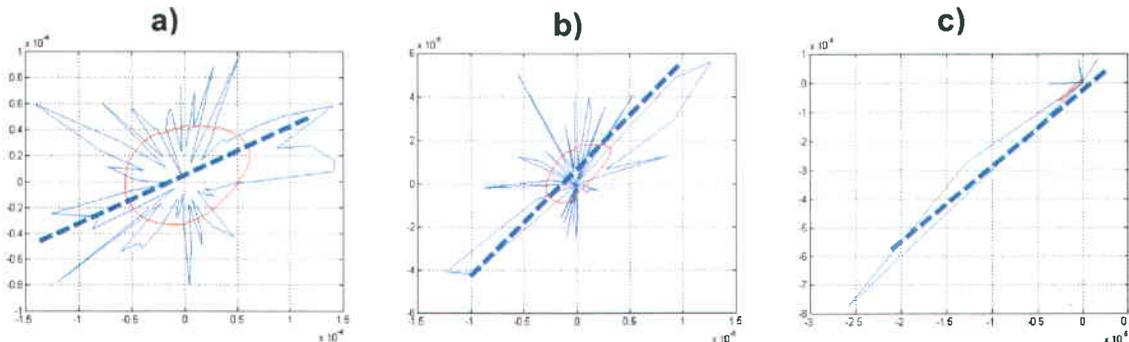


Figure 2.5: Histogramme appartenant à une fenêtre de taille 2,4km obtenu avec l'image de gradient à a) 100m, b) 200m, et 400m de résolution respective servant à trouver la direction (avec ambiguïté) du vent dans une fenêtre élémentaire de taille 2,4km. Les ellipsoïdes en couleur rouge indiquent les histogrammes lissés. Les lignes pointillées représentent les directions du grand axe des histogrammes.

La direction du vent obtenue avec les gradients de résolution 100m, 200m, et 400m sont pris par bloc de 3x3 fenêtres de 2,4 km de largeur. Pour chaque bloc, la moyenne locale des directions est calculée et ainsi que le biais. La direction ayant le biais minimum parmi les trois images est choisie comme étant la direction absolue du vent. La carte de direction obtenue est assujettie à une ambiguïté 180° sur leur orientation.

Une nouvelle méthode est proposée dans cette étude pour éliminer l'ambiguïté 180° sur les directions de vent calculées par l'algorithme des Gradients Locaux présenté précédemment. Elle est basée sur la physique de propagation et de l'interaction des ondes électromagnétiques avec de la matière en mouvement.

En présence de vent, la surface de l'eau peut être soumise à une compression tangentielle. La faible viscosité de l'eau permet au champ de force surfacique exercé par le vent de former des rides instantanées sur l'eau. De l'énergie mécanique due à la compression est emmagasinée dans les structures des rides. Pendant que l'air continue à se déplacer à la surface, l'énergie déjà stockée se libère progressivement dans le sens de déplacement du vent. Lorsque l'action du vent cesse, l'énergie stockée dans les rides continuerait à être libérée créant ainsi un déplacement des vagues de Bragg et des

mouvements de courant dans la fine couche à la surface de l'eau. Ces phénomènes seront exploités afin d'éliminer l'ambiguïté 180° sur les directions déterminées par l'algorithme des gradients locaux.

En plus du changement de phase du signal incident dû à l'interaction avec la cible, le mouvement relatif des vagues de Bragg par rapport à l'antenne est suspecté de causer un autre changement de phase. La différence de phase entre le signal incident et rétrodiffusé introduite par ce mouvement relatif est modulée par le phénomène de diffusion, la dépolarisation du signal, etc. Si ces derniers étaient négligés, une comparaison de la phase avec une phase nulle serait suffisante pour prendre une décision sur le vrai sens de déplacement du vent suivant sa direction. La valeur de cette phase de référence pour comparaison avec celle du signal rétrodiffusé n'est pas connue a priori. La « phase référence » est une appellation adoptée dans cette méthodologie pour désigner une valeur de phase supposée à partir de laquelle une direction avec ambiguïté serait réorientée dans sa vraie orientation.

Une approche empirique est ainsi proposée dans cette étude. Elle consiste à considérer une série de valeur (de -25° à $+25^\circ$) pour la phase de référence. Les valeurs dans la série sont espacées d'un pas de $0,5^\circ$. Le choix de ce pas est d'assurer l'interception d'une valeur de phase de référence où la direction ne serait plus corrigée. Le choix de l'intervalle $[-25^\circ, +25^\circ]$ est un compromis pour pouvoir détecter une phase de référence proche de 0° et aussi pour avoir assez de résultats pour des phases de référence négatives et positives.

Selon le mode de l'orbite du satellite, la variation de la phase du signal par rapport au sens de déplacement du vent vis-à-vis de l'antenne peut être différente. La Figure 2.6 illustre ce changement dans le cas où la position initiale du signal définit la visée du radar qui est orientée de l'Ouest vers l'Est (orbite ascendante). Le signal coloré en rouge représente ainsi le signal rétrodiffusé par les vagues de Bragg se déplaçant vers l'antenne et celui en bleu étoilé par ceux s'éloignant de l'antenne. Les équations (2.12) et (2.13) donnent le domaine des valeurs de la direction du vent selon la phase pour une orbite ascendante ou descendante respectivement. La différence de phase $\phi_1 - \phi_2$ représente la différence entre la phase du signal émis et celui rétrodiffusé et c'est cette différence qui est mesurée par le radar.

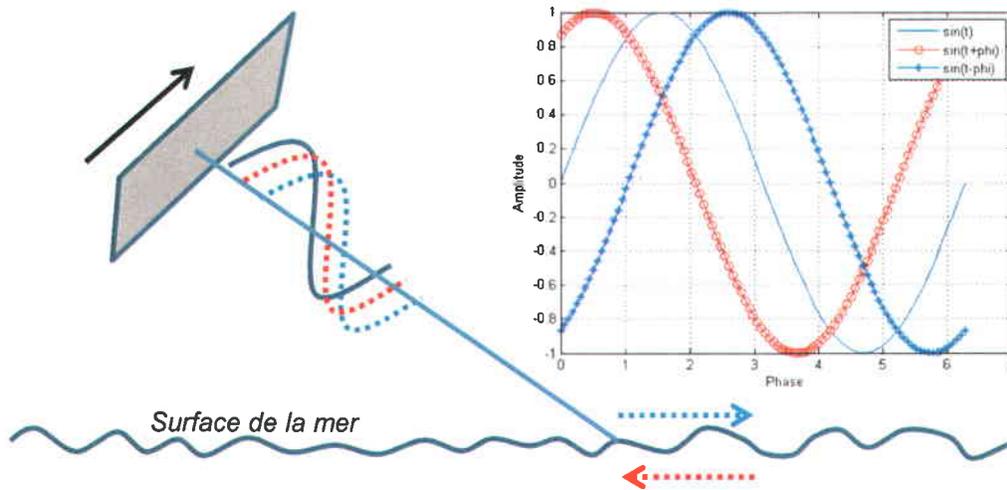


Figure 2.6: Décalage du signal par rapport à la position de l'antenne en fonction de la phase de référence. La valeur de l'angle phi sur la figure est $\pi/3$ radians. La flèche en couleur rouge indique un déplacement des vagues de Bragg vers la position au nadir de l'antenne et celle en bleu s'éloignant de l'antenne radar. La flèche en noire indique le sens de déplacement du satellite sur son orbite.

Orbite ascendante avec une vue droite :

$$\begin{cases} \phi_1 - \phi_2 < \phi_{ref} \Rightarrow Dir(vent) < 180^\circ \\ \phi_1 - \phi_2 > \phi_{ref} \Rightarrow Dir(vent) > 180^\circ \end{cases} \quad (2.12)$$

Orbite descendante avec une vue droite :

$$\begin{cases} \phi_1 - \phi_2 < \phi_{ref} \Rightarrow Dir(vent) > 180^\circ \\ \phi_1 - \phi_2 > \phi_{ref} \Rightarrow Dir(vent) < 180^\circ \end{cases} \quad (2.13)$$

ϕ_{ref} : Phase de référence

Dir(vent) : Direction du vent qui est mesurée à partir du nord géographique.

$\phi_1 - \phi_2$: mesure de la différence de phase entre le signal incident et rétrodiffusé.

Selon l'hypothèse considérée, l'éloignement de la cible (vague de Bragg) du radar causerait une augmentation de la différence de phase $\phi_1 - \phi_2$ par rapport à une phase de référence ϕ_{ref} donnée. Dans le cas d'une orbite descendante, le processus est inversé.

Dans l'exemple illustré sur la Figure 2.6, $\phi_{ref} = 0^\circ$.

En météorologie, les valeurs des directions de vent sont comptées à partir du nord géographique (origine des directions 0°) et dans le sens horaire. Le vent orienté de l'ouest vers l'est a une direction supérieure à 180° (soit entre 180° et 360°) et celui orienté d'est vers l'ouest a une direction inférieure à 180° (soit de 0° à 180°). Les équations (2.12) et (2.13) expriment les mêmes idées, mais diffèrent par l'orientation de l'orbite. L'équation (2.13) peut être utilisée pour le cas d'une orbite ascendante avec une vue à gauche ; et l'équation (2.12) dans le cas d'une orbite descendante avec une vue à gauche.

Les données SQ de RADARSAT-2 sont stockées sous forme d'un couple de nombres réels formant un nombre complexe dont le module représente l'amplitude du signal et la phase correspond à la différence de phase (entre le signal émis et signal reçu) mesurée par le radar à la réception du signal rétrodiffusé. La carte représentant la différence de phase mesurée est obtenue en appliquant la fonction « *arc tangente* » sur le rapport entre la partie imaginaire et la partie réelle des nombres complexes représentant les données.

L'orientation du champ de vitesse sur l'une des images SQ acquises (du 4 novembre 2012) est connue d'avance à l'aide de l'effet de sillage observé sur la surface de la mer à l'abri du vent à côté de l'île (à l'est). Cette image sera donc utilisée pour tester l'algorithme d'élimination de l'ambiguïté vu que le vent se déplace d'une manière quasi uniforme et dans le même sens sur toute la scène.

Trois méthodes est testées pour la détermination de la valeur de ϕ_{ref} sur l'image du 4 novembre 2012. 1) trouver la phase de référence à partir d'un graphe représentant les efficacités de chaque polarisation. 2) trouver la phase de référence par évaluation des efficacités pour des combinaisons des phases entre les canaux en considérant le maximum de variation dans chaque combinaison de phase de deux canaux différents. 3) trouver la phase de référence en utilisant une différence et une sommation deux à deux des canaux et d'évaluer leurs efficacités. Le Tableau 2.3 présente les détails de ces méthodes.

Tableau 2.3: Valeur de ϕ_{ref} à évaluer pour les méthodes 2 et 3.

ϕ_{ref} considérées pour la méthode 2	ϕ_{ref} considérées pour la méthode 3	
$-(\phi_{HH} + \phi_{VV})$	$-(\phi_{HH}-\phi_{VV})$	$\phi_{HH}-\phi_{VV}$
$-(\phi_{HH} + \phi_{HV})$	$-(\phi_{HH}-\phi_{HV})$	$\phi_{HH}-\phi_{HV}$
$-(\phi_{HH} + \phi_{VH})$	$-(\phi_{HH}-\phi_{VH})$	$\phi_{HH}-\phi_{VH}$

ϕ_{ref} considérées pour la méthode 2	ϕ_{ref} considérées pour la méthode 3	
$-(\phi_{VV} + \phi_{HV})$	$-(\phi_{VV}-\phi_{HV})$	$\phi_{VV}-\phi_{HV}$
$-(\phi_{VV} + \phi_{VH})$	$-(\phi_{VV}-\phi_{VH})$	$\phi_{VV}-\phi_{VH}$
$-(\phi_{HV} + \phi_{VH})$	$-(\phi_{HV}-\phi_{VH})$	$\phi_{HV}-\phi_{VH}$

L'efficacité est définie par l'équation (2.14). Les efficacités de chacune des combinaisons de phase de canal dans le Tableau 2.3 seront calculées et comparées entre eux.

$$efficacité = \frac{n_{ij}}{N} \quad (2.14)$$

Où n_{ij} : Nombre des directions corrigées sur la scène.

N : Nombre total des directions calculées sur la scène.

Vu que la taille de l'image et la résolution spatiale de la direction sont connues, le nombre de fenêtres contenant les directions extraites est connu. Lors de la correction de chacune des directions, le nombre de celles qui ont été corrigées et celles qui ne le sont pas peut être compté par un simple compteur inséré dans le code du programme informatique conçu pour la nouvelle approche proposer pour l'élimination de l'ambiguïté 180°.

Lorsque l'ambiguïté sur les directions extraites est éliminée, les directions à utiliser dans les calculs de vitesses sont interpolées sur la tuile radar en utilisant la méthode d'interpolation pondération inverse à la distance (IDW) (Shepard, 1968). Elle consiste à estimer les directions manquantes au voisinage d'une autre déjà connue en fonction de l'inverse de la distance qui les sépare. La résolution spatiale utilisée pour l'interpolation est la même que pour l'image sur laquelle les vitesses du vent sont extraites (dans notre cas ~400m) à l'aide de modèle de fonction géophysique.

2.4.2 Extraction de la vitesse du vent sur les images

Le modèle géophysique CMOD5 a été utilisé. D'après Hersbach *et al.* (2007) des paramètres géophysiques (l'âge des vagues, la turbulence du vent, les courants marins, la stabilité de la couche limite, la présence des surfactants et l'état confus de la mer) ont été ignorés dans la formulation de ce modèle ; même cas pour les autres modèles qui l'ont succédé. Pour les images utilisées, nous avons supposé que ces paramètres n'avaient

aucun effet sur les caractéristiques du champ de vent à déterminer. En effet, l'algorithme de Koch (2004) pour le calcul des directions masque les effets de ces paramètres. Ceci est démontré en détail dans Koch (2004).

Le modèle CMOD5.N a un biais et RMSE inférieur à CMOD5 (Takeyama *et al.*, 2013). Il ne donne pas des vitesses de vent réelles, mais des vitesses équivalentes à un état stable de l'atmosphère. Ainsi, les vitesses mesurées par des mats qui seront utilisées lors de la comparaison devraient être converties en des vitesses équivalentes qui seraient mesurées sous un état neutre de l'atmosphère. Sinon, les vitesses extraites du modèle devraient être converties en des vitesses réelles en utilisant le code-LKB (Liu *et al.*, 1978, Fairall *et al.*, 1996). Ce code consiste à transformer des vitesses de vent réel mesurées (soit par des bouées où par approche RSO avec les Modèles de Fonction Géophysique, GMF) à des vitesses qui seraient mesurées sous une condition d'état neutre de l'atmosphère. Le code considère la température de l'air, la température de la surface de la mer, et l'humidité relative de l'air. Des données de température de l'eau pourraient être utilisées, mais par manque de temps, elles n'ont pas été utilisées dans cette étude. De plus, les images ont été acquises vers la fin de l'automne, une période sous laquelle la basse couche de l'atmosphère n'est plus stratifiée comme c'est le cas durant les mois estivaux. Le modèle CMOD5 a été retenu pour l'extraction de la vitesse. Les Figure 2.7 et Figure 2.8 présentent les diagrammes méthodologiques illustrant l'extraction des vitesses sur les scènes ScanSAR-Étroit et Standard Quad-Pol respectivement. Le diagramme appliqué aux scènes ScanSAR-Étroit se différencie seulement de celui de SQ par l'absence de la polarisation VV. L'Équation (2.1) peut-être réécrite sous la forme suivante correspond au modèle CMOD5 (Équation (2.15)).

$$\sigma_{VV}^0 = \text{cmod5}(U_{10}, \varphi, \theta) \quad (2.15)$$

σ_{VV}^0 : Coefficient de rétrodiffusion radar.

U_{10} : vitesse du vent à 10m au-dessus de la surface de l'eau.

φ : direction du vent par rapport à l'antenne.

θ : angle d'incidence du signal radar.

Il est à noter que l'estimation de la vitesse du vent selon ce modèle se fait d'une manière itérative. En effet, la vitesse U_{10} à calculer n'est pas exprimé de manière explicite comme le cas du coefficient de rétrodiffusion σ_{VV}^0 dans l'équation (2.15). Ce modèle est connu pour estimer des valeurs de vitesses de 2m/s jusqu'à 35m/s. Une vitesse de vent atteignant le 35m/s a pu être mesurer par le modèle CMOD5 lors du passage du cyclone tropical Thelma au nord de l'Australie le 09 décembre 1998 (Hersbach *et al.*, 2007)

Lors de la conversion du coefficient de rétrodiffusion en unité décibel, un facteur de correction est appliqué (Équation (2.16)). Ce facteur corrige l'effet de la variation de l'angle d'incidence du signal à travers la scène. Il a été proposé par (Danielson *et al.*, 2008) pour des scènes RADARSAT-1 et a été adapté par (Bergeron *et al.*, 2011) pour des données de RADARSAT-2.

$$\begin{aligned} cor &= 1 - 0.006 * (\theta - 25) \quad si \theta < 31 \\ cor &= 1 - 0.006 * (31 - 25) \quad si \theta \geq 31 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Où

θ : Angle d'incidence du signal radar

Le rapport entre les coefficients de rétrodiffusion σ_{VV}^0 et σ_{HH}^0 est utilisé (Mouche *et al.*, 2004, Hwang *et al.*, 2010b) pour calculer les vitesses du vent sur les images en polarisation HH. Il été démontré que le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) est le plus adapté pour les données Standard Quad-Polarisation (Bergeron *et al.*, 2011). Il a été utilisé sur les données dans cette étude.

$$RP = \frac{\sigma_{VV}^0}{\sigma_{HH}^0} \quad (2.17)$$

D'après l'équation (2.17), le coefficient de rétrodiffusion σ_{HH}^0 est obtenu en divisant σ_{VV}^0 par le rapport de polarisation (RP). La définition du RP proposé par Hwang *et al.* (2010b) est présentée par l'équation (2.18). Le rapport entre le coefficient de rétrodiffusion en polarisation VV et HH égale à la valeur de RP.

$$RP = A * U^a \quad (2.18)$$

Où

$$A = 1.56 * 10^{-3} * \theta^2 - 3.39 * 10^{-2} * \theta + 1.33$$

$$a = -1.5 * 10^{-3} * \theta - 7.24 * 10^{-2}$$

θ : angle d'incidence du signal

A et a sont des paramètres déduits par Hwang *et al.* (2010b) après des analyses effectuées sur des données RADARSAT-2 acquises en mode Standard Quad-Polarisation.

Lorsque le coefficient de rétrodiffusion dans la polarisation HH est obtenu, il est converti en décibel et le facteur de correction dans l'équation (2.16) est appliqué. L'inversion du modèle hybride (CMOD5 combiné avec le ratio de polarisation RP) se fait d'une manière itérative comme le cas de CMOD5.

Les vitesses dans les polarisations croisées seront calculées avec le modèle de Vachon et Wolf (Vachon *et al.*, 2011).

Modèle de Vachon et Wolf

$$U_{10} = \frac{\sigma_{VH}^0 + 35,6}{0,592} \quad (2.19)$$

Le coefficient de rétrodiffusion déduit de ce modèle et une fonction linéaire de la vitesse U_{10} avec une pente égale à 0,592 et une valeur minimum de -35,6.

$$\sigma_{VH}^0 = 0,592 * U_{10} - 35,6 \quad (2.20)$$

Cette valeur minimum est proche de la valeur du σ_{NE}^0 (coefficient de rétrodiffusion équivalent du bruit du système radar) qui est égal à $-36,5 \pm 3\text{dB}$ (Slade, 2009) pour les produits SLC Fine Quad-Pol de RADARSAT-2, à partir desquels le modèle dans l'équation (2.19) a été établi. Toutefois, en appliquant ce modèle à nos données polarimétriques RADARSAT-2 en mode Standard Quad-Pol, nous avons remarqué que les vitesses calculées étaient largement inférieures à celles calculées dans les polarisations parallèles (HH et VV). D'après les caractéristiques des produits SLC Standard Quad-Polarisation et SCN présentés dans Slade (2009) les valeurs du σ_{NE}^0 sont $-40 \pm 3\text{dB}$ et $-28,5 \pm 2,5\text{dB}$ respectivement.

La constante -35,6 dans les équations (2.19) et (2.20) est remplacée par le niveau maximal de bruit dans l'image afin d'adapter le modèle dans l'équation (2.19) afin de pouvoir l'appliquer aux images acquises avec d'autres modes d'acquisition (SLC Standard Quad-Polarisation et SCN) que Fine Quad avec laquelle le modèle (équation (2.19)) a été conçu. Le principe de cette modification est basé sur le fait que pour obtenir un signal mesurable (vitesse positive), ce dernier doit être supérieur au niveau de bruit du senseur pour que les informations provenant de la cible ne soient noyées dans le bruit pour chacun des pixels de l'image. Le modèle adapté est présenté dans l'équation (2.21).

Modèle de Vachon et Wolf adapté pour les données SQ de RADARSAT-2

$$U_{10} = \frac{\sigma_{VH}^0 - \max(\text{niveau de bruit})}{0,592} \quad (2.21)$$

Où

σ_{VH}^0 : Coefficient de rétrodiffusion dans le canal en polarisation croisé VH.

U_{10} : Vitesse du vent à environ 10m au-dessus de la surface de la mer.

Le calcul des vitesses de vent dans les polarisations croisées se fait directement parce que la vitesse U_{10} recherchée peut être exprimé explicitement (Équation (2.19) ; Équation (2.21)), contrairement au cas du modèle de fonction géophysique où l'inversion se fait de manière itérative.

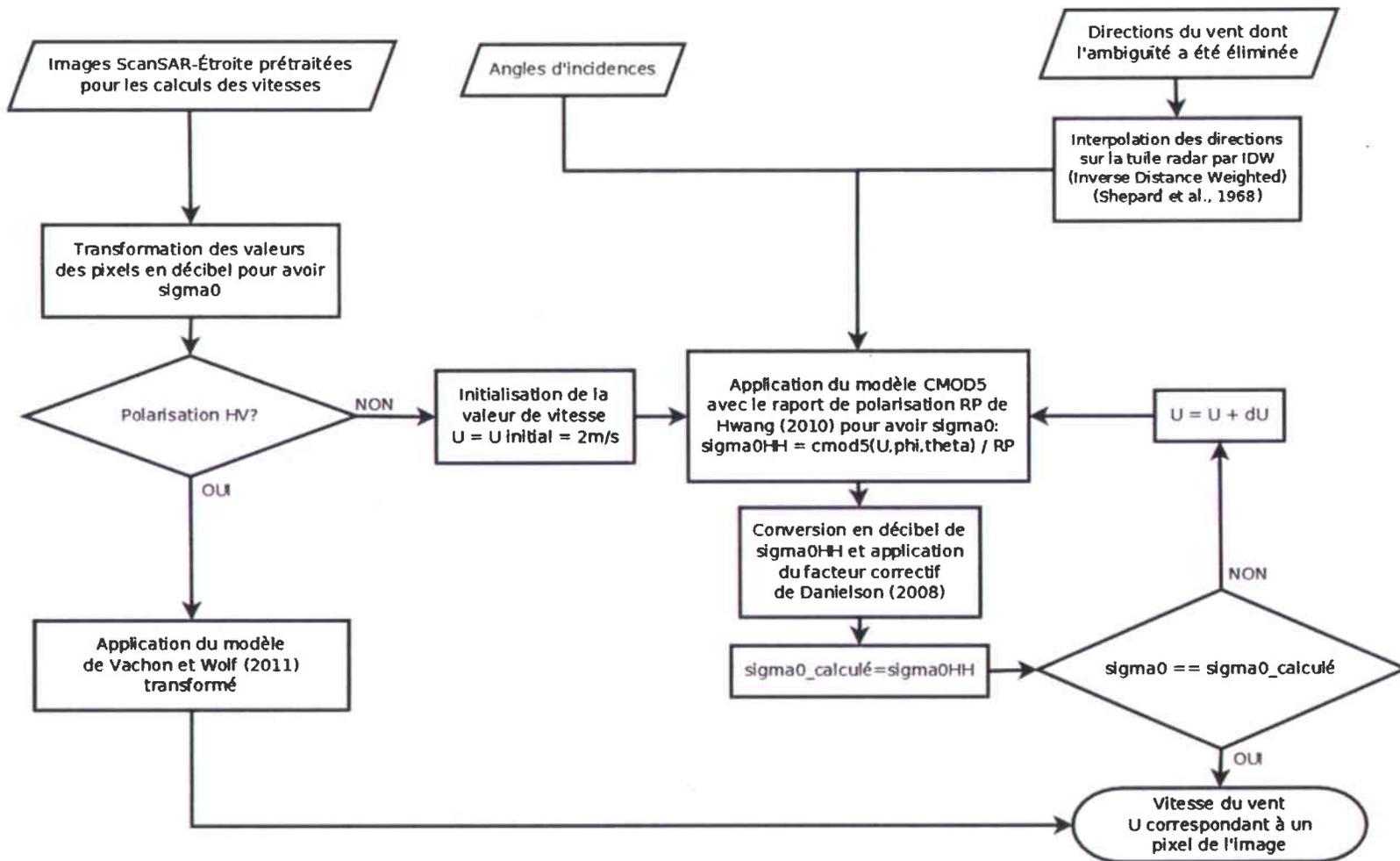


Figure 2.7: Diagramme du calcul de la vitesse du vent pour les scènes ScanSAR Étroite (HH-HV).

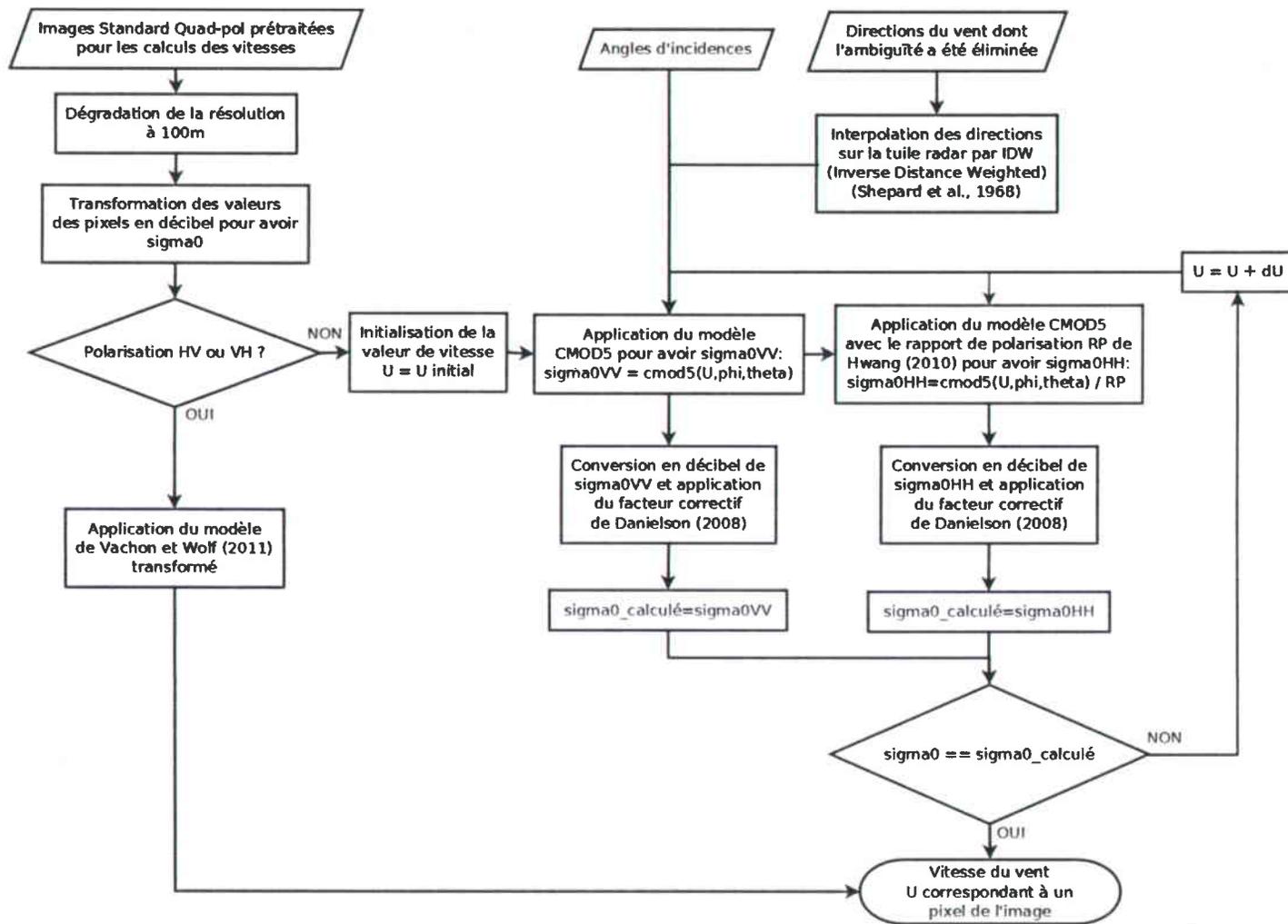


Figure 2.8: Diagramme du calcul de la vitesse du vent pour les scènes Standard Quad-Pol (HH, HV, VV, VH).

2.5 Résultats et discussions

2.5.1 Estimation des directions du vent directement des images

Rappelons que la 1^{re} étape est la détermination des directions du vent directement de la scène SQ du 4 novembre 2012 (Figure 2.10). Tout d'abord l'algorithme des Gradients Locaux a été appliqué sur l'image en amplitude du canal HH. Les directions calculées ont une résolution spatiale 2,4 km et sont encore assujetties à une ambiguïté 180° sur la vraie orientation.

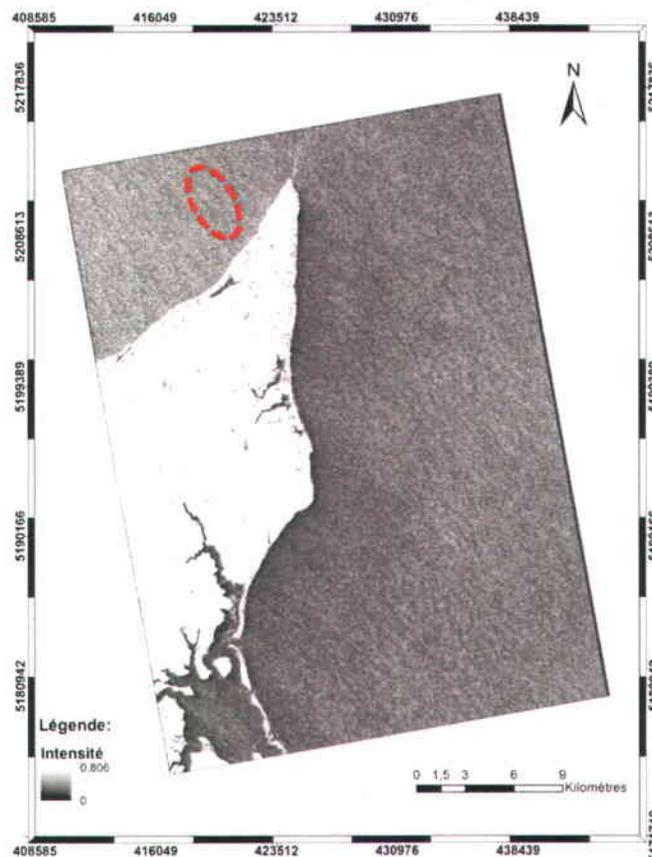


Figure 2.9: Image de l'intensité du canal HH de la scène SQ du 04 novembre 2012 à 18h05 (image test). Le cercle coloré en rouge indique des stries linéaires visibles sur l'image.

Des stries linéaires sont observées sur la surface de la mer représentée sur la Figure 2.9. Elles suivent approximativement une direction orientée du nord-ouest vers le sud-est. L'effet d'ombrage de l'île par rapport au vent sur la partie est de la pointe de North Cape crée une zone à faible intensité sur cette partie. La valeur de la direction du vent mesurée

au mât de la station météo de North Cape cinq minutes avant l'acquisition de la scène (soit à 18h) est de 310° . Cette valeur valide l'orientation des stries visibles sur l'image.

Les directions calculées avec l'algorithme des Gradient Locaux sont présentées sur la Figure 2.10. Elles sont approximativement parallèles à celles des structures linéaires observées sur la Figure 2.9.

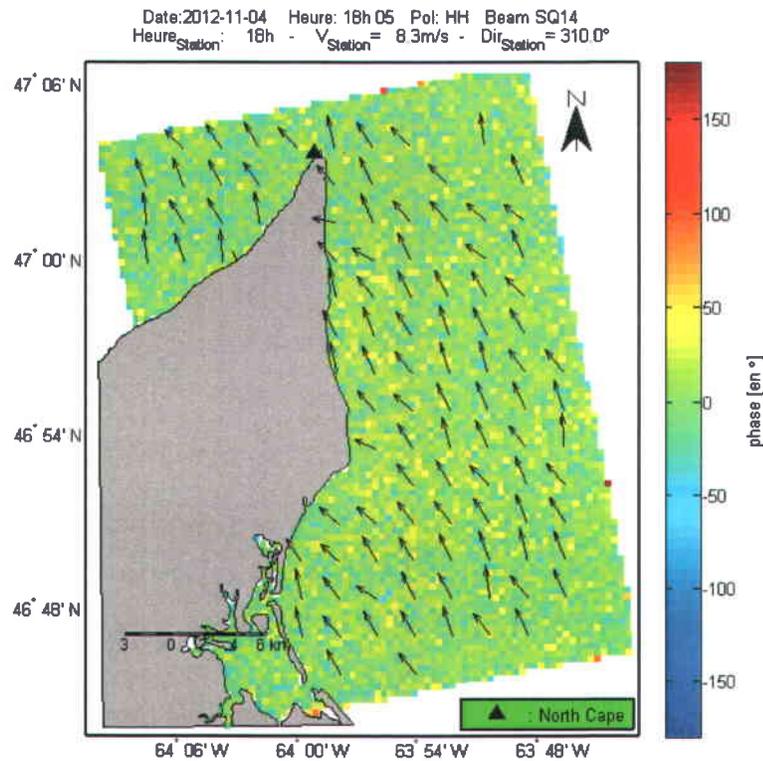


Figure 2.10: Directions calculées avec l'algorithme des Gradient Locaux. Les flèches indiquent l'orientation des directions calculées ayant une ambiguïté. La barre de couleur indique les valeurs de la phase du signal en HH.

2.5.2 Élimination de l'ambiguïté 180° sur les directions

L'élimination de l'ambiguïté a été testée avec l'utilisation des données de phase des images polarimétriques de RADARSAT-2. La vitesse, la direction et le sens de déplacement du vent cinq minutes avant l'acquisition de la scène sont connus à la station météo North Cape qui est localisée sur l'image test. Ce rapprochement dans le temps entre les données météo et l'image RADARSAT-2 utilisée est la raison de choisir cette scène pour tester l'élimination de l'ambiguïté avec la phase du signal.

La valeur de la direction du vent enregistrée à la station et la position par rapport à l'île de l'étendue du sillage à l'est de l'île ont permis de savoir que la direction du vent sur la scène considérée est orientée nord-ouest sud-est et reste la même sur toute la scène. Cela a permis de valider le test de l'algorithme d'élimination de l'ambiguïté 180°. La Figure 2.11 montre les valeurs de l'efficacité obtenue pour les images de phase des quatre polarisations en fonction de la série de phases de référence (-25° à +25° avec un pas de 0,5°). Plus un canal a une efficacité proche de l'unité, plus les phases contenues dans ce canal permettent de corriger la direction avec ambiguïté, lorsque comparer avec une phase de référence particulière.

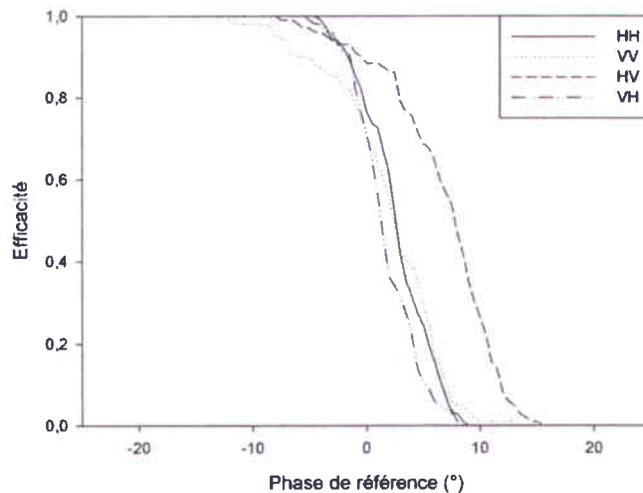


Figure 2.11: Efficacités utiliser des phases des quatre polarisations (issues de l'image du 4 Novembre 2012 à 18h05) pour l'élimination de l'ambiguïté.

Pour les phases de référence inférieure à -12° , toutes les polarisations ont une efficacité maximum (efficacité=1); mais pour des valeurs supérieures à 19° , aucune des phases dans les quatre polarisations ne permet d'enlever l'ambiguïté. Pour des phases de référence comprise entre ces deux extrêmes (-12° et 19°), chacune des images dans les quatre canaux a des valeurs d'efficacité différentes. Cette différence serait due à divers phénomènes (exemple : le mouvement des vagues par rapport à l'antenne radar, le mouvement de courant à la surface de la mer) (Schulz-Stellenfleth *et al.*, 2000) qui pourraient causer un changement de phase du signal rétrodiffusé à travers la surface de la

mer sur l'image. L'efficacité du canal VV chute en premier par rapport aux trois autres au niveau d'une phase de référence égale à $-11,5^\circ$. L'efficacité de VV descend à 0,98 lorsque ϕ_{ref} vaut $-10,5^\circ$; reste constante jusqu'à 7° et décroît progressivement pour atteindre 0 au niveau de ϕ_{ref} égale à $12,5^\circ$. Le comportement de l'efficacité du canal VH est similaire à celle de VV même s'il ne descend que lorsque ϕ_{ref} dépasse $-11,5^\circ$. L'efficacité de HV ne diminue pas de la même façon que celui de VH. Au niveau de ϕ_{ref} égale à $-4,5^\circ$ il descend pour atteindre 0 lorsque la phase de référence atteint $18,5^\circ$. L'efficacité de HH est le dernier à diminuer (au niveau de $\phi_{ref} = -7,5^\circ$). Les valeurs des efficacités correspondant à leur zone de diminution sont présentées au Tableau 2.4.

Tableau 2.4: Valeurs des efficacités lors de leur décroissance lorsque ϕ_{ref} se rapproche de 0° .

ϕ_{ref} (en $^\circ$)	efficacité _{HH}	efficacité _{VV}	efficacité _{VH}	efficacité _{HV}
-12,5	1	1	1	1
-12	1	0,990	1	1
-11,5	1	0,980	1	1
-11	1	0,980	1	1
-10,5	1	0,980	1	1
-10	1	0,980	1	1
-9,5	1	0,980	1	1
-9	1	0,980	1	1
-8,5	1	0,980	1	1
-8	1	0,951	1	1
-7,5	1	0,951	0,990	1
-7	1	0,931	0,990	1
-6,5	1	0,912	0,990	1
-6	1	0,902	0,980	1
-5,5	1	0,902	0,971	1
-5	1	0,902	0,971	0,990
-4,5	1	0,882	0,961	0,980
-4	0,990	0,872	0,961	0,980
-3,5	0,9704	0,863	0,951	0,961
-3	0,941	0,853	0,941	0,961

Note : Les valeurs en gras représentent les valeurs de l'efficacité correspondant aux valeurs de la phase de référence seuil lors de l'élimination de l'ambiguïté des directions dans les quatre canaux HH, VV, HV, VH respectifs.

Des valeurs spécifiques de la phase de référence ont été choisies (0° ; -1° ; -2° ; -3°) pour analyser la sensibilité de la nouvelle approche pour des valeurs de la phase de référence correspondant à la variation de l'efficacité pour les quatre canaux (ϕ_{ref} proche de 0°).

L'évaluation de l'efficacité de la nouvelle méthode pour l'élimination de l'ambiguïté sur la direction a été faite sur les images de phase à 400m et 200m de résolution respectivement. La Figure 2.12 et la Figure 2.13 présentent les résultats sur le test d'efficacité de l'élimination de l'ambiguïté. En passant de la Figure 2.12 : a) à b) ; b) à c) ; c) à d), toutes les nouvelles directions corrigées sont encerclées dans des ellipses colorées en rouge. Ces résultats montrent que les directions situées proche de la côte ont besoin d'une phase de référence inférieure à -1° afin de les corriger de l'ambiguïté. Ceci pourrait être causé par l'effet de déferlement des vagues et les mouvements d'eau en surface induits par les courants de la marée en zone côtière. Les résultats qualitatifs sont résumés aux Tableau 2.5 et Tableau 2.6. Peu importe la valeur de la résolution spatiale (400m ou 200m), les résultats d'efficacité sont semblables.

La taille de la fenêtre choisie pour l'évaluation de la valeur de la phase localisée la plus proche de chacune des directions à corriger est de 7x7 pixel.

Tableau 2.5: Efficacité pour quelques phases de référence sur l'image de phase de la scène SQ14 du 4 novembre 2012. La résolution spatiale de l'image de phase est 400m.

ϕ_{ref} (en $^\circ$)	Efficacité (en %)
0	76,47
-1	84,31
-2	92,16
-3	94,12

Tableau 2.6: Efficacité pour quelques phases de référence sur l'image de phase de la scène SQ14 du 4 novembre 2012. La résolution spatiale de l'image de phase est 200m.

ϕ_{ref} (en $^\circ$)	Efficacité (en %)
0	75,49
-1	86,27
-2	91,18
-3	93,14

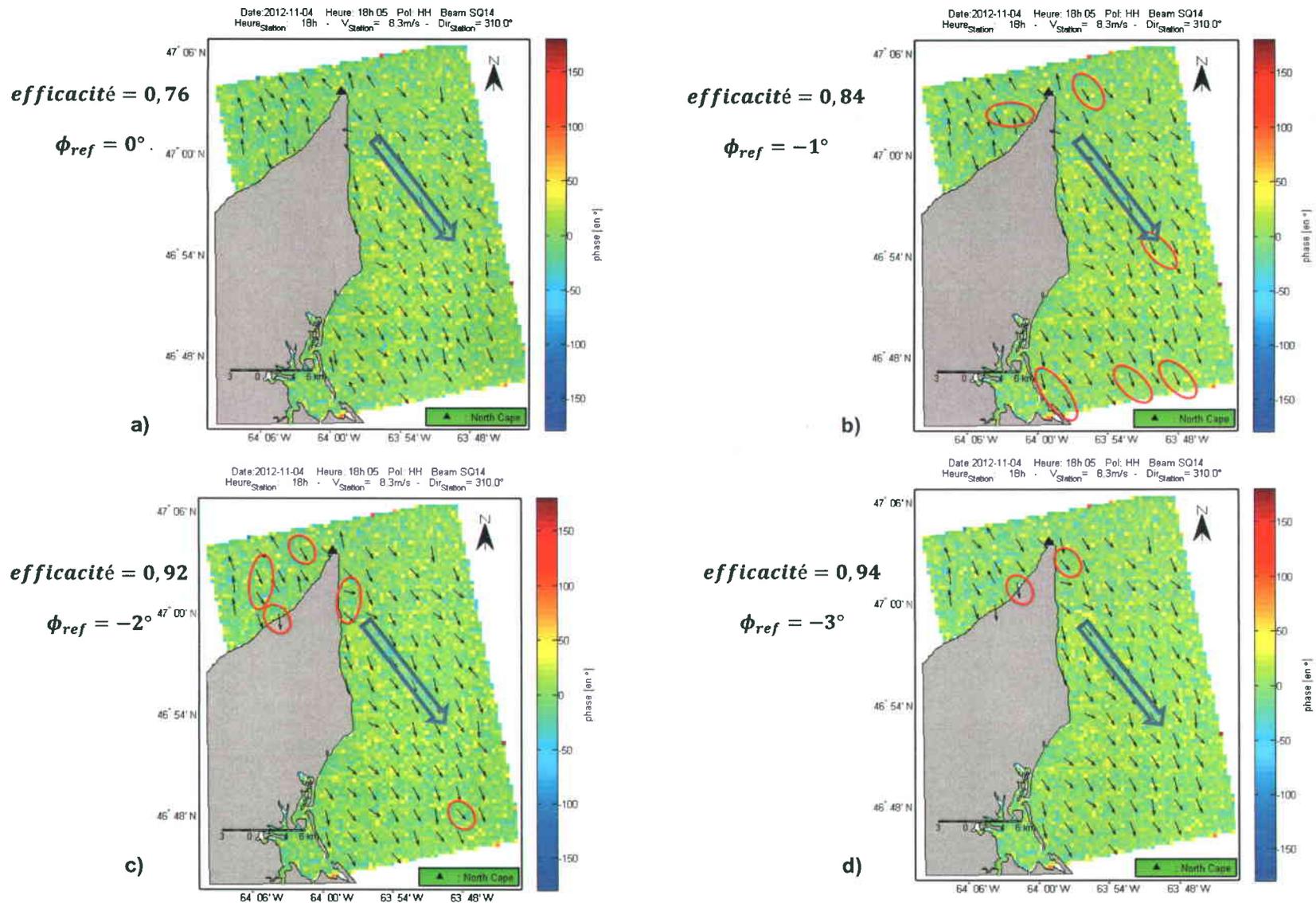


Figure 2.12: Correction de la direction avec quatre valeurs choisies de la phase de référence a) $\phi_{ref}=0^\circ$; b) $\phi_{ref}=-1^\circ$; c) $\phi_{ref}=-2^\circ$; d) $\phi_{ref}=-3^\circ$, comparées avec la phase du canal HH. La résolution spatiale de l'image est de 400m et celle de la direction est de 2,4km. La flèche en gras représente la direction et l'orientation du vent sur l'image. Les petites flèches indiquent les directions extraites de l'image. Les ellipses rouges indiquent les directions nouvellement corrigées en passant d'une image à l'autre dans l'ordre a), b), c), et d). L'image de phase (400m de résolution) présentée correspond à l'image de phase comparée à la phase de référence $\phi_{ref}=-20^\circ$.

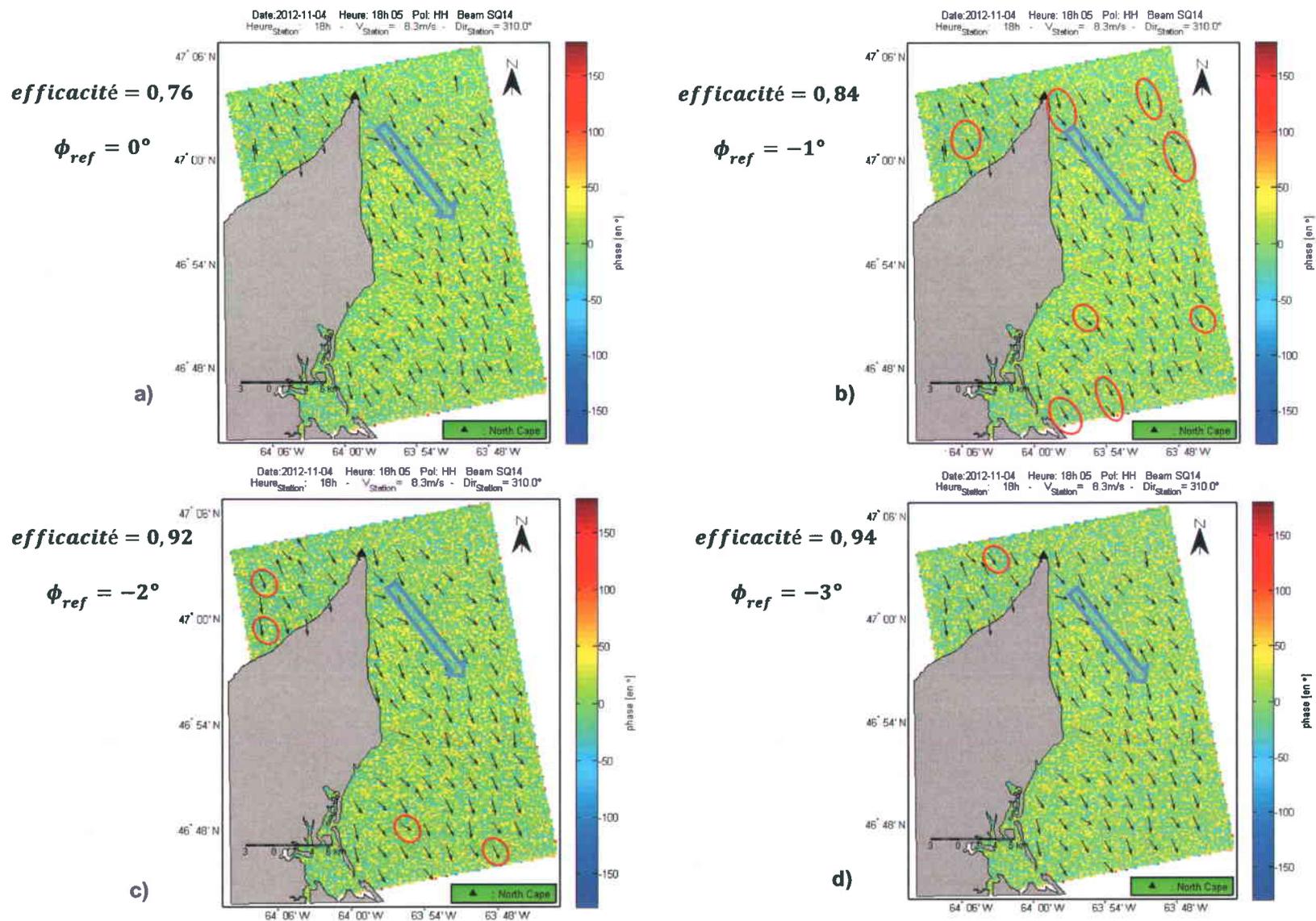


Figure 2.13: Correction de la direction avec quatre valeurs choisies de la phase de référence a) $\phi_{ref}=0^\circ$; b) $\phi_{ref}=-1^\circ$; c) $\phi_{ref}=-2^\circ$; d) $\phi_{ref}=-3^\circ$, comparées avec la phase du canal HH. La résolution spatiale de l'image est de 200m et celle de la direction est de 2,4km. La flèche en gras représente la direction et l'orientation du vent sur l'image. Les petites flèches indiquent les directions extraites de l'image. Les ellipses rouges indiquent les directions nouvellement corrigées en passant d'une image à l'autre dans l'ordre a), b), c), et d).

D'après les résultats sur les deux figures (Figure 2.12 et Figure 2.13) les valeurs de l'efficacité sont approximativement les mêmes pour les images de phases à 400m et 200m de résolution spatiale. Le résultat obtenu avec la résolution 200m prend plus de temps de calcul par rapport à celui à 400m. Pour le reste des analyses dans l'élimination de l'ambiguïté, la résolution de 400m est retenue.

Première méthode

Le Tableau 2.4 et la Figure 2.11 montrent que les valeurs d'efficacité obtenues pour les quatre polarisations sont tout maximum (égal à 1) pour des phases de référence inférieure ou égale à $-12,5^\circ$. N'importe quelles phases de référence appartenant à cette plage de valeur pourraient être choisies. Une valeur de la phase de référence $\phi_{ref} = -20^\circ$ a été retenue pour le reste de l'analyse dans la première méthode. La Figure 2.14 présente une carte de la phase pour l'image du 4 novembre 2012 acquise en polarisation HH ; ainsi que les directions non corrigées (Figure 2.14a) et corrigées (Figure 2.14b) de l'ambiguïté 180° en utilisant une phase de référence -20° . D'après les conditions établies par les équations (2.12) et (2.13), ce résultat montre que l'angle de phase -20° peut être retenu comme seuil des différences de phase (entre le signal incident et rétrodiffusé) monocalenal pour discerner l'effet du mouvement par rapport à l'antenne des vagues de Bragg.

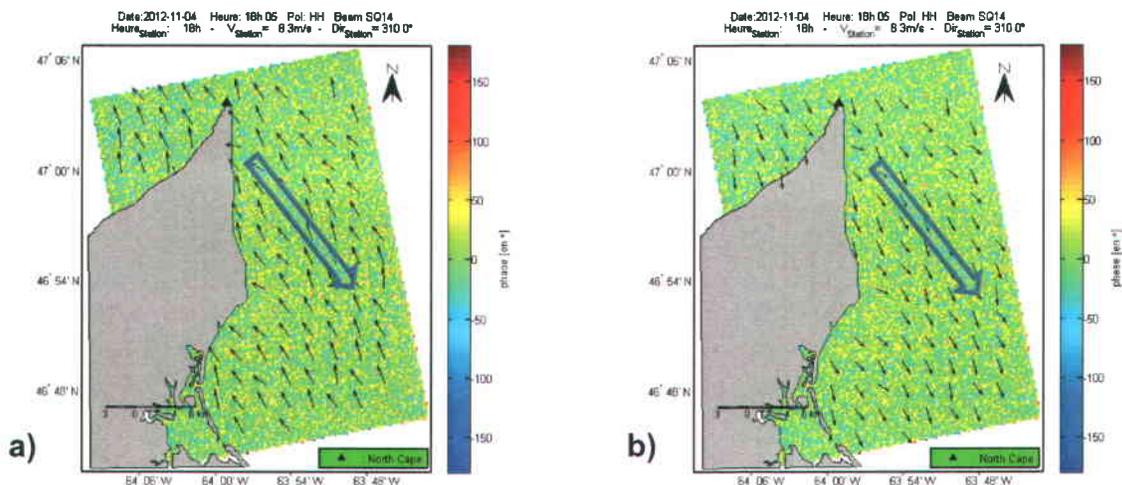


Figure 2.14: Les petites flèches représentent les directions du vent a) non corrigées, et b) corrigées avec une phase de référence de $\phi_{ref} = -20^\circ$. La flèche en gras représente la direction du vent locale. L'image de fond représente de la phase mesurée en polarisation HH. La barre de couleur indique les valeurs de la phase.

Deuxième méthode

Les résultats obtenus pour la seconde méthode sont présentés au Tableau 2.7. Les combinaisons de phase ayant de meilleures efficacités sont $-(|\phi_{VV}| + |\phi_{HV}|)$ et $-(|\phi_{VV}| + |\phi_{VH}|)$; suivi par $-(|\phi_{HH}| + |\phi_{VV}|)$. Cette méthode ignore le signe algébrique de la phase⁵ dans chaque canal et considère seulement le négatif de cette variation. Cette méthode rejoint partiellement la première méthode. Elle se différencie de la première en considérant la phase de référence comme étant une fonction de deux phases intercanaux pour l'élimination automatique de l'ambiguïté 180°.

Les résultats obtenus avec la phase de référence $-(|\phi_{HH}|+|\phi_{VH}|)$ ressemblent à ceux obtenus sur le graphe à la Figure 2.11 lorsque comparer avec les images de phase dans les quatre canaux polarimétriques ; ils correspondent à une phase de référence $\phi_{ref} = -5,5^\circ$ dans la première méthode (voir Tableau 2.4 pour la comparaison avec le Tableau 2.7). Pour le cas de $-(|\phi_{VV}| + |\phi_{HV}|)$ et $-(|\phi_{VV}| + |\phi_{VH}|)$, elles ont donné des résultats comparables aux phases de référence inférieures à -12° si l'on arrondit à 1 l'efficacité obtenue avec la phase de ϕ_{HH} utilisant la phase de référence $-(|\phi_{VV}| + |\phi_{VH}|)$. Pour le cas des combinaisons en polarisation croisée $-(|\phi_{HV}| + |\phi_{VH}|)$, les résultats sont semblables à ceux pour des phases de référence comprises entre -8° à $-11,5^\circ$. La performance de $-(|\phi_{HH}| + |\phi_{VV}|)$ est nettement supérieure à tous les tests de la première méthode (Tableau 2.4) et ce pour toutes les polarisations.

Tableau 2.7: Efficacité de chacune des polarisations pour la méthode 2.

$\phi_{ref}(en^\circ)$	efficacité _{HH}	efficacité _{VV}	efficacité _{HV}	efficacité _{VH}
$-(\phi_{HH} + \phi_{VV})$	1	1	1	0,9608
$-(\phi_{HH} + \phi_{HV})$	1	0,8823	1	0,9804
$-(\phi_{HH} + \phi_{VH})$	1	0,8725	0,9706	1
$-(\phi_{VV} + \phi_{HV})$	1	1	1	1
$-(\phi_{VV} + \phi_{VH})$	0,9902	1	1	1
$-(\phi_{HV} + \phi_{VH})$	1	0,8922	1	1

⁵ Il s'agit ici de la différence de phase entre le signal incident et le signal rétrodiffusé.

Troisième méthode

Cette méthode est plus réaliste et efficace malgré que les résultats ne sont pas meilleurs que ceux de la deuxième méthode. Elle est réaliste parce que le signe algébrique de chacune des deux phases combinées pour former ϕ_{ref} est respecté (c'est-à-dire, le sens de déplacement des vagues de Bragg par rapport à l'antenne radar). Le fait de ne pas respecter leur signe comme dans le cas de la deuxième méthode (par l'introduction de la valeur absolue) néglige l'hypothèse considérée dans la formulation des équations (2.12) et (2.13) pour l'élimination de l'ambiguïté 180° . La phase de référence dans cette méthode est formée par la différence de phase entre deux canaux différents. Les résultats obtenus (Figure 2.15) dans la troisième méthode sont présentés sous forme graphique vu qu'elle contient plus de possibilités de combinaison par rapport à la précédente méthode. Les combinaisons de phase ayant les meilleures efficacités pour la phase de référence sont : A) ϕ_{VV-HV} lorsqu'elle est comparée à l'image de phase en ϕ_{HH} puis B) lorsqu'elle est comparée à l'image de phase en ϕ_{VH} ; C) ϕ_{VV-VH} lorsque comparée à l'image de phase ϕ_{HV} ; D) ϕ_{VV-HH} lorsque comparée à l'image de phase ϕ_{HV} . Leurs efficacités sont égales à 0,96.

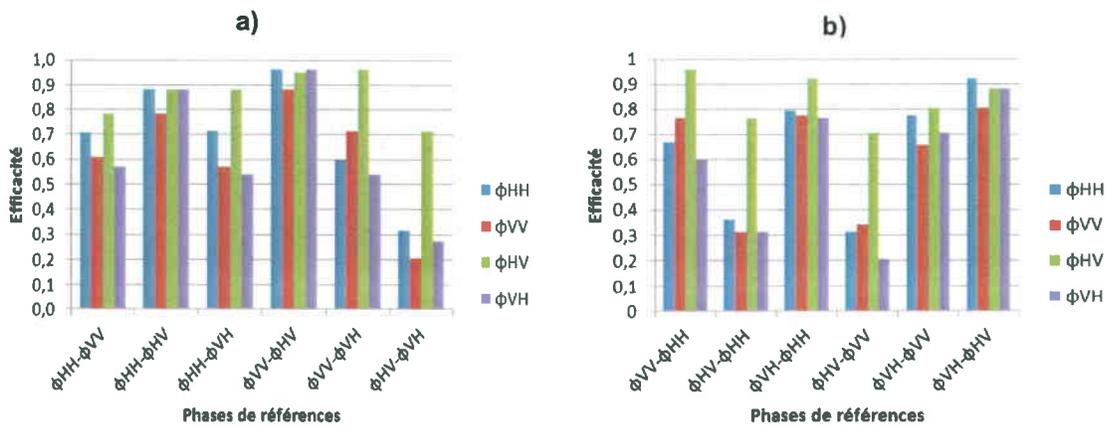


Figure 2.15: Efficacités pour chacune des combinaisons de phase correspondant à la troisième méthode. Les quatre polarisations identifiées par sur les couleurs des barres verticales sont associées aux images de phase des canaux comparées aux phases de référence indiquées en abscisse, selon les critères énoncés par les équations (2.12) et (2.13).

La Figure 2.16 montre les directions correspondantes aux corrections effectuées en utilisant les phases de référence pour le cas B) et C). Les couleurs sur les deux images montrent que les valeurs des phases ϕ_{HV} et ϕ_{VH} sont approximativement égales. Cette

égalité soutient l'égalité des deux éléments hors diagonale de la matrice de Sinclair (Lee et al., 2009) pour une acquisition radar monostatique.

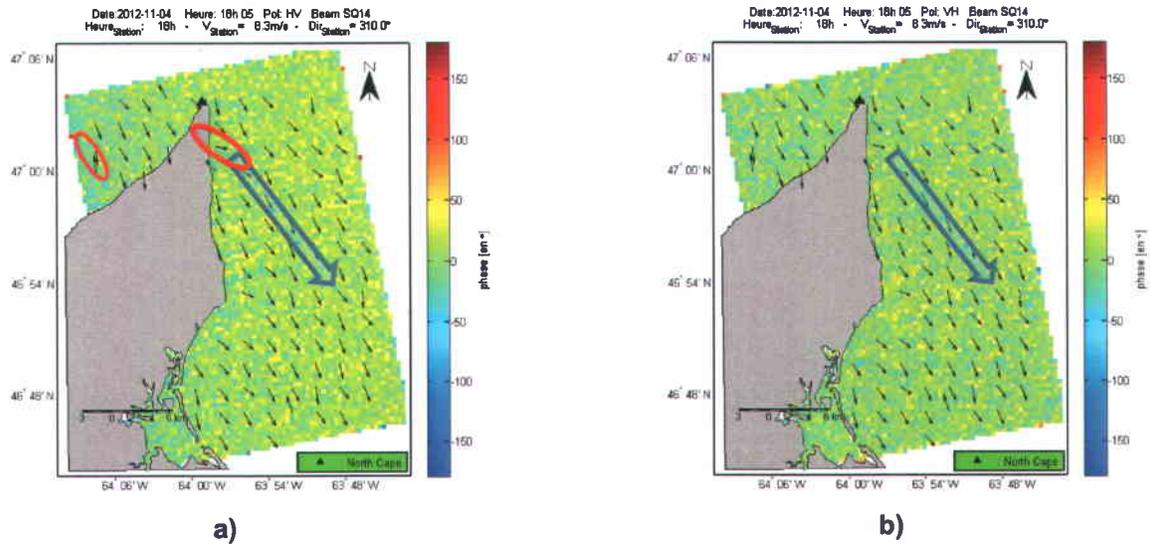


Figure 2.16: Directions corrigées avec les phases de référence (3^e méthode) a) $\phi_{ref} = \phi_{VV-VH}$ comparée à ϕ_{HV} ; b) $\phi_{ref} = \phi_{VV-HV}$ comparée à ϕ_{VH} . La flèche en gras représente la direction du vent locale. Les cercles colorés en rouges indiquent les différences avec les résultats obtenus sur la Figure 2.17a.

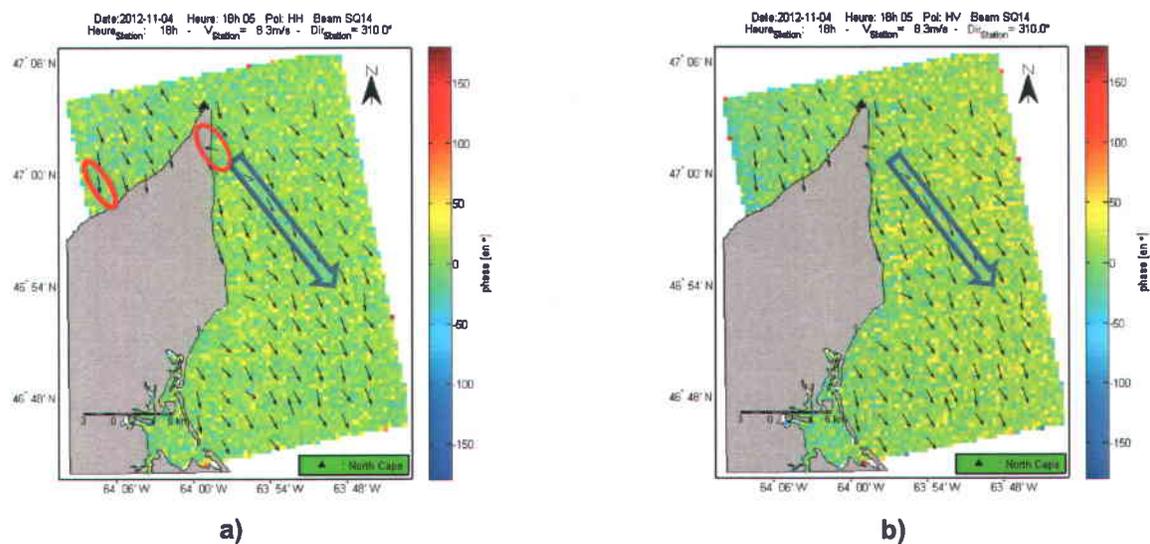


Figure 2.17: Directions corrigées avec les phases de référence (3^e méthode) a) $\phi_{ref} = \phi_{VV-HV}$ comparée à ϕ_{HH} ; b) $\phi_{ref} = \phi_{VV-HH}$ comparée à ϕ_{HV} . La flèche en gras représente la direction du vent locale. Les cercles colorés en rouges indiquent les différences avec les résultats obtenus sur la Figure 2.16a.

Les résultats de la correction des directions observés sur les Figure 2.17a et Figure 2.17b sont similaires ; ce qui implique une similarité entre ϕ_{HH} et ϕ_{HV} . Il serait possible que le

déphasage dans le canal HV introduit lors de la dépolarisation du signal est négligeable par rapport à celui produit par le mouvement des vagues de Bragg par rapport à l'antenne. Les efficacités obtenues sur les résultats (Figure 2.16 et Figure 2.17) ont pourtant les mêmes valeurs. Ce qui les différencie c'est la localisation spatiale des directions corrigées. Celles-ci sont présentées dans des ellipses colorées en rouge.

La Figure 2.18 montre les cartes de champ de vent calculé sur la scène Standard Quad-polarisation du 28 novembre 2012 à 18h05.

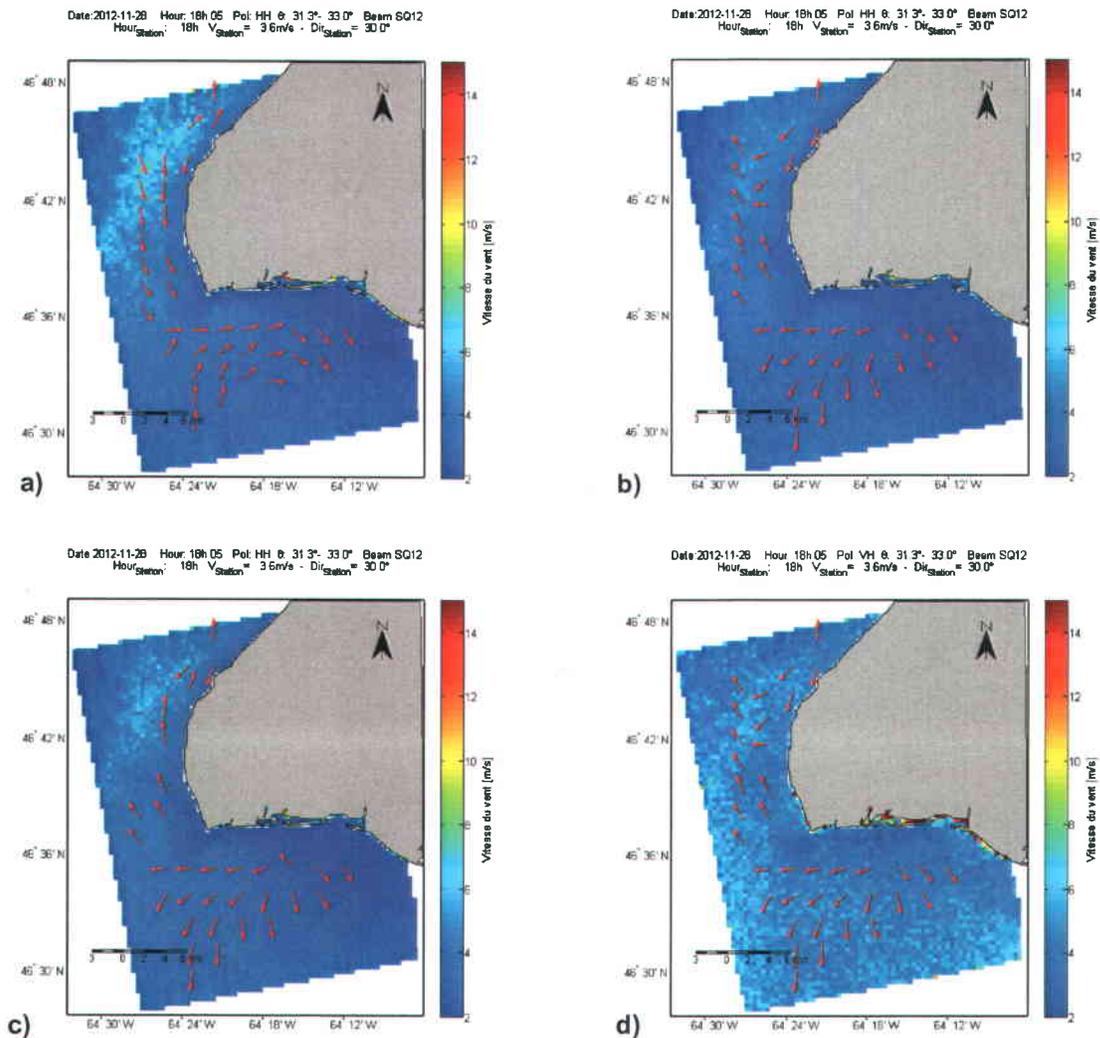


Figure 2.18: Champ de vent calculé sur la scène SQ du 28 novembre 2012 pour les canaux HH (a, b, c) et VH (d) respectivement. L'ambiguïté sur les directions a été respectivement éliminée en utilisant une phase de référence a) $\phi_{ref} = -|\phi_{VV}| - |\phi_{HV}|$ comparée avec ϕ_{HH}° , b) $\phi_{ref} = \phi_{VV-HH}$ comparée avec ϕ_{HV} , c) $\phi_{ref} = \phi_{VV-HV}$ comparée avec ϕ_{VV} et d) $\phi_{ref} = \phi_{VV-HH}$ comparée avec ϕ_{HV} . La barre de couleur indique les vitesses du vent et les flèches colorées en rouge indiquent la direction et le sens du vent.

Les directions obtenues avec la phase de référence $-\phi_{VV}-\phi_{HV}$ comparée avec ϕ_{HH} Figure 2.18a sont orientées d'ouest vers l'est comme celles obtenues (Figure 2.14b) en utilisant une phase de référence de -20° (première méthode) sur la scène SQ du 4 novembre 2012. Or, dans le cas de la scène du 28 novembre 2012, les directions ne sont pas orientées d'ouest en est. L'effet de sillage causé par l'île sur la scène témoigne de cette orientation des directions du vent. Les vitesses calculées sur le canal VH ont été calculées avec le modèle de Vachon et Wolf (2011), adapté pour les polarisations croisées des données Standard Quad-Polarisation. Le modèle ne dépend pas des directions de vent. Pourtant, l'effet de sillage est observé aux mêmes endroits sur la carte de vitesse. L'orientation des directions qui ont été corrigées de l'ambiguïté à l'aide de la phase de référence $\phi_{ref} = \phi_{VV-HH}$ et la phase ϕ_{HV} sont donc validées.

La direction moyenne du vent sur la scène du 28 novembre 2012 est en accord avec celle (30°) enregistrée à la station de North Cape (situé à environ 55km de la côte de West Point) à 18h00, soit 5 minutes avant l'acquisition de la scène considérée sur la Figure 2.18. L'orientation des directions du vent corrigée avec la phase de référence ϕ_{VV-HH} comparée avec ϕ_{HV} respecte l'orientation de l'effet de sillage sur l'image.

La phase de référence ϕ_{VV-HV} comparée avec ϕ_{HH} et la phase de référence ϕ_{VV-HV} comparée avec ϕ_{VV} ont les mêmes efficacités sur la scène du 4 novembre 2012 (image test). Pourtant, les directions observées sur la Figure 2.18c et Figure 2.18d montrent que la première combinaison de phase est efficace par rapport à la deuxième. Sur la Figure 2.18d, une seule direction n'a pas été pas orientée correctement alors qu'il y en a trois sur la Figure 2.18c qui ont été mal corrigées. Les résultats sur la Figure 2.18 démontrent l'efficacité de la phase de référence ϕ_{VV-HH} comparée avec ϕ_{HV} à éliminer l'ambiguïté 180° sur les directions du vent calculées avec l'algorithme des Gradients Locaux. Il est à remarquer que la phase de référence ϕ_{VV-HV} comparée avec ϕ_{HH} (Figure 2.18b) donne le même résultat que la phase de référence ϕ_{VV-HH} comparée avec ϕ_{HV} .

2.5.3 Variation des coefficients de rétrodiffusion d'un canal à l'autre

Les coefficients de rétrodiffusion (σ^0) dans chacun des canaux de la scène SQ du 4 novembre 2012 sont illustrés à la Figure 2.20. La gamme de couleurs montre les valeurs en décibels de σ^0 ; elles sont inférieures à -30dB pour les polarisations croisées (HV ; VH) et varient entre -5dB à -26dB pour les deux canaux en copolarisation (HH et VV). Des valeurs élevées sont observées au voisinage de la partie est de la côte de North Cape. Celles-ci seraient dues au fait que la ligne côtière définie par la base de données utilisée pour masquer la partie terrestre de l'île ne coïncide pas exactement à la limite terre-mer locale. Une partie des coefficients de rétrodiffusion terrestres (valeurs élevées par rapport à ceux de la mer) n'a pas pu être ainsi masquée correctement. Ces valeurs élevées du coefficient de rétrodiffusion ne pourraient pas être causées par le double rebond du signal à travers la surface de l'eau et le talus situé sur cette partie est de la côte. Le satellite est en orbite ascendant lors de l'enregistrement de cette scène et le talus est orienté vers l'est (même orientation que l'antenne radar). Il est donc impossible d'avoir un double rebond provenant de ce talus.



Figure 2.19: Photo représentative du talus observé qui longe la partie est de la côte à North Cape.
Photo : Wind Energy Institute of Canada (WEICan)

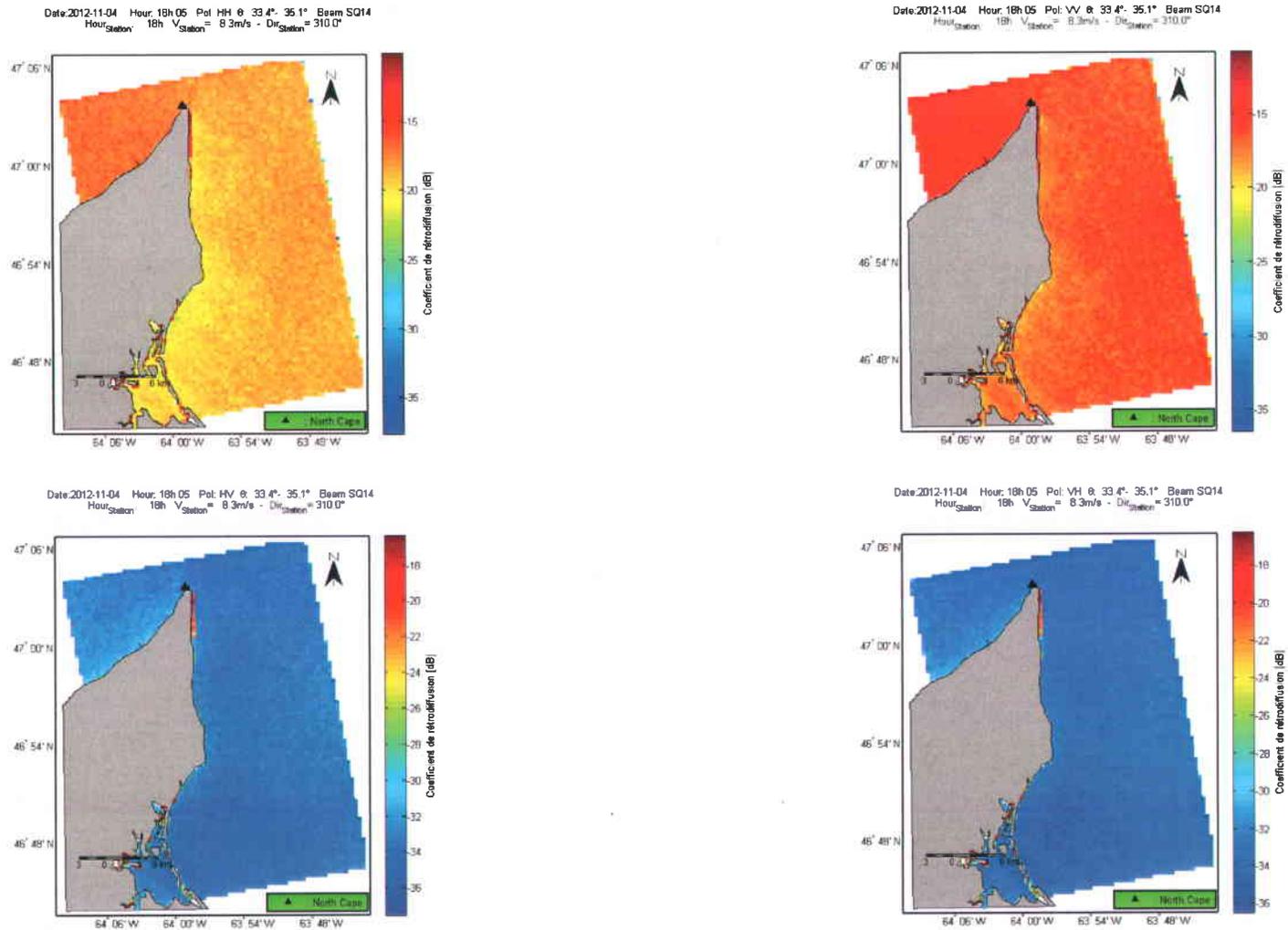


Figure 2.20: Représentations des coefficients de rétrodiffusion dans les canaux HH, VV, HV et VH de la scène SQ du 4 novembre 2012. La barre de couleur montre les valeurs des coefficients de rétrodiffusion en décibels. La résolution spatiale des données est de 400m.

2.5.4 Cartes des champs de vitesse

Le modèle géophysique CMOD5 a été utilisé pour les canaux en copolarisation. Les directions du vent corrigées de l'ambiguïté ont été en entrée du modèle pour calculer les vitesses. Les Figure 2.21, Figure 2.22 et Figure 2.23 présentent les cartes de vitesse calculées sur les images SQ14 du 4 novembre 2012, SQ9 du 11 novembre 2012 et ScanSAR-Étroite du 8 novembre 2012 respectivement. Les valeurs des vitesses provenant des scènes traitées sont en générales proches de la valeur enregistrée sur le mât à la station météo de North Cape.

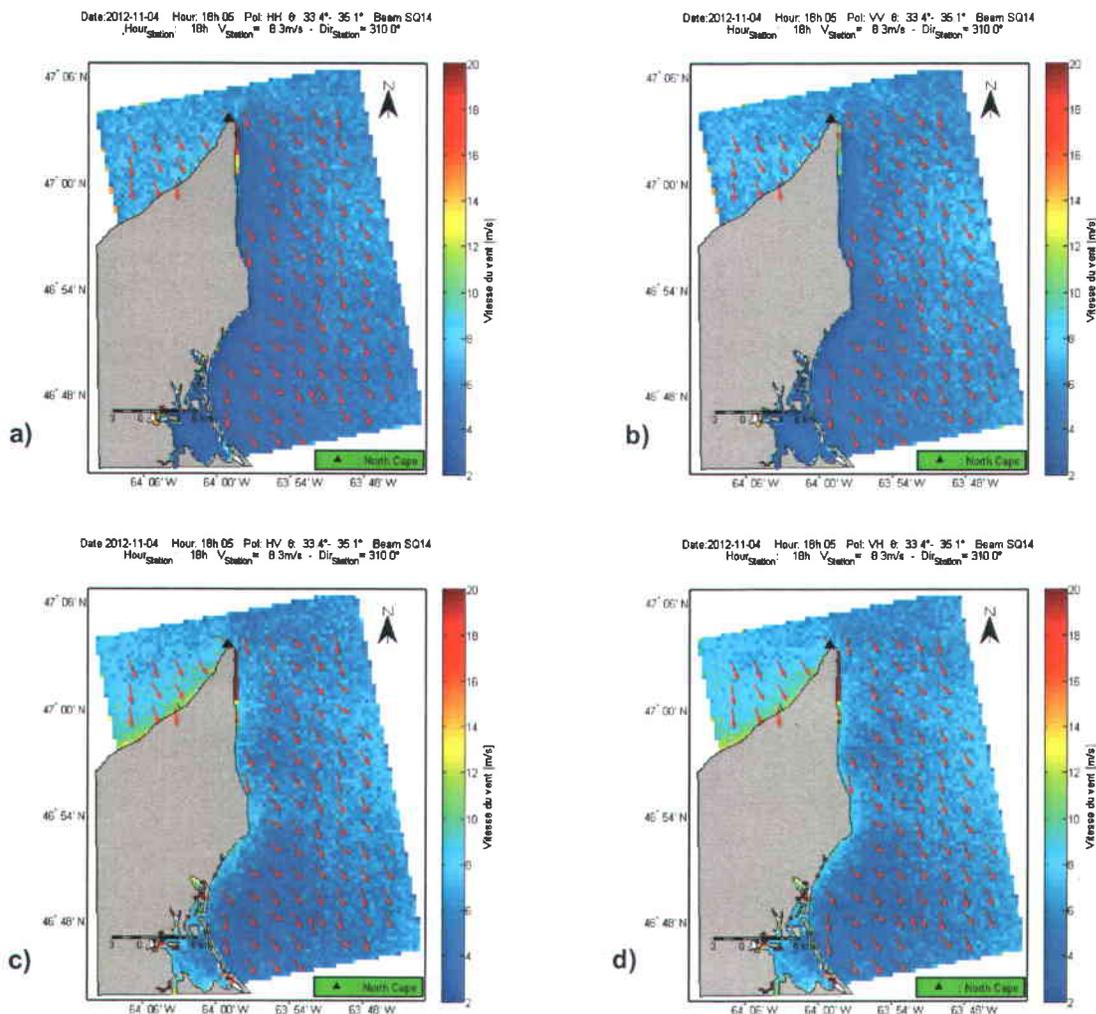


Figure 2.21: Cartes des champs de vent calculés à partir des canaux a) HH, b) VV, c) HV et d) VH de la scène SQ du 4 novembre 2012 en utilisant respectivement le modèle CMOD5 pour les canaux en copolarisation (avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) pour HH) et le modèle de Vachon *et al.* (2011) (adapté pour les scènes SQ de RADARSAT-2) pour HV et VH. La résolution des vitesses est de 400m et celle de la direction de 2,4km.

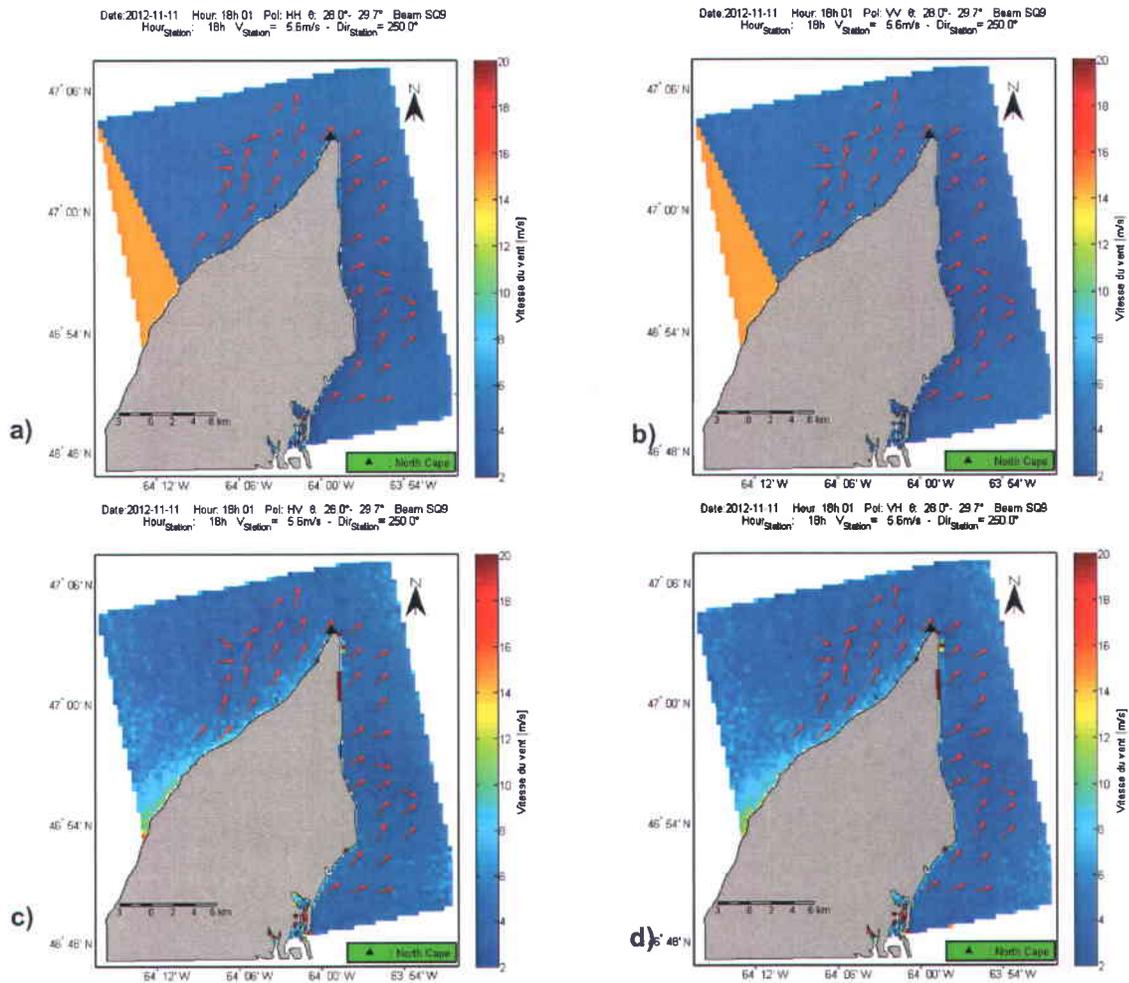


Figure 2.22: Cartes des champs de vent calculés à partir des canaux a) HH, b) VV, c) HV et d) VH de la scène SQ9 du 11 novembre 2012 en utilisant respectivement le modèle CMOD5 pour les canaux en copolarisation (avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010a) pour HH) et le modèle de Vachon *et al.* (2011) (adapté pour les scènes SQ de RADARSAT-2) pour HV et VH. La résolution des vitesses est de 400m et celle de la direction est de 2,4km.

L'ambiguïté sur les directions (Figure 2.21, Figure 2.22) a été éliminée avec la phase de référence ϕ_{VV-HH} comparée à ϕ_{HV} . L'artefact observé sur a) et b) pourrait provenir des valeurs de pixels non valides sur les bords (near range) de l'image lors des itérations durant l'inversion de CMOD5.

Les vitesses calculées dans les polarisations croisées présentent des valeurs surestimées proche de la ligne côtière. Ces effets sont observables sur les Figure 2.21c, Figure 2.21d, Figure 2.22c et Figure 2.22d.

Les vitesses calculées dans les polarisations parallèles (HH, VV) ne présentent pas de surestimation de valeurs sur les côtes. La dépolarisation du signal par le déferlement des vagues est considérée comme source de cette surestimation des vitesses.

Les vitesses observées sur la Figure 2.23 ont des valeurs surestimées sur les côtes de la partie nord-est de la Nouvelle-Écosse, alors qu'elles ont été calculées avec la polarisation parallèle HH.

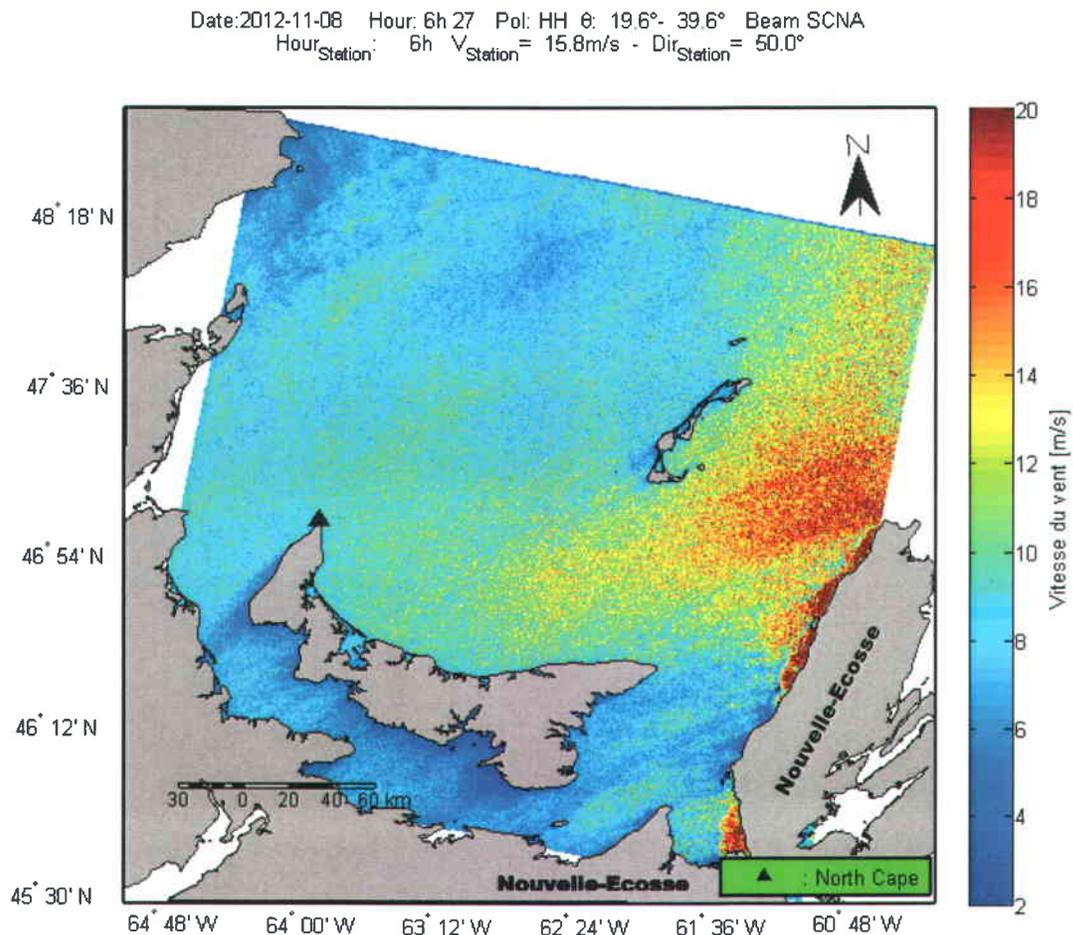


Figure 2.23: Carte des champs de vent extraits de l'image RADARSAT-2 ScanSAR du 8 novembre 2012 avec CMOD5. La barre de couleur montrent les valeurs des vitesses du vent.

Les images ScanSAR-Étroite de RADARSAT-2 sont acquises sous deux formes (SCNA ou SCNB) selon l'étendue de l'angle d'incidence. Les valeurs de l'angle d'incidence du signal sont d'environ 19,6° à 39,6° et 30,6° à 46,6° pour SCNA et SCNB, respectivement. La carte de vitesse sur la Figure 2.23 a été obtenue avec la scène SCNA (19,6° < θ < 39,6°). Une partie de la ligne de côte de la Nouvelle-Écosse se trouve sur les parties de l'image (à l'est) correspondant aux angles d'incidence au voisinage de 20°. Les vitesses

surestimées sur ces endroits sont dues aux effets de l'angle d'incidence sur le fonctionnement du modèle géophysique utilisé. Le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) couplé avec le modèle CMOD5 considère uniquement des valeurs d'angle d'incidence entre 20° à 40°. Les pixels ayant été pris avec des angles d'incidence inférieurs à 20° pourraient avoir des valeurs de vitesses surestimées.

2.5.5 Validation des directions

Le nombre de scènes SQ co-localisées spatialement avec la station de North Cape est seulement en nombre de trois (soient SQ7 du 25 octobre 2012 prise à 6h36min04s, SQ14 du 4 novembre 2012 prise à 18h05min33s, et SQ9 du 11 novembre 2014 prise à 18h01mn24s qui sont cités dans le). et cela n'est pas suffisant pour effectuer un calcul d'erreur ni de biais. La validation de la précision des directions calculées avec l'algorithme des gradients locaux et dont l'orientation a été déterminée par la nouvelle approche d'élimination de l'ambiguïté a été ainsi faite avec les résultats obtenus sur les scènes ScanSAR-Étroites. L'étendue spatiale de cette dernière permet à la station d'être co-localisée avec la majorité des scènes ScanSAR utilisées dans cette étude. Les Tableaux 2.8 et 2.9 montrent des directions calculées en mer au voisinage de la station sur les scènes SQ14 du 4 novembre 2012 et SQ9 du 11 novembre 2012 respectivement et comparées aux valeurs mesurées par le mât à la station North Cape.

Tableau 2.8: Directions du vent calculées sur la scène SQ14 du 4 novembre 2012 acquise à 18h05 co-localisée avec la station météo de North Cape. La vitesse mesurée à 18h00 est de 8,3 m/s.

Distance à la station	Directions calculées sur l'image	Moyenne spatiale des valeurs calculées	Direction mesurée à la station North Cape à 18h00	Différence entre moyennes spatiales et la valeur mesurée
1.5 km à l'Est	306°			
2.3 km au Nord-Ouest	315°	309°	310°	1°
3.5 km à l'Ouest	306°			

La différence entre la direction mesurée et la moyenne spatiale des directions calculées voisines à la station pour les deux cas sont respectivement de 1° et 11°. Ces résultats confirment l'observation de Koch (2004), que l'erreur sur la détermination de la direction augmente lorsque la vitesse du vent diminue.

Tableau 2.9: Directions du vent calculées sur la scène SQ9 du 11 novembre 2012 acquise à 18h01 et co-localisée avec la station météo de North Cape. La vitesse mesurée à la station à 18h00 est de 5,6 m/s.

Distance à la station	Directions calculées sur l'image	Moyenne spatiale des valeurs calculées	Direction mesurée à station de North Cape à 18h00	Différence entre moyennes spatiales et la valeur mesurée
1.3km au Nord-Ouest	232°	239°	250°	11°
2 km au Nord-Est	244°			
2 km au Sud-Est	240°			

Le Tableau 2.10 résume les valeurs de direction moyennées dans l'espace, calculées avec les gradients locaux au voisinage de la station de North Cape, pour les séries d'images ScanSAR. Une version complète du même tableau est présentée à l'ANNEXE A. La valeur de la RMSE pour le calcul des gradients locaux est de 28,5° et le biais évalué à -1,98°.

Tableau 2.10: Comparaison des moyennes spatiales des directions (10m ASL) calculées au voisinage de la station North Cape sur les scènes ScanSAR-Étroites utilisées.

Date d'acquisition des scènes	Directions mesurées à la station	Directions calculées avec les gradients locaux	Décalage temporel entre les images et les données à la station	Vitesse mesurée à la station (m/s)
06/06/2012	30°	16.3°	9 minutes	9,7
08/11/2012	50°	76.3°	27 minutes	15,8
29/10/2012	80°	30.5°	19 minutes	10,3
20/05/2012	140°	153°	4 minutes	6,1
13/06/2012	160°	141°	4 minutes	2,5
24/07/2012	200°	231°	9 minutes	3,1

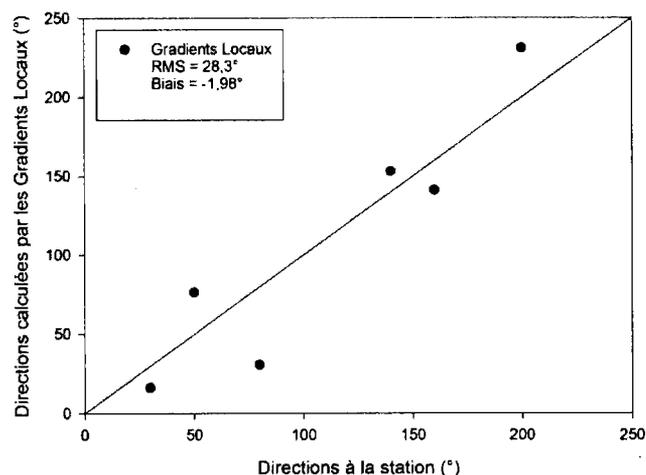


Figure 2.24: Comparaison des directions calculées sur les images ScanSAR-Étroites avec les données enregistrées à la station de North Cane.

Les valeurs de la RMSE et du biais pour l’algorithme des gradients locaux indiquées à la Figure 2.24 sont en accord avec celles indiquées dans la littérature malgré le nombre réduit d’images disponibles pour cette étude. Le Tableau 2.11 compare nos résultats avec ceux présentés dans la littérature. Une méthode inverse (Zhang *et al.*, 2012) avait été utilisée pour retrouver la direction du vent. Les vitesses ont d’abord été calculées en polarisation croisée avec le modèle linéaire de Vachon *et al.* (2011); puis injecter dans le modèle géophysique en bande C. Des valeurs de RMSE de 22,47° et un biais de 1,65° résultaient de leur analyse; ce qui est comparable avec les résultats présentés à la Figure 2.25.

Tableau 2.11: Comparaison de nos résultats statistiques avec ceux présentés dans la littérature.

	RMSE	Biais	Méthode
Échantillon au complet (Figure 2.24)	28.5°	-1.98	SAR vs données <i>in situ</i> (semi-automatique)
Échantillons de la 2 ^e et de la 3 ^e ligne éliminés (Figure 2.25)	20.5°	1.88°	SAR vs données <i>in situ</i> (semi-automatique)
Zhang et Vachon (2012)	22,47°	1,65°	SAR vs données <i>in situ</i>
Horstmann (2002)	21.6°	-3.5°	SAR vs HIRLAM model (semi-automatique)
Koch (2004)	17.6°	-0.5°	SAR vs numerical model (semi-automatique)
Horstmann and Koch (2005)	18.3°	-2.5°	SAR vs DWD model (semi-automatique)
Horstmann and Koch (2008)	20.1°	-1.7°	SAR vs DWD model (semi-automatique)

Lorsque les échantillons du 2^e et la 3^e ligne du Tableau 2.11 ont été éliminés de la comparaison, la valeur du RMSE a diminué à 20,5° et le biais devint 1,88°. Les données images du 29 octobre 2012 et du 8 novembre 2012 sont les plus éloignées dans le temps par rapport à l'enregistrement à la station.

Les données enregistrées à 6 heures 30 minutes provenant de WEICan et qui seraient celles les plus proches dans le temps par rapport à l'acquisition de la scène ScanSAR de la journée de 8 novembre 2012 n'a pas pu être utilisée à cause d'une panne de l'enregistreur. De plus, les données provenant de WEICan ne contiennent pas de valeurs de direction à 10m au-dessus de la surface du sol. La valeur de la direction enregistrée à 6h00 a été ainsi utilisée dans la validation vu que celle-ci est la plus co-localisée de la scène (acquise à 6h27).

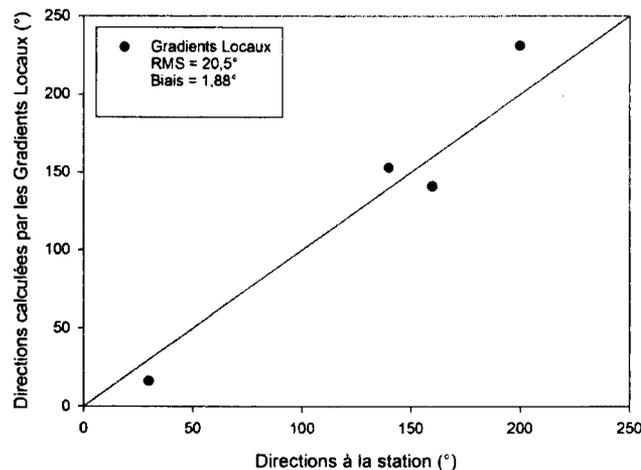


Figure 2.25: Comparaison des directions du vent calculées sur les images ScanSAR-Étroites avec les données enregistrées à la station de North Cape en éliminant les données correspondant aux journées du 29 octobre 2012 et du 8 novembre 2012.

2.5.6 Validation des vitesses

Les vitesses ont été validées avec les données d'enregistrement de la station météo de North Cape. Les scènes considérées pour la validation des vitesses sont celles qui ont été utilisées lors de la validation des directions (c'est-à-dire les scènes ScanSAR). Les scènes ScanSAR ont été reprises pour la valider les vitesses parce qu'elles sont nombreuses par rapport aux scènes SQ à être collocalisé avec le mât de North Cape.

Les vitesses considérées sont situées à différentes distances du mât; soient à 1 km, 10 km et à 25 km. Ces distances ont été choisies parce qu'elles correspondent à celles indiquées dans Hasager *et al.* (2005) où les valeurs de la vitesse du vent diminuent à l'approche de la côte. Toutes les six scènes ont d'abord été considérées et les résultats sont présentés aux Figure 2.26, Figure 2.27 et Figure 2.28.

Les résultats sur ces figures montrent que les vitesses RSO sont davantage biaisées pour l'échantillon pris à 1 km (biais = -2,97 m/s) de la côte par rapport celles à 10 km et 25 km où les biais sont de -2,75 m/s et -2,78 m/s respectivement. Les vitesses RSO sont sous-estimées par rapport à celles du mât à cause de l'état confus de la mer proche de la ligne côtière. Les vagues se déferlent lorsque le rapport entre leur hauteur et la profondeur locale de la mer est compris entre 0,3 et 0,8. C'est la bathymétrie locale qui est la principale cause. Cet effet sera expliqué en détail dans le chapitre 3.

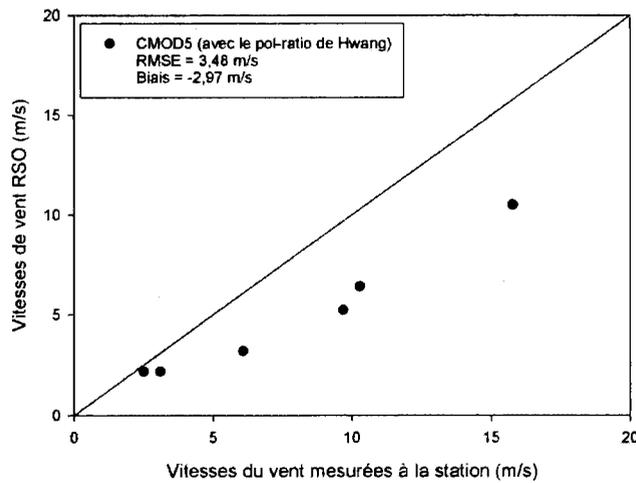


Figure 2.26: Validation des vitesses RSO avec les enregistrements du mât météorologique de North-Cape pour six images ScanSAR. Le point considéré est situé à 1 km du mât.

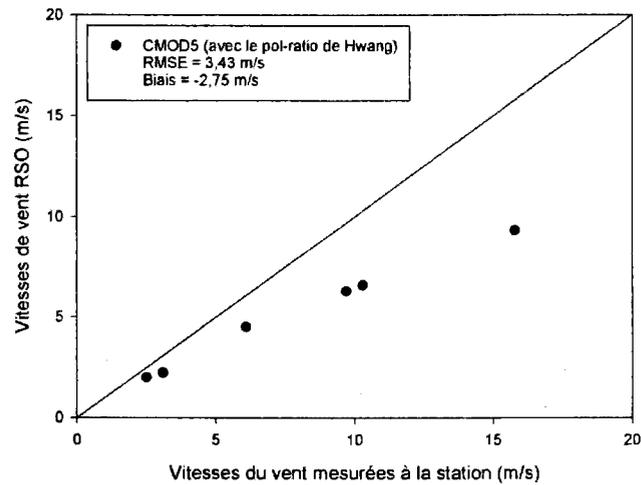


Figure 2.27: Validation des vitesses RSO avec les enregistrements du mât météorologique de North-Cape pour six images ScanSAR. Le point considéré est situé à 10 km du mât.

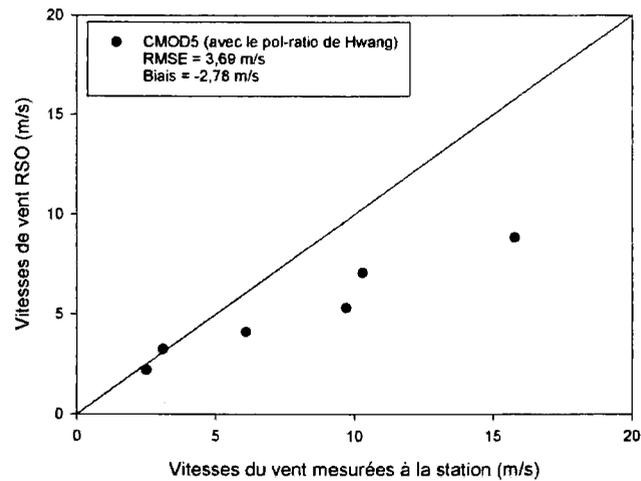


Figure 2.28: Validation des vitesses RSO avec les enregistrements du mât météorologique de North-Cape pour six images ScanSAR. Le point considéré est situé à 25 km du mât.

La différence de température entre la surface de la mer et la basse couche de l'atmosphère pourrait aussi un paramètre responsable de la sous-estimation des vitesses par le modèle géophysique. Il est à noter que la viscosité de l'eau dépend de sa température. La viscosité augmente lorsque la température diminue. Si la température de

la mer est inférieure à celle de l'air au-dessus d'elle, plus de force provenant du vent est nécessaire pour former des vaguelettes à la surface de l'eau.

Des cellules de pluie ont été observées sur cinq des six images utilisées pour la validation. La pluie a pour effet de diminuer l'amplitude des vagues de Bragg et entraîne une sous-estimation des vitesses RSO sur l'image par rapport à celles mesurées au mât de la station. L'erreur (RMSE = 3,69 m/s) observée sur la vitesse au point situé à 25 km du mât est supérieure à celles des vitesses à 1 km et 10 km (RMSE = 3,48 m/s et RMSE = 3,43 m/s respectivement). La distance par rapport à la station de validation en serait la cause. Les deux scènes ayant un décalage temporel de 27 minutes et 19 minutes avec l'enregistrement au mât ont alors été éliminées des données de validation. Les résultats obtenus pour quatre scènes ScanSAR sont présentés aux Figure 2.29, Figure 2.30 et Figure 2.31.

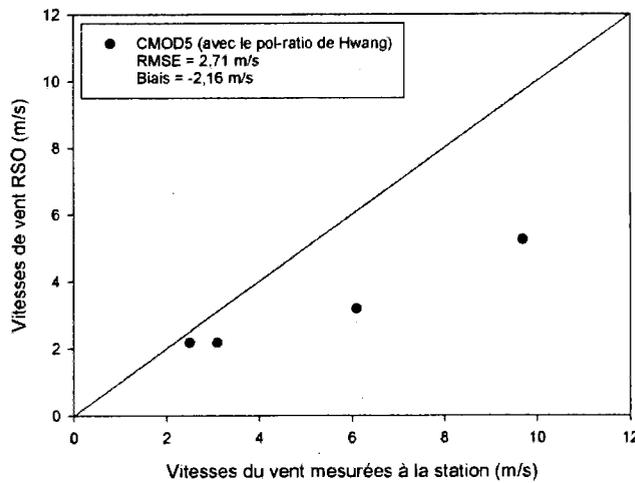


Figure 2.29: Validation des vitesses RSO avec les enregistrements du mât météorologique de North-Cape pour quatre images ScanSAR. Le point considéré est situé à 1 km du mât.

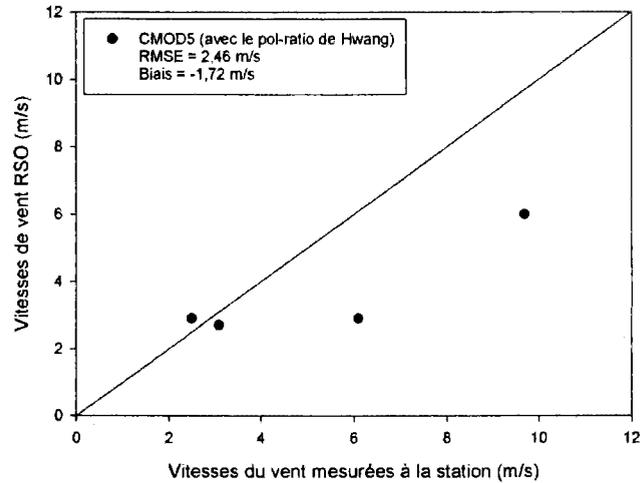


Figure 2.30: Validation des vitesses RSO avec les enregistrements du mât météorologique de North-Cape pour quatre images ScanSAR. Le point considéré est situé à 10 km du mât.

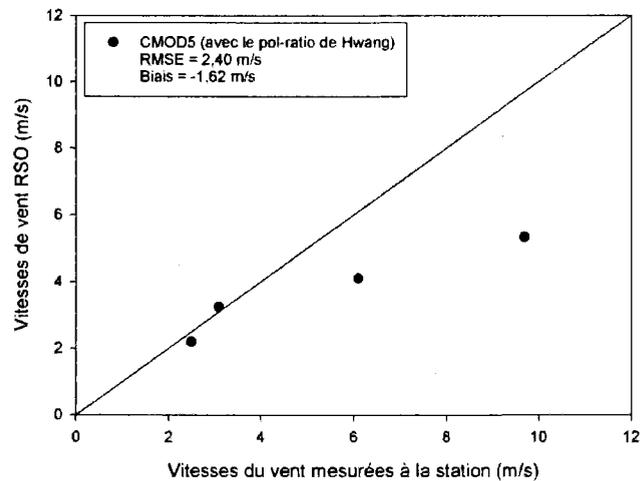


Figure 2.31: Validation des vitesses RSO avec les enregistrements du mât météorologique de North-Cape pour quatre images ScanSAR. Le point considéré est situé à 25 km du mât.

Après élimination des données les plus délocalisées dans le temps par rapport aux données de mesures à la station, les valeurs de la RMSE et du biais ont diminué. Elles valent respectivement 2,71 m/s et -2,16 m/s pour le point situé à 1 km du mât; 2,46 m/s et -1,72 m/s pour le point situé à 10 km; et finalement 2,40 m/s et -1,62 m/s pour le point à 25 km. L'effet de la délocalisation temporelle des vitesses calculées et mesurées à la station

a été éliminé. Bergeron *et al.* (2011) avait trouvé un RMSE 1,30 m/s ; un biais de 0,58 m/s sur les vitesses calculées avec des images SQ RADARSAT-2. Ces vitesses ont été comparées avec les données de la bouée Mont-Louis installée dans le fleuve St-Laurent à environ 35 km de la rive gaspésienne; 49,55°N, 65,75°O qui est colocalisé dans le temps et dans l'espace avec les images qui ont été utilisées. La différence des résultats montrés aux Figure 2.29, Figure 2.30 et Figure 2.31 provient d'une part de la délocalisation dans l'espace des échantillons de vitesse par rapport à la localisation du mât. D'autre part, l'effet de la bathymétrie qui sera développé dans le chapitre 3 aurait une contribution sur le biais et le RMSE. Comme dans le cas des résultats aux Figure 2.26, Figure 2.27, et Figure 2.28, les échantillons situés à 1 km et 10 km ont donné des erreurs (2,71 m/s et 2,46 m/s) supérieures à ceux situés à 25 km (RMSE = 2,40 m/s). Ici, la bathymétrie est supposée hausser les erreurs d'estimation des vitesses.

La comparaison de notre méthode d'élimination de l'ambiguïté avec celle de Zhang *et al.* (2012) ne peut pas se faire directement. Les deux approches sont complètement différentes. Dans la méthode de Zhang *et al.* (2012), les directions sont calculées par l'inversion du modèle de la fonction géophysique CMOD5.N en utilisant des vitesses issues du modèle C-2PO sur le canal VH. La forme mathématique de CMOD5.N permet d'obtenir quatre possibilités de solution concernant la direction du vent calculée sur un pixel donné. La caractéristique de symétrie du PCC (Coefficient de corrélation polarimétrique) est ensuite utilisée afin de pouvoir choisir une des quatre solutions pour éliminer l'ambiguïté. La méthode proposée dans cette étude permet de choisir une, parmi deux orientations possibles, pour une direction qui a été déterminée par l'algorithme des Gradients Locaux sur l'un ou l'autre des canaux en polarisation parallèle (HH ou VV).

2.6 Conclusion

La différence de phase monocanal⁶ a pu être extraite sur les scènes SQ et a été utilisée pour l'élimination de l'ambiguïté 180° sur la direction du vent calculée sur les images polarimétriques sans avoir à utiliser des données externes à l'image. Les vitesses et les directions ont pu être déterminées en utilisant les données SQ et ScanSAR-Étroite de

⁶ Déphasage entre le signal incident et rétrodiffusé intrinsèque à chaque canal.

RADARSAT-2. Les directions déterminées sur les scènes SQ et ScanSAR-Étroite ont été extraites directement avec seulement les informations (structures linéaires) contenues dans l'image.

Trois approches ont été présentées concernant la détermination de la phase de référence à utiliser lors de l'élimination de l'ambiguïté sur les directions calculées. La première approche consistait à effectuer une détermination graphique. La seconde utilise le maximum de variation de phase sur deux canaux différents et prend le négatif de la valeur trouvée. La troisième utilise la somme et la différence entre deux phases contenues dans deux canaux distincts. Même si les trois approches n'utilisent pas d'information externe, les deux dernières approches peuvent être utilisées dans un processus automatisé parce qu'elles ne nécessitent aucune intervention (choix de valeur de la phase de référence) par un analyste. La deuxième approche a donné de meilleurs résultats par rapport aux deux autres (1^{er} et 3^e) lorsqu'appliquée sur les scènes SQ14 du 4 novembre 2012 et SQ9 du 11 novembre 2012 à 18h01, scènes pour lesquelles les directions du vent sont orientées d'ouest vers l'est. En utilisant une phase de référence provenant de $-(|\phi_{VV}|+|\phi_{HV}|)$, toutes les directions ont pu être corrigées avec les différences de phase enregistrées dans les quatre canaux des deux scènes citées précédemment. Mais, en considérant la scène SQ12 du 28 novembre 2012 sur laquelle l'orientation du vent est d'est en ouest, aucune des phases de référence issues des deux premières méthodes (1^e et 2^e) n'a pu corriger les directions en accord avec la position de l'effet de sillage de l'île. Seules la phase de référence ϕ_{VV-HV} comparée avec la phase ϕ_{HH} et la phase ϕ_{VV-HH} comparée avec la phase ϕ_{HV} ont donné de meilleurs résultats sur toutes les scènes.

L'ambiguïté dans les directions calculées sur les scènes ScanSAR-Étroite a été éliminée pour les régions présentant un effet de sillage de vent sachant que celui-ci est toujours situé derrière une île par rapport à la venue du vent. Les directions calculées ont été validées avec les données du mât de North Cape en utilisant les résultats provenant des scènes ScanSAR utilisées. Cette station est présente sur huit parmi les dix scènes ScanSAR acquises. Parmi ces huit scènes ScanSAR contenant la station North Cape, deux ont été rejetés. L'une a été prise 27 minutes après l'enregistrement à la station (Environnement Canada) alors que la vitesse enregistrée à la station était faible (3,1 m/s); aucune valeur n'a été enregistrée dans la base de données de WEICan. L'autre scène

avait une erreur non identifiée lors de son traitement et. La station de North Cape est présente sur seulement deux des dix-huit scènes SQ. Les résultats obtenus lors de la validation de la direction sont comparables à ceux trouvés dans la littérature. L'hypothèse de considérer la direction du vent à la station de North Cape pour représenter la direction du vent en mer est vérifiée.

La comparaison de l'efficacité de nos méthodes avec celle de Zhang *et al.* (2012) est quasiment impossible parce que selon cet auteur, l'élimination de l'ambiguïté selon se fait durant l'inversion de CMOD5.N alors que notre méthode est effectuée après avoir calculé toutes les directions avec l'ambiguïté sur l'image.

La validation des vitesses avec les données de mât de la station de North Cape a montré l'importance des variables spatiales et temporelles lors de la validation. Malgré que le mât n'était pas colocalisé spatialement avec les échantillons considérés pour la validation, le RMSE (2,40 m/s) et le biais (1,62 m/s) obtenus ne sont pas comparables à ceux observés dans la littérature consultée.

Il a été constaté que les vitesses mesurées dans les canaux en polarisation croisée sont surestimées au voisinage de la ligne côtière. Le comportement des vagues après avoir subi des déferlements serait l'explication adéquate à cette surestimation. Nous avons soutenu cette hypothèse en sachant que les mousses issues des vagues après déferlement produiraient une diffusion de volume en plus du pouvoir à dépolariser les signaux. Les déphasages observés, dans chacun des canaux utilisés lors de la correction de l'ambiguïté 180° seraient affectés, par un mouvement superficiel de l'eau sur ces endroits. Ce sont d'ailleurs les directions localisées sur les régions de déferlement des vagues qui ont été corrigées en dernier lors de la détermination de la valeur de la phase de référence (Figure 2.12).

CHAPITRE 3: ÉVALUATION DES EFFETS DE LA BATHYMÉTRIE SUR L'ESTIMATION DU VENT

3.1 Introduction

Les modèles numériques sont utilisés dans la prévision météorologique. À partir des simulations, ils sont guidés par des données de mesures prises sur des points répartis dans l'espace à des moments précis. Malgré l'effort effectué dans l'installation de mât météorologique sur zones côtières, les modèles météorologiques sont limités par leur faible résolution spatiale ainsi que par l'effet de la turbulence du vent qui est une fonction de la rugosité imposée par l'occupation du sol et l'effet de barrière créé par la topographie. Dans la dynamique des fluides, la turbulence est un phénomène complexe. Pourtant, il est important de comprendre et de résoudre les équations qui découlent de la dynamique des fluides pour comprendre l'écoulement de l'air dans la basse couche de l'atmosphère et surtout sur en région côtière où le vent se déplace sur deux surfaces de nature et propriété physique différentes. C'est le cas pour notre la zone d'étude.

L'interface terre-mer joue un rôle majeur dans le changement de régime des vitesses du vent en mer vers la terre. Cinq facteurs ont été identifiés par Ricard *et al.* (2006) ; à savoir la vitesse du vent, la direction du vent, l'orographie, l'occupation du sol et le gradient de température terre-mer. Ils influencent le déplacement de l'air en milieu côtier. Selon Hélimax Énergie inc.(2003) et l'étude faite par (Choisnard *et al.*, 2004), il a été montré qu'une analyse d'impact du changement de la vitesse du vent terre-mer nécessite la connaissance de la direction du vent : perpendiculaire (vent de terre vers mer ou vice versa), ou parallèle à la ligne de côte. Selon les stations météorologiques, les résultats varient avec un biais de -0,8 m/s à 2,8 m/s et une erreur moyenne de 1,3 m/s à 3,6 m/s entre les vitesses RSO et celles aux stations. Ces auteurs ont supposé qu'une partie de ces différences proviennent de la relation naturelle entre le vent côtier et le vent sur la

partie maritime environnante et que cette relation est influencée par l'aspect de la côte (relief) et le changement de rugosité à l'interface terre-mer. Les RMSE trouvées lors de la validation des vitesses trouvées dans le paragraphe 2.5.6 se trouvent dans l'intervalle 1,62 m/s à 3,69 m/s.

Le régime de vent en mer est plus stable par rapport à celui du vent de type continental. Ils sont moins perturbés par l'influence de la topographie et de la turbulence, mais il y a moins de données de mesures pour la validation des modèles. L'utilisation des imageries radar dans l'estimation du vent en mer est un avantage face au manque de données rencontré dans la validation des modèles.

Le modèle MS Micro est un code de calcul avec lequel les équations de Navier-Stokes sont résolues. Il est basé sur le modèle développé par (Jackson *et al.*, 1975). Une extension à trois dimensions a été proposée dans (Mason *et al.*, 1979). Plusieurs hypothèses doivent être vérifiées pour que les simulations soient valides. L'atmosphère doit avoir une stratification neutre ; la rugosité de la surface du sol doit être constante et périodique dans les deux directions et la pente du terrain ne doit pas dépasser 20%. D'autres versions du modèle ont été développées (MS3DJH/1 (Mason *et al.*, 1979) ; MS3DJH/2 (Walmsley *et al.*, 1982) ; MS3DJH/3 (Walmsley *et al.*, 1986) ; MS Micro (Walmsley *et al.*, 1990)) afin de pallier à ces limites d'application. Le mémoire de maîtrise de Dautreaux (2012) avait introduit un couplage du modèle MS Micro avec le code de calcul ACSC⁷. Ce dernier donne plus d'impact au changement brusque de la rugosité observée au niveau des régions côtières (passage terre-mer) lorsque comparé à MS Micro sans couplage; de plus, il tient compte du changement de la température et de l'humidité de l'air. Toutefois, la carte de ressource éolienne utilisée dans cette étude a été réalisée antérieurement aux travaux de Dautreaux (2012) avec le modèle MS Micro sans couplage ACSC. La version du modèle de Walmsley *et al.* (1990) qui est déjà implémentée dans le logiciel Anémoscope qui a été utilisé.

⁷ ACSC : Abrupt Change of Surface Condition

3.2 Analyse de la carte de vent MS Micro

Une carte de ressource éolienne pour l'Île-du-Prince-Édouard a déjà été réalisée par un groupe de recherche pour le Programme Environnement à l'Université de Moncton au Nouveau-Brunswick (<http://www.gov.pe.ca/envengfor/windatlas/>). Des données de sorties de l'atlas des énergies éoliennes du Canada ont été utilisées en entrée du modèle de calcul WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Programme) pour cartographier à haute résolution (~200 m) la ressource éolienne à l'Île-du-Prince-Édouard, à des altitudes de 30 m, 50 m, et 80 m respectivement. WAsP inclut le modèle à microéchelle MS Micro décrit initialement par Mason *et al.* (1979) en faisant une extension à trois dimensions du modèle d'écoulement à deux dimensions de Jackson *et al.* (1975). MS Micro ne considère pas le changement brusque de la rugosité comme le cas de deux surfaces adjacentes terre-mer en région côtière ; ce qui laisse apparaître des artefacts de calcul au voisinage de ces régions.

Dans le cadre de cette étude, une carte du module de la vitesse moyenne du vent (Figure 3.1) a été acquise auprès de l'équipe de recherche *Chaire K.-C.-Irving en développement durable* à l'université de Moncton.

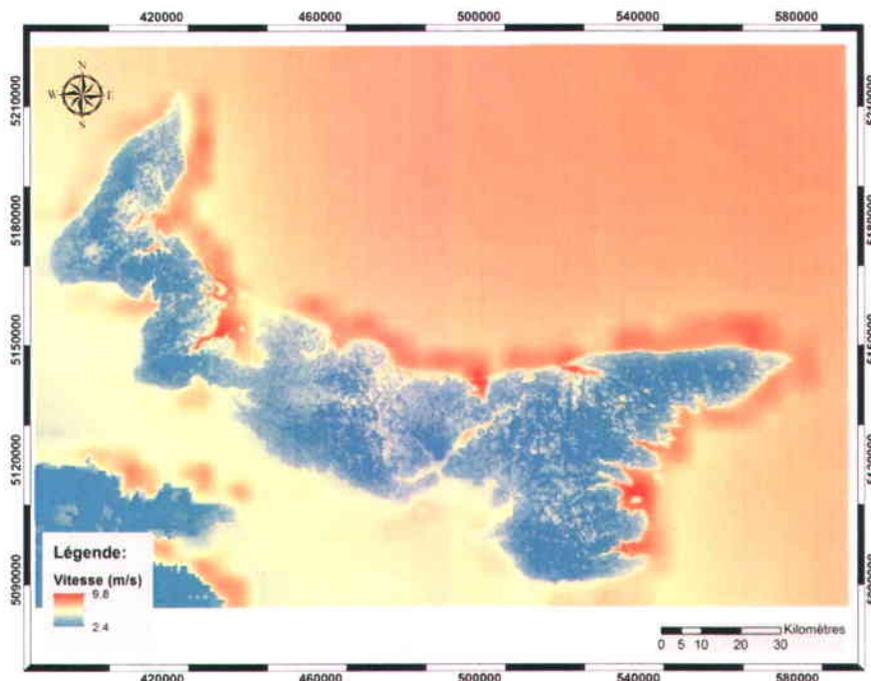


Figure 3.1: Carte du module de vitesse moyenne à long terme simulée par le modèle MS-MICRO avec les données climatiques de 1958 à 2000.

Les vitesses cartographiées sur la carte ont été simulées à partir de données climatiques enregistrées entre les années 1958 à 2000 dans la région de l'Île-du-Prince-Édouard. Cette carte contient des vitesses du vent à environ 10m au-dessus du sol, à une échelle approximative de 200m et recouvre les parties terrestres de l'Île-du-Prince-Édouard ainsi que la mer locale. Elle est considérée comme représentative du climat global *in situ*. D'autres données comme l'occupation du sol et la topographie sont incluses dans cette base de données. Ces dernières ont la même résolution spatiale que la carte de vitesse.

Quatre catégories de valeurs de vitesse sont observables sur la carte de la Figure 3.1. Il y a trois zones en mer : l'Atlantique ; le détroit séparant le Nouveau-Brunswick et l'Île-du-Prince-Édouard ; et les régions proches des côtes (caractérisées par des vitesses élevées). La quatrième zone est représentée par le vent sur la partie terrestre. Le modèle produit des valeurs de vitesse relativement constante en mer. Les vitesses en mer sont supérieures à 7 m/s dans l'est et au sud-est de la région, sauf à la séparation terre-mer où elles peuvent atteindre 8m/s à 9m/s avant de chuter sur la partie terrestre. Les vitesses dans le canal entre l'île et le Nouveau-Brunswick sont comprises entre 6 m/s et 7,3 m/s. Le vent provenant de l'océan Atlantique est atténué en traversant l'île qui présente des valeurs de rugosité (Tableau 3.1) élevées par rapport à la mer (~0.0002m). Le Tableau 3.1 montre les valeurs de rugosité selon l'occupation du sol sur l'Île-du-Prince-Édouard. La Figure 3.2 présente la carte d'occupation du sol correspondante aux valeurs de rugosité.

L'anomalie causée par la variation brusque de la rugosité de surface (terre-mer) est visible sur la carte montrée la Figure 3.1. Les vitesses calculées en mer proche de la côte ont des valeurs élevées par rapport à toutes les valeurs calculées dans la région. Elles sont réparties le long de la côte est. Ces zones de transition sont absentes sur une partie de la côte au centre sud de l'île. Sur les côtes Sud-est, elles sont présentes, mais moins prononcées par rapport aux autres. Ces valeurs de vitesses élevées sont associées à une anomalie créée par MS Micro face au changement brusque de la rugosité (faible en mer ; élevée sur terre). Les vitesses en mer dans le détroit situé entre l'île et le Nouveau-Brunswick sont relativement plus faibles par rapport aux autres endroits sur la mer. Ceci est causé par l'effet-écran créé par l'Île-du-Prince-Édouard (face au régime de vent provenant de l'Atlantique) et par le Nouveau-Brunswick (face au régime de vent Jet provenant de l'Ouest). En traversant la colline au centre de l'île, les vitesses provenant de

l'Atlantique descend en bas de 7 m/s alors que celles en mer de l'autre côté sont supérieures à 7,5 m/s. La topographie de l'île est représentée à la Figure 3.3 ; l'altitude par rapport au niveau de la mer varie de 0m à 140m.

Tableau 3.1 : Valeur de la rugosité en fonction de la classe de l' occupation du sol.

classe	Description	z_0	classe	Description	z_0
1	Eau	0.001	14	Herbe longue	0.08
2	Glace	0.001	15	Arable	0.08
3	Lac	0.001	16	Riz	0.08
4	Conifère à feuilles persistantes	1.5	17	Sable	0.35
5	Feuillu à feuilles persistantes	3.5	18	Maïs	0.25
6	Arbres à feuilles caduques Conifères	1.0	19	Coton	0.1
7	Feuillus à feuilles caduques	2.0	20	Culture irriguée	0.08
8	Feuillus tropicaux	3.0	21	Urbain	1.35
9	Arbres à feuilles caduques sèches	0.8	22	Toundra	0.01
10	Arbustes à feuilles larges persistantes	0.05	23	Marais	0.05
11	Arbuste à feuilles caduques	0.15	24	Sol	0.05
12	Arbustes épineux	0.15	25	Forêt mixte	1.5
13	Herbe courte et autres plantes herbacées	0.02	26	Forêt de transition	0.05

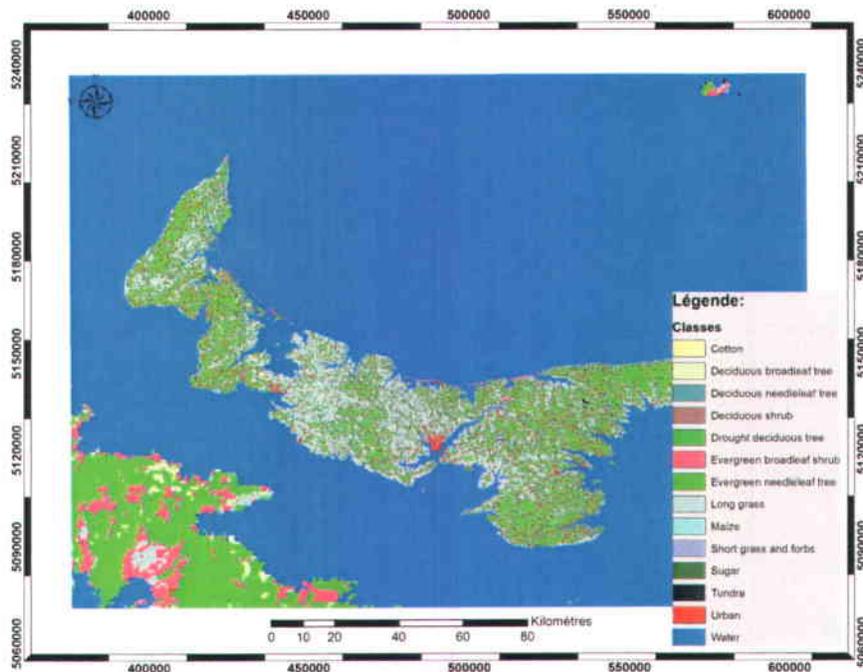


Figure 3.2: Carte de l'occupation du sol de l'Île-du-Prince-Édouard extraite de la base de données utilisée pour le calcul des vitesses dans le modèle MS Micro.

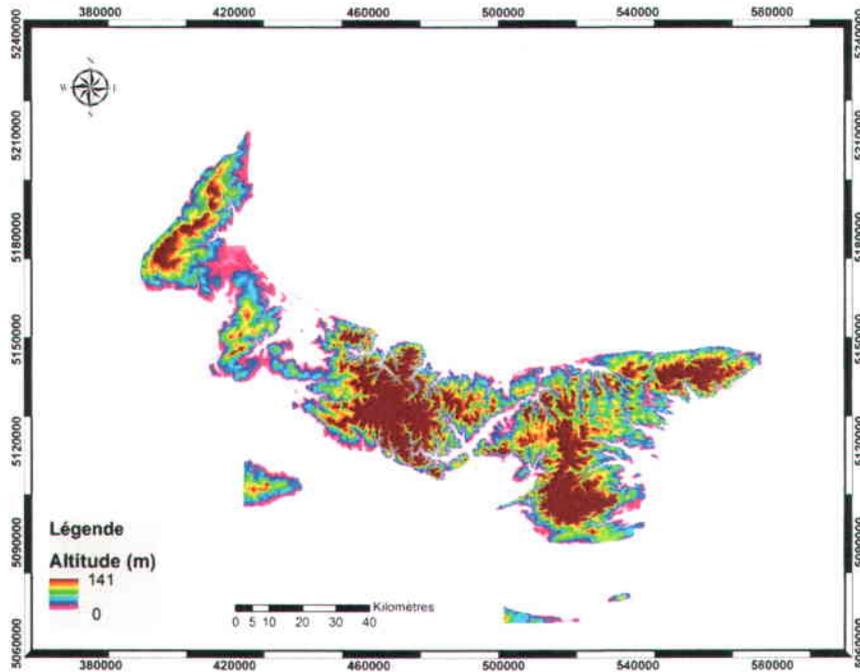


Figure 3.3: Carte de variation de l'altitude du terrain de l'Île-du-Prince-Édouard extraite de la base de données utilisée pour le calcul des vitesses dans le modèle MS Micro.

3.3 Mise en évidence des effets de la bathymétrie

Les radars à synthèse d'ouverture peuvent être utilisés pour détecter les effets de la bathymétrie comme ont montré de nombreuses études apparues dans la littérature (Alpers *et al.*, 1984, Cooper *et al.*, 1994). Les signaux en bande C utilisés par RADARSAT-2 sont sensibles aux vagues de Bragg à la surface de l'eau. Ces vagues sont modulées par les interactions du mouvement des courants sous-jacents avec le fond marin pour le cas de l'eau peu profonde proche des côtes. Les effets de la bathymétrie sur la caractérisation du champ de vent sur les images RADARSAT-2 seront mis en évidence par l'analyse simultanée de la variation de la profondeur locale et celle des vitesses estimées par CMOD5.

La diminution de la profondeur de la mer proche de la ligne côtière est à l'origine de l'état confus de la mer à ces endroits. Les mouvements de courant dans la colonne d'eau sur les côtes sont canalisés selon la forme du fond marin et interfèrent avec le mouvement des vagues à la surface. La hauteur des vagues dépend de cette profondeur. Les vagues de

Bragg sont modulées par d'autres types de vagues plus larges et le signal rétrodiffusé vers le capteur radar est biaisé selon les perturbations introduites par cette modulation.

Le changement de la longueur d'onde des vagues se rapprochant de la côte est un effet connu de la bathymétrie. La taille des vagues diminue lors de son déplacement vers la ligne côtière et sa hauteur augmente jusqu'à leur déferlement. La turbulence créée par le déferlement produit à son tour une forte amplitude des vagues de Bragg. De fortes rétrodiffusions du signal peuvent être localisées dans ces zones. Un effet de décalage en azimut de ces zones peut être produit par le mouvement des vagues suivant la direction de l'orbite du satellite.

Des profils ont été effectués à l'intérieur d'une zone tampon de 30 km à partir de la ligne de côte. Des valeurs de la profondeur de la mer, des vitesses issues de MS Micro, des vitesses calculées avec les images RADARSAT-2 seront présentées sur ces profils (voir Figure 3.4). Ils permettront d'analyser les variations des valeurs présentées.

3.4 Analyse des effets de la bathymétrie sur les vitesses calculées sur les images RADARSAT-2

Neuf profils ont été effectués (Figure 3.4) en mer pour l'image SQ du 4 novembre 2012 à 18h05 ; cinq sur la partie ouest et quatre sur la partie est de North Cape. La direction du vent local au moment de l'acquisition de l'image est uniforme de NW-SE (soit 310° d'après la valeur mesurée à la station de North Cape le même jour à 18h00). L'orientation des profils a été choisie pour correspondre à cette direction dans le but d'avoir le maximum d'énergie du vent agissant sur la surface de la mer. Les résultats obtenus sur ces profils sont présentés respectivement aux Tableau 3.2, Tableau 4.2, Tableau 4.3 et Tableau 4.4. Les graphiques correspondants sont présentés aux Figure 3.5, Figure 3.6, Figure 3.7 et Figure 3.8. Les résultats obtenus sur la carte de vent MS Micro ont la même allure sur tous les profils présentés sur ces figures. Les valeurs de vitesses surestimées observées sur la Figure 3.1 sont visibles sur chacun des profils. Ceci a été déjà signalé au paragraphe 3.2 comme étant l'effet du changement brusque de la rugosité de surface au passage du vent sur les deux milieux (mer-terre), non résolu par la version de MS Micro utilisée.

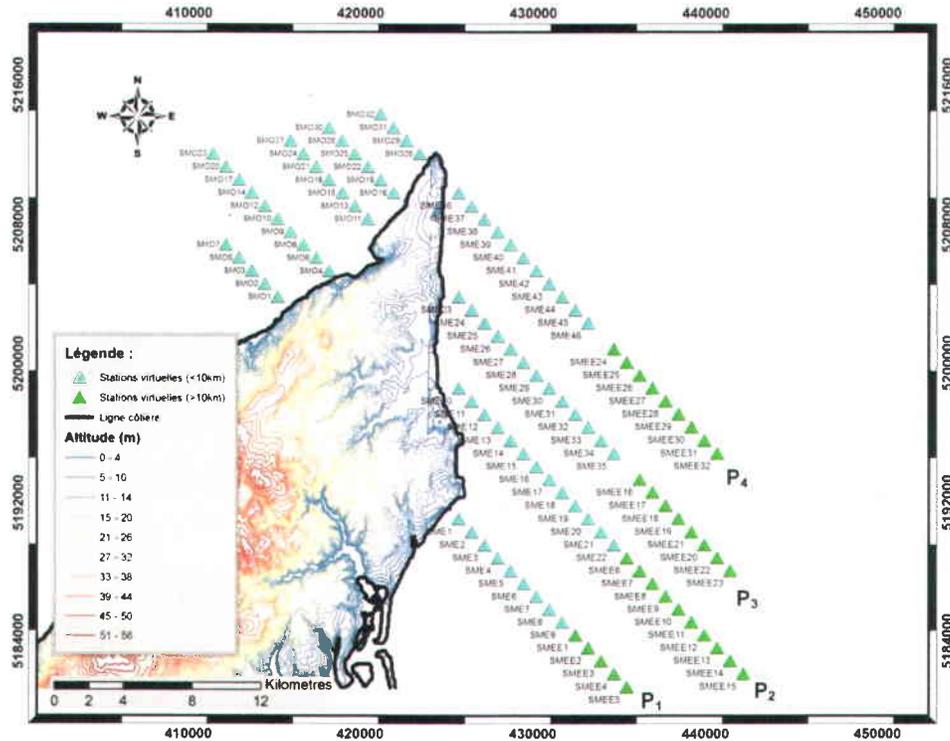


Figure 3.4: Stations fictives en mer situées sur des profils parallèles aux directions du vent local. Les iso lignes représentent la topographie. P1, P2, P3, P4 sont les profils à l'est de l'île.

En mer, les vitesses sont stables ; elles représentent la vitesse moyenne pendant la période entre les années 1958 et 2000. Les données de profondeur ont été interpolées par triangulation. Les mesures prises les plus proches se trouvaient en moyenne à 5km de la côte sur la partie ouest (Figure 3.4) et 4km sur la partie est. Elles ont été interpolées jusqu'à 500m de la ligne côtière. La profondeur localisée entre la ligne de la côte et les valeurs de profondeur interpolées les plus proches ont une décroissance monotone.

Tableau 3.2 : Profil P₁ de vitesse en mer à l'est de North Cape. La vitesse à la station de North Cape était 8,3 m/s à cinq minutes avant l'acquisition de la scène sur laquelle les vitesses RSO extraites sur les profils ont été calculées.

Distance à la côte (en km)	Vitesses (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
0.8	7,82	3,55	4,47	7,22	7,26	1,77
1,8	7,97	3,91	4,29	6,02	7,30	6,91
2,9	8,06	4,54	5,16	5,96	4,43	11,70
3,9	8,00	5,20	4,92	4,47	3,82	16,67
5	7,81	3,28	3,02	2,05	3,39	20,13
6,068	7,64	3,36	3,51	4,95	5,07	22,12

Distance à la côte (en km)	Vitesses (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
7,128	7,32	4,37	3,73	5,14	3,12	23,03
8,188	7,13	5,54	6,17	4,23	5,20	23,77
9,248	7,07	3,79	4,01	3,61	4,40	23,77
10,308	7,09	4,71	5,89	5,31	3,98	23,79
11,368	7,12	4,39	3,96	7,88	4,83	24,60
12,428	7,15	4,65	4,74	5,13	4,68	25,41
13,488	7,17	4,50	5,42	4,16	3,42	26,19
14,548	7,19	5,10	4,84	5,17	6,32	26,67

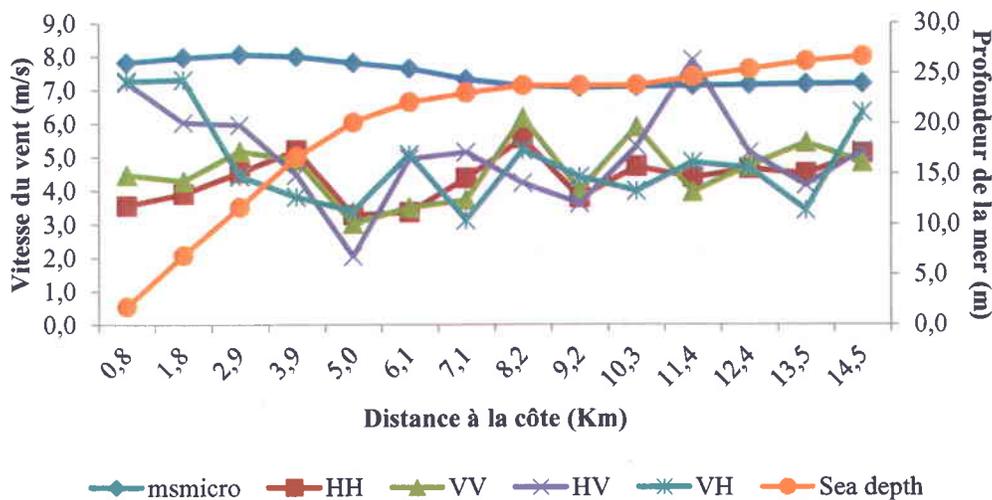


Figure 3.5: Profil P₁ de vitesse en mer (en m/s) à l'est de North Cape extrait des quatre polarisations et comparé à celui du modèle MSMicro et de la bathymétrie.

Selon la localisation de chacun des profils, la variation de la topographie sous-marine n'est pas la même. L'importante variation de la bathymétrie est localisée dans les premiers 10 km de la côte. La pente diminue progressivement en s'éloignant de la ligne côtière.

Les profils P1 et P2 présentés aux Figure 3.5 et Figure 3.6 montrent une baisse des vitesses RSO sur des zones localisées à environ 5 km de la côte sur une profondeur de 20 m (sur P1) et à environ 7 km de la côte sur une profondeur de 15 m (sur P2). La baisse des vitesses RSO est importante sur P2 lorsque comparée à celle sur P1.

Le même effet cité dans le paragraphe précédent est présent sur les profils P3 et P4 aux Figure 3.7 et Figure 3.8. Elle n'est pas visible sur ces deux dernières figures parce que la

variation de la profondeur suivant ces deux profils dans les dix premiers kilomètres de la ligne côtière ne permet pas de reproduire l'effet.

Proche de la ligne côtière, les vitesses calculées avec les canaux en polarisation croisée (HV et VH) ont des valeurs grandes par rapport à celles se trouvant au large de la mer (voir Figure 2.21c, Figure 2.21d, Figure 2.22c, Figure 2.22d). Cet effet est causé par le fait que le signal est plus dépolarisé par les mousses provenant du déferlement des vagues. L'intensité du signal provenant des polarisations croisées est donc supérieure à celui provenant des canaux en co-polarisation. Les vitesses calculées en HV et VH sont ainsi surestimées.

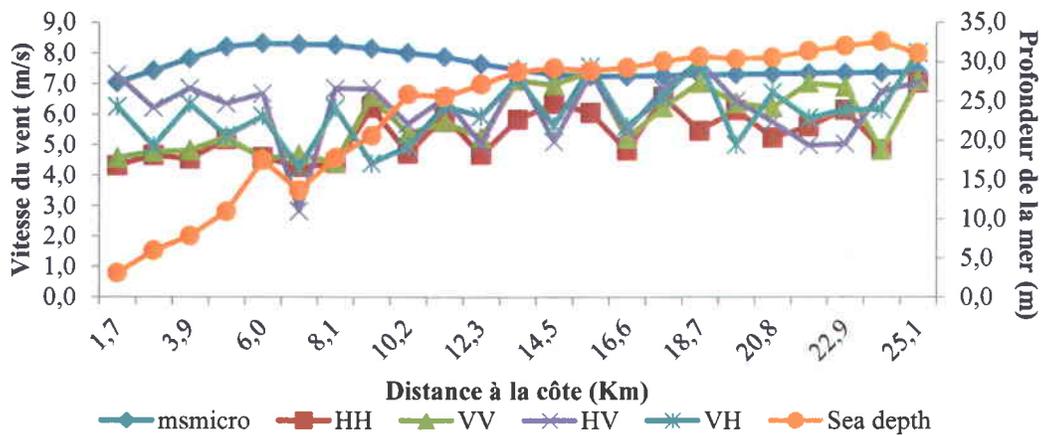


Figure 3.6: Profil P_2 de vitesse en mer (en m/s) à l'est de North Cape, extrait des quatre polarisations et comparé à celui du modèle MS Micro et de la bathymétrie.

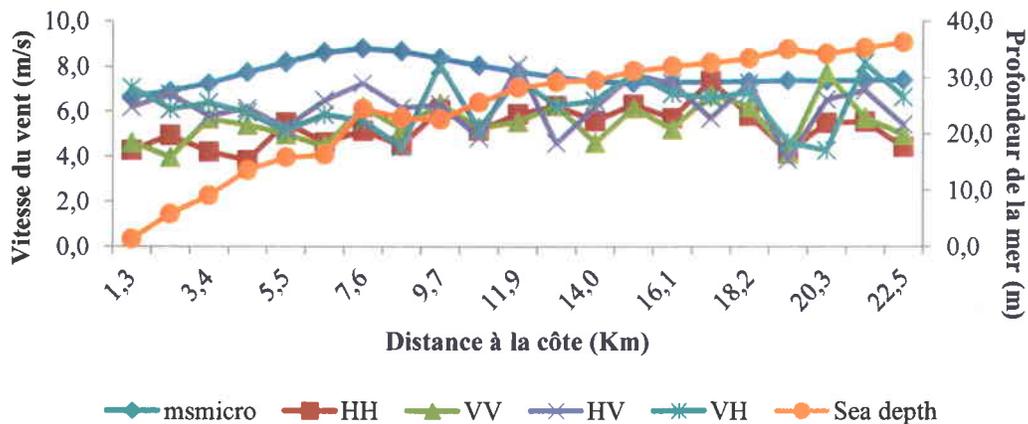


Figure 3.7: Profil P_3 de vitesse en mer (en m/s) à l'est de North Cape, extrait des quatre polarisations et comparé à celui du modèle MS Micro et de la bathymétrie.

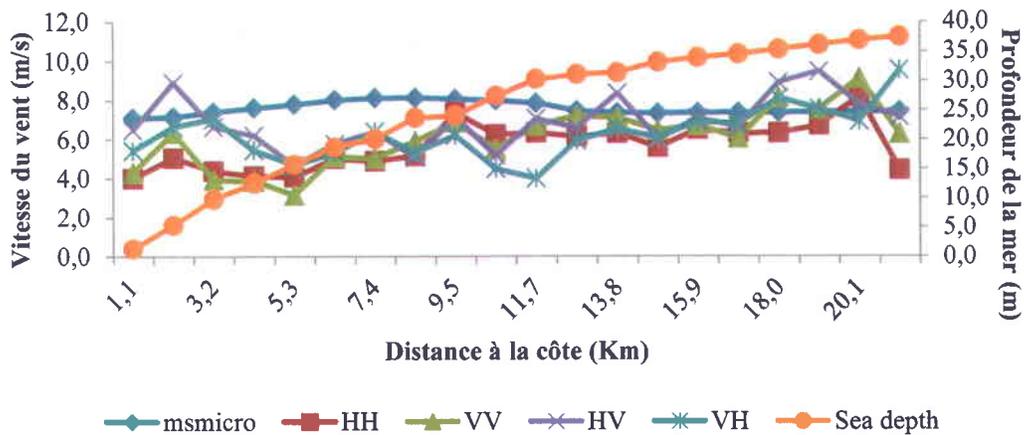


Figure 3.8: Profils P_4 de vitesse en mer (en m/s) à l'est de North Cape, extraits des quatre polarisations et comparés à celui du modèle MSMicro et de la bathymétrie.

Selon la variation de la pente de la topographie du fond marin le long des profils, un effet commun sur les vitesses RSO estimées est observable localement. Dans les premiers 10km de la côte, les vitesses calculées dans les quatre canaux chutent (Figure 3.5, Figure 3.6, Figure 3.7, Figure 3.8) lorsque la profondeur de l'eau diminue rapidement en fonction de la distance à la côte. Deux cas pourraient être imaginés pour ce fait en considérant le sens de l'écoulement du vent instantané local et l'emplacement des profils par rapport à l'île : 1) cette baisse serait causée par l'effet d'ombrage créé par l'île ; 2) le changement rapide de la profondeur de l'eau en se rapprochant de la côte crée un courant partiel à la surface de l'eau et provoque un lissage partiel des vagues à la surface entraînant une diminution de l'intensité du signal radar rétrodiffusé. Afin de pouvoir vérifier la cause de cette anomalie, d'autres profils ont été effectués sur la côte ouest de l'île ; là où la direction du vent est orientée depuis la mer vers la terre (absence d'ombrage du vent par rapport à l'île). Les valeurs de vitesse RSO présentées sur ce profil ont été calculées sur la scène SQ12 du 28 novembre 2012 à 18h05 heure locale.

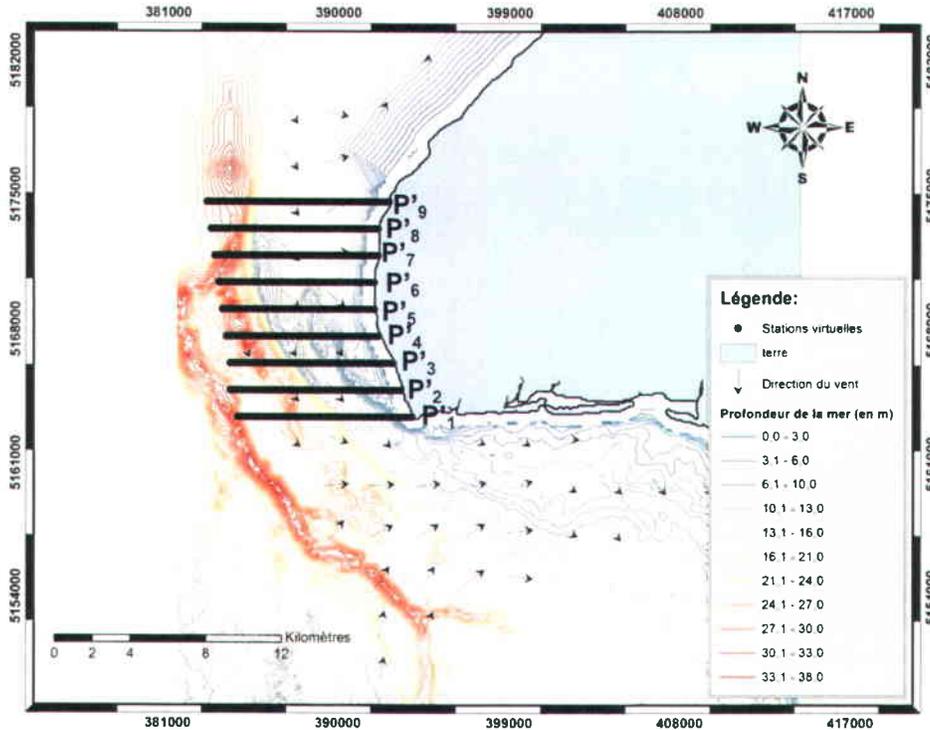


Figure 3.9: Carte présentant le profil P'1 de vitesse RSO en mer (en m/s) à l'ouest de West Point, Île-du-Prince-Édouard. Les isolignes représentent la profondeur de la mer locale.

Le profil des vitesses RSO calculées sur la partie ouest de West Point est présenté à la Figure 3.9. Seul le profil P'1 est présenté sur la Figure 3.10. Le reste (P'2, P'3, P'4, P'5, P'6, P'7, P'8 et P'9) sont affichés dans l'ANNEXE D. L'analyse de P'1 a montré qu'une baisse de la vitesse RSO est localisée à moins de 10 km de la ligne côtière. Cette zone se trouve au niveau des endroits (entre 3 km et 4 km de la côte) où la profondeur de l'eau diminue rapidement pour le cas de P'1. La même constatation a été observée sur les profils P1 et P2 qui ont été effectués à l'est de North Cape. Les profils P1 et P2 sont situés sur une zone à l'abri du vent ; ce qui n'est pas le cas pour P'1. Le deuxième cas annoncé dans le paragraphe précédent est ainsi retenu comme étant la cause de cette sous-estimation de la vitesse observée sur les profils présentés. C'est l'effet de la bathymétrie qui domine sur l'estimation des vitesses RSO dans le voisinage de North Cape.

La sous-estimation de la vitesse mesurée par RSO dans les premiers 10 km de la côte a été observée, lors de l'analyse des vitesses calculées sur les scènes ScanSAR-Étroites effectuée dans le chapitre 2. Les valeurs négatives du biais observé témoignent de cette sous-estimation de la vitesse.

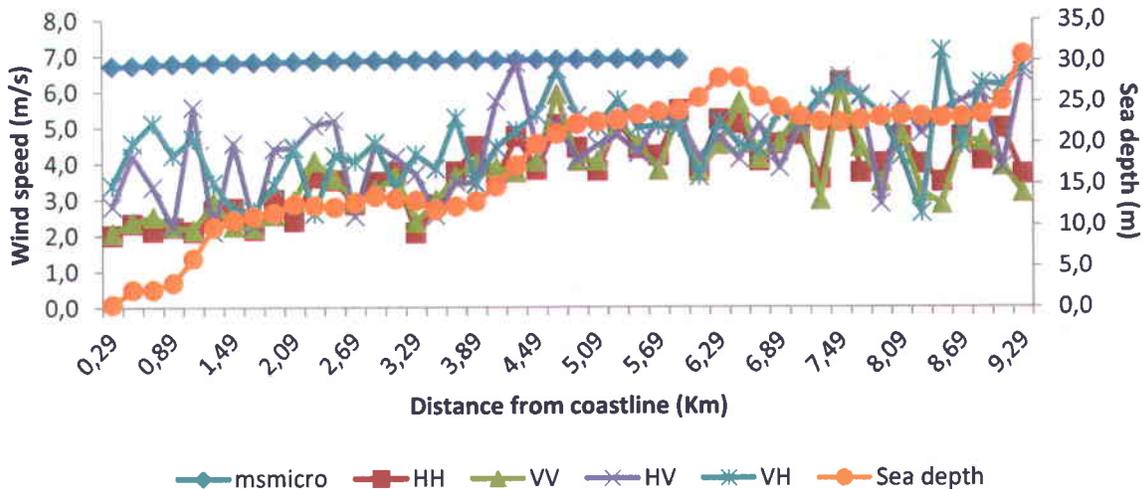


Figure 3.10: Profils P'1 de la vitesse RSO en mer (en m/s) à l'ouest de West Point, Île-du-Prince-Édouard, extraite des quatre polarisations et comparée à celui du modèle MS Micro en fonction de la profondeur de la mer locale.

La variabilité importante de la vitesse RSO observée dans les premiers 20 km dans cette étude est en accord avec les résultats de (Hasager *et al.*, 2011). D'après l'auteur, l'étude statistique de la ressource éolienne effectuée sur plus de 1000 cartes de vent, dérivée du satellite ENVISAT a montré que la vitesse moyenne du vent décroît à l'approche de la côte, soit dans une distance de 0 km à 20 km.

Selon l'analyse des résultats dans ce chapitre, la variation de la bathymétrie à l'approche de la côte aurait un apport dans les erreurs et biais cités par les auteurs dans le paragraphe ci-dessus. Les résultats obtenus sur les profils analysés confirment la sous-estimation des vitesses (estimées par CMOD5) lors de leur validation dans la section 2.5.6 du chapitre précédent.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, des vitesses de vent calculées dans le chapitre précédant ont été extraites le long de quelques profils linéaires tracés depuis la ligne côtière vers la mer. Ils sont contenus dans une zone tampon ayant une largeur environ 20 km et leurs orientations sont d'une part parallèle à la direction du vent local sur la scène (Figure 3.4) et d'autre part perpendiculaire à la direction du vent local (Figure 3.9). Les profils ont été

analysés en fonction de la variation de la profondeur vers la côte. Les vitesses mesurées dans les quatre canaux polarimétriques de RADARSAT-2 se rapprochent de la vitesse moyenne indiquée sur la carte de vitesse dans la région d'étude montrée par MS Micro ; une zone de faible vitesse a été localisée dans le détroit compris entre l'île et le Nouveau-Brunswick. Elle a été observée sur les cartes de vitesse calculées sur les scènes ScanSAR. Ceci montre que la vitesse du vent dans ce détroit est en général faible, car même les images prises instantanément par le radar montrent les mêmes résultats que la carte du modèle qui ne sont que des valeurs moyennes.

Il a été constaté que lorsque la profondeur de la mer diminue brusquement, les vitesses RSO calculées (dans les quatre canaux) sont plus faibles par rapport la moyenne locale. Ceci est observé sur les zones à moins de 10km de la côte. L'étirement des vagues de Bragg, à cause de la formation des vagues plus larges dues à l'effet de la diminution rapide du fond marin *in situ*, a été considéré comme la principale cause de cette sous-estimation des vitesses RSO. Lorsque la profondeur du fond marin ne présente pas de variation importante, les vitesses RSO estimées se stabilisent, mais restent inférieures à celles calculées à plus de 20km de la côte. Nos observations de vitesses RSO dans les premiers 10 km (avec CMOD5) concordent avec les résultats obtenus à partir d'images ERS-2 (Hasager *et al.*, 2005, Hasager *et al.*, 2006) utilisant le modèle CMOD4 et à partir d'images ENVISAT ASAR (Hasager *et al.*, 2011) utilisant le modèle CMOD5. L'hypothèse de considérer l'effet de la bathymétrie sur l'estimation de la vitesse du vent avec l'approche RSO proche des côtes a été vérifiée.

Une profondeur de la mer de 15m à 20m a été considérée comme seuil à partir de laquelle les vitesses RSO calculées sont comparables à celles calculées en mer loin de la côte (≥ 15 km dans notre cas d'étude).

CHAPITRE 4: CONCLUSION GÉNÉRALE

L'algorithme des gradients locaux a été utilisé dans l'extraction des directions du vent sur les scènes ScanSAR-Étroite et SQ de RADARSAT-2 dans lesquelles les stries de vents ont pu être détectées. L'ambiguïté sur l'orientation réelle de la direction a été éliminée avec la nouvelle approche proposée dans ce mémoire; une approche qui est basée sur l'utilisation des phases contenues dans les images polarimétriques RADARSAT-2 et une phase de référence déterminée selon trois méthodes différentes. La première méthode était le sujet d'une présentation par affiche (Ratsimbazafy *et al.*, 2013) lors du congrès de l'AQT. Dans cette méthode, la phase de référence a été déduite après un test d'efficacité des critères de correction appliquée sur les quatre canaux de l'image test (scène SQ du 04 novembre 2012 à 18h05 heure locale). Ainsi, une valeur de ϕ_{ref} unique est utilisée pour corriger l'ambiguïté. Dans la deuxième méthode, la phase de référence est formée par le négatif de la somme des valeurs absolues de deux phases issues de deux canaux différents. Dans la troisième méthode, la phase de référence est formée par une différence de deux phases provenant de deux canaux différents. Pour les deux dernières méthodes, la valeur de la phase de référence varie d'un pixel à l'autre, contrairement à la première méthode dans laquelle elle reste constante sur tous les pixels formant l'image. La phase de référence ϕ_{VV-HH} comparée à la phase ϕ_{HV} et la phase de référence ϕ_{VW-HV} comparée à la phase ϕ_{HH} ont donné des résultats satisfaisants sur l'élimination automatique de l'ambiguïté 180° sur les directions du vent calculées avec l'algorithme des Gradients Locaux.

Cette nouvelle approche se base sur l'hypothèse suivante : « les mouvements horizontaux de l'eau à la surface de la mer auraient un effet sur la différence de phase entre le signal radar incident et rétrodiffusé ». Cette hypothèse a pu être vérifiée à travers nos résultats lors de l'évaluation de la valeur de la phase de référence nécessaire pour corriger

l'ambiguïté 180°. Il a été constaté que les directions proches des côtes (là où les vitesses mesurées dans les canaux en polarisation croisée sont surestimées) sont les dernières à être corrigées (nécessitant une valeur de phase de référence inférieure par rapport à celles au large de l'océan) dans le processus.

La précision des directions calculées avec les gradients locaux et corrigés de l'ambiguïté autour de North Cape a été validée avec six séries d'images ScanSAR-Étroite RADARSAT-2 (correction manuelle pour le cas de ScanSAR) co-localisées avec la station de North Cape. La situation géographique de la station (pas d'orographie importante; située sur une pointe fine d'un triangle représenté par la pointe de l'île; située à moins de 200m de la ligne côtière) a permis d'utiliser les valeurs de directions enregistrées et colocalisées dans le temps avec l'acquisition des six images utilisées pour la validation. En éliminant les deux scènes les plus décalées dans le temps par rapport aux données à la station, la RMSE (22,5°) et le biais (1,88°) sont comparables à ceux trouvés dans la littérature. Les directions calculées ont été utilisées dans l'inversion du modèle CMOD5 pour calculer les modules du champ de vitesse.

Il a été constaté que la comparaison de notre méthode pour l'élimination de l'ambiguïté sur les directions du vent calculées ne peut pas se faire avec celle de Zhang *et al.* (2012). Les deux approches sont complètement différentes. Malgré cette différence, la phase de référence provenant de la combinaison VV-VH (c.-à-d. : ϕ_{VV-VH} correspondant à celle du PCC de Zhang *et al.* (2012) est parmi les phases de référence ayant de bonnes performances à l'élimination de l'ambiguïté sur la direction du vent. Il est à noter que même le PCC est un nombre complexe, son argument (sa phase) n'était pas utilisé dans l'approche de Zhang *et al.* (2012).

Les vitesses RSO ont été validées avec les données d'enregistrement du mât météorologique de North Cape. Le meilleur résultat obtenu (RMSE= 2,40 m/s; biais= -1,62 m/s) correspond aux échantillons de vitesse prise à 25 km de la station. Les résultats observés sur les échantillons situés à 10 km et à 1 km de la station montrent que la bathymétrie a un effet sur l'estimation des vitesses par l'approche RSO. L'hypothèse a été vérifiée par rapport à variation de la profondeur du fond marin. La vitesse est influencée par des paramètres locaux (déferlement des vagues; courant de marée; variation de la bathymétrie).

L'effet de la bathymétrie sur l'estimation des vitesses en région côtière avec les images RADARSAT-2 a été mis en évidence. Il a été observé que la variation brusque de la topographie sous-marine dans les premiers 20km à partir de la ligne côtière affecte la rugosité des vagues de Bragg à la surface locale et diminue l'intensité du signal rétrodiffusé et les vitesses estimées. Une valeur de la profondeur de la mer entre 15m à 20m a été considérée comme seuil au-dessus de laquelle le champ de vents local peut être caractérisé avec certitude par la technique RSO.

Au début de cette étude, nous avons prévu utiliser pour validation des mesures du vent de mâts réparties dans la partie nord de l'Île-du-Prince-Édouard (Lessard-Fontaine *et al.*, 2010a). Les images SQ polarimétriques commandées ont été ainsi réparties pour être colocalisées à ces stations. Vu que ces stations ont été fermées entre 2010, seules les données de la station permanente de North Cape ont pu être récupérées pour la validation des résultats. L'utilisation d'un nombre important d'images polarimétriques ou enregistrées en mode complexe colocalisée dans l'espace et dans le temps avec un mât est suggérée pour d'autres études à venir afin de pouvoir évaluer et tester l'efficacité de la nouvelle approche pour l'élimination de l'ambiguïté 180° sur la direction du vent présentée dans cette étude. Aussi, le modèle de Vachon *et al.* (2011) adapté aux données Standard Quad-Pol de RADARSAT-2 proposé dans ce travail est aussi à valider avec plus d'images polarimétriques et pour plus de valeurs de vitesse de vent différentes.

BIBLIOGRAPHIE

- Alpers W & Hennings I (1984) A theory of the imaging mechanism of underwater bottom topography by real and synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research* 89:10529-10546.
- Alpers W & Huang WG (2011) On the Discrimination of Radar Signatures of Atmospheric Gravity Waves and Oceanic Internal Waves on Synthetic Aperture Radar Images of the Sea Surface. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49(3):1114-1126.
- Atlas R, Hoffman RN, Leidner SM, Sienkiewicz J, Yu TW, Bloom SC, Brin E, Ardizzone J, Terry J, Bungato D & Jusem JC (2001) The effects of marine winds from scatterometer data on weather analysis and forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82(9):1965-1990.
- Beaucage P, Bernier M, Lafrance G & Choissard J (2008) Regional Mapping of the Offshore Wind Resource: Towards a Significant Contribution From Space-Borne Synthetic Aperture Radars. *Ieee J-Stars* 1(1):48-56.
- Beaucage P, Glazer A, Choissard J, Yu W, Bernier M, Benoit R & Lafrance G (2007) High-Resolution coastal wind assessment in a coastal environment using synthetic aperture radar satellite imagery and a numerical weather prediction model. *Canadian Journal of Remote Sensing* 33(5):368-377.
- Ben Ticha MB (2007) Fusion de données satellitaires pour la cartographie du potentiel éolien offshore.
- Benoit R, Desgagne M, Pellerin P, Pellerin S & Chartier Y (1997) The Canadian MC2: A Semi-Lagrangian, Semi-Implicit Wideband Atmospheric Model Suited for Finescale Process Studies and Simulation. *Monthly Weather Review* 125:2382 - 2415.
- Bergeron T, Bernier M, Chokmani K, Lessard-Fontaine A, Lafrance G & Beaucage P (2011) Wind Speed Estimation Using Polarimetric RADARSAT-2 Images: Finding the Best Polarization and Polarization Ratio. *Ieee J-Stars* 4(4):896-904.
- Born GH, Dunne JA & Lame DB (1979) Seasat Mission Overview., p 1405-1406.
- Buckreuss S, Werninghaus R & Pitz W (2009) The German satellite mission TerraSAR-X. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE* 24(11):4-9.
- Choissard J, Bernier M & Lafrance G (2003) RADARSAT-1 SAR scenes for wind power mapping in coastal area: Gulf of St-Lawrence case. *Igarss 2003: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vols I - VII, Proceedings*:2700-2702.
- Choissard J, Lafrance G & Bernier M (2004) Développement des techniques spatiales de cartographie du potentiel éolien offshore et côtier par imagerie RADARSAT-1 : Cas du golfe du St-Laurent. *La revue en sciences de l'environnement* 5(1).
- Christiansen M, Werner Alpers, and Martin Gade (2001) Simultaneous observations of rain cells over the ocean by the synthetic aperture radar aboard the ERS satellites and by surface-based weather radars. *Journal of Geophysical Research* 106(C3):4665 - 4677.
- Christiansen MB (2006) *Wind Energy Applications of Synthetic Aperture Radar*. (RISO).

- Christiansen MB, Koch W, Horstmann J, Hasager CB & Nielsen M (2006) Wind resource assessment from C-band SAR. *Remote Sensing of Environment* 105(1):68-81.
- Cooper AL, Chubb SR, Askari F, Valenzuela GR, Bennett JR & Keller WC (1994) Radar surface signatures for the 2-dimensional tidal circulation over Phelps Bank, Nantucket Shoals - A comparison between theory and experiment. *J Geophys Res-Oceans* 99(C4):7865-7883.
- Covello F, Battazza F, Coletta A, Lopinto E, Pietranera L, Valentini G & Zoffoli S (2008) COSMO-SkyMed mission status. p 710918-710918-710915.
- Danielson RE, Dowd M & Ritchie H (2008) Objective analysis of marine winds with the benefit of the Radarsat-1 synthetic aperture radar: A nonlinear regression framework. *J Geophys Res-Oceans* 113(C5):15.
- Dautrevaux É (2012) *Modélisation de l'effet de la rugosité variable dans la prévision microéchelle du vent de basse couche*. (École de technologie supérieure, École de technologie supérieure, Montréal, 2012., Montréal). 1 ressource en ligne (xv, 74 p.) p. "<http://espace.etsmtl.ca/id/eprint/1121>"
- Fairall CW, Bradley EF, Rogers DP, Edison JB & Young GS (1996) Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment.
- Fan K, Huang W, He M, Fu B, Zhang B & Chen X (2008) Depth inversion in costal water based on SAR image of waves. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology* 26(4):434 - 439.
- Fetterer F, Gineris D & Wackerman CC (1998) Validating a scatterometer wind algorithm for ERS-1 SAR. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 36(2):479-492.
- Fichaux N & Ranchin T (2002) Combined extraction of high spatial resolution wind speed and wind direction from SAR images: A new approach using wavelet transform. *Canadian Journal of Remote Sensing* 28(3):510-516.
- Forster RR, Isacks BL & Das SB (1996) Shuttle imaging radar (SIR-C/X-SAR) reveals near-surface properties of the South Patagonian Icefield. *Journal of Geophysical Research* 101(E10):23169.
- Furevik BR & Espedal HA (2002a) Wind energy mapping using synthetic aperture radar.
- Furevik BR, Johannessen OM & Sandvik AD (2002b) SAR-retrieved wind in polar regions - Comparison with in situ data and atmospheric model output. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(8):1720-1732.
- Gaddis L, Mouginis-Mark P, Singer R & Kaupp V (1989) Geologic analyses of Shuttle Imaging Radar (SIR-B) data of Kilauea Volcano, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin* 101:317-332.
- Gade M, Alpers W, Bao MQ & Huhnerfuss H (1996) Measurements of the radar backscattering over different oceanic surface films during the SIR-C/X-SAR campaigns. *Igarss '96 - 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium: Remote Sensing for a Sustainable Future, Vols I - Iv*:860-862.
- Gerling TW (1986) Structure of the surface wind field from the Seasat SAR. *Journal of Geophysical Research* 91(C2):2308.

- Hasager CB, Badger M, Peña A, Larsén XG & Bingöl F (2011) SAR-Based Wind Resource Statistics in the Baltic Sea. *Remote Sensing* 3(12):117-144.
- Hasager CB, Barthelmie RJ, Christiansen MB, Nielsen M & Pryor SC (2006) Quantifying offshore wind resources from satellite wind maps: study area the North Sea. *Wind Energy* 9(1-2):63-74.
- Hasager CB, Nielsen M, Astrup P, Barthelmie R, Dellwik E, Jensen NO, Jørgensen BH, Pryor SC, Rathmann O & Furevik BR (2005) Offshore wind resource estimation from satellite SAR wind field maps. *Wind Energy* 8(4):403-419.
- He Y, Perrie W, Zou Q & Vachon PW (2005) A NewWind Vector Algorithm for C-band SAR. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING* 43(7).
- Hersbach H (2010) Comparison of C-Band Scatterometer CMOD5.N Equivalent Neutral Winds with ECMWF. *J Atmos Ocean Tech* 27(4):721-736.
- Hersbach H, Stoffelen A & de Haan S (2007) An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5. *Journal of Geophysical Research* 112(C3).
- Hogan TF & Rosmond TE (1991) The Description of the Navy Operational Global Atmospheric Prediction System's Spectral Forecast Model. *Monthly Weather Review* 119(8):1786-1815.
- Holt B (2004) SAR Imaging of the Ocean Surface. *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual*, Jackson CR & Apel JR (Édit.) National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, District of Columbia, USA. p 25-79.
- Horstmann J & Koch W (2005) Measurement of Ocean Surface Winds Using Synthetic Aperture Radars. *IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING* 30(3).
- Horstmann J & Koch W (2008) High Resolution Wind Field Retrieval from Synthetic Aperture Radar: North Sea Examples.
- Horstmann J, Koch W & Lehner S (2002) High resolution wind fields retrieved from SAR in comparison to numerical models. (Toronto, Ont., p 1877-1879.
- Horstmann J, Koch W, Lehner S & Tonboe R (2000a) Mapping of mesoscale wind fields using RADARSAT-1 ScanSAR images. *Oceans 2000 Mts/Ieee - Where Marine Science and Technology Meet, Vols 1-3, Conference Proceedings*:1321-1327.
- Horstmann J, Koch W, Lehner S & Tonboe R (2000b) Wind retrieval over the ocean using synthetic aperture radar with C-band HH polarization. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38(5):2122-2131.
- Horstmann J, Schiller H, Schulz-Stellenfleth J & Lehner S (2003) Global wind speed retrieval from SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(10):2277-2286.
- Hwang PA, Zhang B & Perrie W (2010a) Depolarized radar return for breaking wave measurement and hurricane wind retrieval. *Geophysical Research Letters* 37(1).
- Hwang PA, Zhang B, Toporkov JV & Perrie W (2010b) Comparison of composite Bragg theory and quad-polarization radar backscatter from RADARSAT-2: With applications to wave breaking and high wind retrieval. *Journal of Geophysical Research* 115(C8).
- Isoguchi O & Shimada M (2009) An L-band ocean geophysical model function derived from PALSAR. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 47(7):1925-1936.

- Jackson PS & Hunt JCR (1975) TURBULENT WIND FLOW OVER A LOW HILL. *Q J Roy Meteor Soc* 101(430).
- Jacob D & Podzun R (1997) Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorol Atmos Phys* 63(1-2):119-129.
- Kara AB, Wallcraft AJ, Barron CN, Hurlburt HE & Bourassa MA (2008) Accuracy of 10 m winds from satellites and NWP products near land-sea boundaries. *Journal of Geophysical Research* 113(C10).
- Kara AB, Wallcraft AJ & Hurlburt HE (2007) A Correction for Land Contamination of Atmospheric Variables near Land-Sea Boundaries*. *Journal of physical oceanography* 37(4):803-818.
- Kerbaol V, Chapron B & Vachon PW (1998) Analysis of ERS-1/2 synthetic aperture radar wave mode images. *J Geophys Res-Oceans* 103(C4):7833-7846.
- Kim DJ & Moon WM (2002) Estimation of sea surface wind vector using RADARSAT data. *Remote Sensing of Environment* 80(1):55-64.
- Koch W (2004) Directional analysis of SAR images aiming at wind direction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42(4):702-710.
- Koch W & Feser F (2006) Relationship between SAR-Derived Wind Vectors and Wind at 10-m Height Represented by a Mesoscale Model.
- Lee JS & Pottier E (2009) *Polarimetric radar imaging: from basics to applications*. CRC,
- Lehner S, Horstmann J, Koch W & Rosenthal W (1998) Mesoscale wind measurements using recalibrated ERS SAR images. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* 103(C4):7847-7856.
- Lessard-Fontaine A, Bergeron T, Bernier M, Chockmani K & Lafrance G (2010a) Prince Edward Island Wind Assessment. *Québec, INRS - Centre Eau Terre Environnement* (1204).
- Lessard-Fontaine A, BERNIER M, CHOKMANI K, LAFRANCE G & EL ADLOUNI S (2010b) Estimation du potentiel éolien en haute mer et en région côtière par l'utilisation conjointe de données satellitaires d'un radar à synthèse d'ouverture et d'un diffusiomètre. *IGARSS'10*.
- Liu WT, Katsaros KB & Businger JA (1978) Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface. *Journal of the atmospheric sciences* 36(476):1722-1735.
- Liu Y & Pierson Jr WJ (1994) Comparisons of scatterometer models for the AMI on ERS-1: the possibility of systematic azimuth angle biases of wind speed and direction. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING* 32(3):626-635.
- Loescher KA, Young GS, Colle BA & Winstead NS (2006) Climatology of barrier jets along the Alaskan coast. Part I: Spatial and temporal distributions. *Monthly Weather Review* 134(2):437-453.
- Long A (1985) Towards a C-band radar sea echo model for the ERS-1 scatterometer. 29-34.
- Mason PJ & Sykes RI (1979) Flow over an Isolated Hill of Moderate Slope. *Q J Roy Meteor Soc* 105(444):383-395.

- Migliaccio M. & Reppucci A (2006) A Review of Sea Wind Vector Retrievals by means of Microwave Remote Sensing. *Proc. European Microwave Association* 2:136-140.
- Monaldo FM, Thompson DR, Beal RC, Pichel WG & Clemente-Colón P (2001) Comparison of SAR-derived wind speed with model predictions and ocean buoy measurements. *IEEE Transaction on Geoscience and remote sensing* 39(12):2587-2600.
- Moon WM, Staples G, Kim DJ, Park SE & Park KA (2010) RADARSAT-2 and Coastal Applications: Surface Wind, Waterline, and Intertidal Flat Roughness. *P IEEE* 98(5):800-815.
- Morena L, James K & Beck J (2004) An introduction to the RADARSAT-2 mission. *Canadian Journal of Remote Sensing* 30(3):221-234.
- Mott H (2006) *Remote sensing with polarimetric radar*. John Wiley & Sons,
- Mouche A, Hauser D, Kudryavtsev V & Daloze J (2004) MULTI-POLARISATION OCEAN RADAR CROSS-SECTION FROM ENVISAT ASAR OBSERVATIONS, AIRBORNE POLARIMETRIC RADAR MEASUREMENTS AND EMPIRICAL OR SEMI-EMPIRICAL MODELS. *Proc. of the 2004 Envisat & ERSsymposium, CD-rom* 373.
- Mourad PD & Walter BA (1996) Viewing a cold air outbreak using satellite-based synthetic aperture radar and advanced very high resolution radiometer imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* 101(C7):16391-16400.
- Nirchio F (2013) XMOD2 - An improved geophysical model function to retrieve sea surface wind fields from Cosmo-SkyMed X-band data. *European Journal of Remote Sensing* 10.5721/EuJRS20134634:583-595.
- Pinard JDJP, Benoit R & Yu W (2005) A WEST wind climate simulation of the mountainous Yukon. *Atmosphere - Ocean* 43(3):259-282.
- Portabella Arnús M (2002) *Wind field retrieval from satellite radar systems*. (University of Barcelona).
- Portabella M, Stoffelen A & Johannessen JA (2002) Toward an optimal inversion method for synthetic aperture radar wind retrieval. *Journal of Geophysical Research* 107(C8).
- Quilfen Y, Chapron B, Elfouhaily T, Katsaros K & Tournadre J (1998) Observation of tropical cyclones by high-resolution scatterometry. *Journal of Geophysical Research* 103(C4):7767.
- R. K. Moore AM, Y. Fang, B. Beh, and A. Ahamad (1997) Rain Measurement with SIR-C X-SAR. *ELSEVIER*.
- Ratsimbazafy T & Bernier M (2013) Élimination de l'ambiguïté 180° sur les directions du vent en mer estimées sur des imageries Radar à Synthèse d'Ouverture de RADARSAT-2. in *15ème Congrès de l'Association Québécois de Télédétection, Rimouski, Québec*.
- Ricard B (2005) *Relations statistiques entre les mesures de vent in situ et les estimations de vent en région côtière obtenus par imagerie RSO de RADARSAT-1*. Maître ès sciences (M.Sc.) (Université du Québec).
- Ricard B, Bernier M & Lafrance G (2006) Relations statistiques entre les mesures de vent in situ et les estimations de vents en région côtière obtenues par imagerie RSO de RADARSAT-1. *Can. J. Remote Sensing* 32(2):65 - 73.

- Rosenqvist A, Shimada M, Ito N & Watanabe M (2007) ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global-Scale Monitoring of the Environment. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 45(11):3307-3316.
- Samuel W, McCandless J & Jackson CR (2004) Principle of Synthetic Aperture Radar. *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual*, Jackson CR & Apel JR (Édit.) National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, District of Columbia, USA. p 1-23.
- Schulz-Stellenfleth J, Lehner S & Horstmann J (2000) Using ERS-2 wave mode cross spectra to simulate ENVISAT ASAR ocean wave retrieval. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International.2000*, p 272-274 vol.271.
- Shepard D (1968) A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference*. ACM, p 517-524.
- Shimada T, Kawamura H & Shimada M (2003) An L-band geophysical model function for SAR wind retrieval using JERS-1 SAR. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 41(3):518-531.
- Shimada T, Kawamura H, Shimada M, Watabe I & Iwasaki SI (2004) Evaluation of JERS-1 SAR images from a coastal wind retrieval point of view. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42(3):491-500.
- Slade B (2009) RADARSAT-2 product description. (Dettwiler and Associates, MacDonals).
- Soisuvarn S, Jelenak Z, Chang PS, Alsweiss SO & Zhu Q (2013) CMOD5.H - A High Wind Geophysical Model Function for C-Band Vertically Polarized Satellite Scatterometer Measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 51(6):3744-3760.
- Stoffelen A (1998) *Scatterometry - De scatterometer*. Thèse de Doctorat (Université d'Utrecht, Pays-Bas). 209 p
- Stoffelen A & Anderson D (1997) Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4. *Journal of Geophysical Research* 102(C3):5767-5780.
- Takeyama Y, Ohsawa T, Kozai K, Hasager C & Badger M (2013) Comparison of Geophysical Model Functions for SAR Wind Speed Retrieval in Japanese Coastal Waters. *Remote Sensing* 5(4):1956-1973.
- Tang WQ, Liu WT & Stiles BW (2004) Evaluations of high-resolution ocean surface vector winds measured by QuikSCAT scatterometer in coastal regions. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42(8):1762-1769.
- Taylor P, Walmsley J & Salmon J (1983) A simple model of neutrally stratified boundary-layer flow over real terrain incorporating wavenumber-dependent scaling. *Boundary-Layer Meteorology* 26(2):169-189.
- Thompson DR & Beal RC (2000) Mapping high-resolution wind fields using synthetic aperture radar. *J Hopkins Apl Tech D* 21(1):58-67.
- Thompson DR, Elfouhaily TM & Chapron B (1999) Polarization ratio for microwave backscattering from the ocean surface at low to moderate incidence angles. *Proc. IGRASS'99* 3:1671-1673.
- Toutin T (2004) Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *Int J Remote Sens* 25(10):1893-1924.

- Ufermann S & Romeiser R (1999a) A new interpretation of multifrequency/multipolarization radar signatures of the Gulf Stream front. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* 104(C11):25697-25705.
- Ufermann S & Romeiser R (1999b) Numerical study on signatures of atmospheric convective cells in radar images of the ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* 104(C11):25707-25719.
- Unal CMH, Snoeij P & Swart PJF (1991) The polarization-dependent relation between radar backscatter from the ocean surface and surface wind vector at frequencies between 1 and 18 GHz. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 29(4):621-626.
- Vachon PW, Adlakha P, Edel H, Henschel M, Ramsay B, Flett D, Rey M, Staples G & Thomas S (2000a) Canadian progress toward marine and coastal applications of synthetic aperture radar. *J Hopkins Apl Tech D* 21(1):33-40.
- Vachon PW & Dobson FW (1996) Validation of wind vector retrieval from ERS-1 SAR images over the ocean. *Global Atmosphere and Ocean System* 5(2):177-187.
- Vachon PW & Dobson FW (2000b) Wind retrieval from RADARSAT SAR images: Selection of a suitable C-band HH polarization wind retrieval model. *Canadian Journal of Remote Sensing* 26(4):306-313.
- Vachon PW, Gray A, Livingstone C & Luscombe A (1997) Adaptive compensation of RADARSAT SAR analogue-to-digital converter saturation power loss. *Geomatics in Era of RADARSAT*:27-30.
- Vachon PW, Johannessen JA & Browne DP (1994a) Ers-1 Sar Images of Atmospheric Gravity-Waves. *Igarss '94 - 1994 International Geoscience and Remote Sensing Symposium Volumes 1-4*:2026-2028.
- Vachon PW, Johannessen OM & Johannessen JA (1994b) An Ers-1 Synthetic-Aperture-Radar Image of Atmospheric Lee Waves. *J Geophys Res-Oceans* 99(C11):22483-22490.
- Vachon PW & Wolfe J (2011) C-Band Cross-Polarization Wind Speed Retrieval. *Ieee Geosci Remote S* 8(3):456-459.
- Valenzuela GR (1978) Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves—A review. *Boundary-Layer Meteorology* 13(1):61-85.
- Wallcraft AJ, Kara AB, Barron CN, Metzger EJ, Pauley RL & Bourassa MA (2009) Comparisons of monthly mean 10 m wind speeds from satellites and NWP products over the global ocean. *Journal of Geophysical Research* 114(D16).
- Walmsley J & Padro J (1990) Shear stress results from a mixed spectral finite-difference model: Application to the Askervein Hill project data. *Boundary-Layer Meteorology* 51(1-2):169-177.
- Walmsley J, Salmon JR & Taylor PA (1982) On the application of a model of boundary-layer flow over low hills to real terrain. *Boundary-Layer Meteorology* 23(1):17-46.
- Walmsley JL, Taylor PA & Keith T (1986) A simple model of neutrally stratified boundary-layer flow over complex terrain with surface-roughness modulations (MS3DJH/3R). *Boundary-Layer Meteorology* 36(1-2):157-186.

- Wessel P & Smith WHF (1996) A global self-consistent hierarchical high-resolutions shoreline database. *Journal of geophysical researche* 101(B4): 8741-8743.
- Winstead NS, Young GS & Babin SM (1998) Inferring wind direction from the organization of mesoscale atmospheric signatures in RADARSAT imagery. *Igarss '98 - 1998 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Proceedings Vols 1-5*:1159-1161.
- Wolters L, Cats G, Gustafsson N & Wilhelmsson T (1995) Data-parallel numerical methods in a weather forecast model. *Appl Numer Math* 19(1-2):159-171.
- Yu W, Benoit R, Girard C, Glazer A, Lemarquis D, Salmon JR & Pinard JP (2006) Wind Energy Simulation Toolkit (WEST): A wind mapping system for use by the wind-energy industry. *Wind Engineering* 30(1):15-33.
- Zecchetto S, De Biasio F & Trivero P (2007) Computation of wind direction from SAR images without external a priori information. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International*. 23-28 July 2007), p 3277-3280.
- Zhang B, Perrie W, Vachon PW, Xiaofeng L, Pichel WG, Jie G & Yijun H (2012) Ocean Vector Winds Retrieval From C-Band Fully Polarimetric SAR Measurements. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 50(11):4252-4261.

ANNEXE A : Données de validation de la direction

Tableau 4.1: Échantillons de données sur les images ScanSAR-Étroites utilisées dans la validation des directions.

scen e	date	distance à la station	Direction RSO (en dégré)	Direction RSO moyenne (en dégré)	Directions mesurées à la station (en dégré)	Heure d'acquisition de la scene	Heure de l'enregistrement de données à la station
SCN B	20/05/20 12	5km à l'ouest	165.0	153,0	140	18:04	18:00
		5km nord	166.0				
		5km est	128.0				
SCN B	06/06/20 12	6km nord	22.0	16,3	30	18:09	18:00
		4.5km à l'ouest	20.0				
		5.5km est	7.0				
SCN B	13/06/20 12	5km à l'ouest	124.0	141,0	160	18:04	18:00
		5km nord	159.0				
		5km est	140.0				
SCN B	24/07/20 12	4km à l'ouest	214	231	200	18:09	18:00
		6km au nord	244				
		7km au north est	235				
SCN A	08/11/20 12	5km à l'ouest	81	76,3	50	06:27	06:00
		3km au nord	87				
		6km au north est	61				
SCN B	29/10/20 12	6km au nord	25	30,5	80	06:19	06:00
		8km au north est	36.5				
		3km à l'ouest	30				

ANNEXE B : Champ de vent calculé sur les scènes ScanSAR-Étroite

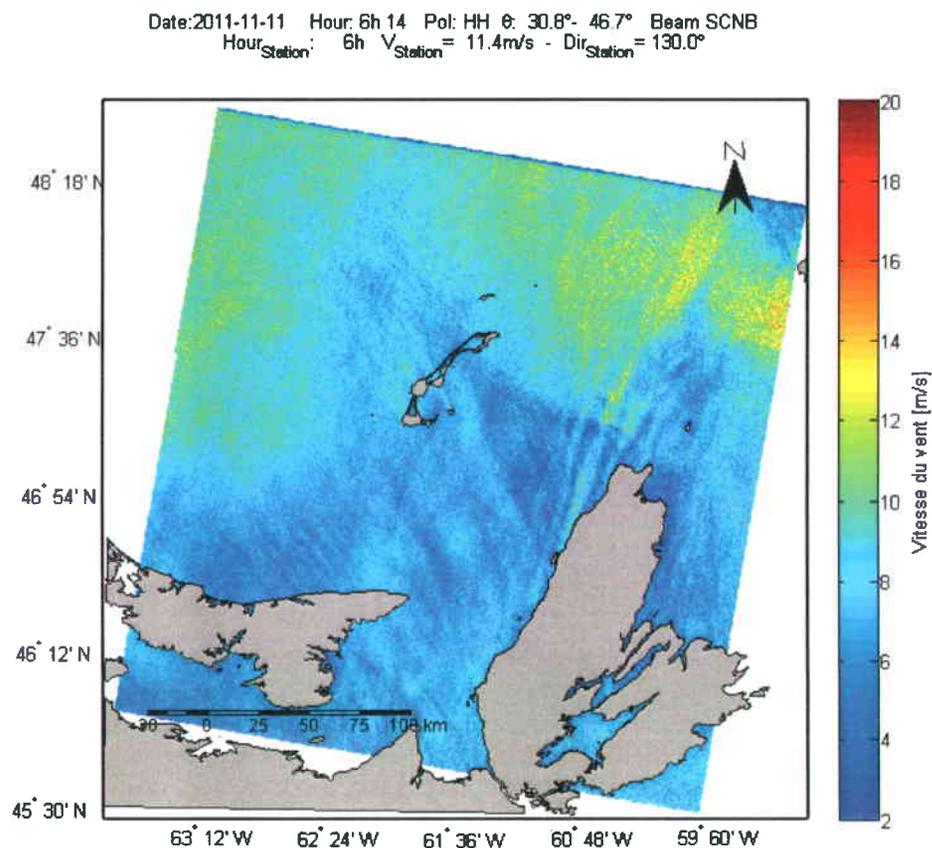


Figure 4.1: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 11 novembre 2011. Les directions (avec ambiguïté 180°) du vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s).

Date:2012-05-20 Hour: 18h 04 Pol: HH θ : 30.6° - 46.6° Beam SCNB
Hour_{Station}: 18h V_{Station} = 6.1m/s - Dir_{Station} = 140.0°

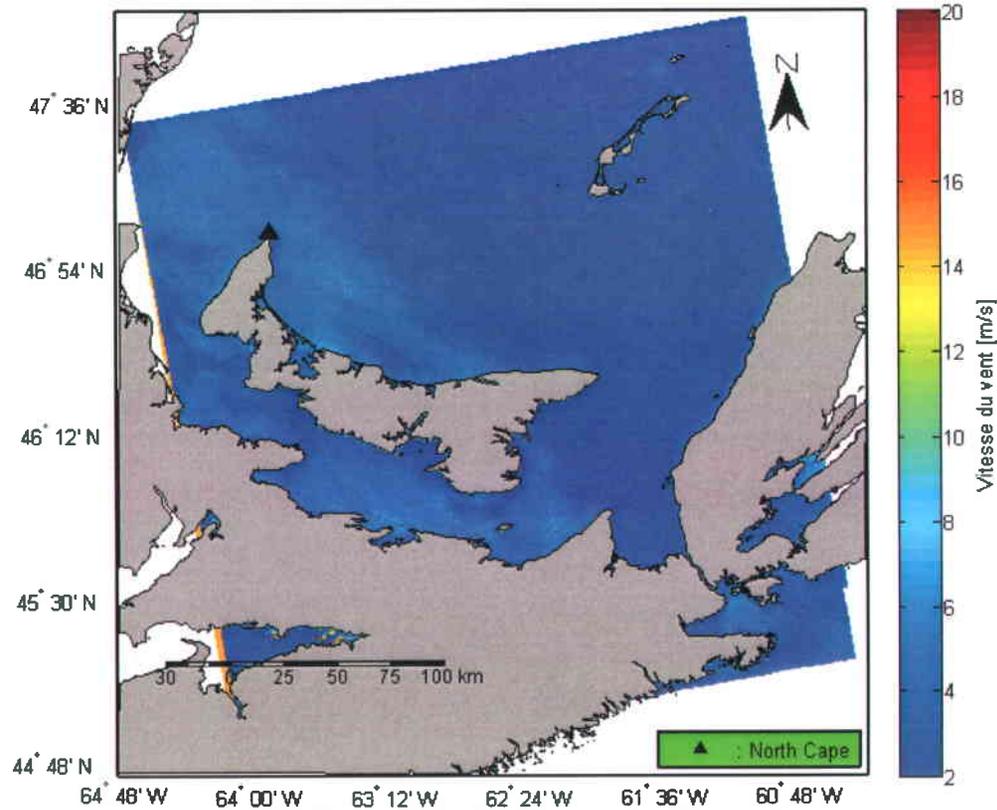


Figure 4.2: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 20 mai 2012. Les directions (avec ambiguïté 180°) du vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s).

Date:2012-05-31 Hour: 6h 23 Pol: HH θ 30.8°- 46.6° Beam SCNB
Hour_{Station}: 6h V_{Station} = 3.1m/s - Dir_{Station} = 40.0°

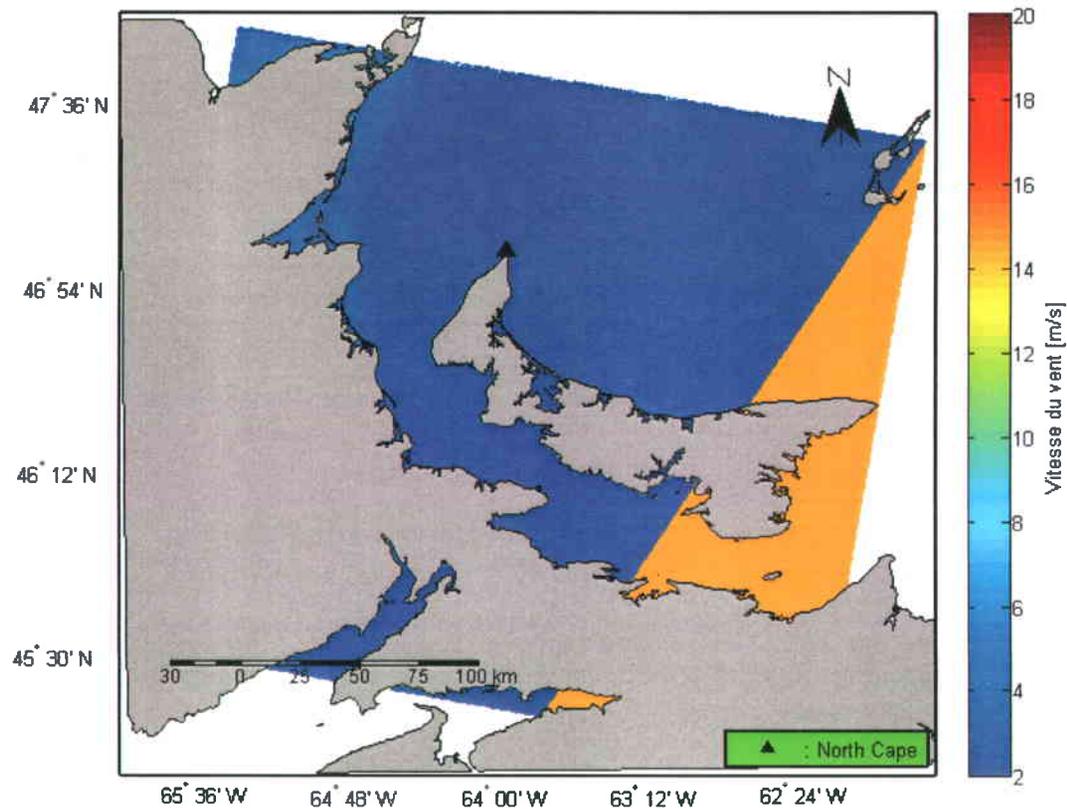


Figure 4.3: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 31 mai 2012. Les directions (avec ambiguïté 180°) du vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s).

Date:2012-06-06 Hour: 18h 09 Pol: HH θ : 30.7°- 46.5° Beam SCNB
Hour_{Station}: 18h V_{Station} = 9.7m/s - Dir_{Station} = 30.0°

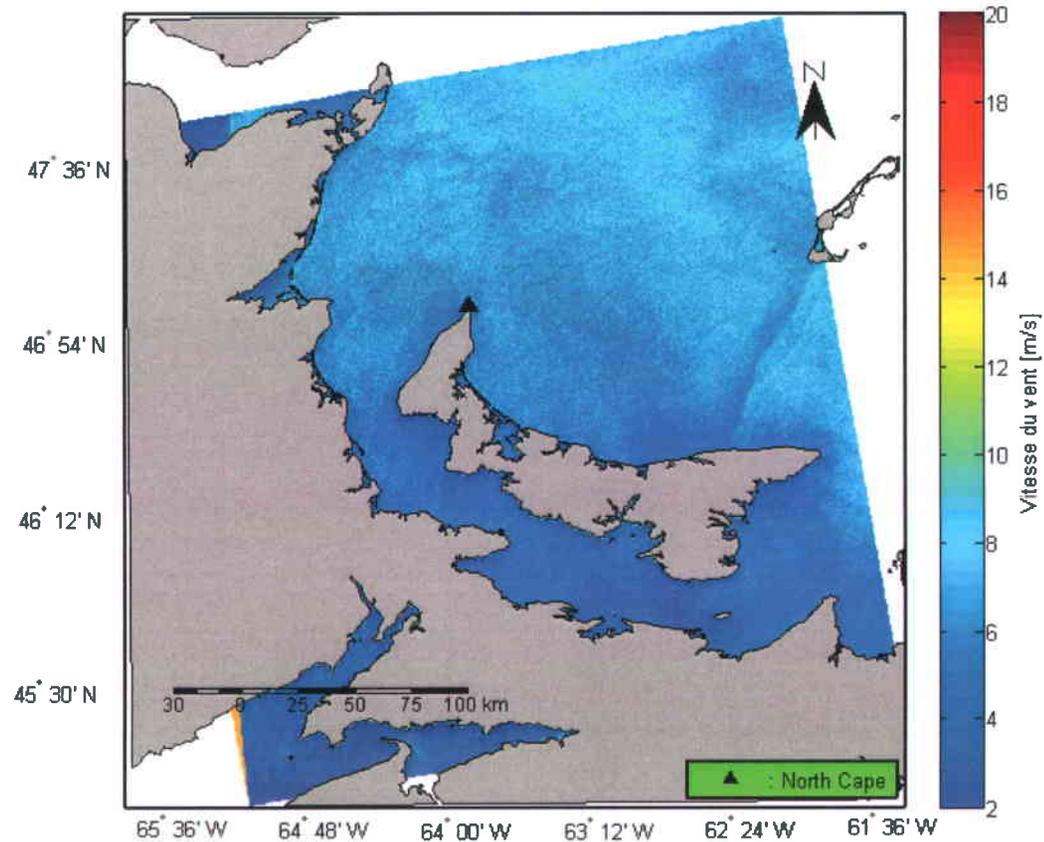


Figure 4.4: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 06 juin 2012. Les directions (avec ambiguïté 180°) des vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s).

Date:2012-06-13 Hour: 18h 04 Pol: HH θ 30.6°- 46.6° Beam SCNB
Hour_{Station}: 18h V_{Station} = 2.5m/s - Dir_{Station} = 160.0°

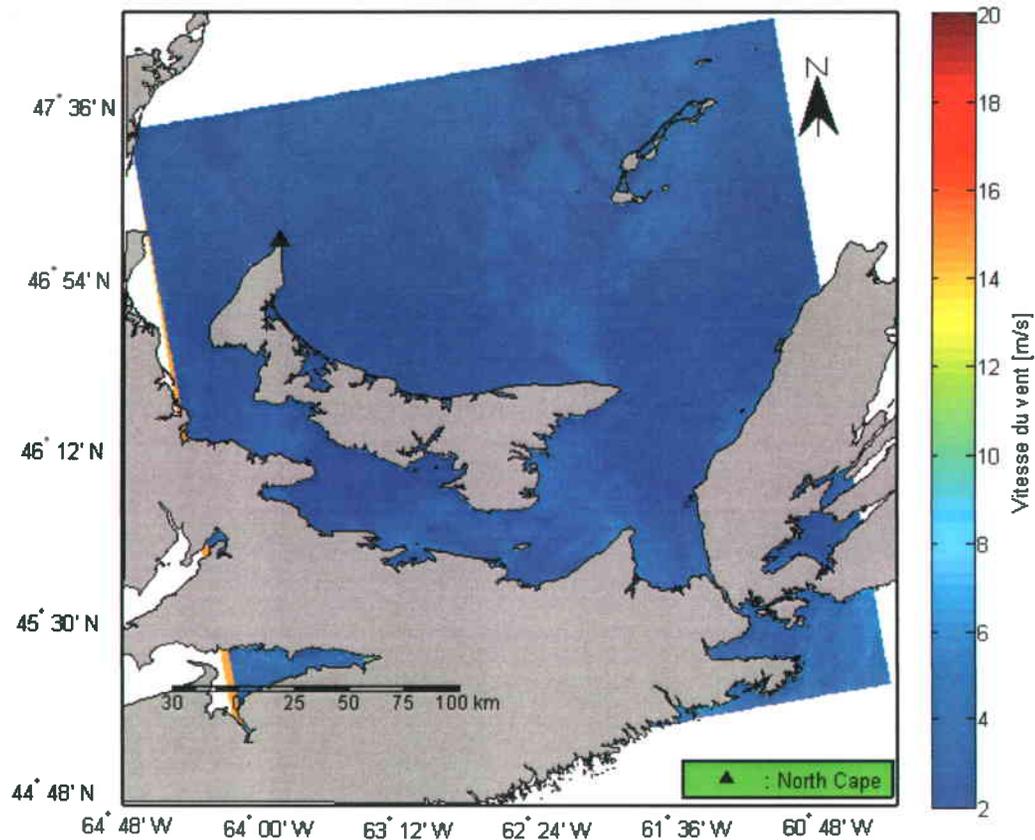


Figure 4.5: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 13 juin 2012. Les directions (avec ambiguïté 180°) du vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s).

Date:2012-07-14 Hour: 18h 00 Pol: HH θ : 30.6°- 46.5° Beam SCNB
Hour_{Station}: 18h V_{Station} = 5.6m/s - Dir_{Station} = 40.0°

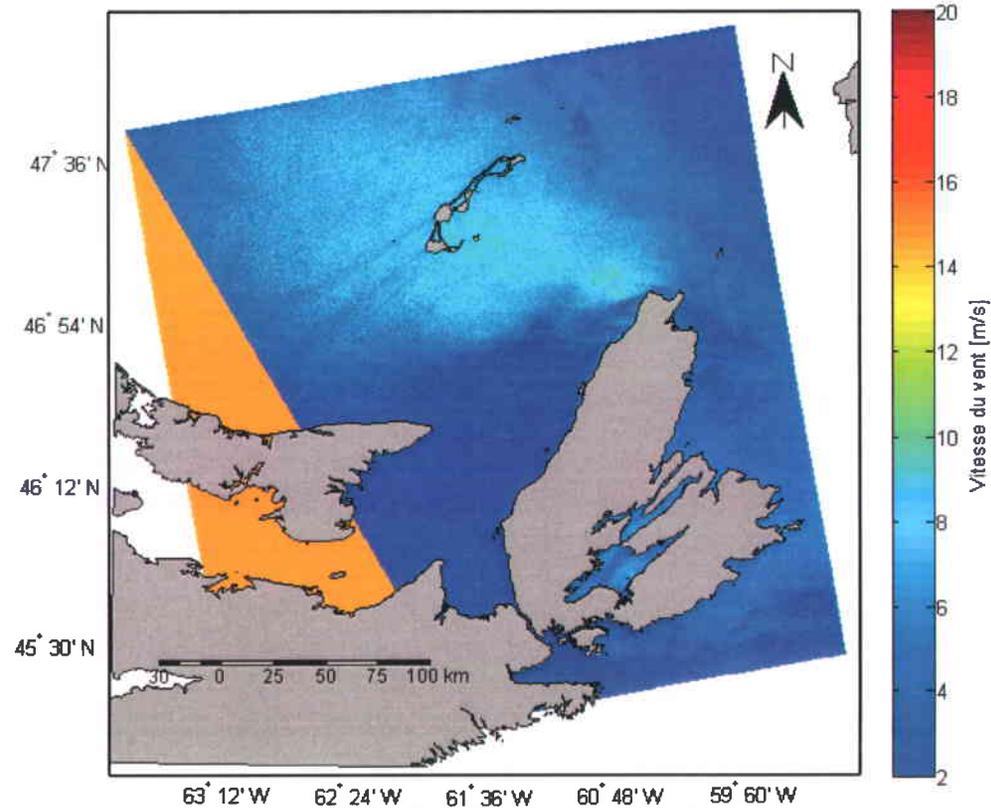


Figure 4.6: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 14 juillet 2012. Les directions (avec ambiguïté 180°) des vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s).

Date: 2012-07-24 Hour: 18h 09 Pol: HH θ : 30.7° - 46.5° Beam SCNB
Hour_{Station}: 18h V_{Station}: 3.1 m/s - Dir_{Station}: 200.0°

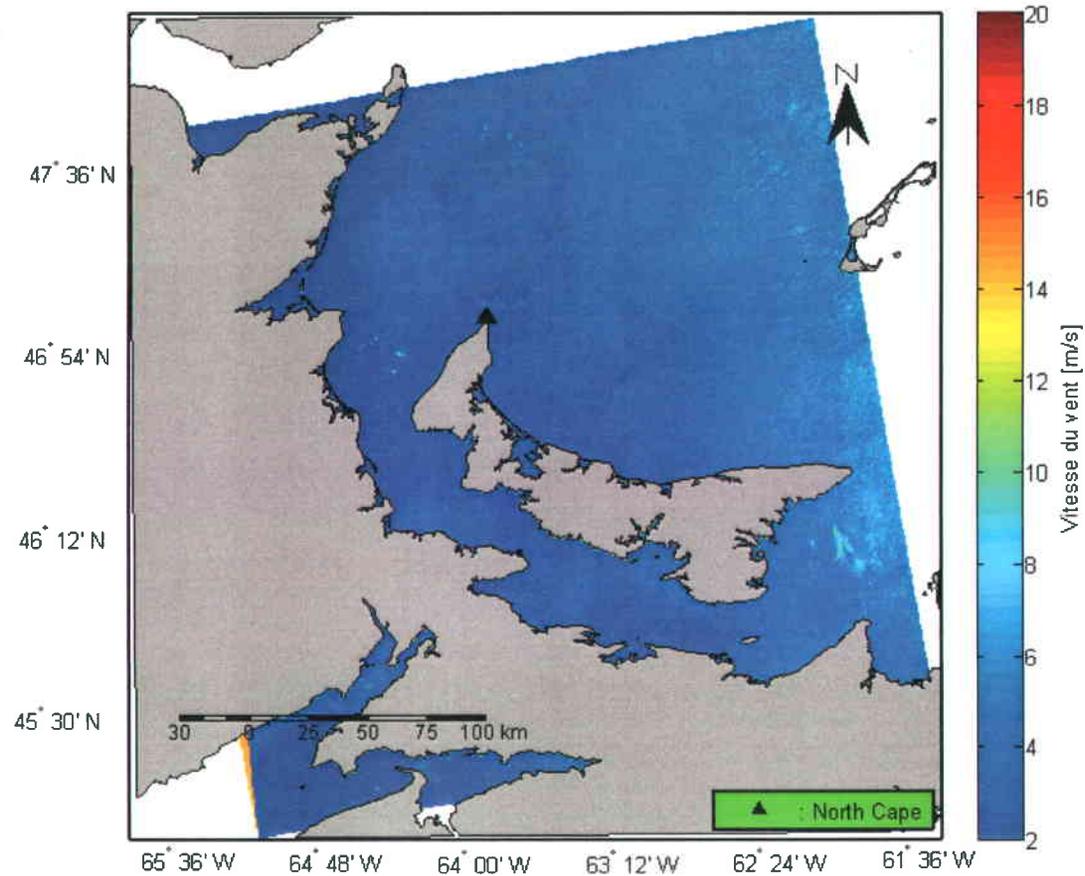


Figure 4.7: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 24 juillet 2012. Les directions (avec ambiguïté 180°) des vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s).

Date:2012-11-08 Hour: 6h 27 Pol: HH θ : 19.6° - 39.6° Beam SCNA
Hour_{Station}: 6h $V_{Station}$ = 15.8m/s - Dir_{Station} = 50.0°

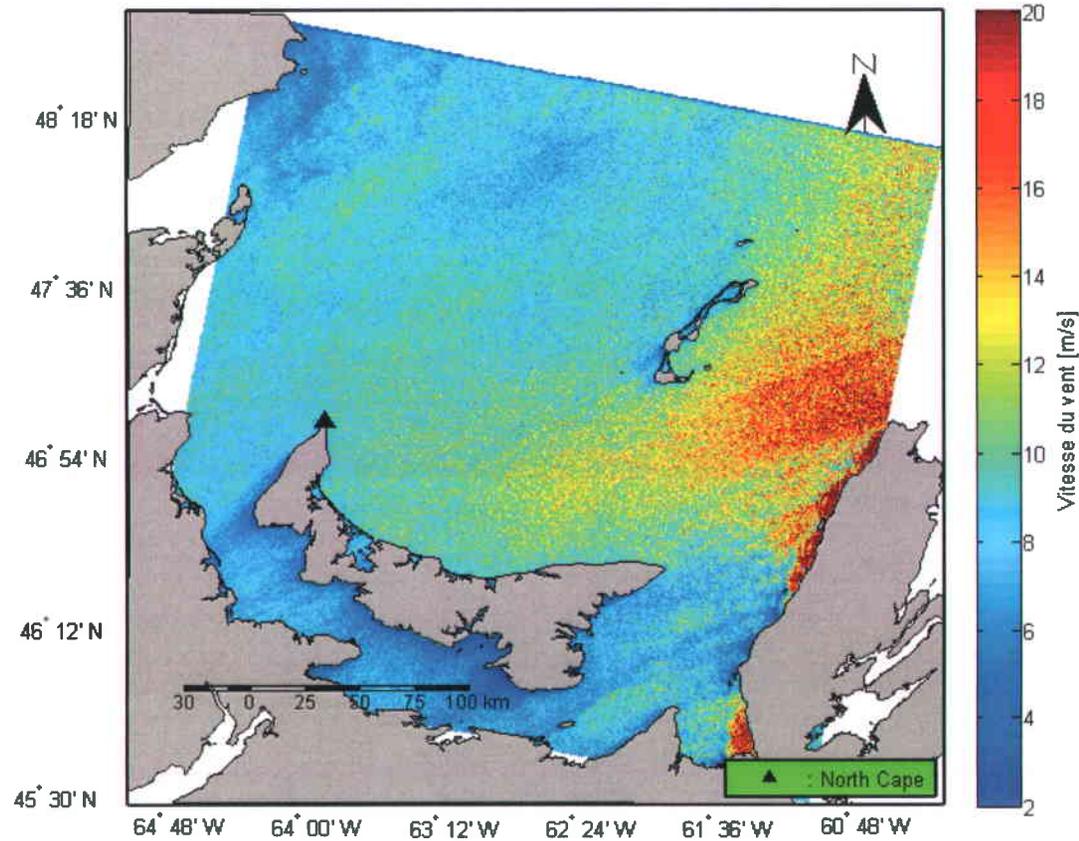


Figure 4.8: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 8 novembre 2012. Les directions (avec ambiguïté 180°) du vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s).

Date: 2012-10-29 Hour: 6h 19 Pol: HH θ : 30.8°- 46.4° Beam SCNB
Hour_{Station}: 6h V_{Station} = 10.3m/s - Dir_{Station} = 80.0°

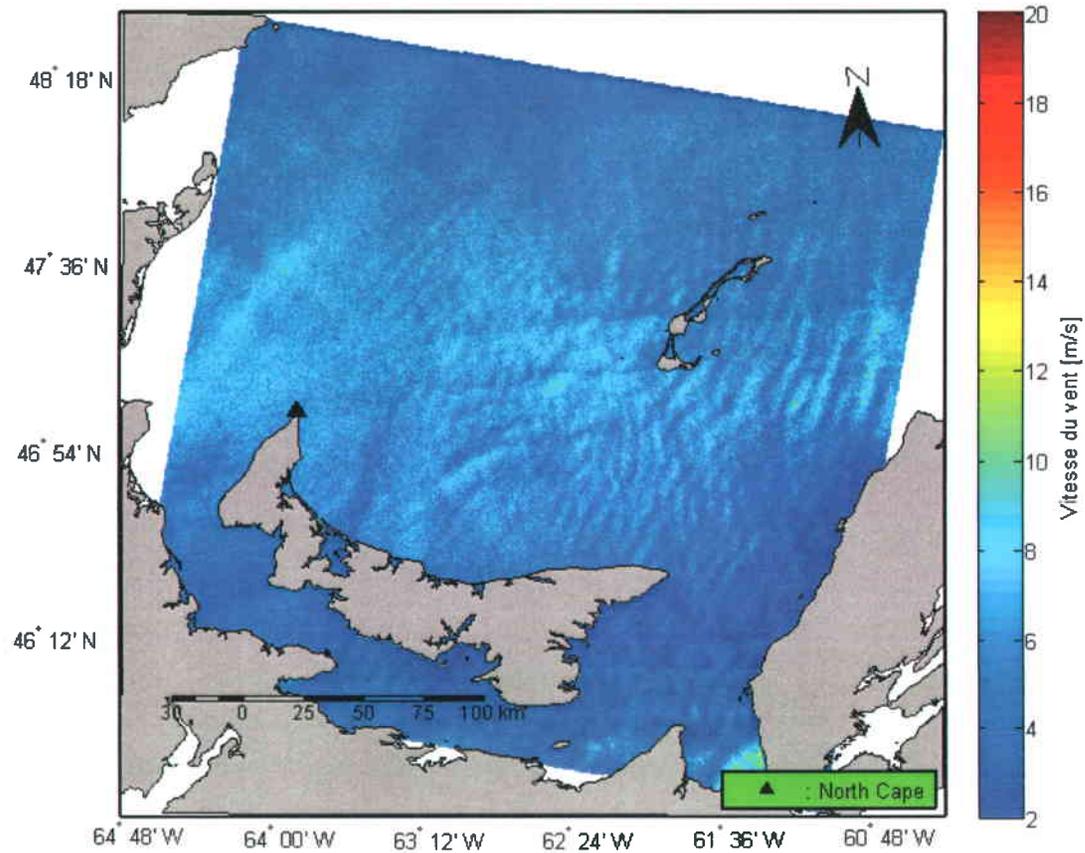


Figure 4.9: Champ de vent calculé avec le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) sur l'image SCNB de RADARSAT-2 acquise en co-polarisation (HH) du 29 octobre 2012. Les directions (avec ambiguïté 180°) du vents introduites dans CMOD5 ont été extraites de l'image à l'aide de l'algorithme des Gradients Locaux. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent (en m/s).

ANNEXE C : Champ de vent calculé sur les scènes Standards Quad-polarisation

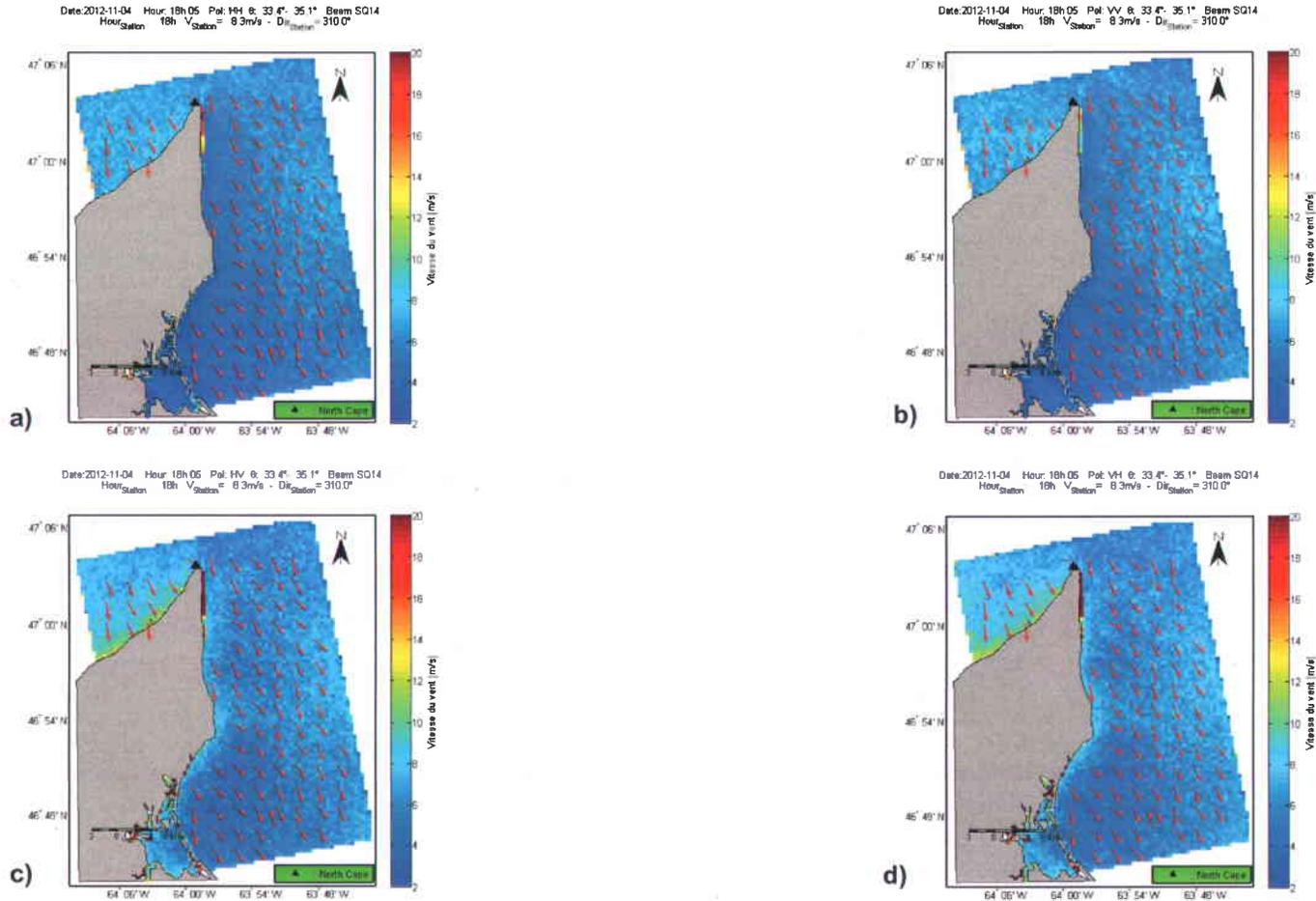


Figure 4.10: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 04 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 20,9° à 22,8°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la méthode 3 utilisant $\phi_{ref} = \phi_{VV-HH}$ comparée à ϕ_{HV} .

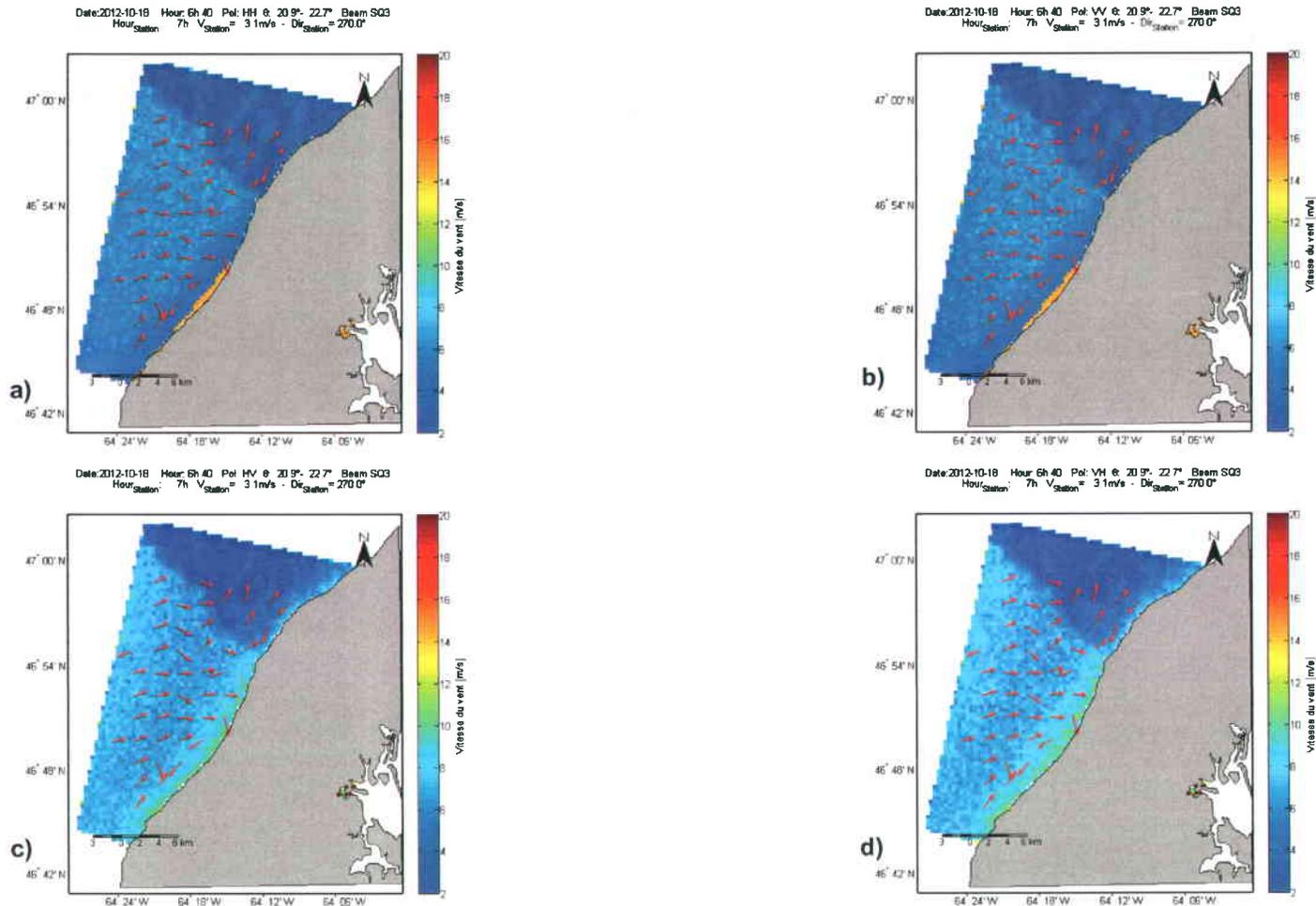


Figure 4.11 : Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 18 octobre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 20,9° à 22,7°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la méthode 3 utilisant $\phi_{ref} = \phi_{VV-HH}$ comparée à ϕ_{HV} .

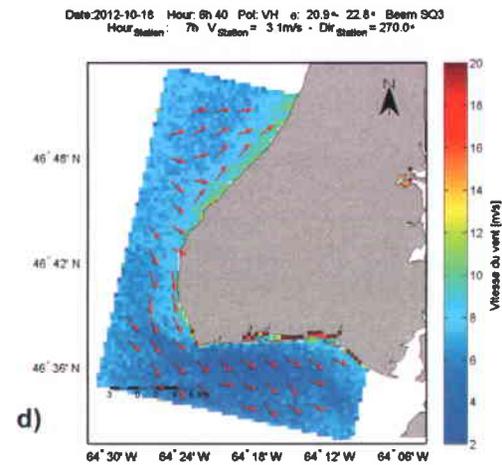
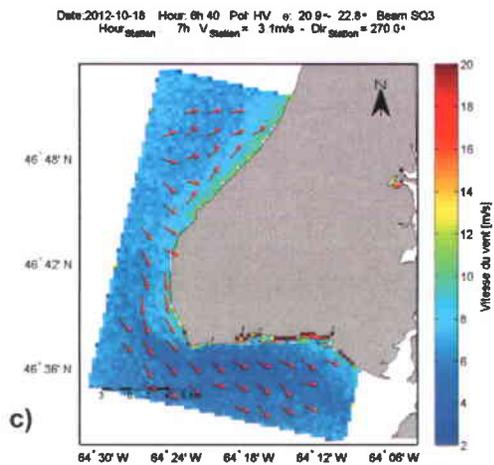
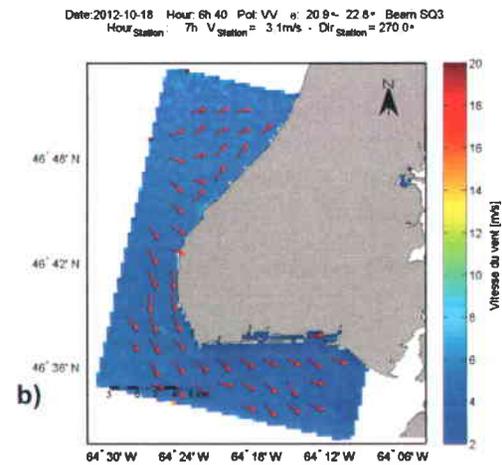
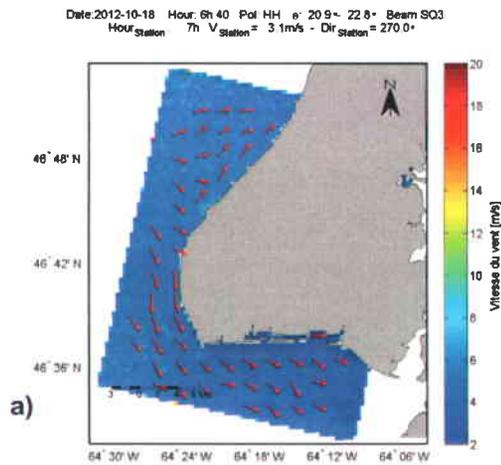


Figure 4.12: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 18 octobre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 20,9° à 22,8°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$.

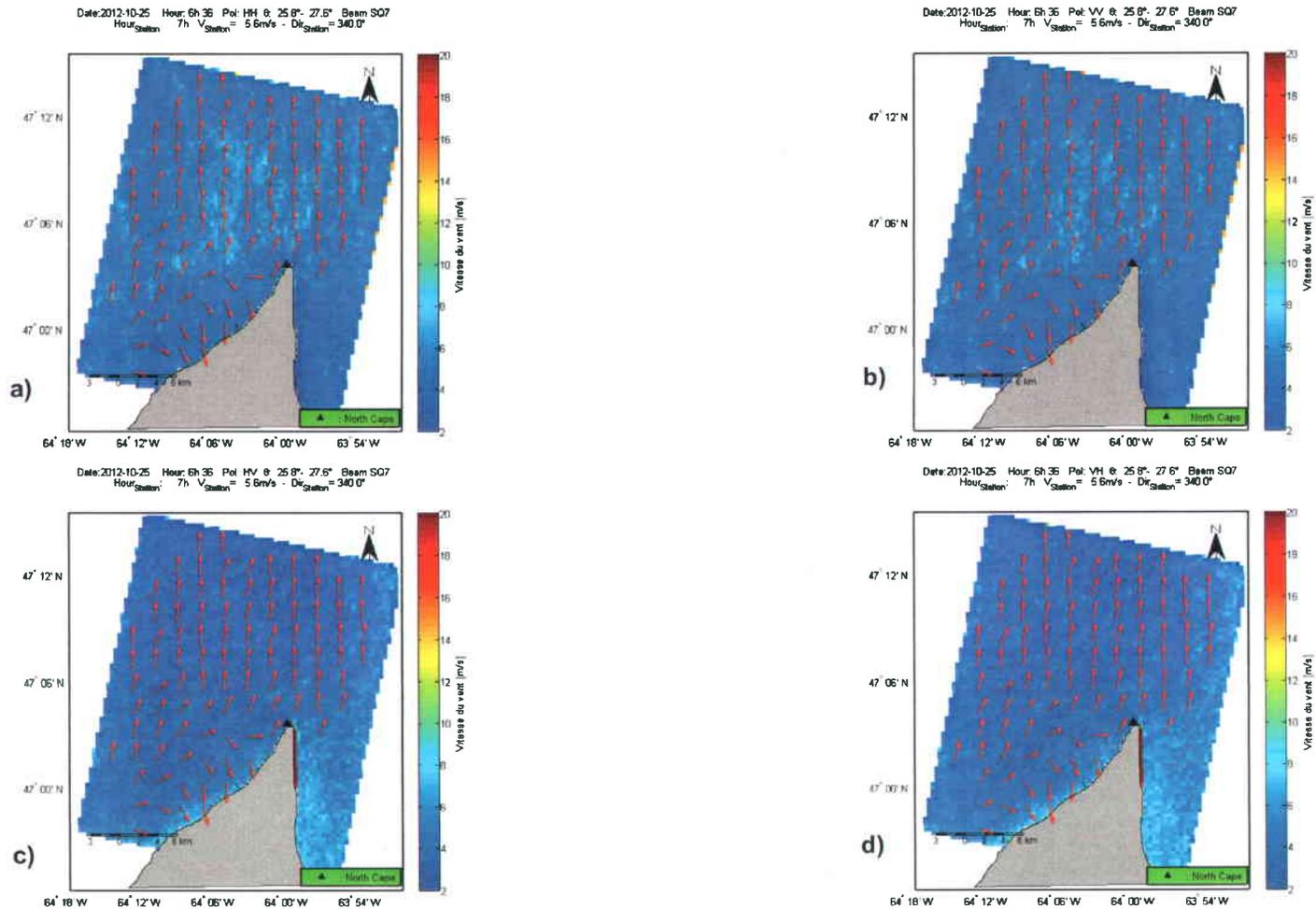


Figure 4.13: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 25 octobre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 25,8° à 27,6°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$.

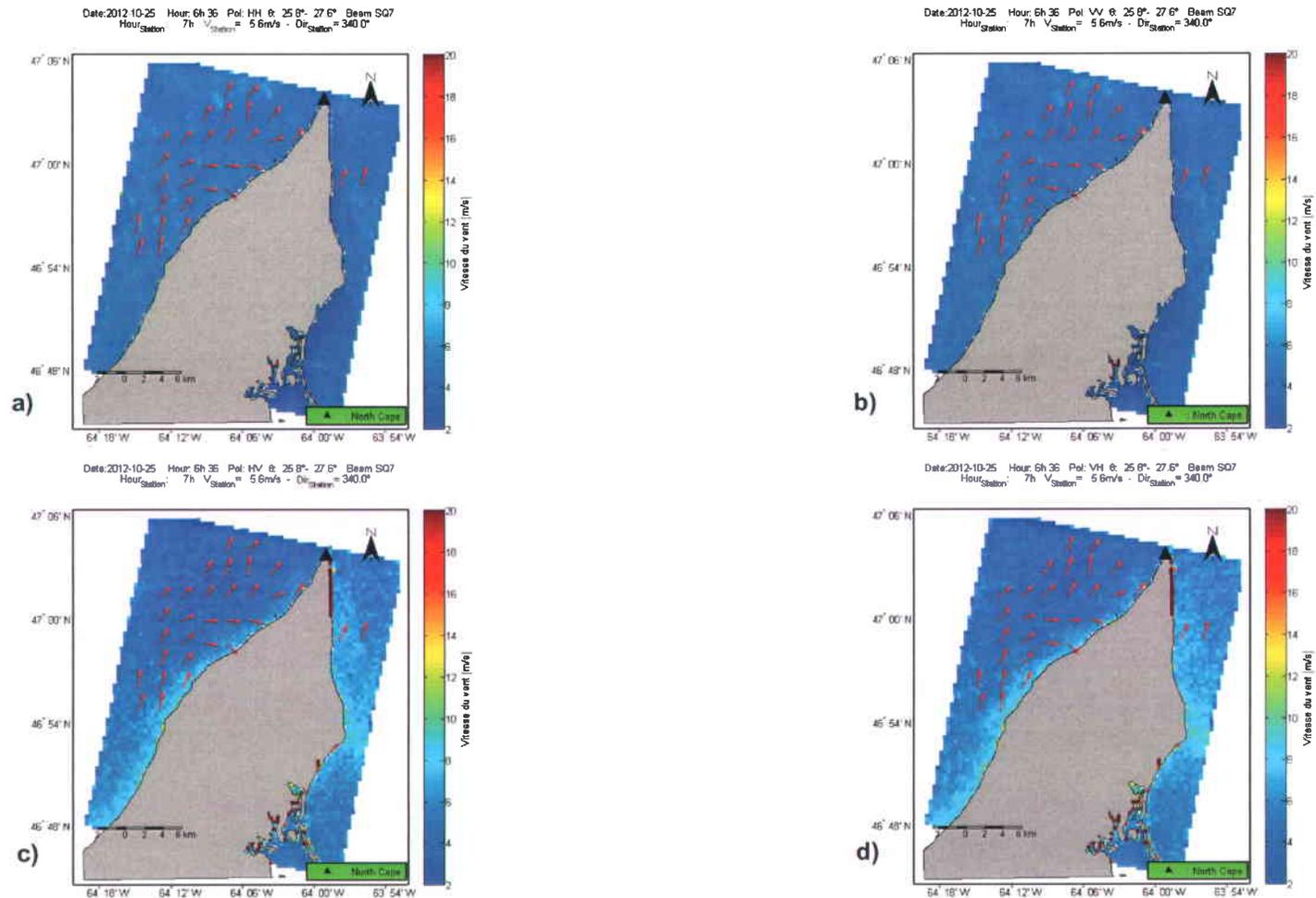


Figure 4.14: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 25 octobre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 25,8° à 27,6°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$.

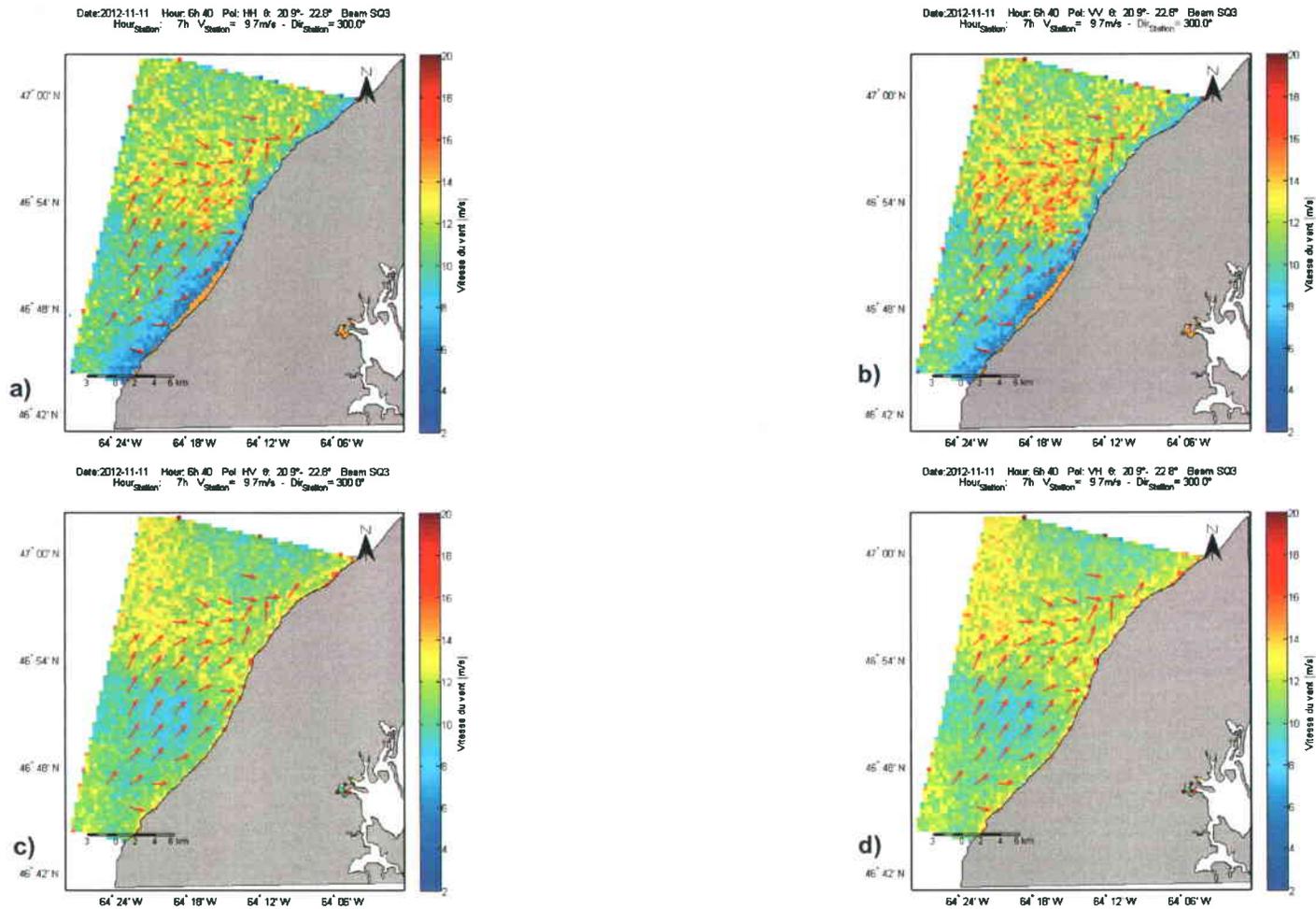


Figure 4.15: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 11 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 20,9° à 22,8°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la méthode 3 utilisant $\phi_{ref} = \phi_{VV-HH}$ comparée à ϕ_{HV} .

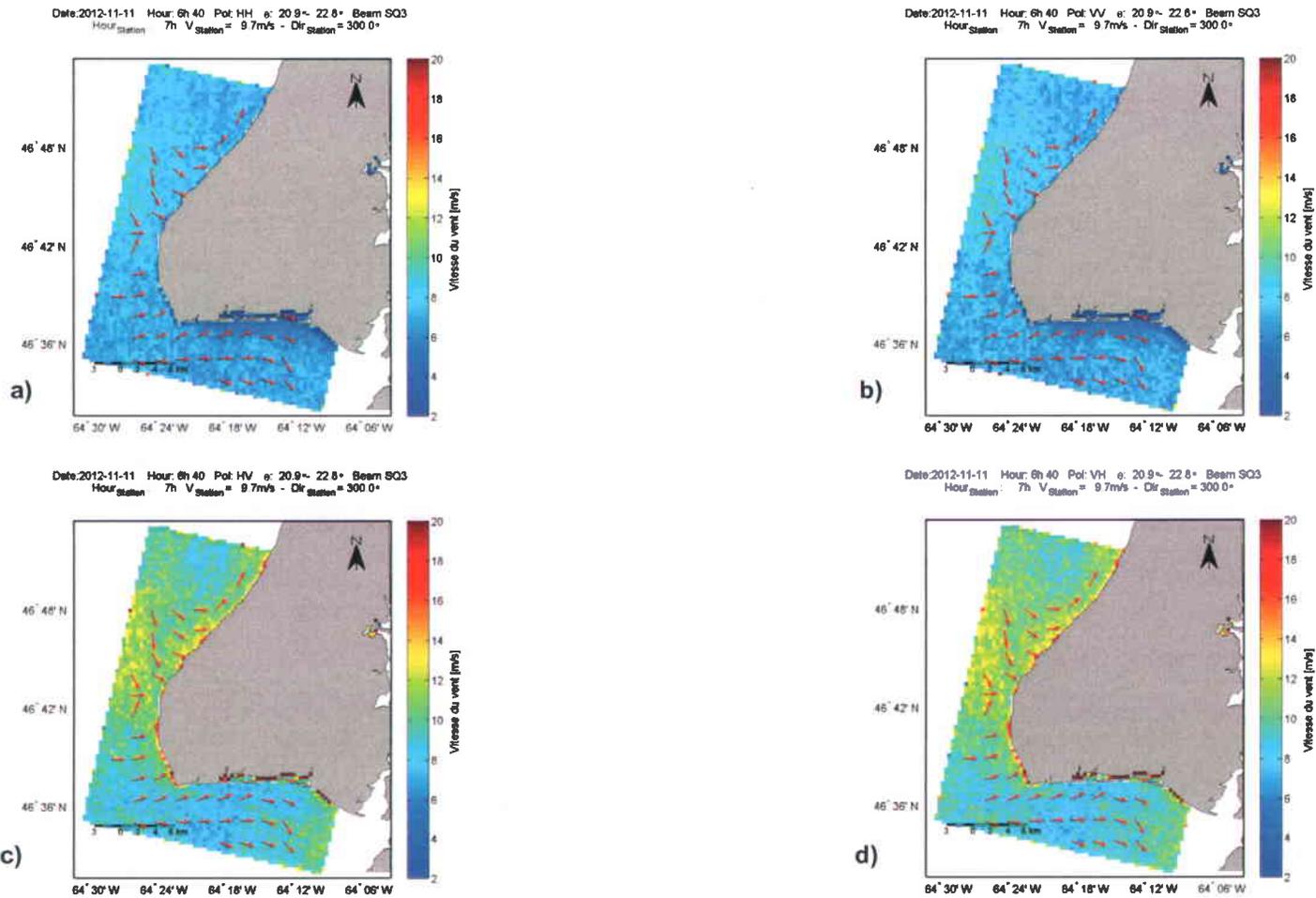


Figure 4.16: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 11 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 20,9° à 22,8°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$.

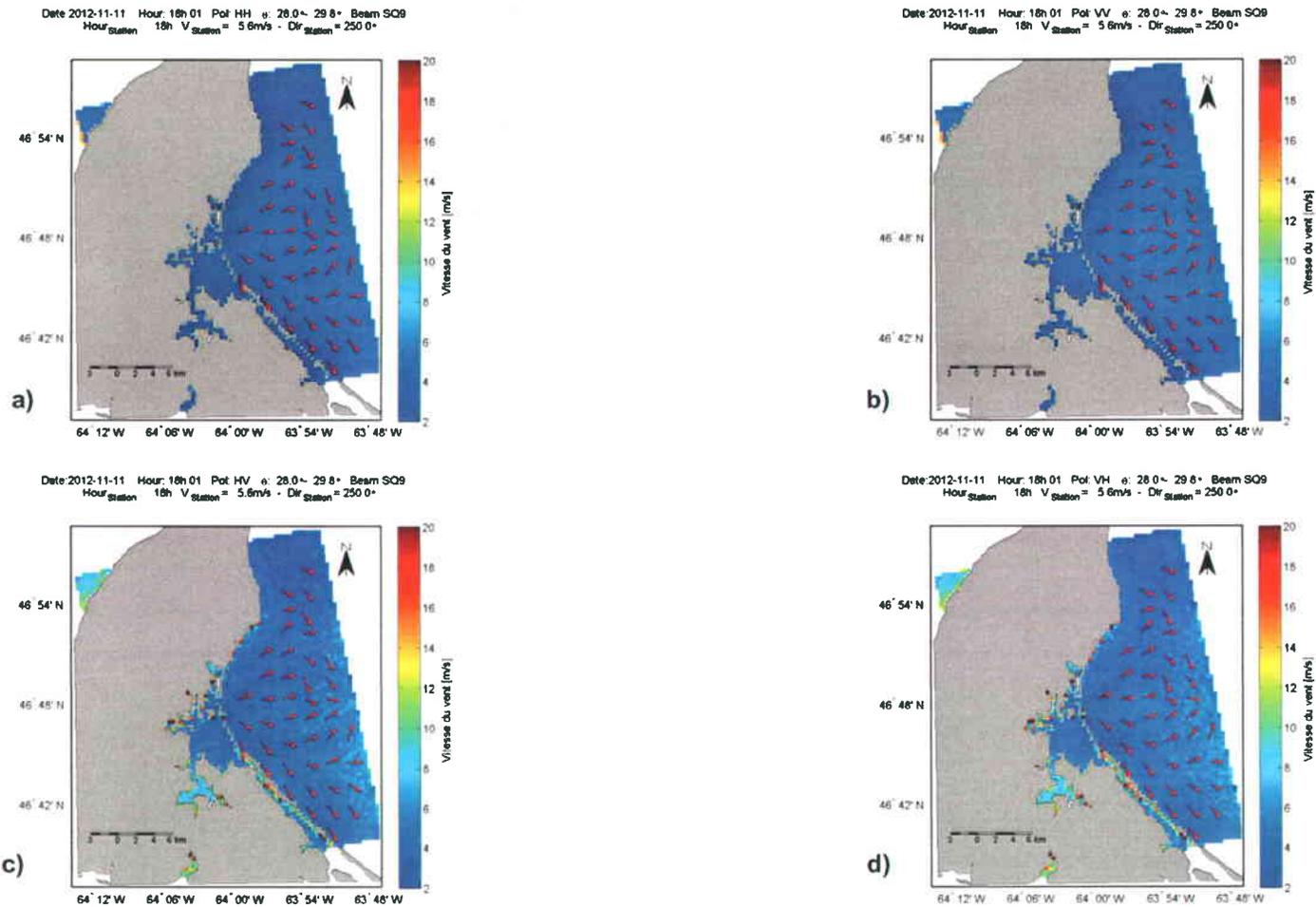


Figure 4.17: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 11 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 28° à 29,8°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$.

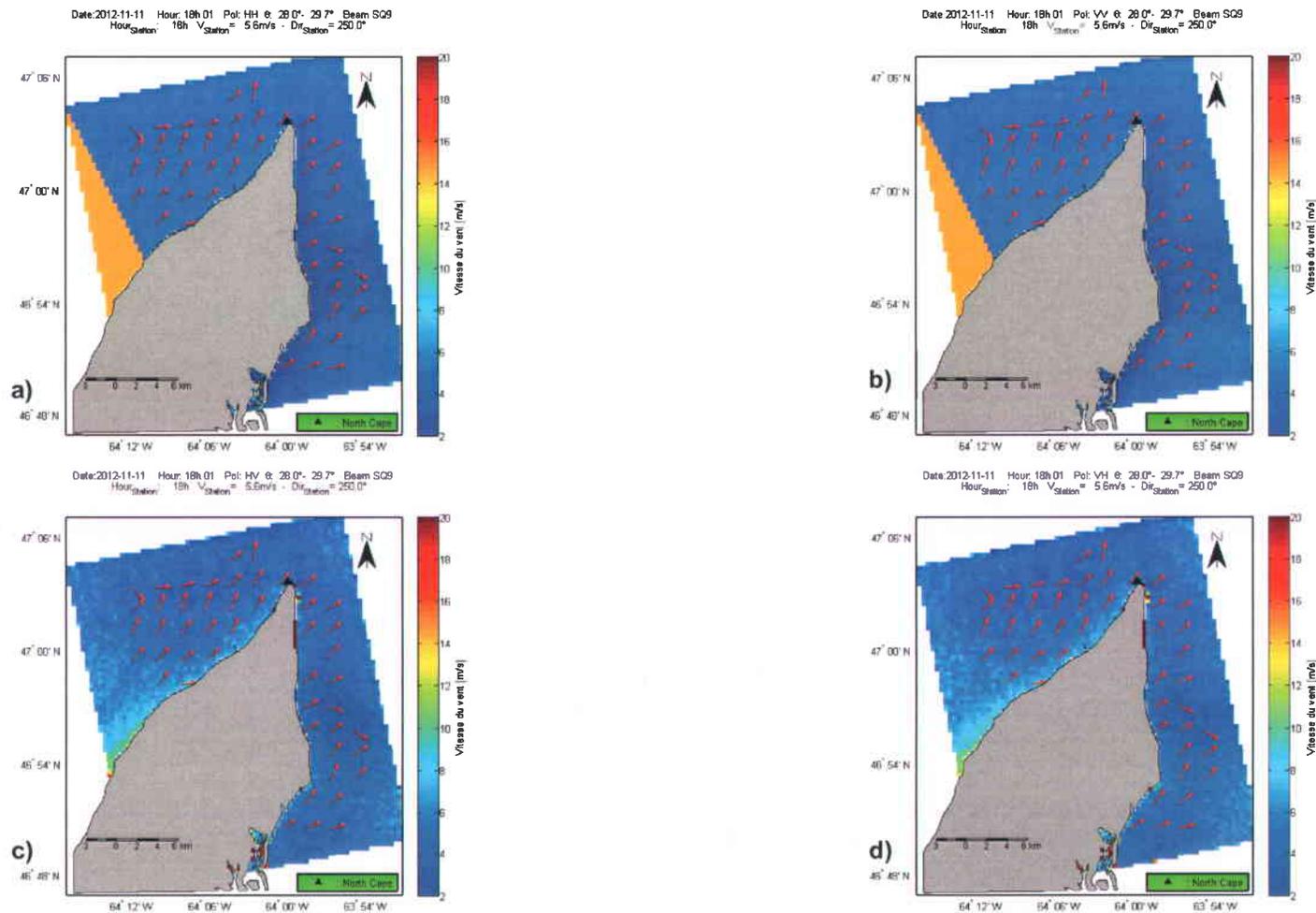


Figure 4.18: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 11 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 28° à 29,7°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$.

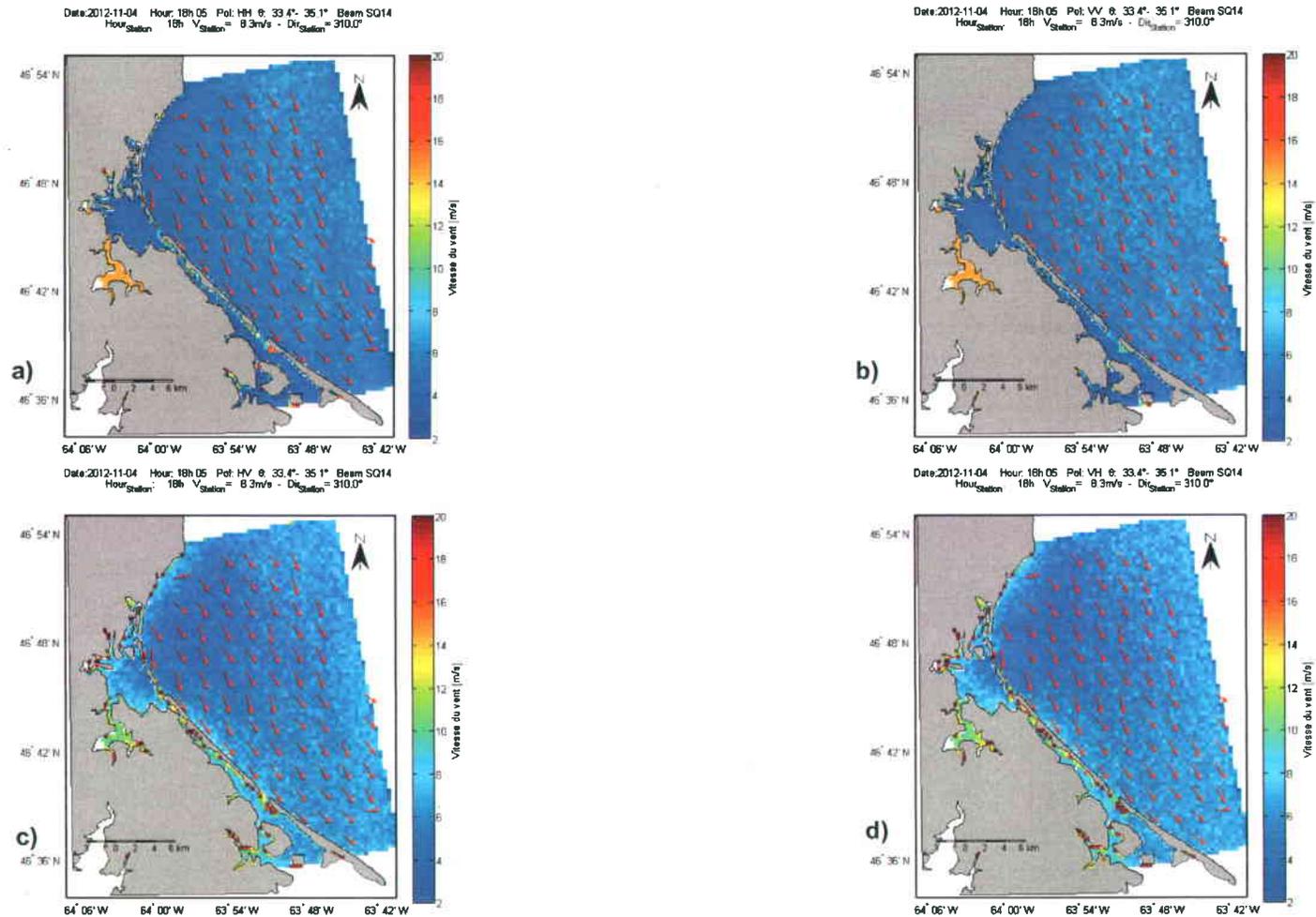


Figure 4.19: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 04 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 33,4° à 35,1°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$.

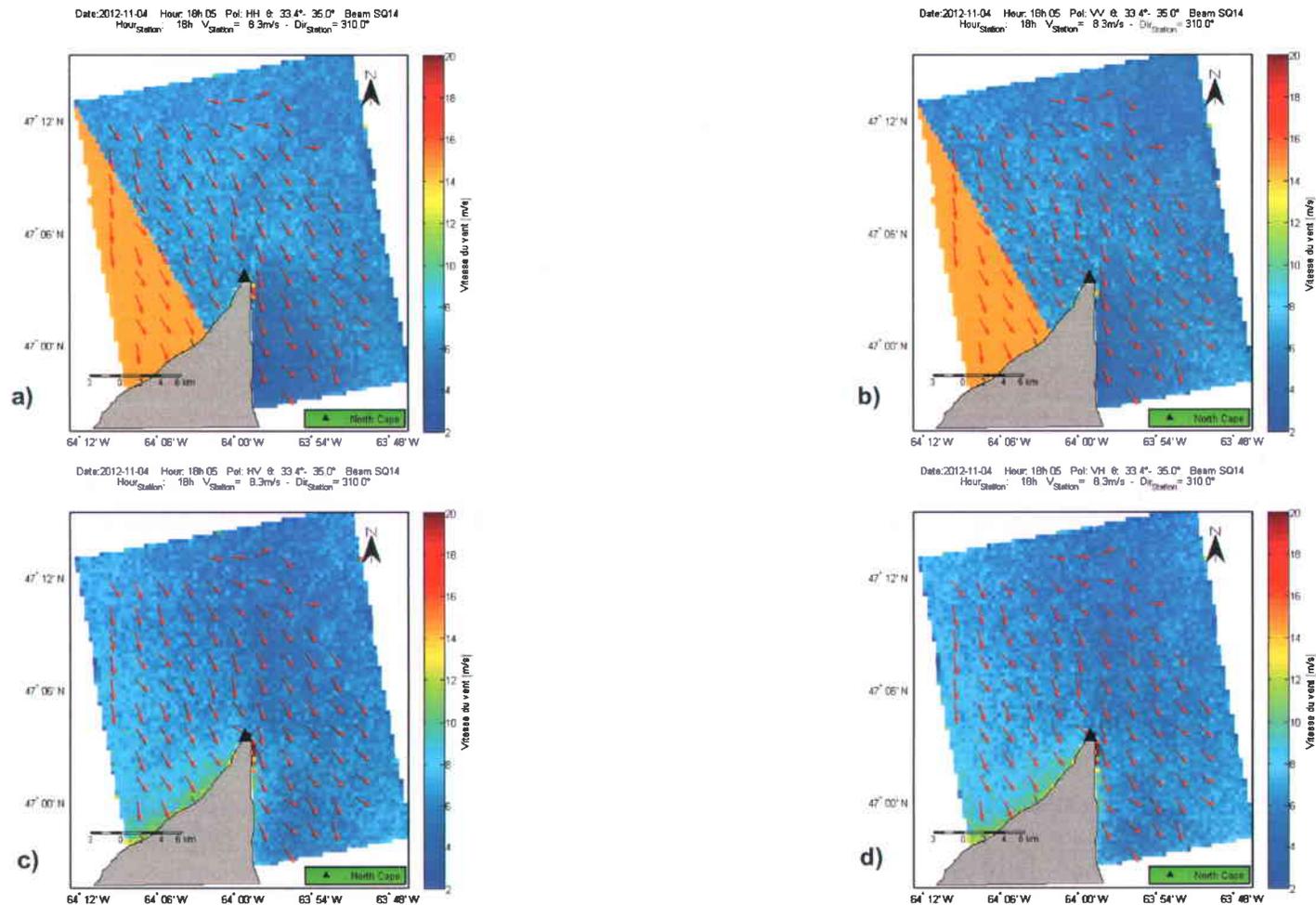


Figure 4.20: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 04 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 33,4° à 35,1°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$.

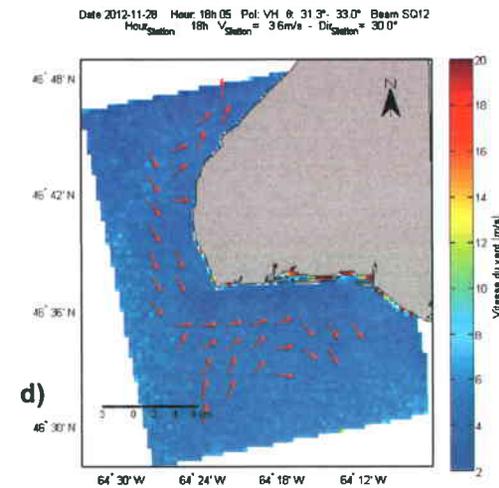
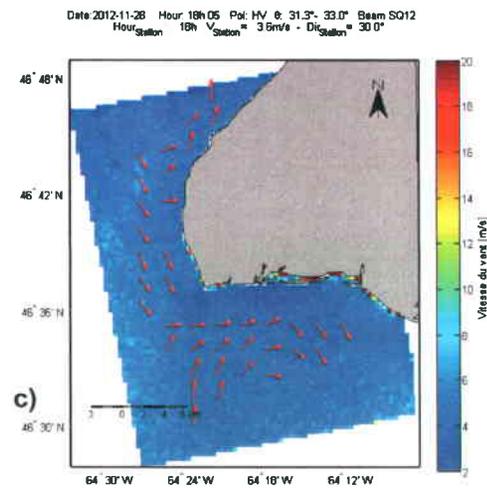
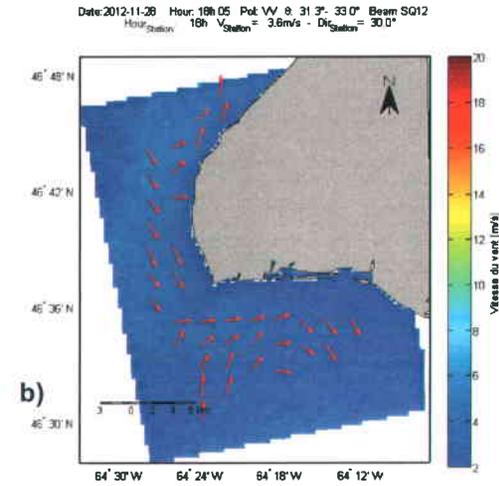
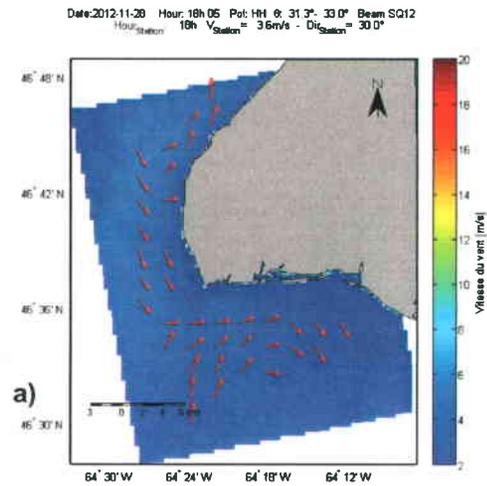


Figure 4.21: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 28 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 31,3° à 33°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$.

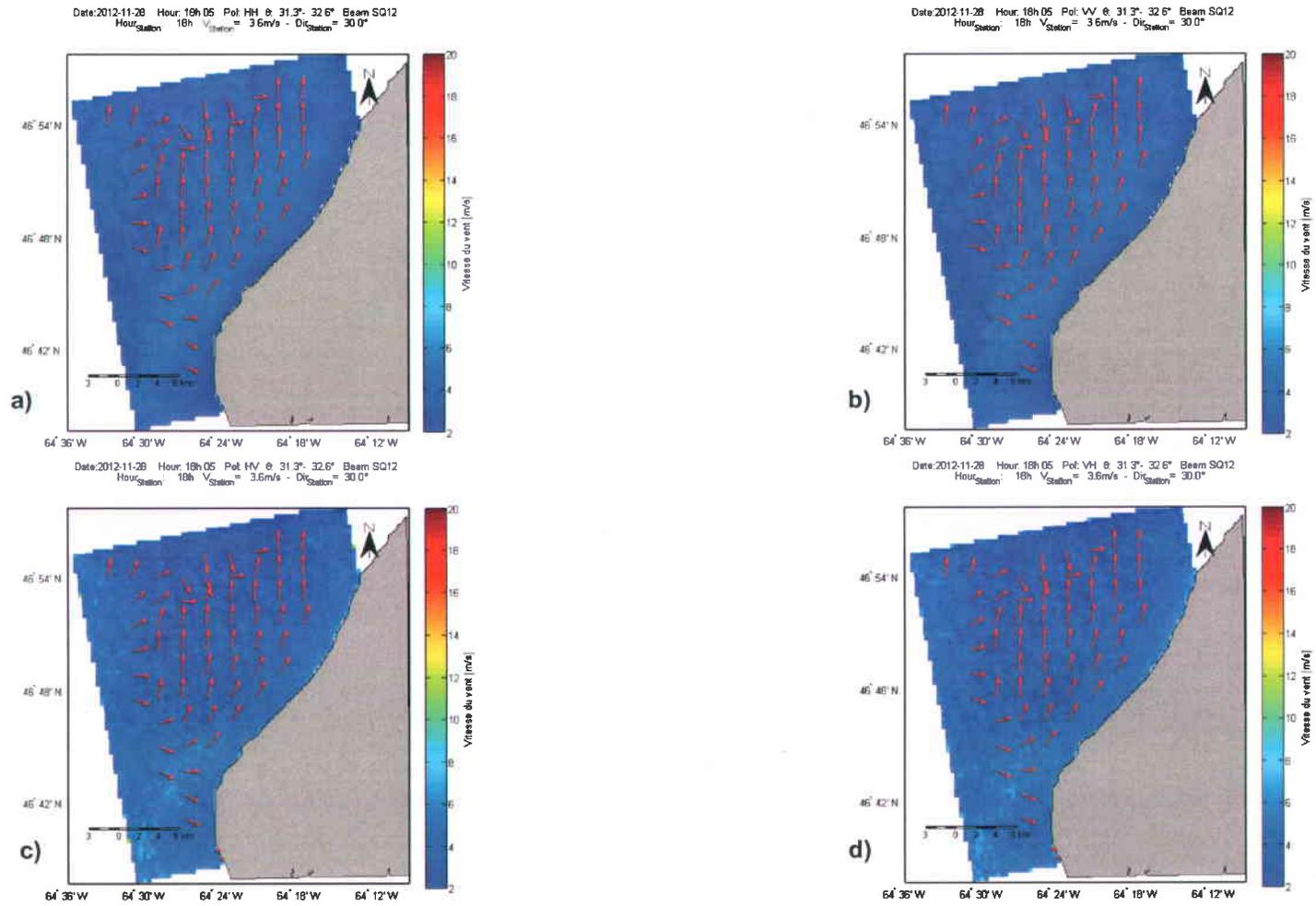


Figure 4.22: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 28 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 31,3° à 32,6°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$.

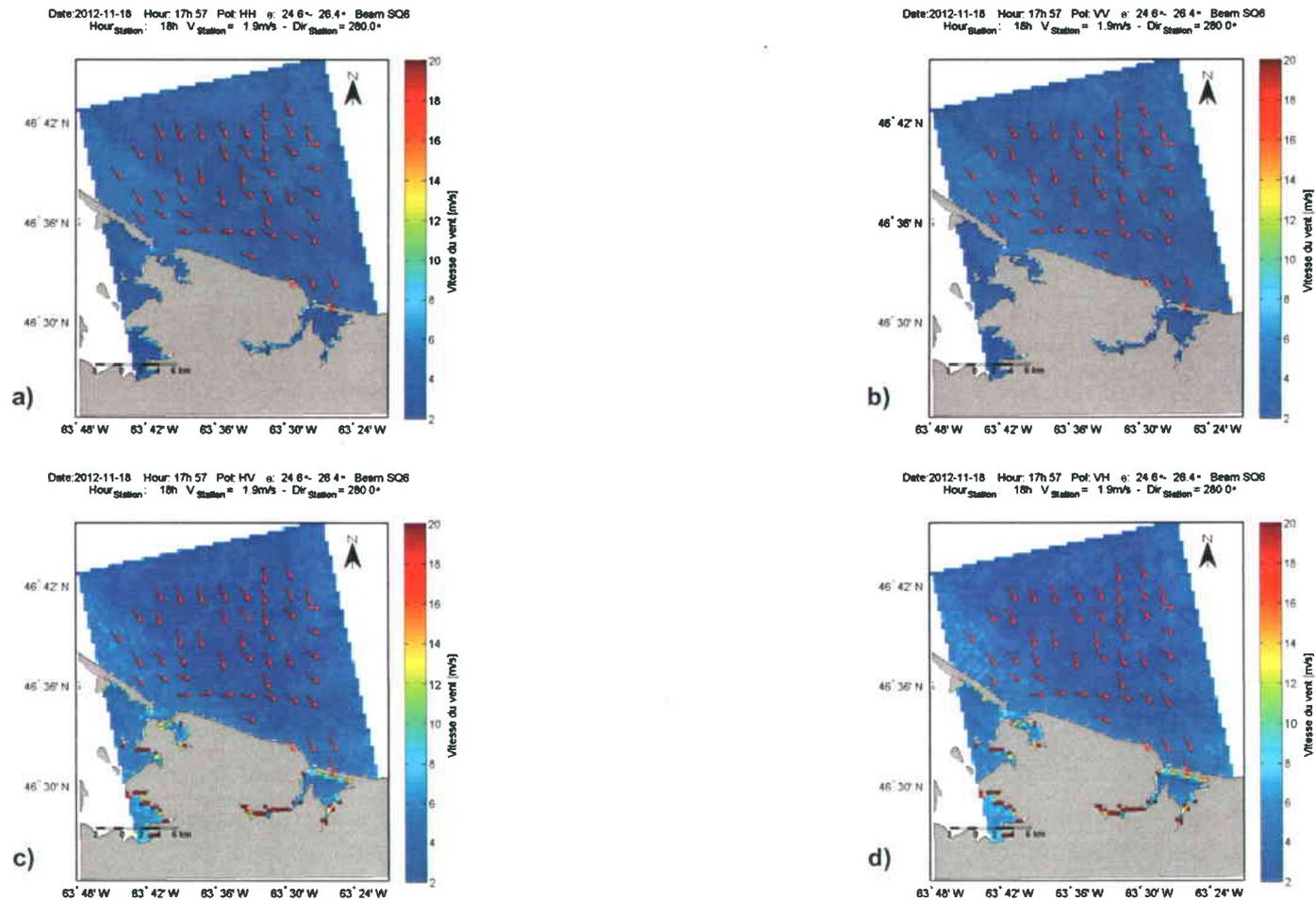


Figure 4.23: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 18 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 24,6° à 26,4°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$.

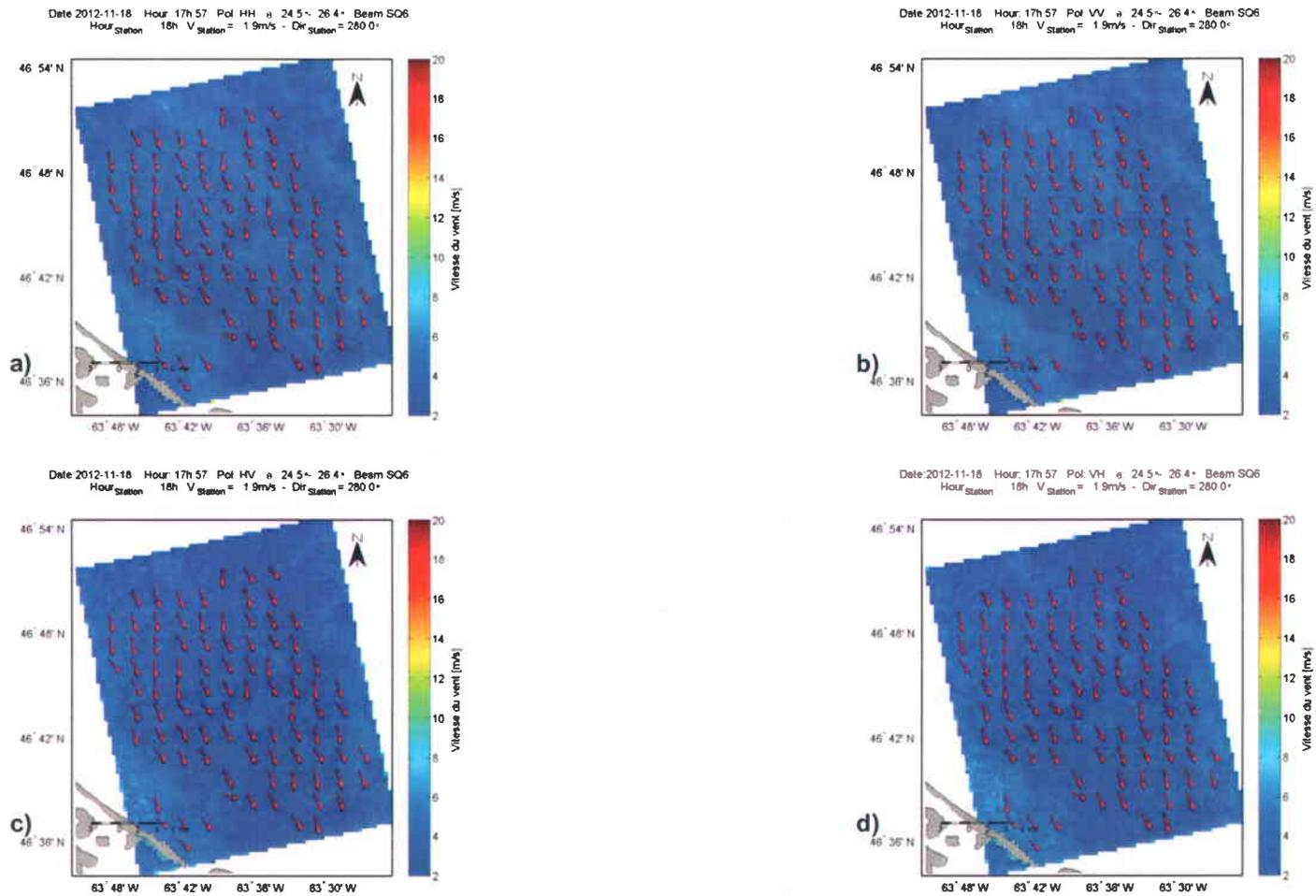


Figure 4.24: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 18 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 24,5° à 26,4°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$.

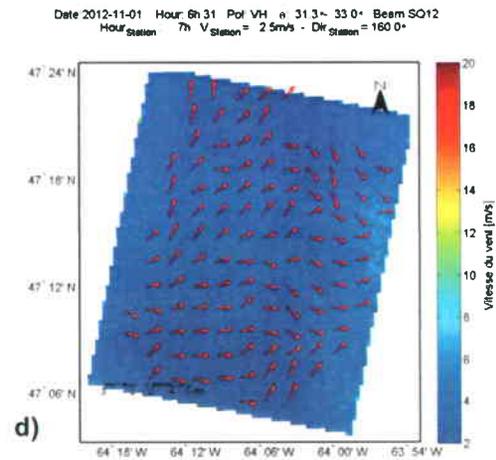
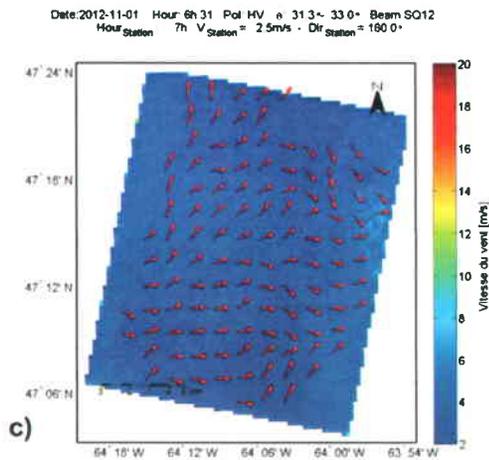
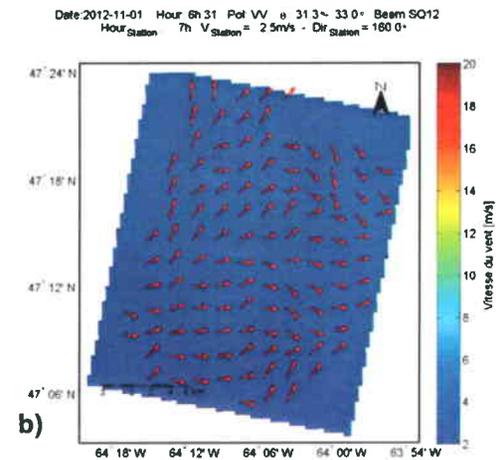
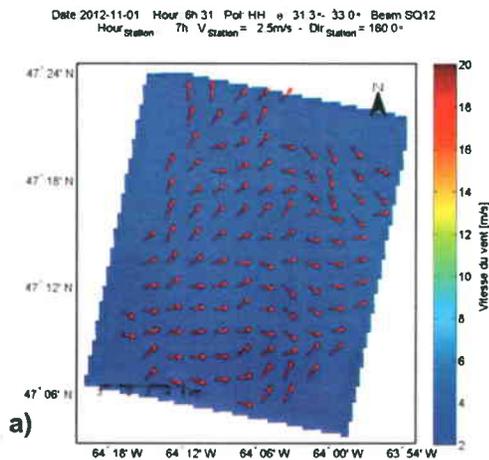


Figure 4.25: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 01 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 31,3° à 33°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$.

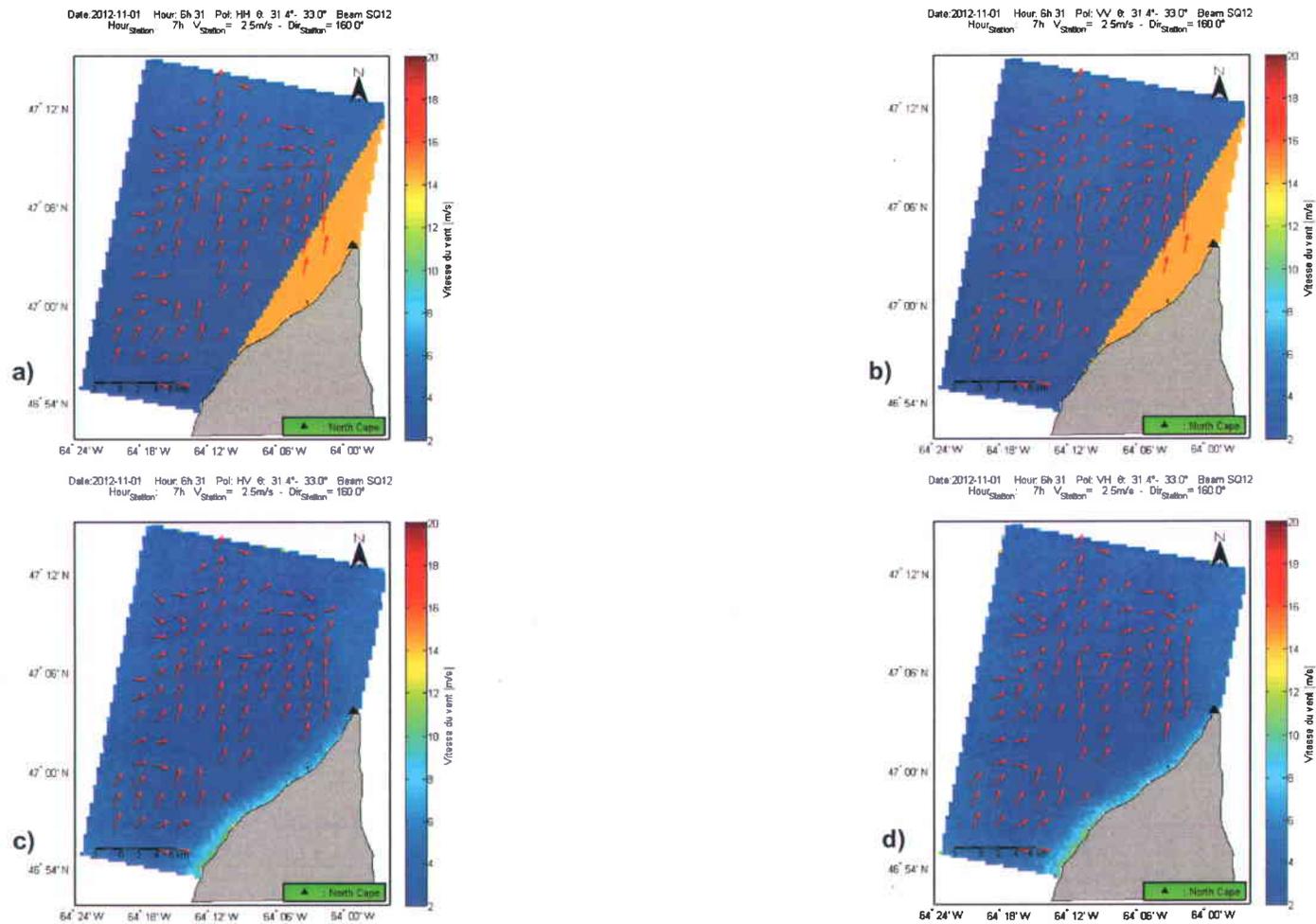


Figure 4.26: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 01 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 31,4° à 33°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$.

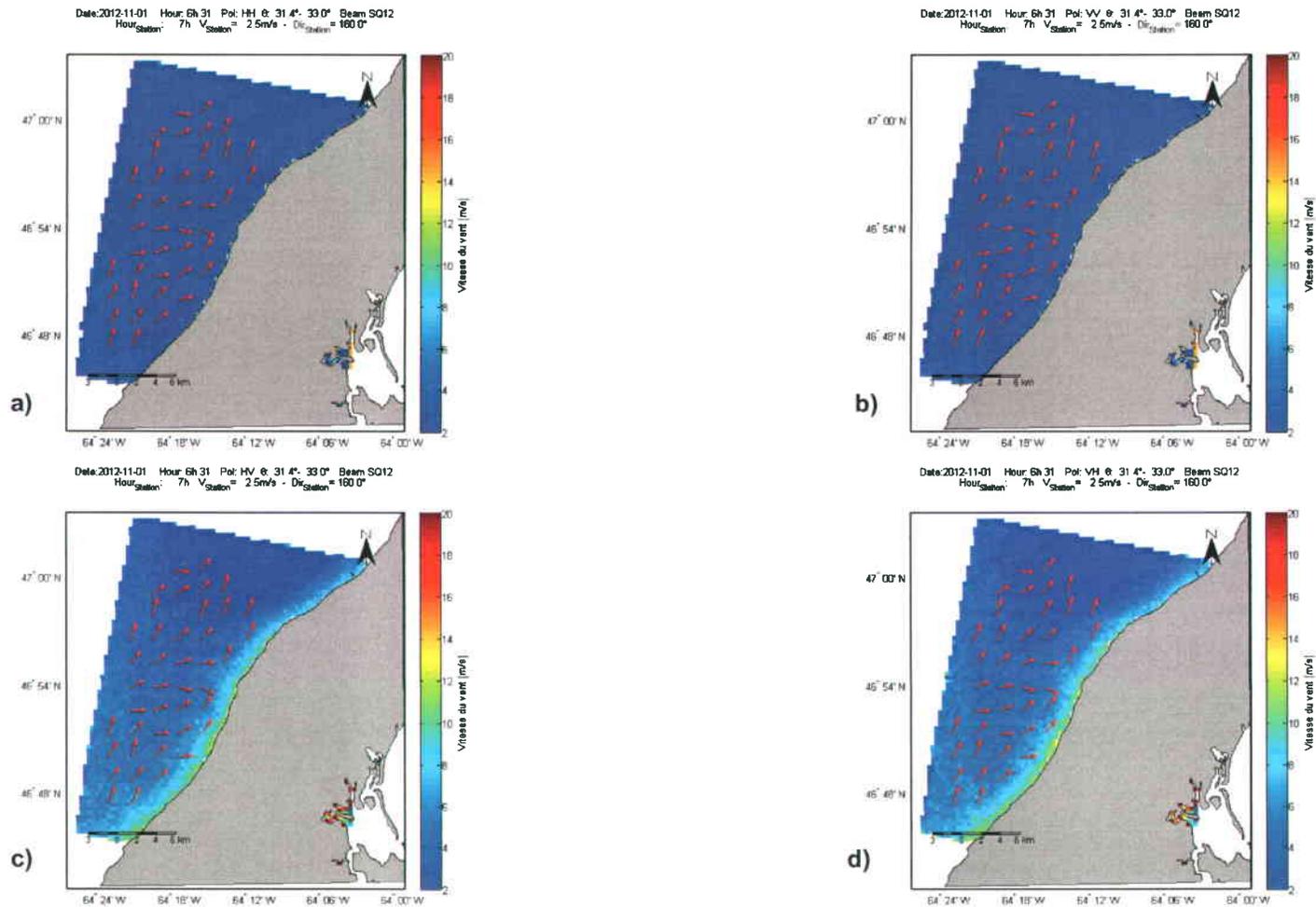


Figure 4.27: Carte de champ de vent calculé sur la scène SQ du 01 novembre 2012. Le modèle CMOD5 couplé avec le ratio de polarisation de Hwang *et al.* (2010b) a été utilisé. Les flèches rouges indiquent la direction du vent. La barre de couleur indique les valeurs de la vitesse du vent. a) et b) : polarisation HH et VV ; c) et d) : polarisation croisée HV et VH. L'angle d'incidence varie de 31,4° à 33°. L'ambiguïté sur les directions a été éliminée avec la première méthode, $\phi_{ref} = -20^\circ$.

ANNEXE D : Résultats obtenue lors des analyses des profils à North Cape

Tableau 4.2 : Profil P₂ de vitesse en mer à l'Est de North Cape. La vitesse à la station de North Cape était 8,3 m/s à cinq minutes avant l'acquisition de la scène sur laquelle les vitesses RSO extraites sur les profils ont été calculé.

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
1,735	7,03	4,31	4,58	7,28	6,26	3,04
2,795	7,42	4,65	4,77	6,21	4,96	5,94
3,855	7,82	4,54	4,83	6,85	6,33	7,83
4,915	8,21	5,17	5,26	6,35	5,30	10,94
5,975	8,32	4,59	4,55	6,68	5,93	17,43
7,035	8,29	4,27	4,68	2,83	4,24	13,62
8,095	8,27	4,39	4,41	6,85	6,21	17,81
9,155	8,15	6,22	6,59	6,84	4,39	20,63
10,215	8,01	4,71	5,37	5,70	4,94	25,90
11,275	7,89	5,94	5,75	6,53	6,28	25,65
12,335	7,65	4,68	5,24	5,03	5,94	27,15
13,395	7,47	5,84	7,12	7,40	7,21	28,82
14,455	7,30	6,36	6,96	5,10	5,64	29,26
15,515	7,25	6,06	7,41	7,32	7,56	28,92
16,575	7,25	4,82	5,22	5,46	5,62	29,30
17,635	7,27	6,58	6,23	6,83	6,55	30,11
18,695	7,29	5,46	7,03	7,72	7,75	30,71
19,755	7,31	6,14	6,37	6,44	5,00	30,42
20,815	7,33	5,23	6,22	5,75	6,71	30,58
21,875	7,34	5,61	7,02	4,98	5,87	31,39
22,935	7,35	6,14	6,90	5,03	6,15	32,02
23,995	7,36	4,84	4,83	6,75	6,16	32,58
25,055	7,38	7,03	7,11	7,03	8,00	31,09

Tableau 4.3 : Profil P₃ de vitesse en mer à l'Est de North Cape. La vitesse à la station de North Cape était 8,3 m/s à cinq minutes avant l'acquisition de la scène sur laquelle les vitesses RSO extraites sur les profils ont été calculées.

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
1,25	6,64	4,26	4,61	6,17	7,06	1,34
2,31	6,89	4,93	3,96	6,76	6,08	5,78
3,37	7,24	4,20	5,65	5,77	6,37	9,06
4,43	7,73	3,82	5,38	6,13	5,93	13,50
5,49	8,17	5,48	4,98	5,26	5,12	15,80
6,55	8,61	4,61	4,44	6,48	5,84	16,24
7,61	8,80	5,13	6,18	7,25	5,59	24,47
8,67	8,67	4,48	5,22	6,16	4,41	22,83
9,73	8,36	6,07	6,35	6,30	8,09	22,51
10,79	8,05	5,16	5,26	4,84	5,19	25,60
11,85	7,78	5,88	5,53	8,07	7,46	28,20
12,91	7,54	6,23	6,24	4,57	6,23	29,26
13,97	7,34	5,57	4,60	6,16	6,46	29,58
15,03	7,27	6,29	6,14	7,64	7,68	31,25
16,09	7,29	5,69	5,20	7,27	6,79	32,05
17,15	7,32	7,35	6,73	5,68	6,59	32,64
18,21	7,33	5,79	6,21	7,27	6,83	33,42
19,27	7,37	4,19	4,09	3,84	4,62	35,03
20,33	7,35	5,47	7,71	6,50	4,25	34,20
21,39	7,39	5,53	5,69	6,92	8,14	35,22
22,45	7,39	4,40	4,96	5,39	6,62	36,22

Tableau 4.4 : Profil P₄ de vitesse en mer à l'est de North Cape. La vitesse à la station de North Cape était 8,3 m/s à cinq minutes avant l'acquisition de la scène sur laquelle les vitesses RSO extraites sur les profils ont été calculées.

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
1,06	7,09	4,00	4,30	6,48	5,42	1,36
2,12	7,16	5,05	6,34	8,91	6,64	5,38
3,18	7,41	4,39	3,93	6,65	7,05	9,83
4,24	7,62	4,14	3,87	6,21	5,44	12,54
5,3	7,80	4,08	3,15	4,66	4,68	15,73
6,36	8,03	5,02	5,12	5,76	5,33	18,66
7,42	8,13	4,89	5,03	6,39	6,38	20,09
8,48	8,13	5,16	5,90	5,07	5,31	23,70

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
9,54	8,07	7,37	6,88	7,13	6,20	24,07
10,6	7,99	6,25	5,51	5,16	4,49	27,43
11,66	7,86	6,34	6,70	7,05	4,00	30,29
12,72	7,45	6,14	7,21	6,58	5,92	31,09
13,78	7,35	6,30	7,10	8,35	6,53	31,40
14,84	7,33	5,58	6,46	6,05	6,06	33,16
15,9	7,34	6,49	6,72	7,06	6,90	33,92
16,96	7,37	6,32	6,04	6,64	6,80	34,55
18,02	7,37	6,32	8,13	8,91	8,11	35,37
19,08	7,40	6,71	7,53	9,47	7,55	36,13
20,14	7,41	8,18	9,12	7,79	6,92	36,90
21,2	7,42	4,43	6,28	7,15	9,53	37,50

Tableau 4.5: Profil P'1 de vitesse à l'ouest de West Point.

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
0,29	6,7	2,0	2,1	2,8	3,4	0,3
0,49	6,7	2,3	2,4	4,2	4,5	2,1
0,69	6,7	2,1	2,5	3,3	5,1	2,1
0,89	6,8	2,2	2,2	2,2	4,2	3,0
1,09	6,8	2,1	2,2	5,6	4,7	5,9
1,29	6,8	2,7	2,9	2,1	3,5	9,7
1,49	6,8	2,8	2,3	4,6	2,7	10,5
1,69	6,8	2,2	2,2	2,3	2,7	11,0
1,89	6,8	3,0	2,6	4,4	3,4	11,5
2,09	6,8	2,4	3,0	4,4	4,4	12,5
2,29	6,9	3,6	4,1	5,1	2,6	12,4
2,49	6,9	3,5	3,6	5,2	4,2	12,2
2,69	6,9	2,9	2,9	2,5	4,1	12,7
2,89	6,9	3,5	3,3	4,5	4,6	13,5
3,09	6,9	3,8	3,7	4,2	3,3	13,2
3,29	6,9	2,1	2,4	3,7	4,2	13,0
3,49	6,9	2,9	3,0	2,5	3,8	11,8
3,69	6,9	3,8	3,6	3,5	5,3	12,3
3,89	6,9	4,5	4,0	3,4	3,4	12,9
4,09	6,9	3,5	3,9	5,7	4,4	14,7
4,29	6,9	4,7	3,7	6,8	4,9	17,2

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
4,49	6,9	3,8	4,1	4,5	5,3	19,8
4,69	6,9	5,1	5,9	5,1	6,6	21,1
4,89	6,9	4,4	4,1	4,1	5,3	22,3
5,09	6,9	3,8	4,1	4,5	5,0	22,6
5,29	6,9	5,1	5,2	4,8	5,8	22,8
5,49	6,9	4,4	4,5	4,3	5,0	23,4
5,69	6,9	4,2	3,8	5,2	5,0	23,8
5,89	6,9	5,5	5,4	5,3	5,0	23,9
6,09		3,9	3,8	4,2	3,6	25,4
6,29		5,2	4,5	4,7	5,2	27,9
6,49		5,1	5,7	4,1	4,5	27,9
6,69		4,1	4,1	5,1	4,4	25,5
6,89		4,5	4,6	3,9	5,4	24,3
7,09		4,8	5,4	5,0	5,2	23,2
7,29		3,6	3,0	5,7	5,9	22,5
7,49		6,3	6,1	6,4	6,2	22,4
7,69		3,7	4,4	5,9	5,8	22,8
7,89		4,0	3,5	2,9	5,4	23,1
8,09		4,7	4,8	5,7	4,2	23,3
8,29		4,0	3,2	4,8	2,6	23,2
8,49		3,5	2,9	5,4	7,1	23,0
8,69		4,7	4,7	5,7	4,5	23,1
8,89		4,1	4,6	6,0	6,2	23,5
9,09		5,0	3,9	3,9	6,2	25,1
9,29		3,7	3,2	6,5	6,7	30,8

Tableau 4.6: Profil P'2 de vitesse à l'ouest de West Point.

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
0,37	6,5	2,0	2,0	5,8	6,2	1,0
0,57	6,5	2,0	2,0	5,1	4,9	2,2
0,77	6,5	2,0	2,8	7,0	5,2	4,3
0,97	6,6	2,7	2,8	3,7	4,4	3,8
1,17	6,6	2,6	2,8	3,3	4,3	6,4
1,37	6,6	2,5	2,7	4,7	3,9	5,9

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
1,57	6,6	2,6	2,4	3,5	5,2	5,3
1,77	6,6	2,4	2,8	2,6	5,1	4,4
1,97	6,6	3,2	3,5	4,9	4,5	3,0
2,17	6,6	2,9	3,4	4,8	4,9	5,0
2,37	6,6	3,0	2,5	4,0	4,7	6,9
2,57	6,6	3,5	3,6	4,9	4,6	11,2
2,77	6,6	3,5	3,5	3,7	3,8	13,1
2,97	6,6	3,5	3,5	3,9	4,3	14,0
3,17	6,7	3,5	3,8	4,3	3,4	14,6
3,37	6,7	3,7	3,8	5,1	3,6	15,1
3,57	6,7	3,7	3,6	5,3	4,5	14,6
3,77	6,7	4,4	3,9	4,6	4,9	14,0
3,97	6,7	3,6	3,8	3,6	5,1	13,2
4,17	6,7	4,8	4,6	4,1	4,5	12,3
4,37	6,7	3,8	3,8	4,7	4,5	10,3
4,57	6,7	4,7	4,6	3,6	3,2	9,2
4,77	6,7	4,1	4,0	5,4	4,3	12,9
4,97	6,7	4,2	3,9	5,7	5,1	17,5
5,17	6,7	5,2	5,4	5,8	5,6	20,9
5,37	6,7	4,0	3,6	4,6	5,8	22,3
5,57		5,3	5,3	4,0	4,7	23,5
5,77		4,3	5,1	6,6	6,3	24,8
5,97		4,1	4,3	5,2	4,3	25,9
6,17		4,6	4,3	6,0	5,4	26,9
6,37		5,1	4,5	3,6	4,9	28,2
6,57		3,8	3,9	3,7	5,5	26,7
6,77		4,7	4,6	6,1	5,8	25,9
6,97		3,6	3,9	6,8	4,2	25,3
7,17		4,4	3,9	4,8	6,4	24,5
7,37		3,9	4,2	4,7	3,3	24,5
7,57		4,3	4,9	4,4	6,2	24,5
7,77		4,1	4,3	4,3	3,6	24,6
7,97		3,8	4,0	4,2	5,9	24,9
8,17		4,0	3,8	7,2	5,7	25,0
8,37		3,5	4,0	5,3	4,9	24,7
8,57		4,3	4,0	5,2	4,5	24,6
8,77		4,5	4,4	4,9	6,1	24,5
8,97		5,3	4,8	5,0	6,5	25,3
9,17		3,4	3,6	3,7	6,5	28,0

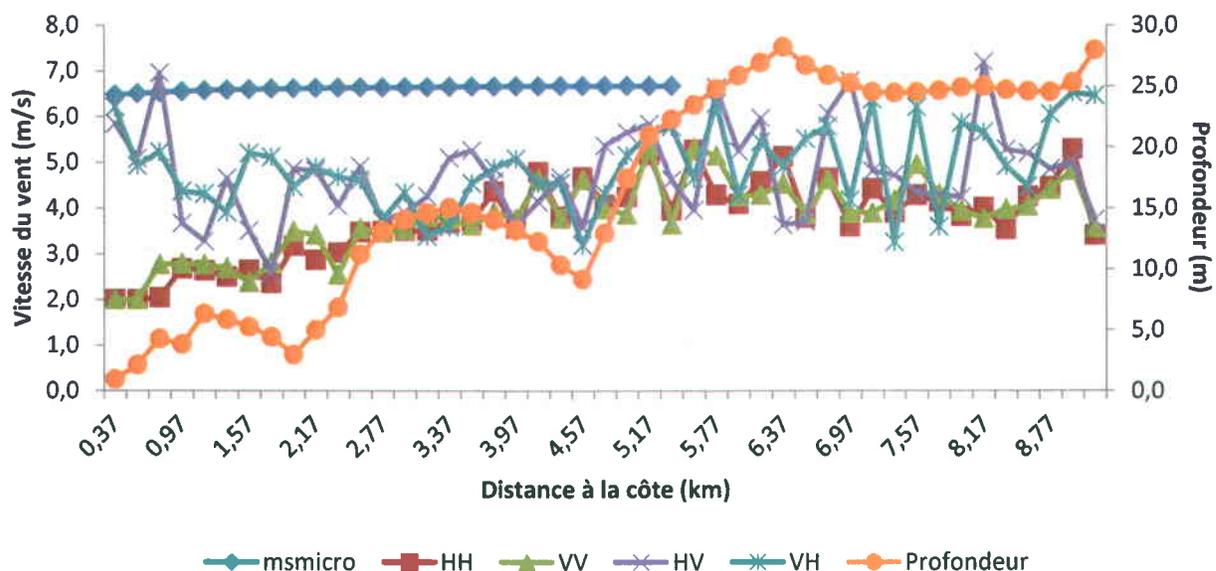


Figure 4.28: Profil P'2 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point.

Tableau 4.7: Profil P'3 de vitesse à l'ouest de West Point.

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
0,36	6,2	2,0	2,0	4,7	3,9	0,5
0,56	6,2	2,4	2,3	2,7	5,2	1,8
0,76	6,3	2,6	2,3	2,8	6,0	4,1
0,96	6,3	2,0	2,5	4,0	4,0	5,0
1,16	6,3	2,7	2,8	4,6	4,2	5,8
1,36	6,3	2,5	3,0	3,7	5,3	7,0
1,56	6,4	2,8	3,1	3,3	4,7	7,6
1,76	6,4	3,4	3,6	4,9	4,3	8,1
1,96	6,4	2,9	3,0	5,0	4,4	8,2
2,16	6,4	3,0	3,7	4,6	4,3	8,0
2,36	6,4	2,8	2,9	2,8	4,2	8,4
2,56	6,4	3,5	3,8	4,7	3,8	7,4
2,76	6,4	3,0	3,0	4,1	4,0	4,9
2,96	6,4	2,9	2,8	4,1	2,9	5,4
3,16	6,4	3,5	3,7	3,3	6,2	11,7
3,36	6,4	3,6	3,9	5,3	3,8	11,6
3,56	6,4	4,2	4,7	4,4	3,5	11,3

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
3,76	6,4	3,5	3,3	3,1	4,9	12,0
3,96	6,4	4,0	4,2	3,4	4,2	14,5
4,16	6,4	4,0	3,8	1,5	3,0	15,6
4,36	6,4	5,2	4,4	3,9	4,2	16,0
4,56	6,4	4,1	4,2	5,1	4,5	14,7
4,76	6,4	4,0	4,2	3,9	4,8	10,5
4,96	6,4	4,1	5,6	2,4	5,1	9,6
5,16		4,2	4,0	4,7	5,4	7,9
5,36		2,9	3,4	4,1	3,4	7,5
5,56		4,0	4,8	4,2	3,8	15,3
5,76		4,8	4,3	5,4	5,2	19,2
5,96		5,5	4,7	5,5	4,7	22,8
6,16		5,0	5,5	3,0	5,1	25,8
6,36		6,1	5,8	4,7	6,0	26,4
6,56		5,3	5,5	6,3	4,3	26,8
6,76		5,5	5,9	4,0	4,8	28,3
6,96		3,9	4,4	7,4	8,1	29,3
7,16		4,5	4,8	5,4	4,9	30,4
7,36		4,0	4,4	4,8	5,4	29,9
7,56		3,8	4,0	5,5	5,0	25,2
7,76		3,3	3,2	4,2	4,6	24,4
7,96		3,8	3,9	5,1	5,7	24,6
8,16		5,0	5,3	6,6	5,6	24,7
8,36		4,2	3,7	6,1	6,0	24,9
8,56		4,4	5,0	5,1	7,3	25,4
8,76		4,5	3,9	6,2	4,7	26,2

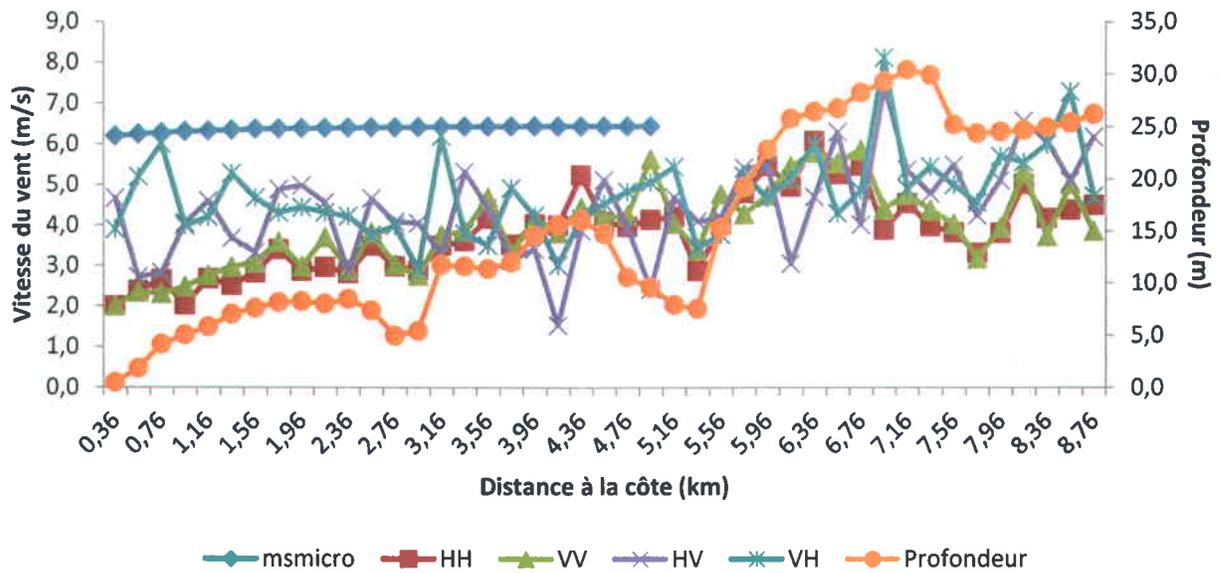


Figure 4.29: Profil P'3 de vitesse à l'ouest de West Point.

Tableau 4.8: Profil P'4 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point.

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
0,2	6,1	2,0	2,0	4,7	4,4	0,2
0,4	6,1	2,2	2,4	3,6	3,9	0,8
0,6	6,1	2,3	3,0	4,5	4,6	3,3
0,8	6,2	2,7	2,4	2,0	5,4	5,5
1,0	6,2	2,8	3,0	6,6	4,8	7,7
1,2	6,3	3,3	3,4	3,9	5,1	9,4
1,4	6,3	3,0	3,0	4,0	4,5	10,4
1,6	6,3	2,6	3,1	4,4	4,3	11,0
1,8	6,3	3,0	3,2	3,3	3,6	11,0
2,0	6,3	2,8	3,0	3,5	2,2	10,5
2,2	6,3	2,9	3,1	4,0	2,8	6,8
2,4	6,3	2,8	2,8	3,3	4,8	4,8
2,6	6,3	4,1	4,7	5,1	6,0	7,9
2,8	6,3	3,6	3,5	4,4	4,4	8,1
3,0	6,3	3,8	4,4	3,1	4,3	7,3
3,2	6,3	5,3	5,1	6,0	4,2	8,3
3,4	6,3	3,1	3,9	5,0	5,0	6,7
3,6	6,3	3,8	4,2	4,0	3,4	6,4
3,8	6,3	4,0	4,2	4,4	4,2	12,6

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
4,0	6,3	3,3	2,9	3,4	5,7	15,2
4,2	6,3	3,4	3,1	5,6	4,9	13,8
4,4		5,7	5,7	4,7	4,4	11,6
4,6		3,5	3,1	3,9	3,4	9,5
4,8		3,3	3,2	4,3	5,3	9,6
5,0		3,8	3,6	4,9	4,1	10,3
5,2		4,6	4,5	2,2	4,3	9,0
5,4		4,1	4,1	4,1	3,4	7,1
5,6		4,3	5,1	2,5	4,2	12,1
5,8		4,5	4,5	5,2	3,3	20,7
6,0		5,5	4,7	5,7	4,8	24,4
6,2		5,6	5,5	5,9	5,0	26,5
6,4		5,6	5,5	6,4	4,8	27,4
6,6		5,6	5,7	5,0	6,0	26,1
6,8		5,2	4,9	3,0	5,8	24,5
7,0		6,0	4,8	6,0	5,4	35,0
7,2		6,3	6,2	5,0	6,3	36,2
7,4		5,5	5,5	7,1	6,1	33,0
7,6		5,6	4,9	6,2	6,4	31,0
7,8		4,9	5,6	6,9	5,9	30,0
8,0		4,9	4,5	5,7	5,2	27,9
8,2		6,2	6,1	5,9	6,0	26,9

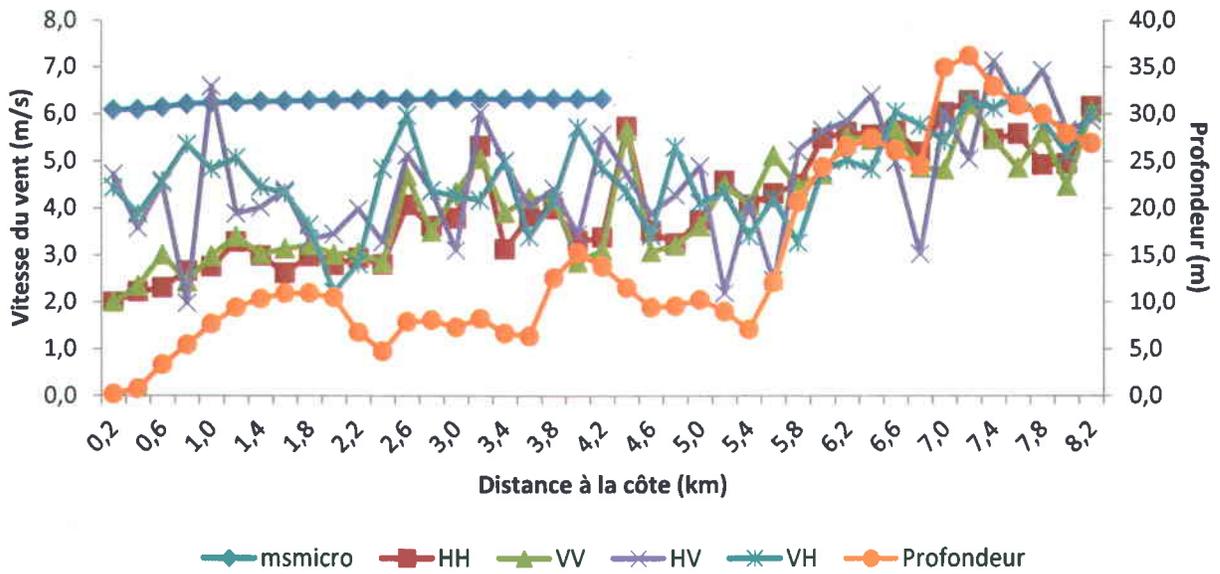


Figure 4.30: Profil P'4 de vitesse à l'ouest de West Point.

Tableau 4.9: Profil P'5 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point.

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
0,32	6,2	2,6	2,7	4,0	4,6	1,7
0,52	6,2	2,5	2,5	2,5	3,3	3,1
0,72	6,3	2,5	2,8	3,6	5,7	6,6
0,92	6,3	2,6	2,8	4,7	5,9	8,1
1,12	6,3	2,8	2,5	4,7	3,8	9,5
1,32	6,3	2,6	2,4	3,8	2,8	11,2
1,52	6,3	2,5	2,3	3,8	4,3	11,0
1,72	6,3	4,8	3,8	3,5	2,9	11,9
1,92	6,3	3,4	3,6	3,9	4,0	11,5
2,12	6,4	3,4	4,1	1,6	4,2	11,5
2,32	6,4	2,8	2,5	3,3	3,3	12,3
2,52	6,4	4,2	3,2	4,7	3,5	12,4
2,72	6,4	4,2	4,0	6,4	2,8	12,0
2,92	6,4	3,6	4,2	5,2	3,9	10,5
3,12	6,4	3,6	4,0	5,5	4,8	9,0
3,32	6,4	4,6	4,6	5,4	3,1	9,0
3,52	6,4	3,8	4,5	3,8	4,1	10,5
3,72	6,4	4,8	5,1	4,7	5,2	12,1
3,92	6,4	3,5	4,4	3,5	4,0	12,8

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
4,12		5,3	4,9	3,3	3,1	12,0
4,32		4,4	4,8	4,6	4,1	14,7
4,52		3,6	3,9	3,9	3,6	13,4
4,72		3,7	3,8	1,7	4,9	15,2
4,92		3,7	3,6	5,3	4,0	12,9
5,12		5,0	5,0	5,4	5,0	11,9
5,32		3,8	3,3	4,9	4,7	9,3
5,52		4,5	4,3	3,3	5,1	7,3
5,72		4,0	4,6	3,9	4,5	6,2
5,92		4,1	4,6	4,7	4,3	9,9
6,12		4,4	4,2	3,8	5,3	18,5
6,32		4,5	5,2	4,1	5,0	23,7
6,52		5,7	5,8	5,4	6,6	25,5
6,72		4,6	4,1	5,3	7,2	26,0
6,92		4,5	4,8	6,0	4,8	27,1
7,12		6,4	6,6	8,2	6,6	29,4
7,32		6,0	5,8	5,7	8,2	32,9
7,52		5,0	5,4	6,3	5,8	34,2
7,72		4,6	3,8	5,6	4,9	33,0
7,92		5,2	4,4	5,5	6,2	31,3
8,12		5,0	4,3	4,9	3,7	28,3

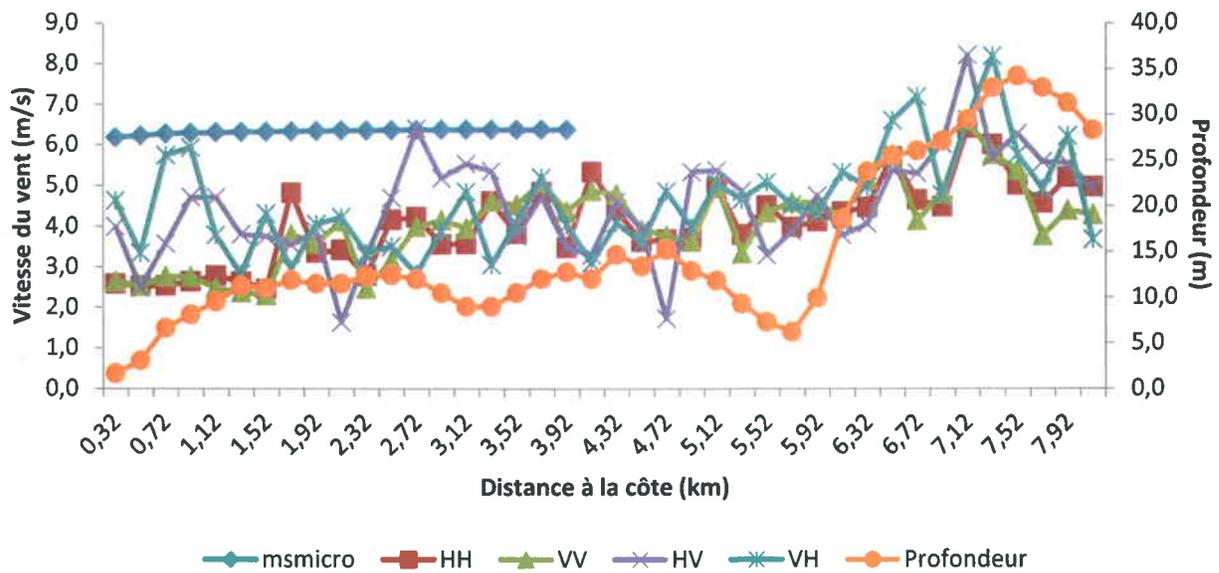


Figure 4.31: Profil P'5 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point.

Tableau 4.10: Profil P'6 de vitesse à l'ouest de West Point.

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
0,28	6,2	2,1	2,2	4,2	3,8	2,4
0,48	6,3	3,1	2,9	4,7	2,6	5,8
0,68	6,3	3,1	2,8	4,4	3,5	7,1
0,88	6,4	3,1	3,2	2,4	2,4	9,5
1,08	6,4	2,7	2,9	3,7	2,6	11,0
1,28	6,4	3,3	3,4	3,7	3,1	10,8
1,48	6,4	2,8	2,6	3,7	2,0	10,8
1,68	6,4	2,8	3,1	5,3	3,4	11,3
1,88	6,4	3,4	4,5	3,4	3,7	12,4
2,08	6,4	4,3	5,0	3,9	4,5	13,9
2,28	6,5	3,3	4,3	3,5	5,8	16,0
2,48	6,5	3,7	3,2	3,7	4,3	16,5
2,68	6,5	3,8	3,8	6,3	5,5	16,0
2,88	6,5	3,9	3,6	3,8	3,3	14,6
3,08	6,5	3,8	3,8	4,0	4,1	12,3
3,28	6,5	4,2	3,9	3,7	4,6	11,8
3,48	6,5	5,1	5,4	4,2	5,8	13,1

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
3,68	6,5	4,0	4,5	4,3	4,8	14,4
3,88	6,5	4,6	4,7	3,7	2,3	15,6
4,08		3,9	4,3	5,4	6,3	16,2
4,28		4,6	3,9	3,8	5,9	16,4
4,48		4,4	4,2	4,2	4,9	16,0
4,68		4,7	5,5	5,0	4,5	15,1
4,88		5,1	4,9	4,6	4,0	13,7
5,08		4,9	4,7	5,6	4,4	12,1
5,28		4,6	4,0	4,4	4,7	10,2
5,48		4,6	4,4	4,6	6,1	9,2
5,68		3,7	4,4	6,6	5,7	8,2
5,88		4,5	4,6	4,6	5,1	6,9
6,08		4,5	4,0	5,2	3,5	7,0
6,28		4,0	4,8	5,0	6,9	12,1
6,48		5,2	4,8	5,2	5,4	15,5
6,68		3,5	4,0	4,9	4,3	20,7
6,88		4,6	4,7	5,4	5,7	24,6
7,08		4,7	4,6	6,8	5,3	25,7
7,28		4,0	3,6	4,1	3,9	26,0
7,48		4,4	5,0	5,0	4,6	26,7
7,68		5,2	4,9	5,5	3,4	27,4
7,88		4,2	4,0	6,3	4,4	29,0
8,08		3,4	3,0	4,0	3,8	29,6
8,28		3,0	3,0	4,4	4,7	30,1

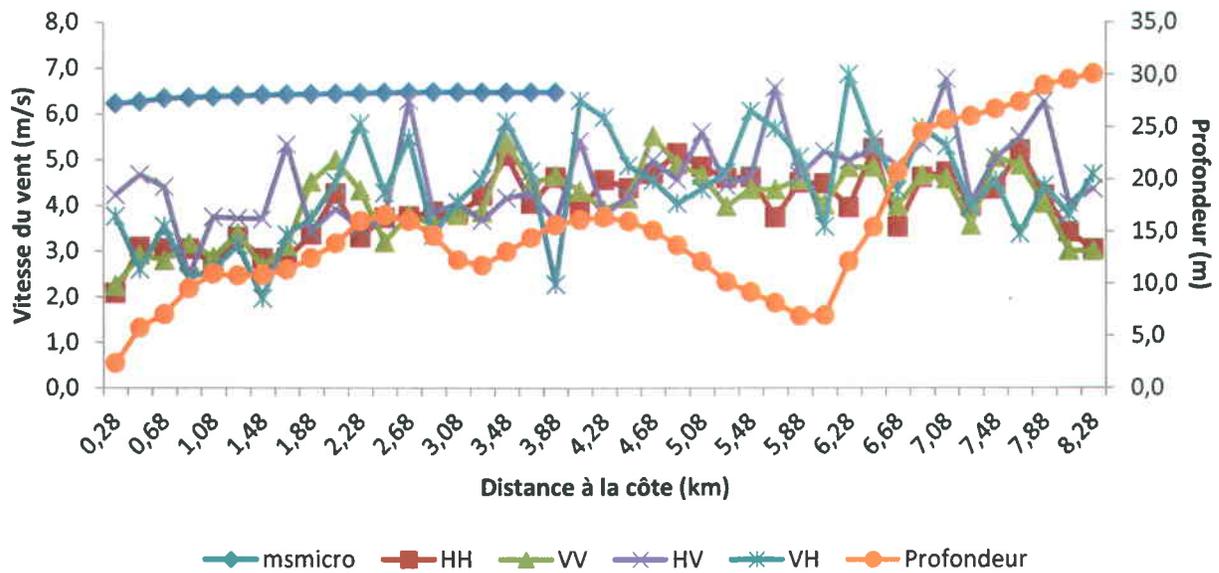


Figure 4.32: Profil P'6 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point.

Tableau 4.11: Profil P'7 de vitesse à l'ouest de West Point.

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
0,30	6,2	2,9	3,1	5,6	2,8	3,8
0,50	6,3	2,9	3,3	4,6	2,2	4,1
0,70	6,4	3,1	3,3	3,1	4,7	6,3
0,90	6,4	2,3	2,5	2,8	3,0	8,1
1,10	6,4	2,7	3,1	3,2	4,7	10,1
1,30	6,5	3,1	3,4	5,4	4,0	11,4
1,50	6,5	3,9	3,8	3,9	3,7	12,1
1,70	6,5	2,9	3,1	3,9	4,2	12,9
1,90	6,5	4,0	4,6	5,1	5,5	14,3
2,10	6,5	3,5	3,6	4,1	5,2	15,6
2,30	6,5	4,7	5,2	4,9	5,7	17,0
2,50	6,5	4,8	4,9	4,3	3,0	17,5
2,70	6,6	4,8	4,1	3,6	3,6	17,6
2,90	6,6	3,3	2,9	2,9	2,8	17,8
3,10	6,6	4,3	4,2	5,8	3,6	17,9
3,30	6,6	3,7	3,4	4,5	4,4	17,8
3,50	6,6	4,1	4,1	4,5	4,5	17,7
3,70	6,6	4,2	4,1	3,4	4,0	17,6
3,90	6,6	4,6	4,3	3,4	5,1	17,4

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
4,10	6,6	4,9	5,4	6,6	5,1	16,6
4,30		5,3	4,7	2,9	3,6	16,3
4,50		4,8	5,4	2,8	4,0	16,1
4,70		5,0	4,6	4,4	7,0	15,9
4,90		4,9	4,2	4,3	4,4	15,6
5,10		5,0	4,2	5,3	5,3	15,1
5,30		5,1	5,3	6,8	5,9	14,5
5,50		4,5	3,8	4,9	4,8	13,2
5,70		5,2	5,1	4,4	3,7	11,4
5,90		4,8	4,4	6,8	5,0	9,6
6,10		5,3	5,9	5,6	4,6	8,4
6,30		5,5	5,6	4,3	4,3	8,0
6,50		5,6	5,5	5,8	5,9	9,2
6,70		5,5	5,7	4,6	3,3	13,0
6,90		3,5	3,4	3,8	5,8	16,1
7,10		4,3	3,5	3,9	5,8	20,9
7,30		3,6	3,8	4,5	3,7	26,0
7,50		4,7	4,7	6,2	5,4	30,6
7,70		3,2	2,7	6,1	5,6	33,9
7,90		3,1	2,8	4,0	4,8	36,3
8,10		3,2	3,1	6,8	5,4	33,4
8,30		3,1	2,8	4,1	2,2	30,1
8,50		3,2	3,1	2,8	3,4	27,8
8,70		3,0	3,2	3,2	4,9	26,1

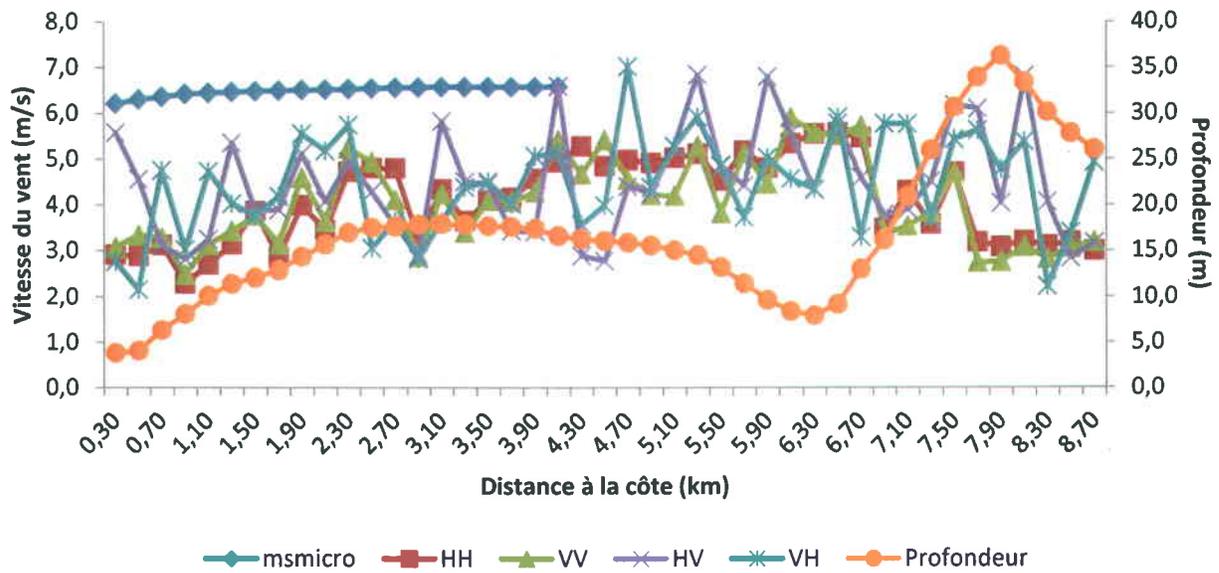


Figure 4.33: Profil P'7 de vitesse à l'ouest de West Point.

Tableau 4.12: Profil P'8 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point.

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
0,31	6,5	2,4	2,7	4,5	3,2	3,0
0,51	6,5	2,7	2,7	4,0	3,4	5,5
0,71	6,5	2,7	2,6	4,4	3,5	8,2
0,91	6,6	3,1	3,1	3,0	4,3	10,7
1,11	6,6	2,9	3,2	3,4	4,1	12,0
1,31	6,6	3,1	2,9	2,0	1,4	13,5
1,51	6,6	3,2	4,2	4,3	4,1	14,0
1,71	6,6	3,5	3,6	5,1	2,4	15,3
1,91	6,6	3,2	3,4	4,5	2,6	16,4
2,11	6,6	4,0	3,4	2,0	4,4	16,9
2,31	6,6	3,6	3,6	4,8	4,8	17,0
2,51	6,7	5,0	5,3	3,2	3,9	17,5
2,71	6,7	4,1	4,3	4,1	4,5	17,9
2,91	6,7	4,8	5,4	6,0	4,9	18,0
3,11	6,7	5,3	5,9	6,2	4,5	18,0
3,31	6,7	4,7	4,8	4,9	4,4	18,0
3,51	6,7	5,1	5,1	4,4	5,4	18,2
3,71	6,7	4,1	4,2	4,8	5,8	18,2
3,91	6,7	5,8	5,0	6,1	7,4	18,0

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
4,11	6,7	5,8	7,0	5,0	6,5	18,2
4,31		4,6	4,8	4,4	4,0	18,3
4,51		5,6	5,6	4,9	5,4	18,4
4,71		4,7	4,4	5,6	5,3	18,3
4,91		6,4	6,4	4,7	6,6	17,5
5,11		6,1	6,4	6,2	5,9	16,6
5,31		4,0	3,5	5,4	4,6	15,6
5,51		3,6	3,7	4,7	3,2	14,4
5,71		5,2	5,1	5,2	5,2	13,1
5,91		3,7	3,6	4,2	3,6	12,0
6,11		5,0	5,5	5,1	4,7	11,0
6,31		5,5	4,2	4,9	3,8	10,8
6,51		4,7	4,1	2,7	3,3	11,8
6,71		2,9	3,2	4,3	4,1	13,9
6,91		3,9	3,4	4,7	3,1	19,5
7,11		3,7	3,3	5,3	3,4	25,8
7,31		3,1	3,2	3,5	4,5	29,1
7,51		3,1	3,0	3,9	4,9	29,8
7,71		3,3	3,2	5,0	3,3	28,7
7,91		3,9	3,4	5,6	4,9	29,2
8,11		3,7	3,3	3,4	5,1	28,4
8,31		2,8	2,7	3,0	3,6	27,5
8,51		2,9	3,0	4,9	5,0	26,8
8,71		3,3	3,1	5,9	6,2	26,2
8,91		2,5	2,3	3,4	3,7	25,6

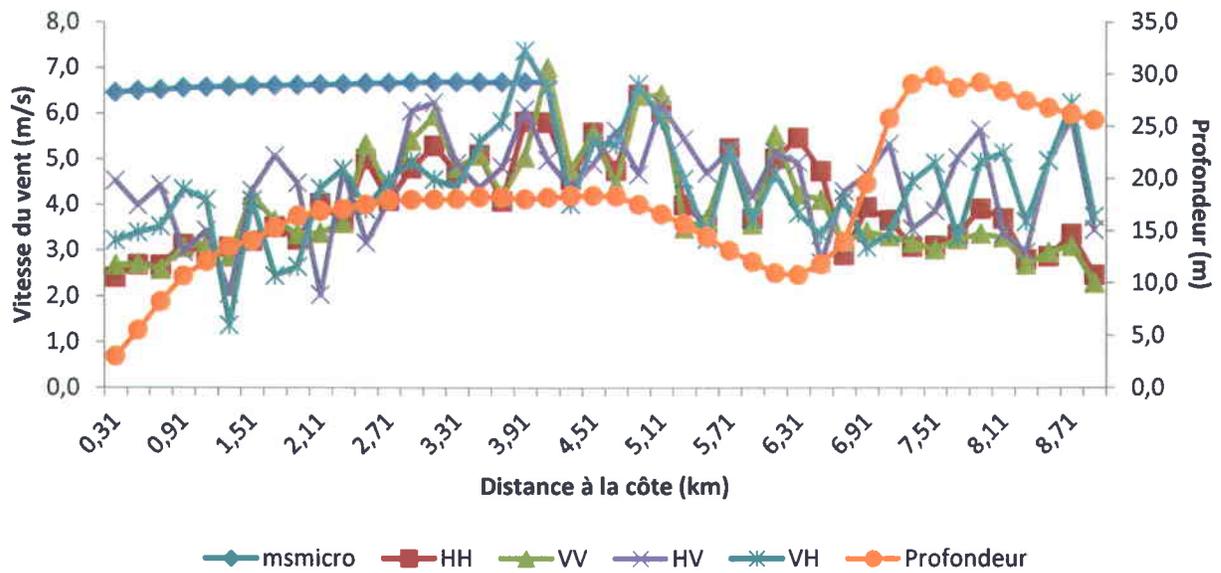


Figure 4.34: Profil P'8 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point.

Tableau 4.13: Profil P'9 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point.

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
0,33	6,5	2,1	2,3	5,6	5,6	6,7
0,53	6,6	2,8	3,0	3,1	6,1	3,6
0,73	6,6	3,0	3,0	4,4	5,8	6,5
0,93	6,6	3,1	3,2	4,7	4,4	8,7
1,13	6,7	3,2	3,7	3,8	4,1	10,5
1,33	6,7	3,5	3,1	4,0	3,5	12,3
1,53	6,7	3,5	3,8	2,7	2,9	13,6
1,73	6,7	3,9	4,0	3,7	3,5	14,4
1,93	6,7	4,7	4,3	2,5	3,0	14,7
2,13	6,7	4,1	4,2	3,6	5,8	15,2
2,33	6,7	4,6	4,1	3,8	3,7	15,4
2,53	6,7	3,8	3,4	2,3	3,6	15,7
2,73	6,8	4,4	4,0	3,8	3,3	15,9
2,93	6,8	4,8	4,4	3,6	3,8	16,2
3,13	6,8	5,5	5,5	4,9	4,6	16,6
3,33	6,8	4,1	4,0	3,4	3,5	17,2
3,53	6,8	6,0	5,1	5,9	4,0	17,5
3,73	6,8	4,4	4,1	5,7	4,0	17,7
3,93	6,8	4,4	4,3	5,2	4,5	17,7

Distance à la côte (en km)	Vitesse (en m/s)					Profondeur de la mer (en m)
	MS Micro	HH	VV	HV	VH	
4,13	6,8	5,1	3,9	4,8	5,8	18,3
4,33	6,8	4,9	5,0	4,6	3,9	18,5
4,53	6,8	4,8	4,8	5,3	4,6	18,3
4,73	6,8	5,6	5,4	6,7	6,1	18,3
4,93		5,1	5,8	3,4	6,5	18,8
5,13		5,0	6,1	4,5	4,8	19,2
5,33		4,6	4,3	4,0	3,1	19,6
5,53		6,4	6,2	5,7	5,1	19,3
5,73		4,7	5,3	4,6	2,9	18,4
5,93		4,6	4,1	4,5	3,8	17,4
6,13		5,2	5,4	6,4	5,8	16,2
6,33		5,9	5,3	5,5	6,7	15,0
6,53		3,9	3,5	3,6	4,5	15,1
6,73		5,5	5,3	5,9	6,0	14,2
6,93		5,3	4,6	4,2	4,0	14,1
7,13		4,6	4,0	6,8	4,3	15,9
7,33		5,7	5,1	4,5	4,6	18,7
7,53		3,8	3,8	3,8	4,7	24,2
7,73		3,7	3,7	4,7	3,8	27,6
7,93		2,8	2,9	4,2	3,5	28,8
8,13		2,6	2,2	4,4	3,9	30,0
8,33		3,1	2,6	4,8	3,9	30,5
8,53		2,6	2,0	4,1	4,6	30,3
8,73		2,9	2,5	4,5	2,8	29,8
8,93		4,1	3,7	5,8	4,9	29,2
9,13		3,3	3,0	3,9	3,2	28,7
9,33		3,3	3,3	2,5	4,4	28,1
9,53		4,2	4,1	3,3	2,3	27,5
9,73		2,3	2,2	4,1	3,2	26,8

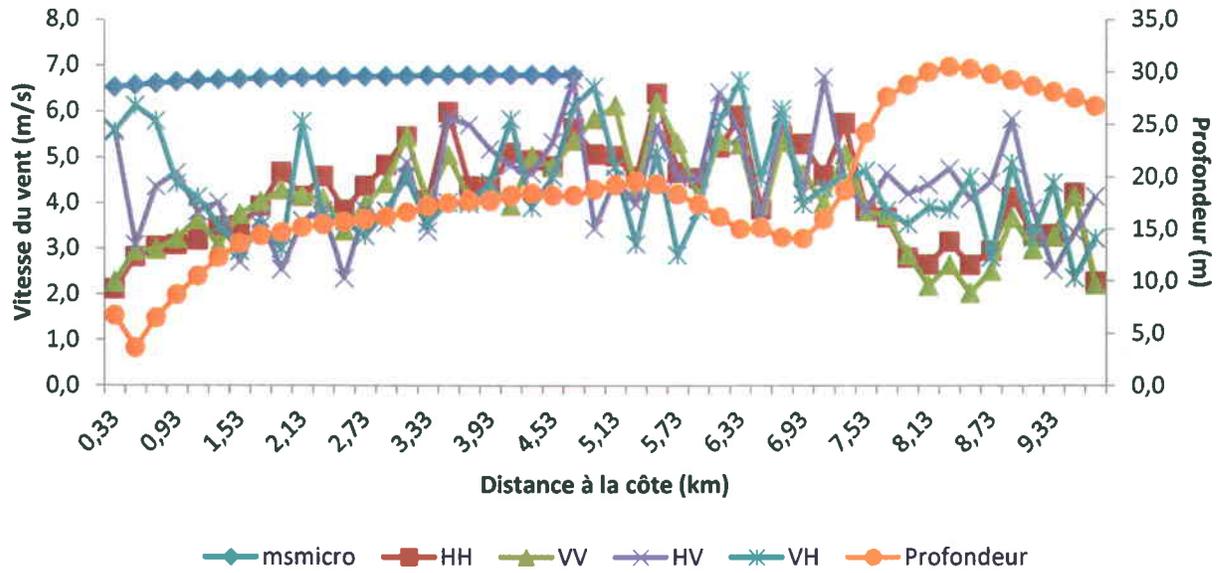


Figure 4.35: Profil P'9 de vitesse (en m/s) à l'ouest de West Point.