

**Modernisation des données de réanalyse pour WEST et impact
sur le potentiel éolien analysé: implantation des réanalyses
ERA5**

par

David Grenier

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE

M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 21 JUILLET 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



David Grenier, 2021



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

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Daniel Rousse, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Robert Benoit, co-directeur
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Stanislaw Kajl, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Antoine Tahan, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

LE 7 JUILLET 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Ce mémoire de maîtrise a été complété sous la direction de Robert Benoit et Daniel Rousse à l'École de Technologie Supérieure ainsi que sous celle du Professeur Christian Masson qui nous a quittés avant la fin de cette recherche. Je tiens à exprimer ma plus profonde sympathie aux membres de sa famille et ses amis. Je tiens premièrement à exprimer ma reconnaissance et à remercier avec toute ma gratitude mon directeur Robert Benoit pour l'aide précieuse, la confiance, l'engagement et la patience inégale tout au long de ce projet de recherche. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie. Il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de ce mémoire. Sa contribution scientifique est le fondement de ce projet et je serai toujours reconnaissant du temps qu'il a consacré à m'aider et à m'enseigner. Sa relecture enrichissante et méticuleuse de chacun des chapitres m'a sans aucun doute permis de préciser mon propos.

Je tiens à remercier à Daniel Rousse d'avoir accepté de prendre en charge le projet pour mettre à terme mon mémoire, pour sa relecture scrupuleuse du manuscrit, pour ses suggestions toujours avisées ainsi que le temps qu'il a consacré à ma recherche.

Je tiens à remercier également monsieur Stanislaw Kajl et monsieur Antoine Tahan pour l'honneur qu'ils me font d'être membre de mon jury de mémoire et pour leurs participations scientifiques.

De plus, je remercie toutes les personnes avec qui j'ai partagé mes études notamment mes collègues et amis qui m'ont apporté leurs supports morales et intellectuels tout au long de mon parcours académique.

Je tiens absolument à remercier mes parents, Salieme Pongphimkham et Renaud Grenier, ma soeur Diane et mon frère Daniel ainsi que ma chère famille pour tout l'amour et l'immense soutien depuis toujours et à chaque étape de ma vie. Je vous dédie ce mémoire.

Je tiens également à remercier mes amis les plus chers, en particulier Vincent Raymond, Maxime Bourdon, Mathieu St-Pierre et Jérémie Guertin pour leurs sincères amitié et confiance et à

qui je dois ma reconnaissance et mon attachement. Grâce à leur support moral et leurs idées inspirantes, j'ai su garder la force de mettre à bien cette étape importante de ma vie. Vous avez toujours été ma plus grande source d'inspiration. Enfin, je ne suis pas près d'oublier tous ces moments extraordinaires.

Finalement, j'adresse mes sincères remerciements à tous les intervenants et professeurs qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches.

Modernisation des données de réanalyse pour WEST et impact sur le potentiel éolien analysé: implantation des réanalyses ERA5

David Grenier

RÉSUMÉ

L'évaluation des ressources éoliennes est une étape importante pour l'installation d'un parc éolien. Le laboratoire de recherche du Centre Météorologique du Canada (CMC) d'Environnement Canada (EC) a développé un outil de simulation d'énergie éolienne (WEST) pour l'industrie de l'énergie éolienne. WEST est basé sur le modèle à méso-échelle MC2 (Canadian Mesoscale Compressible Community Model), le modèle micro-échelle MSMicro ainsi qu'un module statistique permettant d'obtenir la climatologie du vent régional à plus hautes résolutions. WEST a notamment été appliqué sur la région de la Gaspésie et sur les régions montagneuses du Yukon afin de simuler le vent en terrain complexe. WEST utilise présentement les réanalyses NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research). Toutefois, les réanalyses NCEP s'avèrent désuètes. Plusieurs auteurs démontrent que les données de réanalyse de l'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ERA5 (ECMWF Reanalysis 5th Generation) offrent de très bonnes performances et que sa fine résolution est prometteuse pour le développement de l'énergie éolienne. Toutefois, d'autre recherches ont démontrées certaines déficiences de prédiction sur les vitesses de vent qui peuvent conduire à une sous-estimation de la production d'énergie éolienne, particulièrement dans les régions ayant une topographie complexe.

L'objectif du projet consiste donc à tenter de moderniser le modèle WEST en modifiant la base de données de réanalyse NCEP $2,5^\circ$ par ERA5 à $0,25^\circ$ et d'évaluer l'impact sur le potentiel éolien modélisé pour la région de la Gaspésie. La nouvelle base de données est incorporée dans le schéma de classification géostrophique de WEST afin d'améliorer les tables fréquentielles. Ensuite, une analyse statistique est faite sur les résultats obtenus. Les résultats sont comparés aux données d'anémométrie provenant d'une campagne de mesures faite par le Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRNQ) et EC. Il est montré que l'incorporation de ERA5 dans le modèle WEST ne donne pas le rendement escompté. Les résultats montrent que ERA5 à $0,25^\circ$ n'améliore pas les tables fréquentielles, principalement par rapport à la fréquence de la vitesse et à la direction du vent géostrophique (V_g). En fait, cette mauvaise performance rend pratiquement impossible l'utilisation de réanalyse avec la base de données ERA à $0,25^\circ$ telle qu'elle est. Cela se traduit par une variabilité accrue localement, qui n'est toutefois pas toujours présente selon le domaine analysé. Or, la moyenne du module de V_g (VGM) a permis de montrer qu'il existe une réduction des pressions au niveau de la mer qui cause une anomalie dans le gradient de pression qui lui définit le V_g sous la montagne. Il est donc essentiel d'apporter une correction à l'erreur des V_g amplifiées par le relief et d'utiliser les réanalyses ERA5 sur les niveaux du modèle (ETA) (dataset = "reanalysis-era5-complete", et non dataset = "reanalysis-era5-pressure-levels"). Une évaluation de la distribution spatiale des histogrammes du module $|V_g|$ et des roses des vents V_g a permis de mettre en évidence les directions erronées et les vitesses surestimées de ERA5 à $0,25^\circ$ et qui disparaissent lors de l'usage avec ERA5 ETA.

WEST demeure un modèle intéressant pour fournir des champs de vent près de la surface. C'est un outil très important dans l'industrie de l'énergie éolienne. Ainsi, en modernisant les données de réanalyse WEST, il est possible d'améliorer grandement la capacité du modèle à simuler les vents dans des zones potentielles pour le développement d'un parc éolien.

Mots-clés: énergie éolienne, réanalyses, ERA5, NCEP, modernisation, WEST

Modernization of WEST reanalysis data and impact on the wind potential analyzed : implementation of ERA5 reanalysis.

David Grenier

ABSTRACT

Wind resource assessment is an important step for the installation of wind farms. Environment Canada's (EC) Meteorological Center of Canada (CMC) research lab has developed a Wind Energy Simulation Toolkit (WEST). WEST include the MC2 (Canadian Mesoscale Compressible Community Model) mesoscale model, the MSMicro microscale model and a statistical module to establish a regional wind climate at higher resolution. WEST has been applied in the Gaspésie region and in the mountainous regions of Yukon to estimate the wind in complex terrain. WEST currently uses NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research) reanalysis which is outdated. Researchers have shown that ERA5 (ECMWF Reanalysis 5th Generation) reanalysis data from the ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) have good skills and its high resolution is promising for the development of wind power. However, Other research have demonstrated some lack in wind speed which can lead to an underestimation of wind power production, particularly in regions with complex topography.

Therefore, in this context the objective of the current work aims to modernize WEST by modifying the NCEP 2.5° reanalysis database by ERA5 to 0.25° and to evaluate its impact on the potential wind power in the Gaspésie region. The new database is incorporated into WEST's geostrophic classification scheme to improve frequency tables. Then, a statistical analysis is made on the results. The results are compared with anemometry data from a measurement campaign carried out by the Ministry of Natural Resources of Quebec (MRNQ) and EC. It is shown that the implementation of ERA5 in WEST does not provide the expected return. The results show that ERA5 at 0.25° does not improve frequency tables, especially for the frequency of geostrophic wind (V_g) speed and direction. In fact, this weak performance makes it virtually impossible to use 0.25° ERA reanalysis as it is. This results in increased local variability, which is however not always present depending on the area analyzed. However, the average of the magnitude of V_g (VGM) made it possible to show that there is a reduction in pressure at sea level, which causes an anomaly in the pressure gradient that defines the V_g under the mountain. It is therefore essential to correct the error of the V_g amplified by the relief and to use the ERA5 reanalysis on the model levels (ETA) (dataset = "reanalysis-era5-complete" instead of dataset = "reanalysis-era5-pressure-levels"). An assessment of the spatial distribution of the histograms and wind roses revealed the erroneous directions and overestimated speeds of ERA5 at 0.25° which disappear when used with ERA5 ETA.

WEST is still an interesting model to provide wind fields close to the surface. This is an important tool in the wind energy industry. Thus, by modernizing the WEST reanalysis data source, we aim at improving the model's ability to simulate the winds in potential areas for the development of a wind farm.

X

Keywords: wind power, reanalysis, ERA5, NCEP, modernization, WEST

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1 Les modèles micro et méso-échelles	5
1.2 Le modèle WEST et ses applications	7
1.3 Les données de réanalyse	12
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	17
2.1 Les forces fondamentales	17
2.1.1 La force du gradient de pression	17
2.1.2 La force de friction	18
2.1.3 L'équilibre hydrostatique	19
2.1.4 L'équilibre et le vent géostrophique	19
2.1.5 L'équilibre et le vent géostrophique	20
2.2 Les réanalyses NCEP et ERA5	21
2.3 Le modèle WEST	24
2.3.1 Le schéma de classification	26
2.3.2 Modification au schéma de classification	28
2.3.3 Le modèle MC2	30
2.4 Les données d'anémométrie	31
2.5 Outil de moyennage des tables	32
CHAPITRE 3 RÉSULTATS	35
3.1 Les domaines et les points centroïdes utilisés	36
3.2 Caractéristiques spatiales des réanalyses NCEP et ERA5	37
3.3 Évaluation des réanalyses NCEP et ERA5	39
3.3.1 Comparaison entre les tables fréquentielles des réanalyses NCEP et ERA5	39
3.3.2 Comparaison des tables fréquentielles des réanalyses ERA5 à $0,25^\circ$ et $2,5^\circ$	43
3.3.3 Comparaison statistique entre les données WESTATS des réanalyses et d'anémométrie	43
3.3.4 Cartes de moyenne du vent simulé par MC2 de WEST dans la région la Gaspésie	48
3.4 Comparaison entre les tables fréquentielles des réanalyses ERA5 à $0,5^\circ$ et $1,25^\circ$	49
3.5 Comparaison entre les tables fréquentielles des réanalyses ERA5 moyennées	51
3.5.1 Les réanalyses ERA5 moyennées dans la région de la Gaspésie	51
3.5.2 Les réanalyses ERA5 moyennées sur les Prairies canadiennes	53
3.6 Table fréquentielle ERA5 $0,25^\circ$ sur un autre point de grille en Gaspésie	56

3.7	Comparaison du paramètre de la moyenne du module de Vg à 1000 mb pour les réanalyses ERA5 0,25° et 2,5°	58
3.8	Résumé des résultats	69
CHAPITRE 4 ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS		71
4.1	Impact de l'intégration de ERA5 dans WEST	71
4.2	La variabilité entre 0,5° et 1,25°	73
4.3	Expérimentation de l'outil de moyennage de tables dans la région de la Gaspésie et des Prairies canadiennes	74
4.4	Exploration des tables ERA5 0,25° dans le domaine en Gaspésie	75
4.5	Évaluation du VGM des réanalyses ERA5 0,25° et 2,5°	75
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		77
ANNEXE I	LE MODE DEMPLOI DE LOUTIL ECCODES	81
ANNEXE II	SCRIPT DE LA CONSTRUCTION DES GRAPHES STATISTIQUES	85
ANNEXE III	SCRIPT DE LA CONSTRUCTION DES TABLES MOYENNÉES PAR COMBINAISON DES TABLES PLUS FINES	89
BIBLIOGRAPHIE		92

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Paramètres des modèles MC2 et MsMicro Tiré de Yu et al. (2006, p. 26)	8
Tableau 2.1 Comparaison entre les Réanalyses NCEP/NCAR et ERA5	23
Tableau 2.2 Caractéristiques des stations d'observation	33
Tableau 2.3 Caractéristiques du vent mesuré aux stations d'observation	33
Tableau 3.1 Mesures d'anémométrie des mâts du MRNQ et la moyenne de la vitesse du vent (EU) en ms^{-1} des tables NCEP et ERA5 2,5° pour 10 et 25 ans. Statistiques de comparaison des réanalyses ; erreur moyenne, écart quadratique moyen (RMSD) et le coefficient de corrélation	46
Tableau 3.2 Tableau 3.2 Mesures d'anémométrie des mâts du MRNQ et la moyenne de la vitesse du vent (EU) en ms^{-1} des tables ERA5 0,25° pour 10 et 25 ans. Statistiques de comparaison des réanalyses ; erreur moyenne, écart quadratique moyen (RMSD) et le coefficient de corrélation	47

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Distribution de la fréquence d'occurrence de (a) la vitesse du vent géostrophique et (b) la direction du vent. La ligne pointillée montre le vent moyen Tirée de Yu et al. (2006, p. 25)	8
Figure 1.2	Vitesse moyenne du vent simulé par WEST en ms^{-1} . Les courbes noires sont le résultat de MC2 uniquement. Les points noirs montrent la position des stations d'observation. Tirée de Yu et al. (2006, p. 26)	10
Figure 1.3	Atlas canadien du vent produit avec WEST	11
Figure 2.1	Organigramme de WEST Tirée de Yu et al. (2006, p. 18)	25
Figure 2.2	Exemple de a) l'ancienne version et b) la nouvelle version d'une table.	29
Figure 2.3	Position géographique des stations d'observation du MRNQ. Le champ représente la topographie du domaine en mètre. Les valeurs indiquent les vitesses des vents moyens observées pour chaque station en ms^{-1}	32
Figure 3.1	Les domaines et points importants du projet. Les points A, B et C représentent les coordonnées des tables utilisées pour les comparaisons	36
Figure 3.2	Comparaison du champ géopotentiel (GZ) au niveau isobarique de 500 mb, en décamètre (dam) le 1 janvier 1994 à 00Z. Représentation de GZ pour a) ERA5 à $2,5^\circ$, b) NCEP à $2,5^\circ$. Le panneau c) montre la différence entre les champs a) et b) en dam	38
Figure 3.3	Le panneau a) représente le champ géopotentiel (GZ) au niveau isobarique de 500 mb, en décamètre (dam) le 1 janvier 1994 à 00h00Z pour ERA5 0,25. Le panneau b) montre la différence entre le champ a) et GZ pour ERA5 $2,5^\circ$ (figure 3.2a) en dam	39
Figure 3.4	Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 à $2,5^\circ$ sur la colonne de gauche et NCEP à $2,5^\circ$ sur la colonne de droite. La période est de 19940101 à 20031231 et la coordonnée géographique est $48,75^\circ\text{N}$ et $296,25^\circ\text{O}$	41

Figure 3.5	Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 à 2,5° sur la colonne de gauche et NCEP à 2,5° sur la colonne de droite. La période est de 19790101 à 20031231 et la coordonnée géographique est 48,75°N et 296,25°O	42
Figure 3.6	Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 à 0,25° sur la colonne de gauche et ERA5 à 2,5° sur la colonne de droite. La période est de 19940101 à 20031231 et la coordonnée géographique est 48,75°N et 293,75°O	44
Figure 3.7	Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 à 0,25° sur la colonne de gauche et ERA5 à 2,5° sur la colonne de droite. La période est de 19790101 à 20031231 et la coordonnée géographique est 48,75°N et 293,75°O	45
Figure 3.8	EU (ms^{-1}) de la Gaspésie avec les réanalyses a) NCEP 2,5°, b) ERA5 2,5° et c) ERA5 0,25°. Les panneaux d) et e) représentent la différence entre les champs de EU entre ERA5 et NCEP à 2,5° et entre ERA5 0,25 et 2,5° respectivement	48
Figure 3.9	Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 à 0,5° sur la colonne de gauche et ERA5 à 1,25° sur la colonne de droite. La période est de 19940101 à 20031231 et la coordonnée géographique est 48,75°N et 293,75°O	50
Figure 3.10	Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 moyennée avec 2 x 2 tables natives à 1,25° sur la colonne de gauche et ERA5 à 2,5° sur la colonne de droite. La période est de 19940101 à 20031231 et la coordonnée géographique est 48,75°N et 293,75°O	52
Figure 3.11	Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 moyennée avec 10 x 10 tables natives à 0,25° sur la colonne de gauche et ERA5 moyennée avec 5 x 5 tables natives à 0,5° sur la colonne de droite. La période est de 19940101 à 20031231 et la coordonnée géographique est 48,75°N et 293,75°O	53
Figure 3.12	Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 moyennée avec 2 x 2 tables natives à 1,25° sur la colonne de gauche et ERA5 à 2,5° sur la colonne de droite. La période est de 19940101 à 20031231 et la coordonnée géographique est 50,75°N et 251,25°O	54
Figure 3.13	Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 moyennée à 0,25° sur la colonne de gauche et à 0,5° sur la colonne de droite. La période est de 19940101 à 20031231 et la coordonnée géographique est 50,75°N et 251,25°O	55

Figure 3.14	Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 à 0,25° sur la colonne de gauche et ERA5 à 2,5° sur la colonne de droite. La période est de 19940101 à 20031231 et la coordonnée géographique est 48,250°N et 294,25°O	57
Figure 3.15	Le paramètre la moyenne du module de Vg (à 1000 mb) (VGM) de la réanalyse ERA5 2,5° a) sur l'est du Canada et b) centré en Gaspésie. Le champ représente VGM et les lignes de côte sont en rose. Les cercles noirs représentent les points grilles. Valide pour une moyenne sur un an de réanalyse, 1994 au niveau de la mer (1000 mb)	59
Figure 3.16	Le paramètre la moyenne du module de Vg (à 1000 mb) (VGM) de la réanalyse ERA5 0,25° a) sur l'est du Canada et b) centré en Gaspésie. Dans le panneau a), l'échelle de couleur est pour les valeurs de VGM/10. donc $1=10 \text{ ms}^{-1}$. Valide pour une moyenne d'un an de réanalyse, en 1994, au niveau 1000 mb pour VGM et la topographie par rapport à mer ($z=0$)	60
Figure 3.17	VGM de ERA5 0,25° en noir et 2,5° en rouge superposés dans la région des Prairies canadiennes valide pour une moyenne sur un an le 1994 au niveau de la mer (1000 mb). L'échelle de couleur est VGM en ms^{-1}	62
Figure 3.18	VGM de ERA5 0,25° dans a) l'est du Canada sur les niveaux verticaux 0 et 1500 m. Les lignes rouges et noires sont les VGM à 0 et 1500 m respectivement. Les lignes blanches représentent la géographie. En b), VGM centrée en Gaspésie. La flèche dans le panneau a) représente une coupe verticale illustrée à la figure 3.19	63
Figure 3.19	Coupe verticale des 4 niveaux de 0 à 5500 m de VGM. La coupe verticale est représentée par une flèche illustrée sur la figure 3.18	64
Figure 3.20	VGM en coordonnées a) ETA à 490 m et b) isobariques à 1000 mb dans l'est du Canada	66
Figure 3.21	Distribution spatiale des histogrammes en coordonnées a) ETA à 490 m et b) isobariques à 1000 mb dans l'est du Canada	67
Figure 3.22	Distribution spatiale des roses des vents en coordonnées a) ETA à 490 m et b) isobariques à 1000 mb dans l'est du Canada	68

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2D	Deux dimension
3D-var	Three dimensional variational data assimilation
4D-var	Four dimensional variational data assimilation
AGL	Niveau au-dessus du sol
ANU	Annual
ASCAT	Advanced Scatterometer
ASL	Niveau au-dessus de la mer
C3S	Copernicus Climate Change Service
CDED	Canadian Digital Elevation Data
CDS	Climate Data Store
CDS API	Climate Data Store Application Program Interface
CLA	couche limite atmosphérique
CLASSIF	Classification
CMC	Centre Météorologique du Canada
DJF	Décembre Janvier Février
EC	Environnement Canada
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA5	ECMWF Reanalysis 5th Generation
ERA5 BE	ERA5 Back Extension
ERA-I	ERA-Interim
ETA	Niveaux du modèle
FREQS	Fréquences
GES	Gaz à effet de serre

GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat
IBTrACS	International Best Track Archive for Climate Stewardship
IFS	Système de prévision intégré
INDIR	chemin d'entrée pour les réanalyses
IRENA	Agence Internationale pour les Énergies Renouvelables
ip1s	niveaux de pressions nominales
JJA	Juin Juillet Août
KAMM	Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model
LES	Simulation à grandes échelles
PMPE	Programme de mesure du potentiel éolien
RA	Réanalyse
RPN	Recherche en Prévision Numérique
SON	Septembre Octobre Novembre
MAM	Mars Avril Mai
MC2	Canadian Mesoscale Compressible Community Model
MC2-LES	MC2-Large Eddy Scale
MERRA	Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications
MRNQ	Ministère des Ressources naturelles du Québec
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
nclass	nombre de classe
NetCDF	Network Common Data Form
nsect	nombre de divisions pour la direction du vent
USGS	United States Geological Survey
UTC	Temps universel coordonné

WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program
WCRP	World Climate Research Programme
WEST	Wind Energy Simulation Toolkit
WESTATS	Module Statistique de WEST
WRF	Weather Research and Forecasting

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

°	degrée
°C	degrée Celcius
dam	décamètre
g	gravité
h	heure
hPa	hectopascal
J	Joule
m	masse
m	mètre
m^2	mètre carrée
ms^{-1}	mètre par seconde
km	kilomètre
km^2	kilomètre carrée
mb	millibar
mol	mole
mol^2	unité par mole
Ω	vitesse angulaire de la Terre
%	pourcentage
p	pression
ρ	masse volumique de l'air
∇p	gradient de pression
T	température
c	facteur d'échelle de la loi de Weibull

EU	moyenne de la vitesse du vent
f	paramètre de Coriolis
\overrightarrow{F}_{gp}	force du gradient de pression
\overrightarrow{F}_r	force de friction
f_{xu}	composante du vent dans la direction x
f_{xv}	composante du vent dans la direction y
grad	gradient
GZ	hauteur géopotentielle
k	facteur de forme de la loi de Weibull
\vec{k}	vecteur unitaire vertical
kg^{-1}	unité par kilogramme
LAT	latutide des points de la réanalyse
LON	longitude des points de la réanalyse
p_{sfc}	pression à la surface
ϕ	latitude
R	constate des gaz parfaits
R	coefficient de corrélation
rms	moyenne quadratique
RMSD	écart quadratique moyen
SFRQ	somme des fréquences de la classification
μ	coefficient de viscosité dynamique
σ_u	écart-type
\bar{u}	vent moyen
u	composante du vent dans la direction des abscisses (x)
v	composante du vent dans la direction des ordonnées (y)

UGH	distribution de la fréquence de la vitesse de Vg
UHR	distribution de la fréquence de la direction de Vg
UGHR	distribution de la fréquence bivariée de la vitesse et de la direction moyennes de Vg
u_g	composante x de Vg
v_g	composante y de Vg
UU	composante de l'histogramme directionnel de fréquence ug
VV	composante de l'histogramme directionnel de fréquence vg
\vec{V}	vecteur du vent
Vg	vent géostrophique
VGM	moyenne du module de Vg
VGET	écart-type du module de Vg
VGC	coefficient c de Weibull
VGK	coefficient k de Weibull
z	composante vertical
z_{sfc}	hauteur à la surface
zmat	hauteur du mât en mètre
Z	zoulou (UTC)

INTRODUCTION

L'Accord de Paris (2015) s'est fixé l'objectif de contenir la hausse de la température moyenne mondiale en dessous de 2 °C d'ici la fin de ce siècle et de maintenir les efforts pour limiter celle-ci à 1,5 °C par rapport aux niveaux de l'époque préindustrielle. Ceci permettrait de réduire grandement les risques liés aux changements climatiques. De plus, le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) affirme que si nous n'arrivons pas à réduire considérablement nos émissions de carbone, nous pourrions franchir un seuil où l'avenir serait marqué par des événements climatiques catastrophiques (IPCC, 2018). Par conséquent, les énergies renouvelables et l'amélioration continue de l'efficacité énergétique constituent la solution pour un avenir énergétique durable. Ce sont les principaux piliers de la transition énergétique. L'agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) affirme que pour y arriver, le système énergétique mondial doit subir des transformations majeures afin de passer à un système fondé sur les énergies renouvelables (IRENA, 2019).

L'énergie cinétique de l'air en mouvement est transformé en électricité par des éoliennes qui sont installées à des endroits où les conditions météorologiques sont les plus favorables. Les éoliennes sont regroupées pour former des centrales ou des parcs éoliens. L'utilisation de cette forme d'énergie permet de réduire l'empreinte écologique puisqu'elle ne produit aucun polluant ni gaz à effet de serre excepté lors de la fabrication des éoliennes et l'aménagement du site. De plus, l'exploitation de cette ressource ne nécessite aucun combustible et réduit donc la dépendance aux combustibles fossiles.

Contenu de la forte croissance de la demande d'énergie mondiale, il est nécessaire de trouver et d'exploiter d'autres régions à fort potentiel énergétique. Selon Ressources naturelles Canada (2020), la géographie et le climat du territoire canadien sont propices à la production de grandes quantités d'énergie éolienne. Le Canada pourrait tirer des avantages considérables à l'exploitation de cette forme d'énergie à grande échelle, notamment en faisant des économies d'énergie et en

réduisant les émissions de gaz à effet de serre (GES). Toutefois, il est intéressant de poursuivre les recherches et développements des technologies éoliennes afin d'augmenter leur efficacité, de prolonger leur durée de vie, d'atténuer certains problèmes d'interconnexion et d'améliorer l'évaluation de la ressource éolienne. Il est pertinent de soutenir une croissance de l'expertise mondiale dans le domaine de l'énergie éolienne pour permettre de faire progresser certains aspects de cette filière.

L'évaluation de la ressource éolienne est une étape essentielle pour l'installation d'un parc éolien. Cela peut être réalisé par l'extrapolation des données d'observation qui proviennent principalement des stations météorologiques et des mâts d'observation installés sur les sites. Cependant, la validité spatio-temporelle de ces mesures dépend considérablement du régime climatique et de la complexité de la région ce qui peut remettre en question la fiabilité des mesures. Des recherches ont donc développé des modèles numériques utilisant des bases de données globales afin d'établir un climat régional du vent. C'est alors que le laboratoire de recherche du Centre Météorologique Canada (CMC) a mis au point le modèle WEST (Wind Energy Simulation Toolkit) afin d'estimer la ressource éolienne. Par contre, la base de données globales, nommée réanalyse, utilisée actuellement dans WEST s'avère désuète et relativement grossière ce qui affectent directement la performance du modèle à représenter adéquatement le climat éolien.

Dans ce contexte, l'objectif du projet consiste à moderniser le modèle WEST afin de raffiner les résultats à très fine échelle en modifiant la base de données de réanalyse et d'en évaluer l'impact de ce changement sur le potentiel éolien modélisé. Tout d'abord, une nouvelle base de données sera incorporée pour la classification géostrophique de WEST afin d'améliorer les tables fréquentielles. Ce sont les données ERA5 qui seront utilisées pour générer les nouvelles tables. Ensuite, une analyse statistique est faite sur les résultats obtenus afin d'évaluer l'impact sur la production éolienne potentielle. Cette étude se concentre davantage à la région de la Gaspésie.

WEST est un candidat intéressant pour l'industrie du développement éolien puisqu'il fournit une cartographie du vent près de la surface. Ainsi, en modernisant les données de réanalyse de WEST, cela améliorerait grandement la capacité du modèle à représenter le climat du vent et à simuler les vents dans les régions potentielles à l'exploitation des ressources éoliennes.

Les réanalyses ERA5 ont une plus haute résolution spatio-temporelle que celles utilisées actuellement, soit NCEP/NCAR. Une fois intégré dans WEST, cela aurait pour avantage d'obtenir des vitesses et directions de vent et un potentiel éolien plus représentatif de la réalité. Cette étude tentera de définir si l'introduction d'une base de données à plus haute résolution spatiale se traduira par une meilleure représentation locale du climat ou bien un climat plus consistant des ensembles. De plus, cette étude tentera de déterminer si la variabilité accrue localement est toujours présente et la possibilité que celle-ci puisse être nuisible selon l'application visée.

Le chapitre 1 de ce document présente une revue de littérature. Le chapitre 2 présente le modèle WEST et ses principales composantes pertinentes pour la réalisation de cette étude. Cette section décrit en détail les paramètres utilisés afin d'introduire les nouvelles réanalyses dans le système, l'initialisation du modèle méso-échelle et micro-échelle ainsi que le module statistique WESTATS. Le chapitre 3 présente les résultats obtenus et dans le chapitre 4, une discussion est faite dans le but de comparer les résultats simulés par WEST avec la nouvelle la base de données ERA5 à NCEP/NCAR, par rapport aux mesures d'observation. Finalement, ce rapport se termine par une conclusion et des recommandations pour de futures recherches.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Les modèles micro et méso-échelles

Afin de pallier les limites d'extrapolation liées à la variabilité spatio-temporelle des données mesurées sur les sites d'observation, des recherches ont été réalisées afin de développer des modèles qui simulent l'écoulement dans la couche limite atmosphérique. MSMicro (Walmsley et al., 1986) et WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) (Troen et Petersen, 1989) sont parmi les modèles micro-échelles les plus populaires pour la cartographie éolienne. Ces modèles sont dérivés de la théorie bidimensionnelle de Jackson et Hunt (1975).

Walmsley et al. (1986) ont évalué les performances de MSMicro, un modèle micro-échelle linéarisé. Ils ont développé une théorie de l'écoulement au-dessus d'une variation spatiale de la rugosité de surface. Les perturbations de l'écoulement se sont avérées en accord raisonnable avec celles obtenues à partir de différents modèles à différences finies non-linéaires. De plus, MSMicro a fonctionné de manière satisfaisante pour un écoulement sur un terrain bidimensionnel avec des perturbations induites par des variations de topographie et de rugosité, en comparaison avec des modèles à différences finies. Les modifications induites doivent être judicieusement choisies et être confinées à une couche peu profonde près de la surface pour obtenir les meilleurs résultats. Un soin doit être pris en compte en ce qui concerne la taille du domaine, la rugosité de surface ainsi que l'impact potentiel des effets non-linéaires. Ainsi, le modèle peut être utilisé pour estimer des perturbations d'écoulement pour des variations de rugosité modérément importantes et des pentes d'environ 0,3. MSMicro présente des limites dues à la linéarisation, à certaines approximations et à l'utilisation de conditions aux limites périodiques. Toutefois, il permet des calculs avec une résolution spatiale élevée en très peu de puissance informatique.

Les recherches faites par Troen et Petersen (1989) décrivent la procédure d'évaluation des ressources éoliennes à l'aide d'un modèle micro-échelle. Premièrement, un climat régional de vent uniforme à environ 1,0 km au-dessus du niveau du sol (AGL) est établi. Ensuite, le modèle

est utilisé pour estimer le vent sur le site potentiel, en tenant compte des effets locaux et du climat éolien régional. Le modèle WAsP peut être facilement appliqué à un domaine horizontal de centaines de km² avec un espacement de grille d'environ 0,1 km si les données d'observation à long terme sont disponibles à proximité. Toutefois, les phénomènes méso-échelles telles que l'effet de canalisation du vent de vallée ne sont pas pris en compte dans les modèles micro-échelle. Frank et Landberg (1997) affirment que les modèles méso-échelles peuvent être utilisés si le forçage climatique est correctement paramétré.

L'utilisation d'un modèle qui comprend à la fois la méso-échelle et la micro-échelle a déjà été appliquée dans plusieurs recherches notamment par Frank et al. (2001), Carvalho et al. (2013) et Yu et al. (2006). En général, les modèles méso-échelles permettent d'obtenir la climatologie du vent régional et les modèles micro-échelles servent à obtenir une climatologie du vent plus fine à de plus hautes résolutions.

D'une part, Frank et al. (2001) ont combiné le modèle méso-échelle KAMM (Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model) avec WAsP pour effectuer des simulations de vent de plusieurs pays, dont le Danemark, l'Irlande, au Danemark, Galice au nord-ouest du Portugal et aux îles Féroé. Les résultats ont donné de meilleures prédictions que celles utilisant uniquement le modèle KAMM. D'autre part, Carvalho et al. (2013) ont évalués les ressources éoliennes en terrain complexe au Portugal à l'aide du modèle méso-échelle Weather Research and Forecasting (WRF) et WAsP. Les auteurs ont testé les performances des simulations issues du couplage méso-échelle et micro-échelle pour la vitesse et la direction du vent par rapport aux données de vent observées. Ils concluent que la complexité du terrain local est considérée comme l'une des principales sources d'erreur dans la simulation des vents à proximité de la surface en raison de la faible résolution du modèle méso-échelle. Néanmoins, ils ont obtenu des résultats considérablement bons.

1.2 Le modèle WEST et ses applications

Par ailleurs, le Laboratoire de Recherche en Prévision Numérique (RPN) du Centre Météorologique canadien (CMC) a mis au point le modèle Wind Energy Simulation Toolkit (WEST) afin d'estimer la ressource éolienne avec les deux types de modélisation et un modèle statistique. Le modèle à méso-échelle de WEST est basé sur le Canadian Mesoscale Compressible Community Model (MC2) (Benoit et al., 1997, Tanguay et al., 1990, Thomas et al., 1998) avec certaines modifications pour l'initialisation du modèle. Benoit et al. (2002) ont documenté les performances du MC2 dans une prévision haute résolution en temps réel sur un terrain complexe. Le modèle micro-échelle est MSMicro (Walmsley et al., 1986). MSMicro est basé sur le modèle de Mason et Sykes (1979) qui est une extension de la théorie bidimensionnelle de Jackson et Hunt (1975). Walmsley et al. (1982) ont introduit un forçage en fonction de la hauteur. Ensuite, la rugosité variable a été mise en œuvre par Walmsley et al. (1986). Leurs résultats se comparent assez bien avec les observations in situ sur un terrain de faible pente. Par contre, l'erreur peut être importante sur un terrain escarpé.

WEST a été appliqué par Yu et al. (2006) à la région de la Gaspésie. Le schéma de classification du modèle utilise la réanalyse globale NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research) pour une période de 43 ans de 1958 à 2000. La figure 1.1 montre la distribution de fréquence du vent géostrophique en fonction de la vitesse dans le panneau de gauche et de la direction du vent dans le panneau de droite. Le vent géostrophique moyen pour cette région est d'environ $10,6 \text{ ms}^{-1}$ indiqué ici par le trait pointillé et les vents dominants sont principalement du nord-nord-ouest. Le modèle méso-échelle MC2 est initialisé avec un espacement de grille de 5 km. Il y a 175×175 points de grille et 28 niveaux verticaux non uniformément répartis de la surface à 20 km au-dessus du niveau moyen de la mer avec 10 niveaux dans les premiers 1500 m. Le premier niveau de vent est à environ 50 m. Les informations sur les caractéristiques et le type d'usage du terrain utilisées dans cette application de WEST viennent de la base de données du United States Geological Survey (USGS) 1 km et l'élévation du terrain provient du Canadian Digital Elevation Data (CDED). Les paramètres de

configuration utilisés pour le modèle méso-échelle MC2 et le modèle micro-échelle MSMicro sont définis au tableau 1.1.

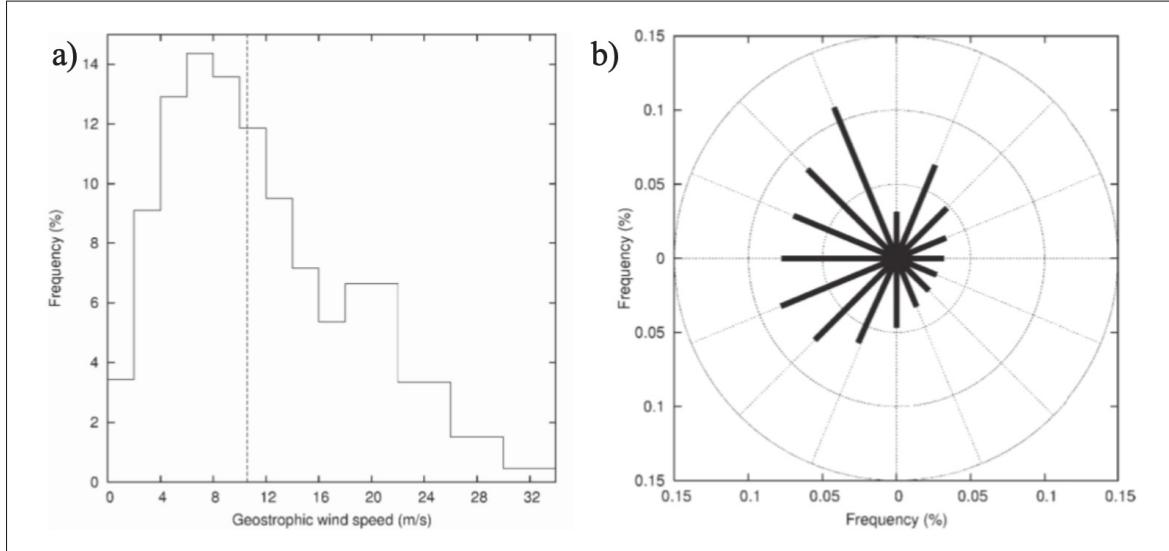


Figure 1.1 Distribution de la fréquence d'occurrence de (a) la vitesse du vent géostrophique et (b) la direction du vent. La ligne pointillée montre le vent moyen
Tirée de Yu et al. (2006, p. 25)

Tableau 1.1 Paramètres des modèles MC2 et MsMicro

Tiré de Yu et al. (2006, p. 26)

MC2		
Parameters	Description	Value
Grd_dx	Horizontal resolution (m)	5,000
“Grd_ni” x “Grd_nj”	Horizontal grid points	175 x 175
Grdt	Time-step (seconds)	120
htop	Height of model lid (m)	20,000
Gnk	Number of vertical levels	28
gnnpbl	Number of levels in boundary layer (< 1500 m AGL)	10
vmh_ndt	Number of time steps during which mountains grow	29

MsMicro		
Parameters	Description	Value
Alpha	Stride on the coupled mesoscale model grid	1
Sigma	Overlap ratio between 2 micro-domains	0.6
Nu	Grid points along X	128
Delta	Grid spacing of the coupled mesoscale model (m)	5,000

Les données de vitesse du vent mesurées à 40 m au-dessus du niveau de la surface utilisées pour la comparaison proviennent de 29 des 44 stations offertes par le Ministère des Ressources naturelles du Québec (MRNQ) et Environnement Canada (EC). Les 29 stations sont marquées par un point noir à la figure 1.2. Les stations rejetées avaient une période d'observation trop courte, manquaient de données à 40 m ou étaient hors du domaine. La plupart des stations sont situées près du littoral de la Gaspésie. Les vitesses de vent les plus rapides simulées par WEST sont sur les eaux (lacs et Golfe du St-Laurent), sur les terres côtières ou au haut des collines. La période moyenne des mesures est d'environ 1,2 an dont la période la plus courte est de 0,8 an et la plus longue est de 2,4 ans. Les données de vent ont été échantillonnées chaque seconde et moyennées à des intervalles de 10 minutes.

La moyenne de la vitesse du vent aux 29 stations est de $6,6 \text{ ms}^{-1}$ alors que la simulation MC2 uniquement donne une moyenne de $6,1 \text{ ms}^{-1}$. Seulement 13 stations simulées sont conformes aux vents mesurés. La différence absolue moyenne entre les observations et MC2 est de $0,83 \text{ ms}^{-1}$ et la différence moyenne est de $0,47 \text{ ms}^{-1}$. Le coefficient de corrélation des vitesses moyennes du vent est $R = 0,5$. WEST (méso et micro-échelle) produit de meilleurs résultats avec une vitesse de vent de $6,4 \text{ ms}^{-1}$, une différence absolue moyenne de $0,69 \text{ ms}^{-1}$ et une différence moyenne de $0,15 \text{ ms}^{-1}$. Le coefficient de corrélation du vent entre les observations et WEST est $R = 0,7$. Donc, WEST est considérablement amélioré comparativement à MC2 uniquement. L'amélioration des simulations WEST sur MC2 est principalement dû à la résolution améliorée des propriétés de surface, de la hauteur du terrain et des caractéristiques de surface grâce à l'inclusion d'un modèle micro-échelle couplé avec un modèle méso-échelle. L'amélioration est plus perceptible dans les régions côtières et mieux résolues avec MSMicro.

WEST a aussi obtenu des résultats précis de la cartographie et du potentiel éolien pour la province de Québec (Benoit et Yu, 2004). De plus, WEST a été utilisé pour créer l'Atlas canadien de l'énergie éolienne représentant la puissance moyenne du vent du pays à une résolution de 5 km. La figure 1.3 montre l'atlas sur l'ensemble du territoire et celui-ci est accessible sur www.windatlas.ca.

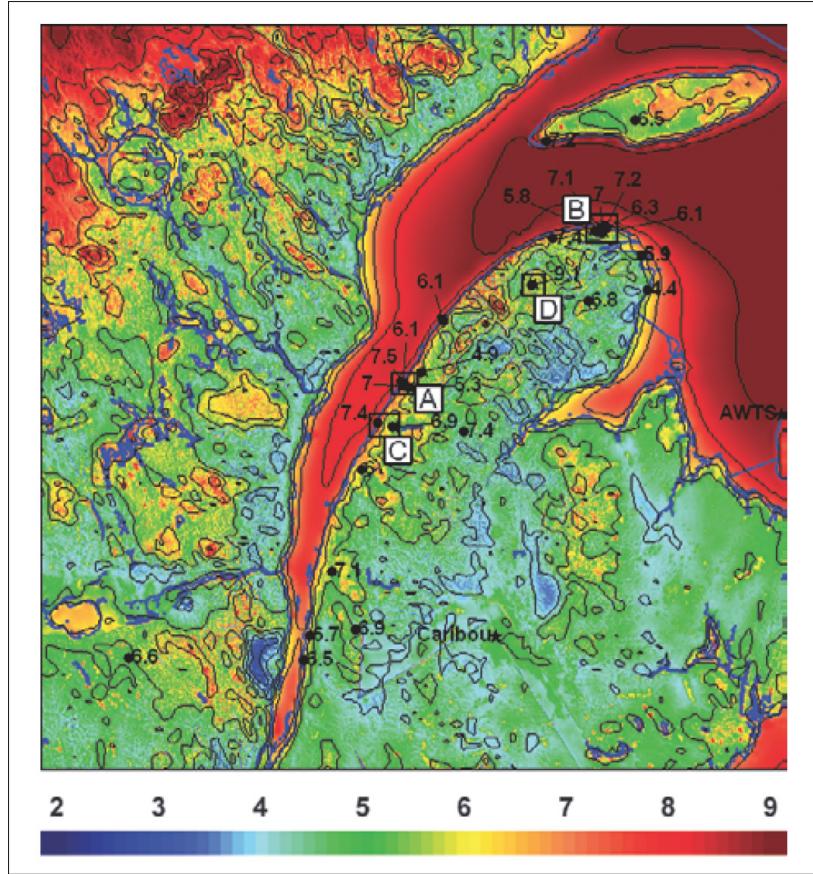


Figure 1.2 Vitesse moyenne du vent simulé par WEST en ms^{-1} . Les courbes noires sont le résultat de MC2 uniquement. Les points noirs montrent la position des stations d'observation.

Tirée de Yu et al. (2006, p. 26)

WEST a également été appliqué par Pinard et al. (2005), Pinard (2007) et Pinard et al. (2009) afin de simuler le vent en terrain complexe pour les régions montagneuses au Yukon et d'analyser la climatologie de la région de Whitehorse. Premièrement, Pinard et al. (2005) ont utilisé WEST pour simuler le climat du vent dans le sud du Yukon et comparent les résultats avec les mesures prisent sur le terrain. Les auteurs démontrent que WEST prédit généralement des vents supérieurs à ceux observés d'environ 40%. Toutefois, le coefficient de corrélation entre le modèle et les observations est élevé, avec une valeur de $R = 0,95$. De plus, les vitesses de vent prévues par MC2 uniquement ne sont que 20% plus élevées que celles mesurées. WEST a été moins performant dans la région montagneuse et complexe du sud du Yukon qu'il l'a été

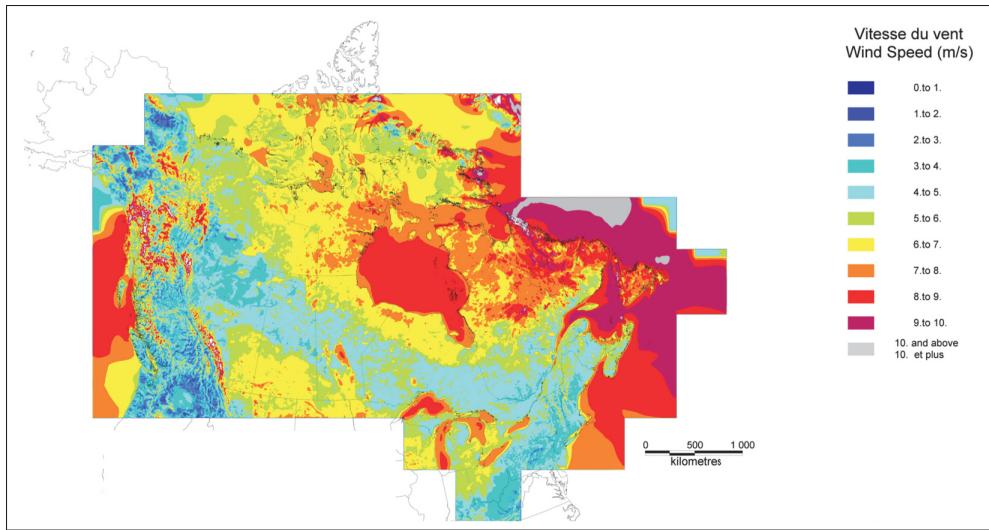


Figure 1.3 Atlas canadien du vent produit avec WEST

dans la région de la Gaspésie. Deuxièmement, Pinard (2007) a analysé les mesures de la haute atmosphère de Whitehorse et se sont avérées bien corrélées avec celles des stations de mesure au sommet des montagnes. Cependant, les vents qui sont dominés par le forçage du gradient de pression ne sont affectés que de manière indirecte par la stratification. L'auteur souligne le rôle important de l'inversion de température hivernale dans la réduction du transport vertical de la quantité de mouvement. Troisièmement, Pinard et al. (2009), ont simulés deux états climatiques simplifiés avec le modèle MC2 dans le terrain complexe et montagneux de la région de Whitehorse au Yukon. Dans le premier cas, les auteurs ont démontré qu'un état climatique, représenté par la réanalyse NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research), entraîne des directions de vents inexacts partout sauf pour la vallée de Whitehorse. Dans le deuxième cas, la simulation a montré un meilleur résultat avec l'utilisation d'une vitesse et direction du vent géostrophique à hauteur constante au-dessus des sommets montagneux. Les vents se sont avérés plus conformes aux observations. D'autre part, une tentative de réduire le transfert de quantité de mouvement vers le bas a été simulée en forçant un profil de température très stable, caractéristique des conditions hivernales. Il a été démontré qu'avec une telle stratification, le vent en altitude qui circule dans la

direction des pentes abruptes des montagnes, s'écoulerait sur la vallée. Les vents sont suspectés d'avoir été causés par des erreurs dans la structure de la grille suivant le terrain.

Suite aux recherches sur la climatologie du vent dans les régions des montagneuses du Yukon décrit dans le paragraphe précédent, Pham (2013) a pour objectif de mettre en œuvre quelques aspects suggérés par Pinard et al. (2009) afin d'améliorer les performances de WEST. En ajoutant certaines composantes lors de l'initialisation, les vents simulés à Whitehorse approcheraient les valeurs de vent observées dans la région et par conséquent, fourniraient un meilleur atlas éolien. La première modification introduit le nombre de Froude, un nouveau critère de classification qui prend en considération la stratification thermique et des facteurs de correction. Cela permet de mieux représenter le profil de température observée lors de l'initialisation du modèle. Une deuxième suggestion consiste à augmenter la topographie de référence initiale utilisée pour construire la topographie à partir des fichiers géophysiques lors de l'initialisation. L'hypothèse est que la topographie de référence initiale au niveau de la mer peut créer une topographie artificielle autour du modèle, ce qui peut forcer des schémas inattendus. Finalement, la troisième modification vise à utiliser les valeurs au-dessus de la topographie lors de l'initialisation au lieu des profils qui se trouvent sous la topographie. Il a été montré que la nouvelle classification était capable de capter la stabilité distincte des états climatiques. De plus, à l'aide des facteurs de correction, les vitesses de vent simulées de la région de Whitehorse sont plus proches des valeurs d'observation. D'autre part, la mise en œuvre de l'élévation de la topographie initiale a également réduit la vitesse du vent modélisée globale du domaine, mais seulement de manière marginale. Enfin, les résultats de Pham (2013) démontrent une réduction des vitesses habituellement surestimées pour la région de Whitehorse et qu'il est possible d'apporter une correction sur les directions des vents lorsque cela est jugé pertinent.

1.3 Les données de réanalyse

Les observations in situ proviennent des stations météorologiques, les ballons-sondes, les avions, les bateaux, les satellites, etc. Ils mesurent la pression, la température, l'humidité, les précipitations, la direction et la vitesse du vent. La plupart des observations ne sont pas

uniformément distribuées autour de la terre. De plus, il y a de moins en moins de ces mesures plus on recule dans le temps. Or, les réanalyses climatiques peuvent résoudre ces problèmes. Elles combinent les données d'observations et les équations qui gouvernent l'atmosphère afin d'obtenir des champs complets du climat passé. Les réanalyses utilisent les lois de la physique et les modèles de prévision numérique pour avoir une image globale du climat le plus réaliste possible, de la surface au sommet de l'atmosphère. En outre, les réanalyses fournissent une description complète du climat observé comme il a évolué au cours des dernières décennies.

WEST utilise présentement les réanalyses NCEP/NCAR produites par Kalnay et al. (1996) à l'appui aux besoins des communautés de recherche et de surveillance du climat. Ces réanalyses ont notamment été utilisées dans diverses recherches en modélisation du vent. Par exemple, Zhang (2014) a utilisé la base de données NCEP/NCAR pour étudier l'impact de l'intensification du vent sur le volume de la glace de la mer en Antarctique à l'aide d'un modèle global. D'autre part, Ladd et Bond (2002), ont évalué la précision de la réanalyse dans le nord-est du pacifique et la mer de Bering. En ce qui concerne le vent, les directions ont été estimées avec précision par NCEP/NCAR sauf près des côtes. Les comparaisons suggèrent un léger biais des vitesses de vents simulées supérieur à ceux observés d'environ 5%.

Au cours des dernières années, les réanalyses sont devenues de plus en plus résolues dans l'espace et dans le temps. MERRA (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications) (Rienecker et al., 2011) et MERRA-2 (Gelaro et al., 2017) ont été très populaires pour modéliser la production d'énergie éolienne. Elles ont été lancées en 2009 et en 2016 respectivement. Celles-ci ont connu de bons résultats en termes de génération de puissance éolienne. En 2017, ERA5 (ECMWF Reanalysis 5th Generation) devient la cinquième génération de réanalyses atmosphériques du climat global produite par le ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) (ECMWF, 2017). Olauson (2018) compare les performances de MERRA-2 et ERA5 pour la modélisation de l'énergie éolienne. Le potentiel éolien a été analysé en Allemagne, au Danemark, en France, en Suède et dans le nord-ouest des États-Unis. Les résultats présentés par l'auteur démontrent que ERA5 offre de meilleures performances. Enfin, l'utilisation de l'ERA5 est suggérée par l'auteur, car elles présentent des incertitudes plus faibles impliquant

une diminution des risques et une augmentation de la valeur des projets en énergie éolienne puisque présentement, les modèles utilisés dans cette filière sont relativement simples. Ces conclusions sont en accord avec celles émises par Gruber et al. (2020), qui ont entre autre évalués les données de réanalyse ERA5 et MERRA-2 pour la simulation de l'énergie éolienne dans différentes régions du monde et des moyens de correction du biais des vitesses du vent. Ils concluent que ERA5 fonctionne mieux que MERRA-2 dans toutes les régions étudiées. De plus, ERA5 montre des corrélations environ 5% plus élevées que MERRA-2 et un écart quadratique moyen inférieur de 5% dans la plupart des régions.

Malgré les bonnes performances des réanalyses ERA5, celles-ci ont tout de même démontré certaines faiblesses. Belmonte et Stoffelen (2019) ont comparés les champs de vent près de la surface à partir des réanalyses ERA5 et ERA-Interim (ERA-I) avec les observations Advanced Scatterometer (ASCAT). Ils se sont intéressés à la nature des différences entre les observations et les composantes zonales et méridionales des vents moyens annuels et transitoires et à la divergence du vent. Lors de l'analyse comparant la moyenne quadratique (rms) avec les observations ASCAT, ils ont constaté que ERA5 montrent une amélioration de 20% face à son prédecesseur ERA-I et une performance similaire aux prévisions opérationnelles actuelles du ECMWF. Par contre, les champs de vent de ERA5 montrent des motifs d'erreurs significatifs en ce qui concerne l'énergie cinétique du vent en termes de composantes zonale et méridionale, moyenne et du tourbillon.

ERA5 et ERA-I montrent des vents zonaux trop à l'ouest et méridionaux pas assez vers le nord aux latitudes moyennes avec des différences allant jusqu'à $0,5 \text{ ms}^{-1}$. Pour les erreurs concernant les vents transitoires, les réanalyses montrent des variabilités de vents zonales et méridionales déficientes, principalement sur les trajectoires des tempêtes associées aux courants océaniques d'ouest dans les latitudes moyennes telles que le Gulf Stream. De plus, les vents ERA5 et ERA-I sont plus cycloniques que les observations dans les hautes et moyennes latitudes. Enfin, les produits ERA montrent une lacune sur la divergence de vent dans les gyres subtropicaux et subpolaires ce qui a des impacts sur le mouvement vertical atmosphérique se traduisant par un affaiblissement du vent et une déficience sur la flottabilité.

D'autre part, la convergence et divergence insuffisantes du vent moyen et du tourbillon le long de la zone de convergence intertropicale suggèrent une fausse représentation de la convection à méso-échelle dans les tropiques. Ceci est conforme aux anomalies observées dans le profil climatique de cisaillement vertical du vent de l'ECMWF, par rapport aux radiosondes colocalisées à haute résolution verticale (Houchi et al., 2010). Une correction de la vitesse de la surface de l'océan est essentielle pour identifier les problèmes représentés par les interactions entre l'océan et l'atmosphère des vents dans les réanalyses ERA5 et ERA-I.

Jourdier (2020) s'est intéressé davantage à la simulation de la production d'énergie éolienne. L'auteur note que la nouvelle réanalyse ERA5 montre de très bons résultats. Son étude sur la France montre qu'ERA5 surpassé MERRA-2, avec un biais plus faible et une corrélation plus élevée et une meilleure variabilité diurne. Pourtant, certains problèmes surviennent. Tout d'abord, un problème d'assimilation qui crée un biais négatif dans la vitesse du vent à 10h00 au temps universel coordonné (UTC), et cela prend plusieurs heures avant de se rétablir ce qui a un impact sur le cycle diurne. En second lieu, ERA5 sous-estime les vitesses du vent, ce qui peut conduire à une sous-estimation majeure de la production d'énergie éolienne, en particulier dans les zones à topographie complexe, si elle n'est pas corrigée.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente quatre sections. Premièrement, les forces fondamentales qui gouvernent l'écoulement dans l'atmosphère sont décrites afin d'avoir une compréhension de la physique importante pour cette étude. La dynamique présentée ici est décrite par Martin (2006) et Holton (2004). Deuxièmement, les données de réanalyse utilisées dans cette études sont décrites. Troisièmement, les caractéristiques du modèle WEST telles que le schéma de classification, les modifications apportées à cette dernière et le modèle méso-échelle sont expliqués en détail. Une quatrième section présente les données d'anémométrie utilisées à des fins de comparaison. Finalement, un outil de moyennage de tables fréquentielles est décrite dans la dernière section.

2.1 Les forces fondamentales

Dans cette section, les forces fondamentales et apparentes telles que la force du gradient de pression, la force de friction et la force de Coriolis sont décrites. En plus, l'équilibre hydrostatique, le vent géostrophique sont détaillés.

2.1.1 La force du gradient de pression

La force du gradient de pression est très importante en dynamique de l'atmosphère. Elle représente la variation de pression dans un fluide. La pression est définie comme l'amplitude de la force agissant perpendiculairement à une surface, par unité de surface. Dans l'atmosphère, le gradient de pression décrit dans quelle vitesse et direction la pression augmente le plus rapidement autour d'un point. Par conséquent, un transfert de quantité de mouvement peut être entraîné par le gradient de pression. Selon la deuxième loi de Newton, la somme des transferts de quantité de mouvement est égale à la force appliquée sur l'élément de fluide. En effet, la force induite par le gradient de pression horizontal est en grande partie responsable mouvement de l'air, allant des hautes vers les pressions. L'expression de la force du gradient de pression $\overrightarrow{F_{gp}}$ est exprimée comme :

$$\frac{\overrightarrow{F}_{gp}}{m} = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (2.1)$$

où m est la masse, ρ est la masse volumique de l'air et p est la pression. Or, le gradient de pression ∇p est une quantité qui représente la variation de la pression dans l'atmosphère. Il décrit la direction et l'ordre de grandeur selon laquelle la pression change à un endroit donné.

2.1.2 La force de friction

La friction est une force fondamentale pour la météorologie puisqu'elle influence la vitesse du vent et modifie également sa direction. Deux types de frottements se produisent dans l'atmosphère. D'une part, la viscosité est la friction interne entre les différentes molécules qui engendre une résistance à l'écoulement du fluide. Par contre, la diffusion turbulente est beaucoup plus efficace que la viscosité dans les processus de mélanges atmosphériques. L'ordre de grandeur diffèrent énormément entre les deux. Le coefficient de diffusion par viscosité est de l'ordre de $1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ tandis que le coefficient de diffusion turbulent est de l'ordre de $0,1$ à $2000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, principalement entre 1 et $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Stull, 1988). La diffusion turbulente est dynamique puisqu'elle dépend des caractéristiques de l'atmosphère, notamment la stabilité atmosphérique. D'autre part, dans un fluide en mouvement, sa vitesse va diminuer près de la surface à cause du frottement entre l'air et terre. Toutefois, le frottement par viscosité est beaucoup moins important que le frottement entre deux surfaces. Pour le cas d'un écoulement dans un fluide incompressible, la force de friction \overrightarrow{F}_r peut être exprimée sous la forme vectorielle comme :

$$\overrightarrow{F}_r = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \mu \nabla \overrightarrow{V} \quad (2.2)$$

où μ est le coefficient de viscosité dynamique et \overrightarrow{V} le vecteur du vent. Dans l'atmosphère la friction par viscosité est négligeable sauf sur une couche mince près de la surface de la Terre nommée sous couche rugueuse, où le cisaillement vertical est très important. Toutefois, une partie de l'atmosphère reste directement influencée par le frottement à la surface et se fait sentir

sur plusieurs centaines de mètres. Étant donné que la viscosité moléculaire est négligeable sauf près de la surface, c'est la turbulence à l'intérieur de cette couche de l'atmosphère qui assure principalement le transfert des quantités physiques. C'est ce que l'on appelle la couche limite atmosphérique (CLA). La CLA est formée de la sous couche rugueuse, d'une couche de surface et de la couche d'Ekman. Dans la couche de surface, les vents sont gouvernés par la stabilité de l'air et la rugosité du sol. Enfin, en plus d'être influencé par les caractéristiques de la surface, la couche d'Ekman subit la force de Coriolis qui tend à modifier la direction du vent. Au-dessus de la CLA, s'étend l'atmosphère libre où les vents deviennent de plus en plus géostrophiques. L'épaisseur de la couche limite dépend principalement de forçage radiatif, de la grandeur du cisaillement vertical du vent et de la convergence ou divergence à la surface causée par les systèmes météorologiques à l'échelle synoptique. Le forçage radiatif détermine essentiellement la stabilité thermique de la CLA et par conséquent, les régimes de convection et de stratification thermique.

2.1.3 L'équilibre hydrostatique

Dans une atmosphère sans mouvement, la gravité g et la composante verticale z de la force du gradient de pression doivent être en équilibre. Ainsi l'expression se traduit par :

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (2.3)$$

Cette condition de l'équilibre hydrostatique donne une bonne approximation de la dépendance de la pression à la verticale dans l'atmosphère.

2.1.4 L'équilibre et le vent géostrophique

Les forces apparentes à considérer dans les processus atmosphériques sont la force centrifuge et la force de Coriolis. La plus importante pour notre étude est la force de Coriolis puisqu'elle influence l'écoulement dans la CLA et l'atmosphère libre. La force de Coriolis agit perpendiculairement à

la direction du mouvement d'une masse d'air dans un milieu en rotation. Lorsqu'elle est observée à partir d'un référentiel non inertiel, cette force est dite apparente ou inertielle. Holton (2004) a démontré les composantes de la force de Coriolis due à un mouvement relatif le long d'un cercle de latitude dans son ouvrage. Il en résulte qu'un mouvement horizontal relatif produit une accélération horizontale perpendiculaire à la direction du déplacement. En négligeant le terme vertical, la force de Coriolis à l'horizontale peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\frac{du}{dt} = fv \quad (2.4)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu \quad (2.5)$$

où $f = 2\Omega \sin \phi$ est le paramètre de Coriolis, ϕ est la latitude, la vitesse angulaire de la Terre $\Omega = 7,292 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. L'équation peut s'exprimer de façon vectorielle comme suit :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -f\vec{k} \times \vec{V} \quad (2.6)$$

où \vec{V} est le vecteur vent horizontal et \vec{k} est le vecteur unitaire vertical.

2.1.5 L'équilibre et le vent géostrophique

L'équation du mouvement décrit tous les types et échelles de mouvements atmosphériques et peut s'exprimer de cette manière :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{1}{\rho}\nabla \cdot \mu\nabla \vec{V} + \vec{g} - f\vec{k} \times \vec{V} \quad (2.7)$$

Toutefois, certains termes des équations sont négligeables lors de l'évaluation du vent à grande échelle. Comme le démontre Holton (2004), en considérant seulement les termes d'ordre

supérieur, il ne reste que les perturbations à l'échelle synoptique aux latitudes moyennes, soit la force de Coriolis et du gradient de pression respectivement. Ils sont en quasi-équilibre et peuvent être exprimés comme suit :

$$f_{xu} \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.8)$$

$$f_{xv} \approx \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.9)$$

où f_{xu} et f_{xv} représentent la composant du vent géostrophique dans la direction x et y respectivement. Ici, l'équilibre est dite géostrophique. C'est une relation approximative entre le champ de pression et la vitesse du vent horizontale pour les systèmes à grande échelle. Il est donc possible de définir le vent géostrophique $\vec{V}_g = \vec{i} u_g + \vec{j} v_g$ et prend la forme vectorielle suivante :

$$\vec{V}_g = \vec{k} \times \frac{1}{\rho f} \vec{\nabla} p \quad (2.10)$$

L'équilibre géostrophique est une approximation valide du premier ordre pour l'atmosphère libre sauf dans la CLA où le flux d'air est agéostrophique sous l'influence du frottement de la surface.

2.2 Les réanalyses NCEP et ERA5

Le Copernicus Climate Change Service (C3S) (C3S, 2018) est l'un des six services d'information fournies par le Programme d'observation de la Terre de l'Union européenne. Le C3S s'appuie sur la recherche climatique menée dans le cadre du World Climate Research Programme (WCRP) et répond aux besoins des utilisateurs. Le C3S est mis en œuvre par le ECMWF au nom de la Commission européenne. Il offre un libre accès aux données et aux outils climatiques basés sur les dernières avancées scientifiques.

ERA5 est un produit du ECMWF et a été publié en juillet 2017 (Copernicus Climate Change Service, 2017) qui remplace son prédecesseur ERA-Interim. Présentement, les données ERA5 BE (ERA5 Back Extension) sont disponibles pour la période de 1950 à 1978 et les données ERA5 de 1979 à ce jour. ERA BE est simplement une base de données ERA5 qui précède l'autre mais qui bénéficie de l'assimilation des rapports de pression des meilleures pistes de cyclone tropical provenant du projet International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) présenté dans par Knapp et al. (2010).

La réanalyse combine des données de modèle avec des observations provenant de partout dans le monde dans un ensemble de données global en utilisant les lois de la physique. C'est ce que l'on appelle l'assimilation de données. Toutes les heures, une prévision est combinée avec les nouvelles observations disponibles afin de produire une estimation optimale de l'état de l'atmosphère, appelé analyse, à partir de laquelle une nouvelle prévision améliorée est émise. Quant à la réanalyse, son fonctionnement est similaire excepté qu'elle est produite avec une résolution réduite afin de fournir un ensemble de données qui couvrent plusieurs décennies. La réanalyse collecte plus d'observation et d'analyse afin d'émettre un produit complet et raffiné.

Le tableau 2.1 montre une comparaison entre les différentes réanalyses utilisées dans cette étude. Tout d'abord, ERA5 a été produit en utilisant l'assimilation de données 4D-Var (plus précise que la 3D-Var) dans le système de prévision intégré (IFS) de l'ECMWF, sur 137 niveaux verticaux, de 1000 à 0,01 hPa. Les données atmosphériques sont disponibles à toutes les heures sur un grille latitude-longitude à une résolution de 0,25° (ou 31 km). Des données de surface sont également disponibles, contenant des paramètres 2D tels que les précipitations, la température à 2 m, le rayonnement du sommet de l'atmosphère et des intégrales verticales sur toute l'atmosphère. La plupart des paramètres analysés sont également disponibles à partir des prévisions (ECMWF, 2017). Les données de réanalyse ERA5 sont disponibles via le site <https://cds.climate.copernicus.eu>. D'autre part, les réanalyses NCEP/NCAR utilise un système d'analyse et de prévision de pointe pour effectuer l'assimilation des données 3D-Var en utilisant des données de 1948 à nos jours. Les données ont une résolution temporelle de 6 heures (00, 06,

12 et 18 UTC) et une résolution spatiale de $2,5^\circ$ (210 km). Or, ce système est beaucoup moins sophistiqué que le IFS utilisé par ERA5.

Tableau 2.1 Comparaison entre les Réanalyses NCEP/NCAR et ERA5

	NCEP/NCAR	ERA5
Période	1948 à ce jour	ERA5 1979 à ce jour ERA5 BE 1950 à 1978
Résolution spatiale	$2,5^\circ$ globale, 17 niveaux verticaux de 1000 à 10 mb	$0,25^\circ$, 137 niveaux verticaux de 1000 à 0,01 mb
Niveaux de pression	1000,925,850,700,600,500, 400,300,250,200,150,100, 70,50,30,20,10 mb	1000,975,950,925,900,875, 850,825,800,775,750,700, 650,600,550,500,450,400, 350,300,250,225,200,175, 150,125,100,70,50,30,20, 10,7,5,3,2,1 mb
Résolution temporelle	6 heures	1 heure
Assimilation de données	3D-Var	4D-Var

Dans cette étude, deux périodes de temps seront analysées afin de comparer la variabilité temporelle. Premièrement, les réanalyses ERA5 couvrent une période de 10 ans de 1994 à 2003 sur une grille latitude-longitude à $0,25^\circ$ ainsi qu'à des résolutions dégradées à $0,5^\circ$, $1,25^\circ$ et $2,5^\circ$. Deuxièmement, elles couvrent une période de 25 ans de 1979 à 2003 sur une grille latitude-longitude à $0,25^\circ$ et $2,5^\circ$. Les coordonnées du domaine en Gaspésie sont 50.25°N , -66°W , 47.25°S , -63°E . Les données de réanalyse NCEP/NCAR utilisées dans cette étude couvrent les mêmes périodes de 10 et 25 ans sur une grille de $2,5^\circ$.

Au cours de cette recherche, nos efforts se sont confrontés à une anomalie majeure. Les réanalyses ERA5 à $0,25^\circ$ présente une grande variabilité spatiale. Le nombre de point de grille est largement supérieur pour le même domaine à méso-échelle comparativement à les réanalyses à $2,5^\circ$. Ceci entraîne un forçage trop local qui n'est pas présent avec NCEP et ERA5 à $2,5^\circ$. Bref,

l'introduction les réanalyses ERA5 0,25° dans WEST n'ont pas données les résultats escomptés. Elles n'ont pas statistiquement améliorée les produits avec succès. Ceci sera expliqué en détail dans les chapitres suivants. Bref, l'hypothèse d'une mauvaise performance à méso-échelle à 0,25° due à un forçage climatique du vent géostrophique trop local a été soulevée. Afin de palier ce phénomène, une autre hypothèse est émise que la moyenne des situations climatiques à chaque point de grille du domaine à résolution plus élevée devrait être équivalent à la table représentant le domaine en entier. Autrement dit, une moyenne de 10 x 10 tables natives à 0,25° devrait donner les mêmes résultats statistiques que la table native à 2,5° et ce, pour un même domaine. L'idée est de reconstruire la table 2,5° en moyennant toutes les tables de tous les points de grilles des réanalyses plus fines afin de valider nos hypothèses nouvellement émises. Si le problème persiste, la même méthodologie sera effectuée en moyennant 5 x 5 tables natives à 0,5° et 2 x 2 tables natives à 1,25° dans le but de cerner à quelle résolution le modèle commence à être affecté par le forçage climatique trop local observé. Les tables natives sont les tables brutes issues du schéma de classification à chaque point de grille du domaine. Le chapitre suivant traitera de cette expérience et sera discuté dans le prochain chapitre.

2.3 Le modèle WEST

WEST a été mis au point pour estimer la ressource éolienne en tenant compte des principes décrits par Frank et Landberg (1997) et Frank et al. (2001). Il est basé sur une approche de «downscaling» statistique-dynamique décrit par Frey-Buness et al. (1995). L'hypothèse fondamentale est que le climat régional est associé à une distribution de fréquence spécifique des situations météorologiques de base à grande échelle, telles que le vent géostrophique, le vent thermique et la stratification thermique. La figure 2.1 montre l'organigramme du modèle. WEST comprend un schéma de classification, une modélisation à méso et micro-échelle ainsi qu'un module statistique (Yu et al., 2006). WEST utilise le modèle MC2 pour la modélisation méso-échelle. C'est un modèle compressible à aire limitée non-hydrostatique développé pour la recherche et la prévision météorologique opérationnelle. Le climat du vent à méso-échelle est obtenu avec ce modèle. Ensuite, les résultats sont traités par le module statistique.

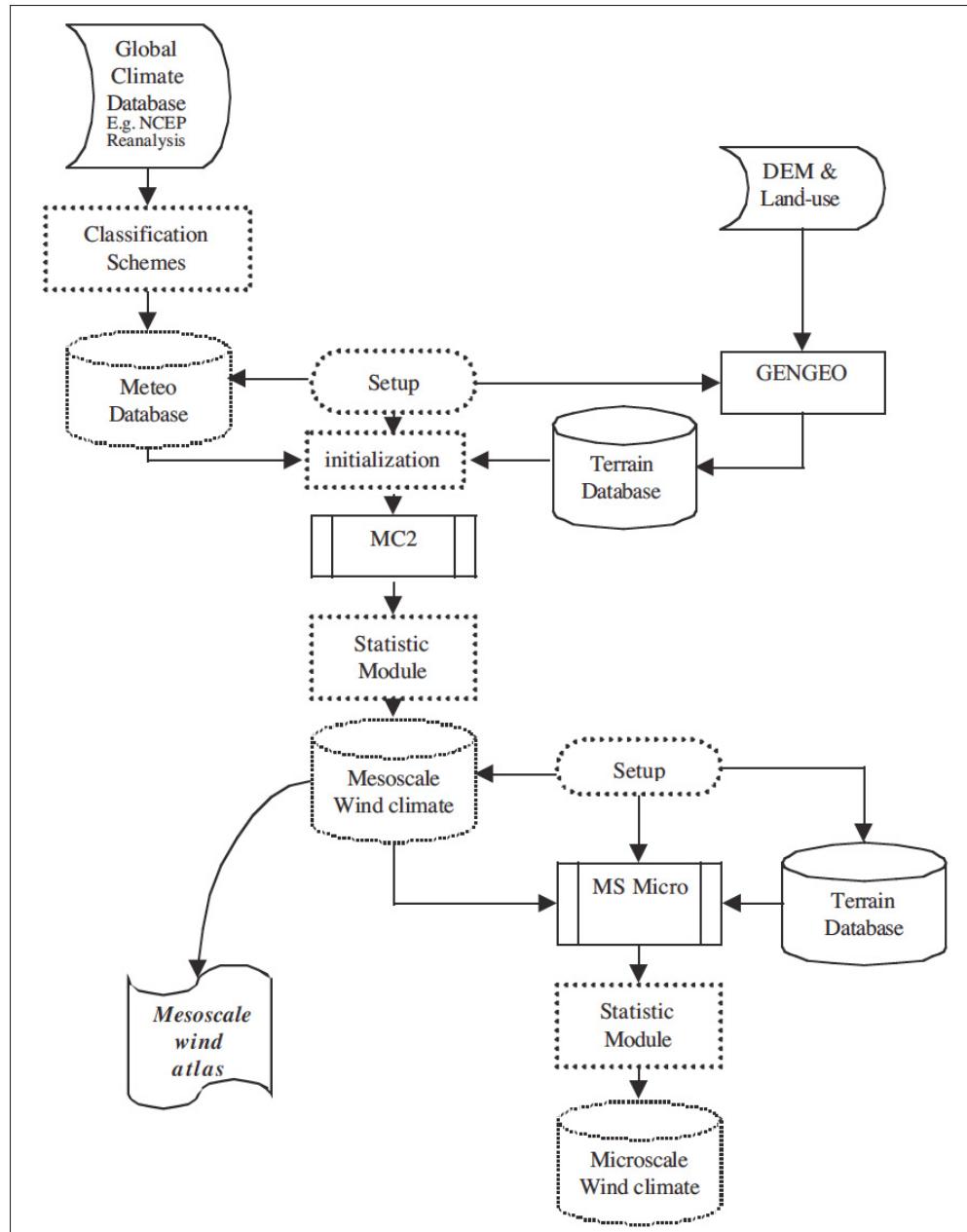


Figure 2.1 Organigramme de WEST
Tirée de Yu et al. (2006, p. 18)

Le module statistique, nommé WESTATS, utilise les résultats simulés de la classification et du modèle MC2 pour construire une base de données de statistiques spatiales en fonction de la position x et y, telles que les moyennes de la vitesse du vent (EU), la distribution de fréquence de la vitesse et de la direction du vent (UGH et UGR respectivement) ainsi que la distribution de

fréquence bivariée de la vitesse et de la direction moyennes du vent (UGHR). Cette dernière est importante pour la modélisation à micro-échelle puisqu'elle fournit les données d'entrée du modèle à micro-échelle afin de calculer le vent à une résolution plus élevée. De plus, elle permet de déterminer la vitesse moyenne du vent et la puissance éolienne moyenne à partir des vents à micro-échelle. Pinard et al. (2005) donne une description plus détaillée du module WESTATS.

Une série de simulations est ensuite effectuée pour affiner davantage les résultats en couplant MC2 et le modèle micro-échelle MSMicro. Ce dernier est un modèle sans accélération, c'est-à-dire qu'il est en équilibre temporel. Pour un profil fixe entrant dans le modèle, la solution est donc constante dans le temps et ne varie qu'en x et y. D'autre part, les écarts des vents dus aux collines et aux caractéristiques de surface sont pris en compte à cette étape. Les données utilisées dans le modèle micro-échelle proviennent des propriétés de surface à haute résolution et la UGHR déterminée dans le module statistique. Les sous-sections suivantes décrivent en profondeur le schéma de classification et le modèle MC2.

2.3.1 Le schéma de classification

Dans cette étude, une comparaison est faite entre la version actuelle de WEST ayant comme base de données globales NCEP/NCAR et la nouvelle réanalyse ERA5. Cette dernière est donc utilisée dans le schéma de classification comme base de données globales à long terme pour les séries d'analyse. Nos efforts sont mis sur les vents près de la surface jusqu'à quelques centaines de mètres puisque c'est à ces niveaux que l'industrie éolienne porte le plus d'intérêt. Aux latitudes moyennes, le vent est principalement influencé par le gradient de pression, la stabilité de l'air et les caractéristiques de surfaces (élévation, orientation et rugosité). Le vent géostrophique s'avère à être le paramètre d'intérêt principal, car il est lié au gradient de pression à grande échelle à travers l'équilibre géostrophique aux latitudes moyennes et sa variation verticale est liée à la variation horizontale de la température. Ce gradient de pression est initialisé égal au gradient impliqué par la relation géostrophique appliquée aux réanalyses. De plus, c'est la variable temporelle des réanalyses qui est classifiée par WEST afin d'en produire le climat au niveau moyen de la mer, c'est-à-dire à 1000 mb, via les tables fréquentielles produites.

Puisque l'intérêt est porté sur le vent près de la surface, l'état atmosphérique est défini sur les 4 hauteurs 0, 1500, 3000, et 5500 m au-dessus du niveau de la mer (ASL). Les pressions à ces hauteurs sont d'environ 1000, 850, 700 et 500 mb respectivement. Ces valeurs sont utilisées comme pressions nominales. Comme le montre le tableau 2.1, ERA5 possède 37 niveaux de pression dont 16 dans la CLA entre 1000 et 500 mb inclusivement tandis que NCEP possède 17 niveaux verticaux dont 7 dans la CLA. ERA5 offre donc une bien meilleure résolution verticale dans la CLA que NCEP. Or, seulement les 4 niveaux de pression nominales mentionnés ci-haut sont traités dans cette étude. L'interpolation et l'extrapolation des paramètres météorologiques à ces pressions se font en deux étapes. Tout d'abord, une interpolation de l'approximation hydrostatique permet d'obtenir la pression aux 4 hauteurs désignées. Ensuite, la température et l'humidité aux pressions nominales sont interpolées aux valeurs de pression obtenues à la première étape. Par la suite, le vent géostrophique \vec{V}_g est calculé aux hauteurs choisies en utilisant la pression, la température et l'humidité préalablement calculées.

Les situations météorologiques, qu'on nomme classes, sont qualifiées selon la direction et la vitesse du vent géostrophique à 0 m ASL. Dans cette étude, la direction des vents géostrophiques est classée en 16 divisions et chacune d'elles est subdivisée en 14 classes de vitesse. Les limites de chaque intervalle de vitesse sont de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 22, 26, 30 et $>34 \text{ ms}^{-1}$. De plus, le cisaillement vertical du vent géostrophique entre 0 et 1500 m ASL est aussi considéré dans la classification. Chaque classe est divisée en deux selon le signe positif ou négatif du cisaillement sauf pour le plus petit intervalle de vitesse, soit $[0,2]$. Il y a donc un total de 432 classes disponibles pour définir les situations météorologiques. Il est important de mentionner que dans cette recherche, la variation saisonnière n'est pas prise en compte dans le schéma de classification. La classification est faite sur une série chronologique qui inclue toutes les saisons. Il est toutefois possible de se concentrer uniquement sur une série saisonnière particulière pour en obtenir le climat éolien correspondant. En outre, le schéma de classification définit un profil vertical de \vec{V}_g et de température à quatre hauteurs pour construire un état initial MC2 pour chaque classe.

2.3.2 Modification au schéma de classification

Des modifications ont été apportées au schéma de classification pour augmenter la flexibilité afin pouvoir accueillir soit des réanalyses NCEP ou ERA5. Lors de l'exécution des fichiers sources sous forme bash de Linux pour la classification, le fichier CLASSIF-parms.dot permet d'avoir une certaine souplesse lors des choix des paramètres utilisés pour la construction des tables. Il permet de définir plein de variables d'environnement, prises en compte par les programmes FORTRAN qui calculent la classification de WEST. Certaines variables dans le code source de paramètre pour la classification sont possibles d'être modifiées pour arriver à nos fins selon l'intérêt de l'utilisateur. Tout d'abord, une première variable `INDIR` est le chemin d'entrée pour les réanalyses de son choix, soit NCEP ou ERA5. Ensuite, l'entrée `season` donne la possibilité d'obtenir des tables annuelles (ANU) ou saisonnières (par exemple DJF, MAM, JJA ou SON représentant l'hiver, le printemps, l'été et l'automne respectivement dont chaque lettre représente la première lettre du mois). D'autre part, `ip1s` et `height` permettent de modifier les niveaux de pressions nominales et les hauteurs désignées comme discuté dans la sous-section précédente. De plus, des réglages temporels tels que le début `byear` et la fin `eyear` de la période étudiée ainsi que le pas de temps `sampling` sont disponibles. Le fichier source donne aussi la possibilité de régler le nombre de divisions pour la direction du vent `nsect`, le nombre de classe de vitesse du vent `nclass` et chaque intervalle de vitesse `classes`.

`CLASSIF-parms.dot` est requis pour les scripts Korn Shell `RA-to-FREQS.ksh` et `FREQS-to-TABLES.ksh`. Le premier converti les données de réanalyse sous forme de fréquence et va utiliser un exécutable nommé `gz2vg.Abs` contenant les scripts de classification ainsi que les librairies de la physique. Le tout est écrit dans un fichier standard `classes_ANU.fst` qui contient la date et l'heure, la position sur la grille en latitude-longitude et toutes les valeurs calculées telles que le cisaillement, u_g , v_g et T pour chaque classe et chacun des niveaux mentionnés dans la variable `height`. Ensuite, le deuxième script converti les fréquences en tables. Il fait le traitement du fichier `classes_ANU.fst` et utilise un exécutable nommé `prep_table.Abs` pour générer les tables sous la forme de `table.ef`.

De plus, les nouvelles tables possèdent un entête beaucoup plus riche en information que la précédente.

La figure 2.2 montre un exemple de l'ancienne version d'une table dans le panneau du haut et la nouvelle version dans celui du bas. Dans le panneau a), la première rangée représente l'entête. Il est affiché le point de grille I et J, la latitude et la longitude. Dans le panneau b), le type de réanalyse, le début et la fin de la période, la résolution et les 4 hauteurs nominales ont été ajoutés. Dans chaque table, les colonnes représentent l'identificateur de la classe, la direction et la vitesse du vent géostrophique, le cisaillement vertical, la fréquence d'occurrence de la classe, la fonction de pondération et finalement la vitesse du vent u et v ainsi que la température au 4 hauteurs nominales.

a)	1 HEADER I: 118 J: 56 Latitude: 48.750 Longitude: 293.750 FLATO: 48.750													
	2 HEADER	id	dd	uv	shear	freq	weight	eweight	uu1	uu2	uu3	uu4		
	3	ANU1D000C11M	359.662	23.649	-1.000	0.5714	13.51	7557.5	0.140	3.699	5.921	8.872		
	4	ANU1D000C10M	359.431	19.682	-1.000	0.9852	19.39	7511.6	0.195	4.210	7.212	12.458		
	5	ANU1D000C12M	358.988	27.647	-1.000	0.3326	9.20	7028.6	0.488	3.738	5.901	8.485		
	6	ANU1D338C14M	338.155	36.881	-1.000	0.1400	5.16	7023.2	13.723	13.536	12.992	12.516		
	7	ANU1D338C11M	338.405	23.664	-1.000	0.4950	11.71	6559.5	8.709	10.536	13.061	17.972		
	8	ANU1D338C10M	338.176	19.737	-1.000	0.8292	16.37	6375.3	7.337	9.615	12.147	17.181		
	9	ANU1D000C14M	359.545	37.352	-1.000	0.1143	4.27	5956.5	0.297	2.673	3.866	6.092		
	10	ANU1D338C12M	338.523	27.512	-1.000	0.2658	7.31	5535.0	10.073	11.328	12.853	15.511		
b)	1 I: 5 J: 6 Latitude: 48.750 Longitude: 293.750 FLATO: 48.750 ERA5 1994010100 2003123112 0.25000 4													
	2 HEADER	id	dd	uv	shear	freq	weight	eweight	uu1	uu2	uu3	uu4		
	3	ANU1D023C14M	23.597	42.561	-1.000	1.3281	56.5269	102397.1797	-17.038	-8.919	5.039	13.326		
	4	ANU1D225C14M	225.298	42.680	-1.000	1.2939	55.2235	100596.0938	30.336	14.921	13.287	16.621		
	5	ANU1D045C14M	42.830	41.393	-1.000	0.7051	29.1880	50010.5039	-28.140	-9.818	3.998	8.905		
	6	ANU1D000C14M	2.709	40.880	-1.000	0.4792	19.5904	32738.8047	-1.932	-2.030	10.087	16.861		
	7	ANU1D203C14M	205.721	41.554	-1.000	0.3423	14.2238	24560.4082	18.034	7.824	5.015	1.329		
	8	ANU1D023C13M	21.928	31.686	-1.000	0.7257	22.9935	23084.9121	-11.833	-4.294	8.787	14.672		
	9	ANU1D023C12M	22.840	27.729	-1.000	1.0269	28.4748	21894.5254	-10.763	-2.713	9.233	18.286		
	10	ANU1D225C13M	224.722	31.818	-1.000	0.6709	21.3470	21611.9492	22.390	10.536	11.725	17.916		
	0.0 1500.0 3000.0 5500.0 vv1 vv2 vv3 vv4 tt1 tt2 tt3 tt4													
		-39.003	-24.999	-13.327	-8.639	262.039	256.453	255.117	241.047					
		30.022	14.426	13.062	14.602	273.469	272.805	268.320	254.266					
		-30.357	-17.225	-7.659	-4.395	266.602	261.984	259.906	245.367					
		-40.834	-23.483	-11.208	-2.151	259.080	250.906	251.203	237.156					
		37.437	24.093	20.647	23.136	276.789	273.852	269.180	255.148					
		-29.393	-18.103	-10.115	-8.320	263.953	257.578	255.570	240.664					
		-25.555	-15.950	-9.949	-8.240	265.688	258.969	255.836	241.613					
		22.608	10.035	8.989	9.932	275.758	273.164	267.727	253.766					

Figure 2.2 Exemple de a) l'ancienne version et b) la nouvelle version d'une table.

D'autre part, un outil appelé ecCodes du ECMWF a été installé afin de pouvoir utiliser les réanalyses ERA5. Les données NCEP sont originellement en format NetCDF mais ont été converties en format FST grâce à une conversion fait chez EC, là où les données ont été recueillies. De ce fait, WEST est construit pour utiliser ce type de format. Toutefois, les

réanalyses ERA5 sont en format GRIB. Les données ERA5 sont téléchargées via des requêtes faites par un script Python au CDS (Climate Data Store) à l'aide du service CDS API (Climate Data Store Application Program Interface) du C3S. Une description est faite à l'annexe I. L'outil ecCodes offre des routines FORTRAN qui permettent la lecture de données GRIB. Ainsi, en combinant cela avec la librairie RMNLIB de EC, il est possible de réécrire les fichiers GRIB en fichier FST à l'aide d'un programme FORTRAN ajouté à WEST. Alors, dans le programme de classification, un script Korn Shell nommé ERA-g2f fait la conversion des fichiers grâce à cet outil. Le mode d'emploi décrivant la méthode d'installation de l'environnement sur notre ordinateur est mis en annexe de ce document.

2.3.3 Le modèle MC2

Cette section présente une description de la procédure d'initialisation du modèle MC2. Pour chaque classe, une simulation MC2 est exécuté. L'ensemble de la grille tridimensionnelle au temps zéro est initialisée à partir du profil vertical de \vec{V}_g et de température aux 4 hauteurs prescrites et les conditions aux limites du domaine sont maintenues constantes. Ensuite, ils sont interpolés aux 28 niveaux du modèle en utilisant une interpolation cubique jusqu'à 5500 m et sont maintenus constants au-dessus. La construction de données météorologiques tridimensionnelles au temps zéro suppose un équilibre hydrostatique et géostrophique. Puis, cela se fait en initialisant les champs du modèle à un état horizontalement uniforme à chaque niveau mais non constant puisque la pression varie de point en point sur un même niveau. Autrement dit, le profil climatique de la classe est étendu sur l'ensemble de la grille selon des principes dynamiques de base. Par la suite, la dynamique de Navier-Stokes de MC2 transforme cette condition initiale et l'adapte à l'écoulement de la surface. Toutes les classes utilisent des grilles de surface pour l'orographie et les caractéristiques de surface.

D'autre part, l'équilibre géostrophique est une approximation valide pour l'atmosphère libre, mais pas dans la CLA où le flux d'air est agéostrophique sous l'influence du frottement provenant de la surface comme expliqué à la section 2.1.2. Les effets de friction sur l'écoulement de l'air sont simulés dans le modèle avec un paramétrage physique de la turbulence. Il est important

de mentionner que MC2 est conçu en coordonnées de hauteur généralisées suivant le terrain. Toutefois, les hauteurs de terrain dans le modèle WEST sont définies initialement au niveau de la mer pour que les hypothèses d'équilibre géostrophique et hydrostatique soient mieux respectées. Au cours des premiers pas de temps, les hauteurs augmentent jusqu'à atteindre les valeurs caractéristiques de la région. Par le fait même, les champs météorologiques s'adaptent dynamiquement au forçage orographique. La température du sol est égale à la température de l'air directement en contact jusqu'au moment où la topographie atteint leur hauteur finale pour éviter les flux de chaleur provenant de l'atmosphère. Ensuite, la température du sol est maintenue constante dans le temps pour permettre au modèle de maintenir les conditions aux limites latérales fixes dans le temps et à l'horizontal et d'atteindre un état quasi-stationnaire, c'est-à-dire sans développement de conditions météorologiques transitoires telles que le cycle diurne. MC2 est réglé sans échange thermique entre la surface et l'air et sans flux solaire. Cela permet de favoriser la stabilité de l'écoulement dans le temps.

2.4 Les données d'anémométrie

Les résultats des simulations sont comparés aux données d'anémométrie provenant d'une campagne de mesure faite par le MRNQ et EC dans le cadre du Programme de mesure du potentiel éolien (PMPE). La figure 2.3 montre les positions géographiques des stations d'observation. La valeur à chaque point est la vitesse moyenne en ms^{-1} . Le tableau 2.2 montre les coordonnées des stations en degré de latitude et longitude, la hauteur du mât en mètre (zmat), le début et la fin de la période de mesure. Pour certaines stations, la hauteur est à 41 m au lieu de 40 m. Dans cette étude, cela à très peu d'incidence sur les résultats et donc, les hauteurs seront simplement considérées comme si elles étaient à 40 m. Les mesures ont été prises pendant environ un an compris entre les années 2000 et 2003 selon la station, échantillonées chaque seconde et moyennées à des intervalles de 10 minutes. La plupart des stations sont situées près du littoral de la péninsule gaspésienne. Le tableau 2.3 montre le vent moyen mesuré \bar{u} en ms^{-1} , l'écart-type σ_u , c et k sont les paramètres de la loi de Weibull qui représente le facteur d'échelle en ms^{-1} et le facteur de forme respectivement.

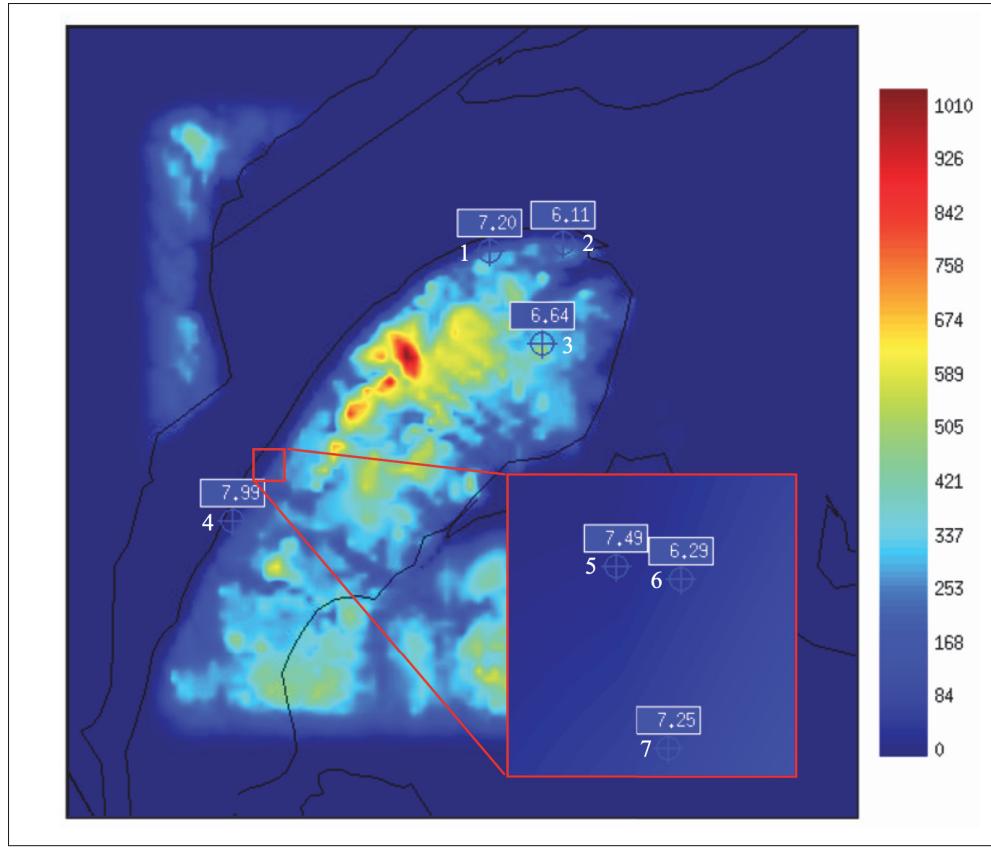


Figure 2.3 Position géographique des stations d’observation du MRNQ. Le champ représente la topographie du domaine en mètre. Les valeurs indiquent les vitesses des vents moyens observées pour chaque station en ms^{-1}

2.5 Outil de moyennage des tables

Un outil a été mis en oeuvre pour tenter de résoudre le problème des tables à plus haute résolution. L’hypothèse émise est que la moyenne des situations climatiques à chaque point de grille du domaine à résolution plus élevée devrait être équivalente à la table représentant le domaine en entier. Ainsi, une région de base a été défini de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, centrée dans la région de la Gaspésie aux coordonnées latitude-longitude $48,75^\circ\text{N}$ et $293,75^\circ\text{O}$.

Tout d’abord, l’outil Python explore chaque table du domaine. Il isole chaque classe identique dans un répertoire avec toutes les valeurs associées. Ensuite, le script moyenne chaque variable

Tableau 2.2 Caractéristiques des stations d'observation

#	Nom de la station	Latitude	Longitude	zmat (m)	Période de mesure	
		(°)	(°)		Début	Fin
1	Montagne sèche	49,17	-64,96	40	2002-02-01	2003-01-31
2	Rivière-au-Renard Martin	48,98	-64,44	40	2001-01-11	2001-11-07
3	Canton Power	48,61	-65,04	41	2001-12-01	2002-11-22
4	Baie des Sables	48,73	-67,87	40	2001-01-01	2002-12-31
5	Ste-Félicité-2	48,89	-67,37	41	2002-01-01	2002-12-31
6	Ste-Félicité-Desrosiers	48,88	-67,36	41	2000-12-01	2001-11-15
7	Ste-Félicité-Marquis	48,86	-67,39	41	2000-12-01	2001-11-15

Tableau 2.3 Caractéristiques du vent mesuré aux stations d'observation

#	Nom de la station	\bar{u} ($m s^{-1}$)	σ_u	k	c
1	Montagne sèche	7,20	3,71	2,06	8,14
2	Rivière-au-Renard Martin	6,11	3,20	2,02	6,91
3	Canton Power	6,64	3,12	2,27	7,50
4	Baie des Sables	7,99	3,24	2,67	8,99
5	Ste-Félicité-2	7,49	3,99	1,98	8,46
6	Ste-Félicité-Desrosiers	6,29	3,22	2,07	7,10
7	Ste-Félicité-Marquis	7,25	3,50	2,21	8,19

physique de chaque classe selon la fréquence d'occurrence de celles-ci. Une fois la procédure effectuée, les nouvelles classes et les classes uniques sont insérées dans une nouvelle table. Enfin, un entête est placé afin d'avoir le même format qu'une table originale. Le script de cet outil est disponible en annexe.

Il est ensuite nécessaire de valider l'outil de moyennage des tables. Un générateur a donc été créé pour vérifier la conformité de l'outil de moyennage. L'objectif du générateur est de certifier la classification géostrophique de WEST comme libre d'erreurs systématiques dans l'usage de plusieurs types de réanalyse, telles que NCEP et ERA5. Le générateur utilise des fichiers réels de réanalyse comme entrée. Il produit autant de sortie que de fichier FST fournis en entrée tout en conservant la même quantité d'enregistrement. Toutes les méta-données des réanalyses sont préservées. Par contre, les contenus météorologiques tels que le géopotentiel, la température et l'humidité sont modifiées. Pour ce qui n'est pas du géopotentiel, les champs sont remplacés par sa valeur moyenne. Pour le géopotentiel, il est remplacé par un champ dont le gradient isobarique satisfait exactement la relation géostrophique avec un vecteur géostrophique imposé par le générateur, le même à chaque niveau de pression de la réanalyse. La valeur moyenne du champ est aussi préservée. En fonction du temps, le vent géostrophique peut soit être constant, soit varier en module et direction d'une manière aléatoire dans une liste de valeurs satisfaisant à des probabilités imposées. Cela permet à la série chronologique des vents géostrophiques utilisés afin de satisfaire à un histogramme de vitesse et direction désiré. Les tables résultantes seront soit mono-classe, soit multi-classe. Puisque les algorithmes de différences finies qui sont utilisés différent de ceux du générateur, il ne peut pas avoir des distributions géostrophiques identiques entre les deux. Il peut y avoir des légères différences sans nuire à la certification. Enfin, en faisant les graphiques appropriés en connaissant d'avance les résultats de ces tables et la série chronologique du vent géostrophique du générateur, il est possible de constater la forte ressemblance.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors de cette étude. La première section décrit les domaines et les points centroïdes utilisés dans cette étude. La deuxième section montre une comparaison des caractéristiques spatiales des réanalyses NCEP et ERA5 telles que le champ de la hauteur géopotentielle des réanalyses. Ceci est fait pour le 1 janvier 1994 à 00Z en Gaspésie. Les réanalyses utilisées pour cette comparaison sont NCEP 2,5° ainsi que ERA5 2,5° et 0,25°. Dans la troisième section, une évaluation des réanalyses NCEP et ERA5 est faite. Une comparaison entre les tables fréquentielles des réanalyses NCEP et ERA5 à 2,5° sur une période de 10 et 25 ans au point 48,75°N et 296,25°O est démontrée. Ensuite, une comparaison entre les tables fréquentielles des réanalyses ERA5 à 0,25° et 2,5° sur une période de 10 et 25 ans au point 48,75°N et 293,75°O. De plus, une comparaison statistique entre les données WESTATS des réanalyses et d'anémométrie est faite. Puis, les cartes de moyenne du vent simulé par MC2 de WEST (EU) à 40 m dans la région de la Gaspésie provenant des réanalyses NCEP 2,5°, ERA5 2,5° et ERA5 0,25° sont présentées et décrites. La quatrième section montre une comparaison entre les tables fréquentielles des réanalyses ERA5 à 0,5° et 1,25° au point 48,75°N et 293,75°O afin de cibler les erreurs potentielles liées à la résolution spatiale. La cinquième section présente les tables fréquentielles des réanalyses ERA5 moyennées. Une comparaison est faite à la région de la Gaspésie et des Prairies canadiennes aux résolutions 0,25°, 0,5° et 1,25° centré au point de grille 48,75°N et 293,75°O et 50,75°N et 251,25°O respectivement, sur une période de 10 ans. La sixième section présente une table fréquentielle ERA5 0,25° sur un autre point de grille en Gaspésie. Elle est comparée avec la table ERA5 2,5° au point 48,250°N et 294,25°O sur 10 ans afin d'illustrer la variabilité spatiale des tables 0,25° dans le domaine. Ce point présente des caractéristiques plus représentatives de la climatologie du vent géostrophique dans le domaine en Gaspésie. Une septième compare le paramètre de la moyenne du module de Vg à 1000 mb pour les réanalyses ERA5 à 0,25° et 2,5°. Enfin, une dernière section résume l'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre.

3.1 Les domaines et les points centroïdes utilisés

La figure 3.1 montre les domaines utilisés dans cette étude et les points importants. Les cercles noirs représentent le point de grilles des réanalyses NCEP et ERA5 à $2,5^\circ$. Les cercles bleus représentent la grille de ERA5 $0,25^\circ$. Il est important de mentionner qu'il y a $10 \times 10 = 100$ tables à $0,25^\circ$ dans un domaine à $2,5^\circ$. Ceci illustre la grande représentativité et variabilité des tables sur le domaine de ERA5 $0,25^\circ$ comparativement à $2,5^\circ$. Les coordonnées des points A et B sont $48,75^\circ\text{N}$ et $296,25^\circ\text{O}$ et $48,75^\circ\text{N}$ et $293,75^\circ\text{O}$ respectivement. Le point A et B sont au centre de leur domaine respectif, délimité par les points de grille à des réanalyses à $2,5^\circ$. Le point C est au sud-est du point B et représente la coordonnée $48,250^\circ\text{N}$ et $294,25^\circ\text{O}$. Le point C a servi à vérifier la variabilité spatiale de ERA5 discutée à la sous-section 3.6.

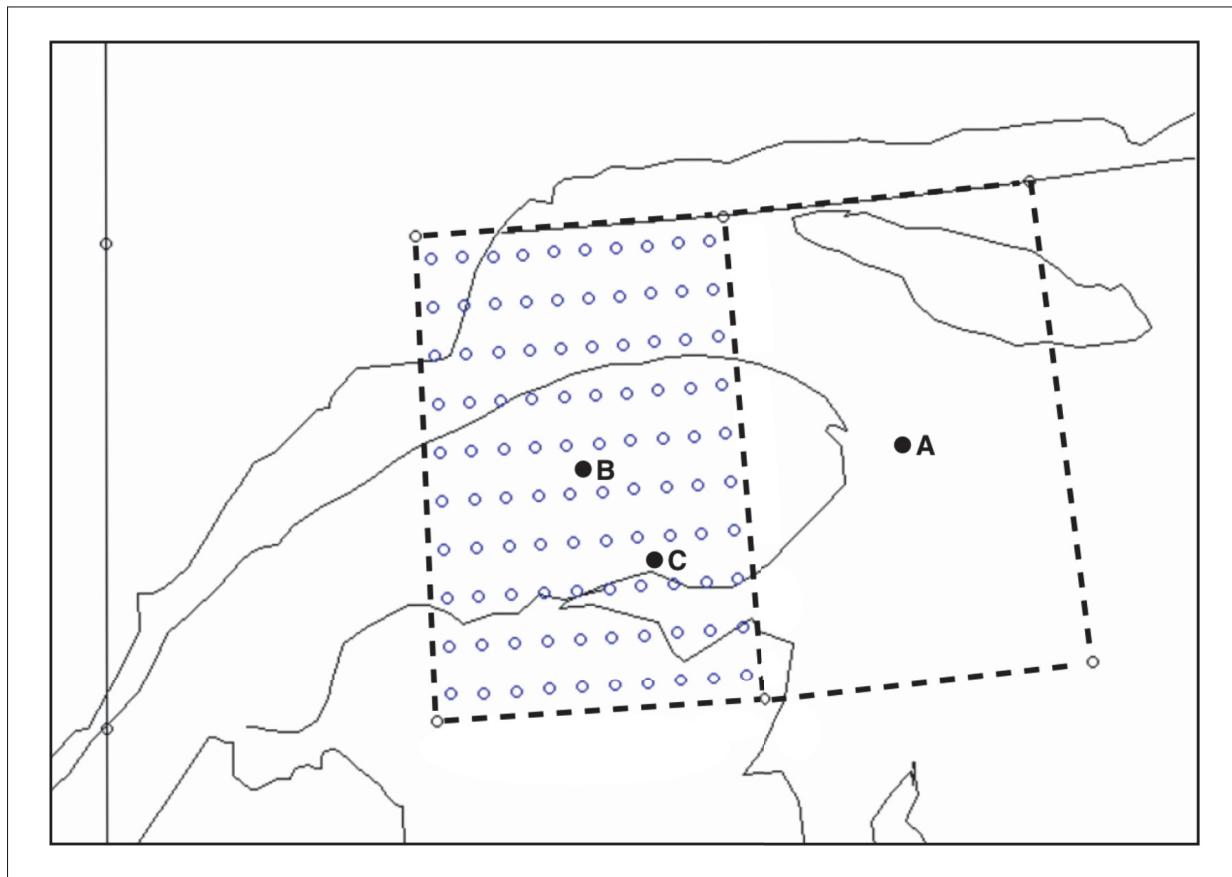


Figure 3.1 Les domaines et points importants du projet. Les points A et C représentent les coordonnées des tables utilisées pour les comparaisons

La sélection de la table fréquentielle est très importante. Tout d'abord, cela s'est fait à partir des réanalyses NCEP déjà existantes. La table au point A est utilisé pour représenter le climat au centre du domaine. Ce point a été utilisé pour comparer les réanalyses ERA5 et NCEP à $2,5^\circ$. Bien que ce point situe sur le golfe du St-Laurent, le domaine à cette résolution est assez grand pour couvrir une partie de la péninsule gaspésienne. Cependant, la table ERA5 $0,25^\circ$ au point A n'est pas représentatif de la climatologie de la Gaspésie tandis que la table au point B l'est beaucoup plus étant donné qu'elle couvre davantage la région et est plus près des stations de mesures d'anémométrie utilisées pour vérifier les résultats discutés à la section 3.3.3. Le point B a été utilisé pour comparer les réanalyses ERA5 à multiple résolutions.

Le choix des points s'est fait de manière stratégique. Puisque le nombre de point disponible pour les grilles à $2,5^\circ$, seules les tables aux points $48,75^\circ\text{N}$ comme coordonnée de latitude avec $296,25^\circ\text{O}$ et $293,75^\circ$ sont significativement plus près de la région de la Gaspésie. Pour ERA5 $0,25^\circ$, 200 points sont disponibles pour représenter le climat de la région. Alors, il a été intuitif de prendre le même point que les réanalyses à $2,5^\circ$ au centre du domaine. Toutefois, comme mentionner ci-haut, la variabilité spatiale ERA5 $0,25^\circ$ offre la liberté de choisir le point de notre choix dont certains représentent mieux le domaine que d'autre.

3.2 Caractéristiques spatiales des réanalyses NCEP et ERA5

Il est important de démontrer les caractéristiques de divers champs météorologiques pour évaluer la performance et l'exactitude des produits de réanalyses NCEP et ERA5. Dans cette section, une comparaison de la hauteur géopotentielle (GZ) entre NCEP et ERA5 à $2,5^\circ$ ainsi que ERA5 à $0,25^\circ$ est faite.

La figure 3.2 montre GZ en décimètre (dam), le 1 janvier 1994 à 00Z pour ERA5 $2,5^\circ$ au panneau a), NCEP $2,5^\circ$ au panneau b). Les lignes continues représentent une ligne d'égale hauteur géopotentielle, nommé isohypse en météorologie. La figure 3.2c) montre la différence entre les champs ERA5 et NCEP $2,5^\circ$ en dam. La différence entre les champs n'est pas significative. Il y a entre 1 et 0,5 dam de différence entre les 2 réanalyses en Gaspésie. On remarque un minimum

relatif près du bassin versant de la rivière Manicouagan et un maximum relatif plus à l'est près du sud du Labrador.

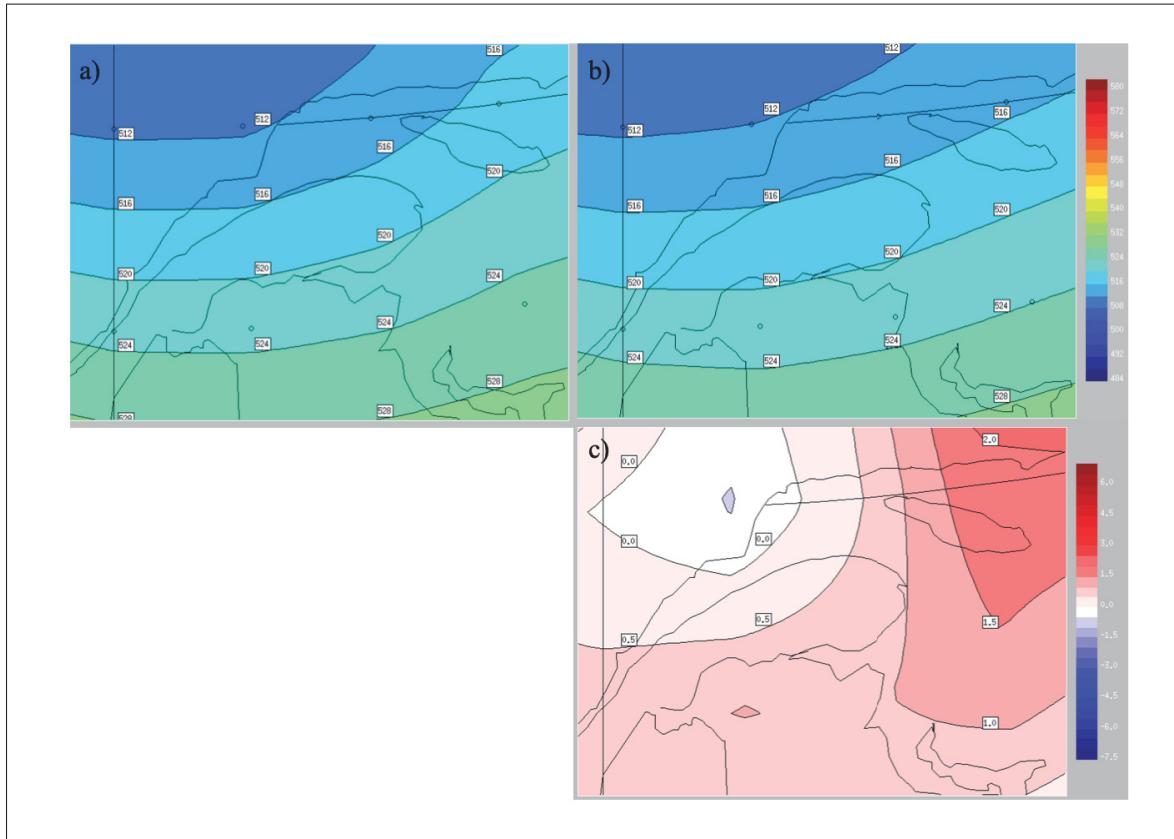


Figure 3.2 Comparaison du champ géopotentiel (GZ) au niveau isobarique de 500 mb, en décamètre (dam) le 1 janvier 1994 à 00Z. Représentation de GZ pour a) ERA5 à $2,5^\circ$, b) NCEP à $2,5^\circ$. Le panneau c) montre la différence entre les champs a) et b) en dam

Le panneau a) de la figure 3.3 montre GZ le 1 janvier 1994 à 00Z pour ERA5 $0,25^\circ$. Le panneau b) montre la différence entre le champ GZ de ERA5 à $0,25^\circ$ et $2,5^\circ$. On remarque que la région est beaucoup plus petite et que l'amplitude des différences est d'environ 0,5 dam, c'est-à-dire plus faible et plus petite échelle spatiale, relativement à ce que l'on constate à la figure 3.2. la dimension du domaine est environ 5 fois plus petite à la figure 3.3 comparativement à la figure 3.2. Les hauteurs géopotentielles sont légèrement plus hautes dans l'ouest du domaine, soit dans les régions de la Côte et l'ouest de la Haute-Gaspésie.

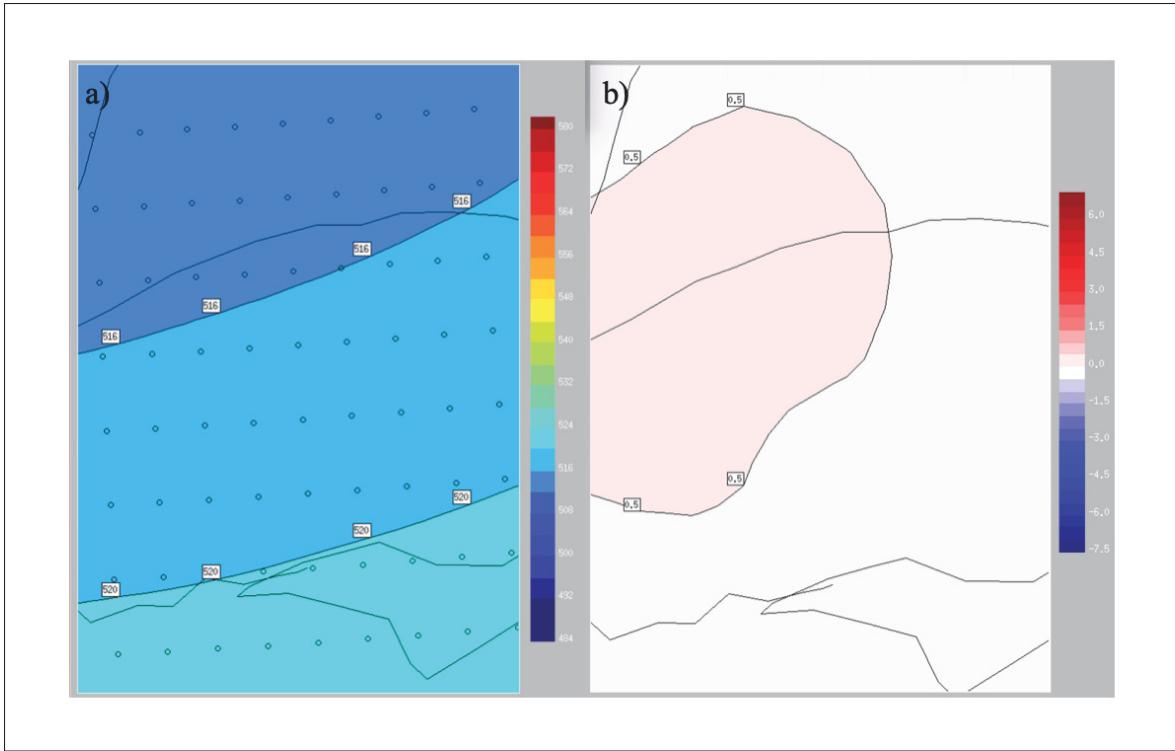


Figure 3.3 Le panneau a) représente le champ géopotentiel (GZ) au niveau isobarique de 500 mb, en décamètre (dam) le 1 janvier 1994 à 00h00Z pour ERA5 0,25. Le panneau b) montre la différence entre le champ a) et GZ pour ERA5 2,5° (figure 3.2a) en dam

3.3 Évaluation des réanalyses NCEP et ERA5

Tout d'abord, il est important de comparer les réanalyses NCEP et ERA5 à 2,5° afin de vérifier la régularité des différentes réanalyses à la même résolution. Ensuite, il est pertinent de comparer les réanalyses ERA5 à 0,25° avec celles à 2,5° dans le but d'évaluer l'impact de l'incorporation d'une base de données à plus haute résolution dans le schéma de classification de WEST. Enfin, les sorties du module WESTATS sont traitées et étudiées. Il est important de spécifier que ce module est la sortie principale de WEST.

3.3.1 Comparaison entre les tables fréquentielles des réanalyses NCEP et ERA5

Dans un premier temps, une analyse entre ERA5 et NCEP est faite. La base de données de réanalyse ERA5 est native à 0,25°. Toutefois, elle est aussi disponible sur des grilles plus

grossières par un processus de moyen fait au C3S. Dans les figures 3.4 à 3.6 et 3.8 à 3.13, les graphiques sont des statistiques établies uniquement à partir du contenu d'une table fréquentielle de WEST. C'est un outil qui reconstruit approximativement les distributions établies par le code de classification géostrophique à partir des séries chronologiques de réanalyse et permet de comparer deux tables de façon compacte. Les graphiques du haut représentent une distribution de fréquence bivariée de la vitesse du vent géostrophique moyen et de la direction (UGHR) en pourcentage (%). Les histogrammes du centre représentent la distribution de la fréquence de la vitesse du vent géostrophique (UGH) en ms^{-1} . De plus, les statistiques de la distribution de Weibull (\bar{u}, σ_u, c et k) sont montrées en rouge. Enfin, les graphiques du bas représentent la rose des vents correspondant à la distribution fréquentielle des directions du vent géostrophique (UGR). Celles-ci ont comme nord vers le haut, sud vers le bas, l'ouest à gauche et l'est à droite. Par contre, le cercle des angles est étiqueté selon la convention algébrique et non météorologique. Le zéro se trouve à droite et augmente dans le sens anti-horaire. Chaque colonne correspond à une table différente. Le script de construction graphes statistiques est mis en annexe.

Une première comparaison est faite entre NCEP et ERA5 à $2,5^\circ$. La figure 3.4 montre les tables fréquentielles de ERA5 sur la colonne gauche et NCEP sur celle de droite. La période est de 10 ans du 1994-01-01 au 2003-12-31 et le domaine est centré en Gaspésie aux coordonnées $48,75^\circ\text{N}$ et $296,25^\circ\text{O}$ comme le montre le point A à la figure 3.1. On remarque que la UGHR donne un maximum aux intervalles de vitesse de 4 à 8 ms^{-1} dans la direction 203° à 293° pour les deux tables. Toutefois, on constate que la fréquence est plus significative pour ERA5 que NCEP. De plus, la UGH de la table ERA5 est généralement plus forte pour les basses vitesses et plus faible pour les vitesses plus élevées comparativement à NCEP. La moyenne de la vitesse du vent est $7,29 \text{ ms}^{-1}$, l'écart-type est $5,58 \text{ ms}^{-1}$, et les paramètres c et k de Weibull sont respectivement 7,94 et 1,34 pour ERA5. Pour NCEP, la moyenne de la vitesse du vent est $8,95 \text{ ms}^{-1}$, l'écart-type est $6,23 \text{ ms}^{-1}$, et les paramètres c et k de Weibull sont 9,9 et 1,48 respectivement.

Par la suite, il est nécessaire d'analyser les deux bases de données NCEP ERA5 pour une période de 25 ans qui représentent davantage une échelle de temps climatique. La période s'étale de 1979-01-01 à 2003-12-31 et le domaine est centré au point A. Dans la figure 3.5, on remarque la

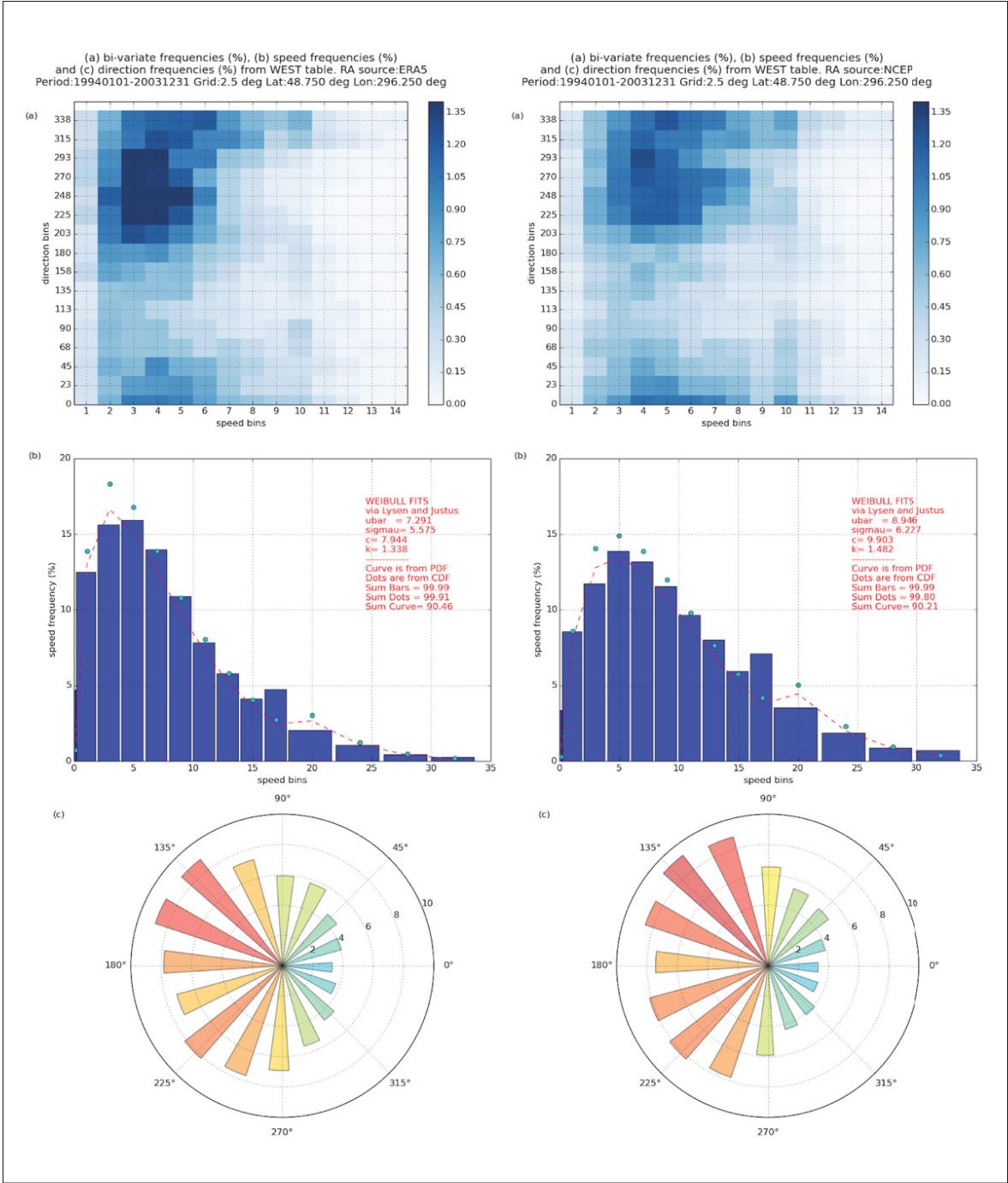


Figure 3.4 Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 à $2,5^\circ$ sur la colonne de gauche et NCEP à $2,5^\circ$ sur la colonne de droite. La période est de 19940101 à 20031231 et la coordonnée géographique est $48,75^\circ\text{N}$ et $296,25^\circ\text{O}$

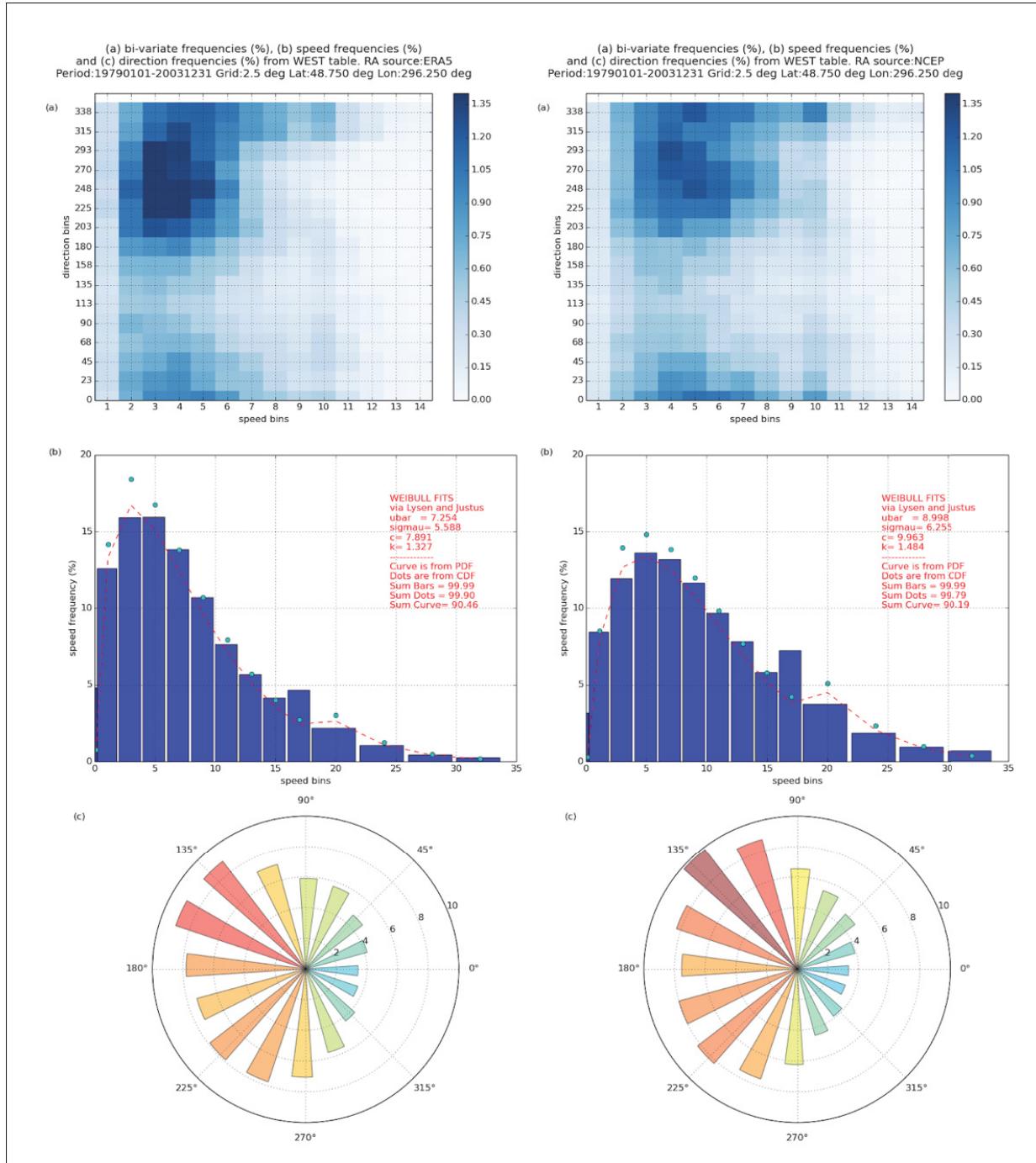


Figure 3.5 Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 à $2,5^\circ$ sur la colonne de gauche et NCEP à $2,5^\circ$ sur la colonne de droite. La période est de 19790101 à 20031231 et la coordonnée géographique est $48,75^\circ\text{N}$ et $296,25^\circ\text{O}$

forte similarité de UGHR, UGH et UGR avec ce que l'on retrouve à la figure 3.4 pour une période de 10 ans. De plus, les statistiques du vent moyen, de l'écart-type ainsi que les paramètres de Weibull démontrent aussi une grande ressemblance entre les 2 périodes analysées.

3.3.2 Comparaison des tables fréquentielles des réanalyses ERA5 à 0,25° et 2,5°

Les figures 3.6 et 3.7 montrent les comparaisons entre les tables fréquentielles ERA5 0,25° et ERA5 2,5° pour une période de 10 ans de 1994-01-01 à 2003-12-31 et 25 ans de 1979-01-01 à 2003-12-31 respectivement. Celles-ci sont centrées sur le point B de la figure 3.1 à 48,75°N et 293,75°O. On remarque que la distribution de UGHR diffère énormément. Pour la table 0,25°, les maximums sont notables et montre une concentration dans les directions 23° à 45° et 225° à des vitesses entre 18 et $>34 \text{ ms}^{-1}$ ce qui différent radicalement de ce qu'on remarque à 2,5°. De plus, UGH est significativement plus faible pour les basses vitesses et plus forte pour les vitesses plus élevées pour ERA5 0,25°. On remarque un aplatissement considérable de la distribution de Weibull et cela est perceptible par le paramètre c qui passe de 1,32 à 1,52. D'autre part, UGR diffère largement aussi entre les 2 réanalyses. ERA5 0,25 présente des vents qui sont principalement du nord et sud-sud-ouest pour ERA5 0,25° contrairement à la direction nord-ouest pour ERA5 2,5°. La moyenne de la vitesse du vent est d'environ 5 ms^{-1} plus grand pour ERA5 0,25° et l'écart-type est plus haut d'environ 3 ms^{-1} . Les résultats sont très similaires pour les 2 périodes étudiées.

3.3.3 Comparaison statistique entre les données WESTATS des réanalyses et d'anémométrie

Le tableau 3.1 présente les statistiques du vent mesuré par rapport à la moyenne de la vitesse du vent calculée par le module statistique de MC2. La colonne 1 présente le nom de la station du MRNQ où le mât a été installé. La moyenne du vent observée à environ 40 m est inscrit sur la deuxième colonne. Les colonnes 3 et 4 montrent la moyenne de la vitesse du vent calculée par le module statistique de WEST pendant une période de 10 ans pour NCEP et ERA5 2,5° respectivement. Les colonnes 5 et 6 représentent exactement les mêmes caractéristiques à

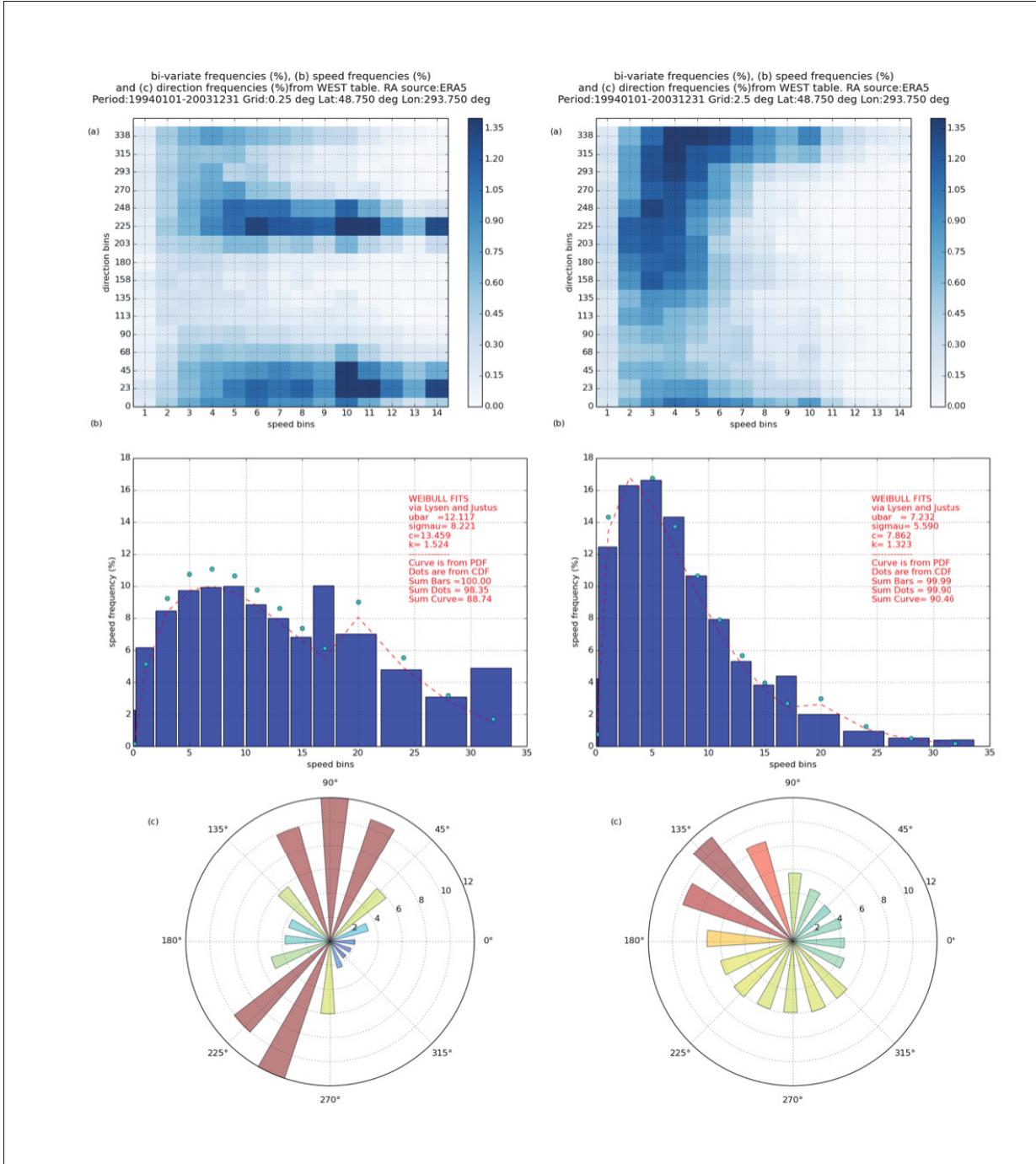


Figure 3.6 Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 à $0,25^\circ$ sur la colonne de gauche et ERA5 à $2,5^\circ$ sur la colonne de droite. La période est de 19940101 à 20031231 et la coordonnée géographique est $48,75^\circ\text{N}$ et $293,75^\circ\text{O}$

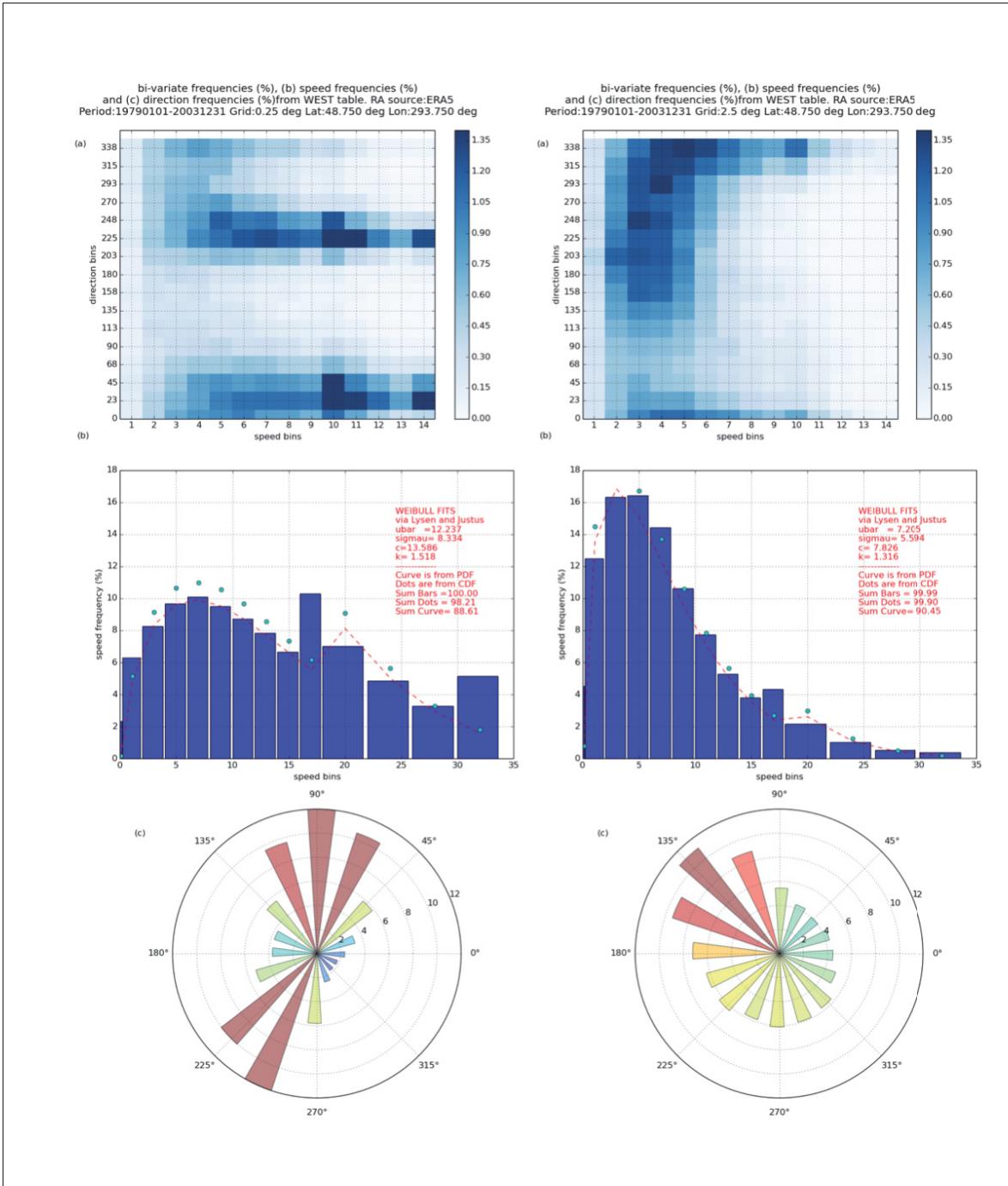


Figure 3.7 Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 à $0,25^\circ$ sur la colonne de gauche et ERA5 à $2,5^\circ$ sur la colonne de droite. La période est de 19790101 à 20031231 et la coordonnée géographique est $48,75^\circ\text{N}$ et $293,75^\circ\text{O}$

l’exception d’une période de 25 ans. Les trois rangées du bas montrent des données statistiques telles que l’erreur moyenne (ou biais), l’écart quadratique moyen (RMSD) et le coefficient de corrélation.

Tableau 3.1 Mesures d’anémométrie des mâts du MRNQ et la moyenne de la vitesse du vent (EU) en ms^{-1} des tables NCEP et ERA5 2,5° pour 10 et 25 ans. Statistiques de comparaison des réanalyses ; erreur moyenne, écart quadratique moyen (RMSD) et le coefficient de corrélation

Mâts du MRNQ	Anémométrie	EU (m/s)			
		10 ans		25 ans	
		NCEP 2.5°	ERA5 2.5°	NCEP 2.5°	ERA5 2.5°
Montagne Sèche	7,20	7,25	6,33	7,33	6,32
Rivière-au-Renard Martin	6,11	7,02	6,10	7,08	6,08
Canton Power	6,64	6,20	5,39	6,23	5,39
Baie des Sables	7,99	7,87	6,95	7,91	6,94
Sainte-Félicite Desrosiers	7,49	7,89	7,08	7,93	7,08
Sainte-Félicite 2	6,29	8,08	7,24	8,12	7,24
Sainte-Félicite Marquis	7,25	7,69	6,91	7,73	6,90
Erreur moyenne		0,43	-0,42	0,48	-0,43
Écart quadratique moyen (RMSD)		0,81	0,81	0,84	0,81
Coefficient de corrélation		0,39	0,38	0,38	0,38

Tout d’abord, on remarque que la différence entre les résultats obtenus pour une période de 10 ans comparativement à 25 ans varie très peu, soit de $0,06 \pm 0,02 \text{ ms}^{-1}$ pour NCEP et $0,01 \pm 0,01 \text{ ms}^{-1}$ pour ERA5. L’erreur moyenne augmente très peu pour une période de 25 ans, soit de $0,05 \text{ ms}^{-1}$ pour NCEP et $0,01$ pour ERA5. La différence du biais entre les deux réanalyses est de $0,85 \text{ ms}^{-1}$ pour une période de 10 ans et $0,92$ pour une période de 25 ans. Le RMSD est de $0,81$ pour NCEP et ERA5 pour la période de 10 ans et pour ERA5 25 ans tandis qu’il augmente de $0,03$ pour NCEP 25 ans. Le coefficient de corrélation est presque identique pour chaque table, soit de $0,38 \pm 0,01$.

La colonne 1 et 2 du tableau 3.2 présente le nom de la station du MRNQ et la moyenne du vent observée à environ 40 m. Les colonnes 3 et 4 représentent les moyennes de vitesse vent en ms^{-1} de ERA5 0,25° pour 10 et 25 ans respectivement. Les 3 dernières rangées montrent l'erreur moyenne, le RMSD et le coefficient de corrélation. On remarque que la différence entre les moyennes de la vitesse du vent entre 10 et 25 ans sont d'environ de $\pm 0,01 \text{ ms}^{-1}$. L'erreur moyenne, l'écart quadratique moyen et le coefficient de corrélation ne varie pas entre les deux périodes. Toutefois, en comparant avec ERA5 2,5°, les écarts sont plutôt significatifs. L'erreur

Tableau 3.2 Tableau 3.2 Mesures d'anémométrie des mâts du MRNQ et la moyenne de la vitesse du vent (EU) en ms^{-1} des tables ERA5 0,25° pour 10 et 25 ans. Statistiques de comparaison des réanalyses ; erreur moyenne, écart quadratique moyen (RMSD) et le coefficient de corrélation

Mâts du MRNQ	Anémométrie	EU (m/s)	
		ERA5 0,25°	
		10 ans	25 ans
Montagne Sèche	7,20	7,38	7,37
Rivière-au-Renard Martin	6,11	7,30	7,29
Canton Power	6,64	6,51	6,50
Baie des Sables	7,99	8,09	8,09
Sainte-Félicite Desrosiers	7,49	8,31	8,32
Sainte-Félicite 2	6,29	8,48	8,49
Sainte-Félicite Marquis	7,25	8,15	8,15
Erreur moyenne	0,75	0,75	
Écart quadratique moyen (RMSD)	1,05	1,05	
Coefficient de corrélation	0,34	0,34	

moyenne varie de $1,17 \pm 0,01 \text{ ms}^{-1}$, le RMSD varie de 0,24 et le coefficient de corrélation varie

de 0,04. On constate que l'écart statistique entre les données d'anémométrie et la moyenne de la vitesse du vent simulé par WEST pour ERA5 0,25° est plus grande que celui de ERA5 2,5°. Les erreurs sont plus grandes tandis que le coefficient de corrélation est plus faible.

La différence entre les résultats sur une période de 10 ans comparativement à 25 ans très négligeable entre elles. C'est pourquoi une période de 10 ans est étudiée pour la suite du document. Les réanalyses ERA5 0,25° présentent un biais notable qui nécessite une recherche plus approfondie. Les sections 3.4 à 3.6 montrent les résultats des tentatives de correction et d'éclaircissement effectuées.

3.3.4 Cartes de moyenne du vent simulé par MC2 de WEST dans la région la Gaspésie

La figure 3.8 montre des cartes de la moyenne du vent simulé par MC2 de WEST (EU) en ms^{-1}

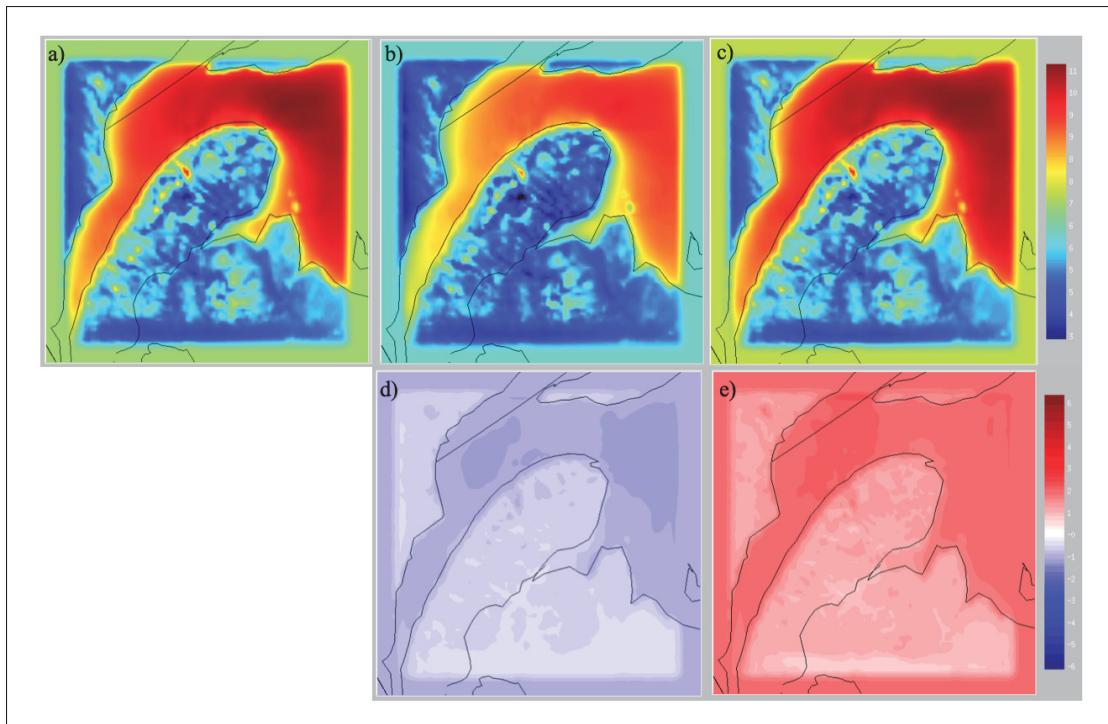


Figure 3.8 EU (ms^{-1}) de la Gaspésie avec les réanalyses a) NCEP 2,5°, b) ERA5 2,5° et c) ERA5 0,25°. Les panneaux d) et e) représentent la différence entre les champs de EU entre ERA5 et NCEP à 2,5° et entre ERA5 0,25 et 2,5° respectivement

à 40 m dans la région de la Gaspésie à partir les réanalyses a) NCEP 2,5°, b) ERA5 2,5° et c) ERA5 0,25°. On remarque que ERA5 2,5° présente des vents moyens plus faible en général par rapport au 2 autres. Les vents sont maximums sur le St-Laurent, le golfe du St-Laurent et sur les Chic-Chocs. Les figures 3.8 d) et e) montrent la différence de EU selon les réanalyses choisies. On retrouve la différence entre les champs de EU de ERA5 2,5° et NCEP 2,5° à l'image d) et de ERA5 0,25° et ERA5 2,5° à l'image e). On constate que EU de ERA5 2,5° est généralement plus faible sur l'ensemble du domaine par rapport à NCEP et que EU de ERA5 0,25° sont généralement plus fort sur toute la région. Les tableaux 3.1 et 3.2 montrent bien cette caractéristique. Les valeurs de EU pour ERA5 2,5° sont généralement plus faibles comparativement aux mesures d'anémométrie sauf pour Sainte-Félicité-2 qui est $0,95 \text{ ms}^{-1}$ plus fort tandis que pour ERA5 0,25°, les EU sont tous plus élevées à l'exception de Canton Power avec une différence de $-0,13 \text{ ms}^{-1}$.

3.4 Comparaison entre les tables fréquentielles des réanalyses ERA5 à 0,5° et 1,25°

Afin de vérifier l'objectif de ce projet, il est important de faire une comparaison entre les résultats obtenus à plus haute résolution. Pour bien définir l'origine de l'anomalie présente dans ERA5, les résolutions 0,5° et 1,25° sont aussi étudiés afin de mettre en lumière la performance graduelle entre la résolution actuelle de WEST et la fine résolution à 0,25°. Une analyse est faite pour la période de 10 ans centrée au point B. Dans la figure 3.9, on remarque immédiatement la grande similarité entre les tables à 0,25° et 0,5° ainsi que les tables 1,25° et 2,5° en terme de UGHR, UGH et UGR. On note que pour ERA5 0,5°, les maximums de la fréquence bivariée sont aux mêmes endroits et la distribution aplatie de UGH. La moyenne de la vitesse du vent et l'écart-type sont significativement plus grand pour ERA5 0,25° et 0,5° que pour les tables de ERA5 1,25° et 2,5°. En plus, on constate les grands écarts directionnels de ERA5 0,25 avec des vents principalement du nord et du sud-ouest.

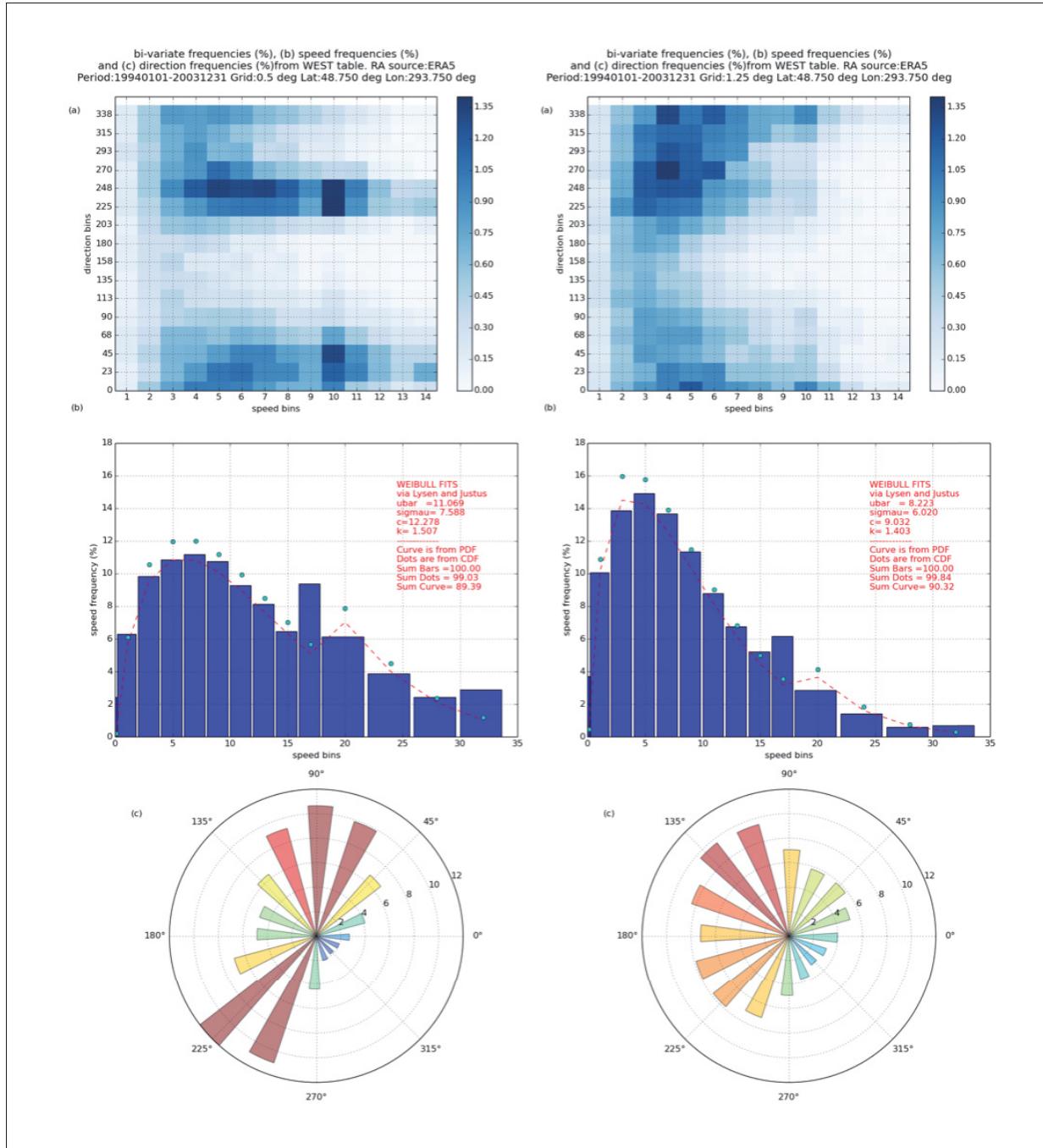


Figure 3.9 Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 à $0,5^\circ$ sur la colonne de gauche et ERA5 à $1,25^\circ$ sur la colonne de droite. La période est de 19940101 à 20031231 et la coordonnée géographique est $48,75^\circ\text{N}$ et $293,75^\circ\text{O}$

3.5 Comparaison entre les tables fréquentielles des réanalyses ERA5 moyennées

L'outil permettant de moyenner les tables expliqué à la section 2.5 est utilisé dans cette section. L'objectif est de reproduire le climat représenté par la table ERA5 à $2,5^\circ$ en moyennant toutes les situations climatiques à chaque point de grille du domaine avec ERA5 $0,25^\circ$. Cette moyenne devrait être équivalente à la table ERA5 $2,5^\circ$.

Tout d'abord, une comparaison est faite entre la table fréquentielle moyenne, obtenue des tables ERA5 à $0,25^\circ$ représentant la région de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ centrée au point B de la figure 3.1, et la table ERA5 $2,5^\circ$ pour une période de 10 ans. Le même exercice est fait à partir d'une table moyennée avec les réanalyses à $0,5^\circ$ et $1,25^\circ$. Le tout est comparé dans la première sous-section. Ensuite, la même expérience est effectuée sur les Prairies canadiennes au point $50,75^\circ\text{N}$ et $251,25^\circ\text{O}$ pour une période de 10 ans.

3.5.1 Les réanalyses ERA5 moyennées dans la région de la Gaspésie

La figure 3.10 montre la table fréquentielle issue d'une moyenne de 2×2 tables natives à $1,25^\circ$ et la table ERA5 à $2,5^\circ$ et la figure 3.11 présente une table moyenne de 5×5 tables natives à $0,5^\circ$ et une table moyenne de 10×10 tables natives à $0,25^\circ$.

Premièrement, on remarque que UGHR est très similaire dans les 4 tables. Le maximum se trouve entre 315° à 338° et entre 4 à 8 ms^{-1} . Toutefois, on peut constater un affaiblissement du signal plus la résolution est élevée. Autrement dit, plus on moyenne de tables, plus une homogénéité s'établit. Ensuite, on observe que plus la résolution est élevée, plus la distribution de Weibull s'affaisse qui se traduit par l'augmentation du paramètre k . De plus, la direction principale est du nord-ouest à $0,25^\circ$ et $0,5^\circ$ ce qu'il n'était pas le cas pour les tables natives aux mêmes résolutions. Cette expérience confirme qu'un simple outil moyennant les tables à l'intérieur du domaine donne un meilleur résultat qu'une seule table native au centre du même domaine.

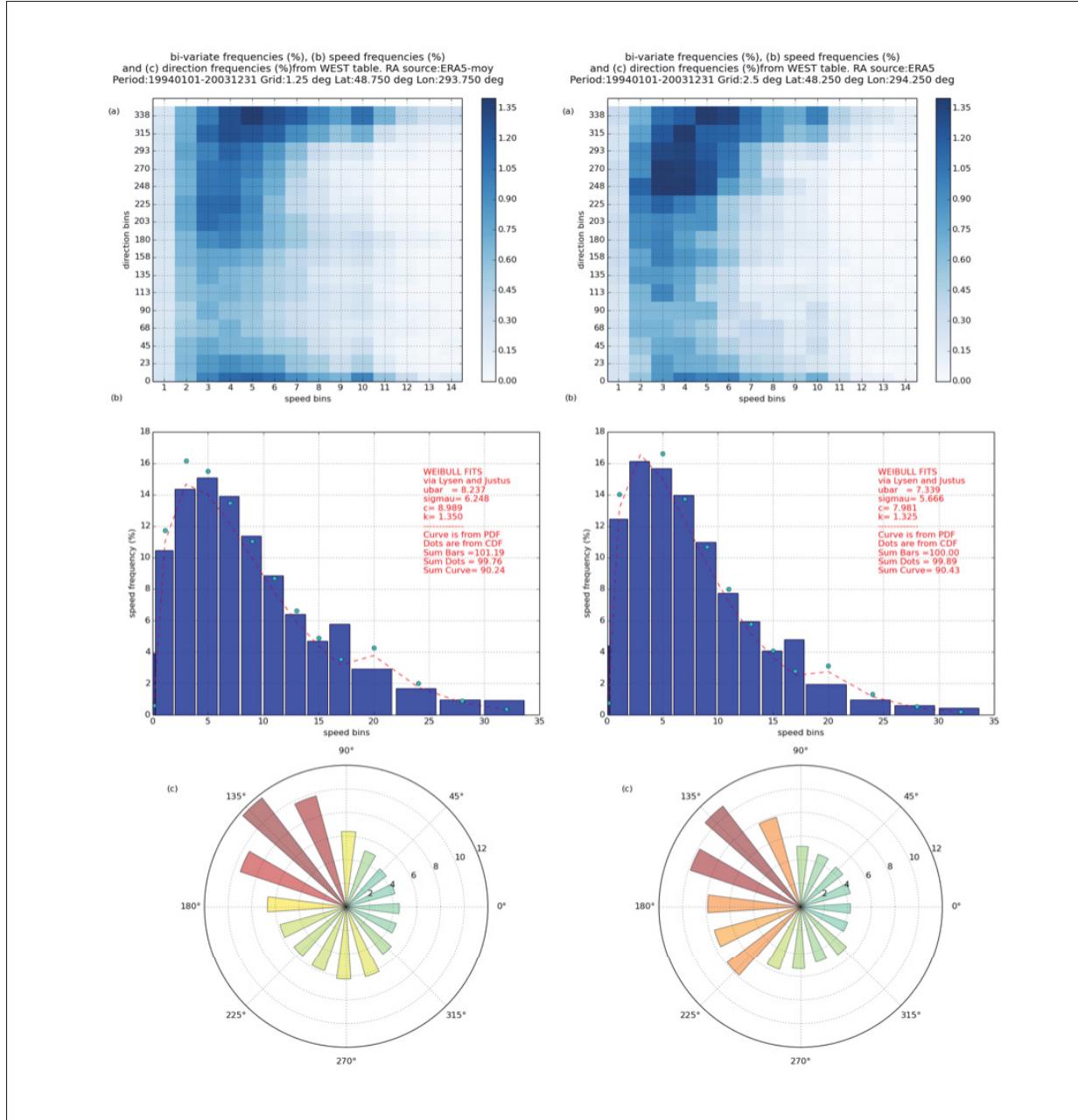


Figure 3.10 Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 moyennée avec 2 x 2 tables natives à $1,25^\circ$ sur la colonne de gauche et ERA5 à $2,5^\circ$ sur la colonne de droite. La période est de 19940101 à 20031231 et la coordonnée géographique est $48,75^\circ\text{N}$ et $293,75^\circ\text{O}$

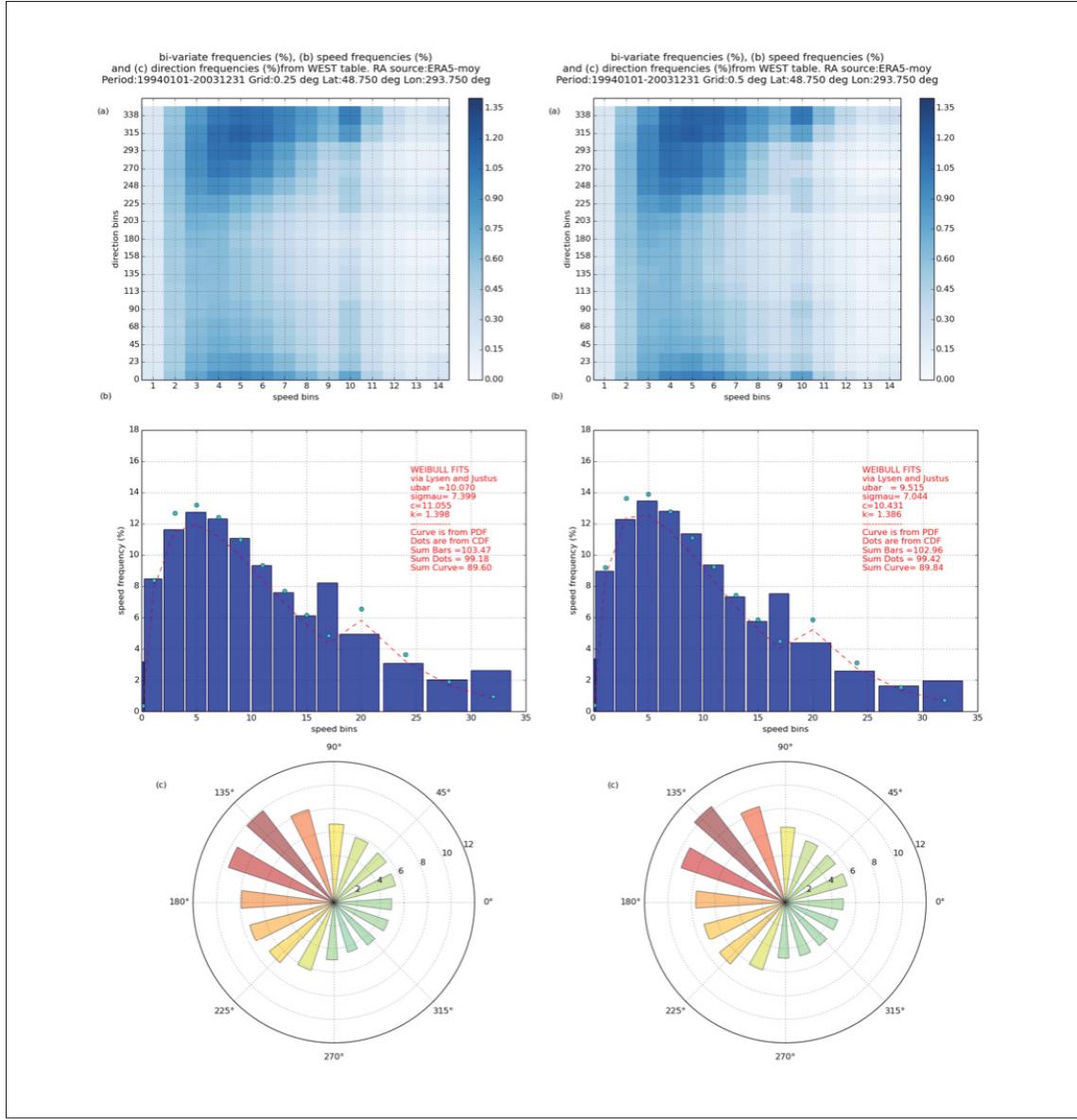


Figure 3.11 Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 moyennée avec 10×10 tables natives à $0,25^\circ$ sur la colonne de gauche et ERA5 moyennée avec 5×5 tables natives à $0,5^\circ$ sur la colonne de droite. La période est de 19940101 à 20031231 et la coordonnée géographique est $48,75^\circ\text{N}$ et $293,75^\circ\text{O}$

3.5.2 Les réanalyses ERA5 moyennées sur les Prairies canadiennes

Afin de valider l'hypothèse d'une variabilité trop local sur les résultats, il est nécessaire de faire une comparaison de ERA5 dans une autre région avec moins de relief montagneux. Dans cette

section, une comparaison est faite entre de la table ERA5 $2,5^\circ$ avec une table moyennée à $0,25^\circ$, $0,5^\circ$ et $1,25^\circ$ sur une grille de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ centré au point $50,75^\circ\text{N}$ et $251,25^\circ\text{O}$ dans les Prairies canadiennes pour une période de 10 ans entre 1994-01-01 et le 2003-12-31. La figure 3.12

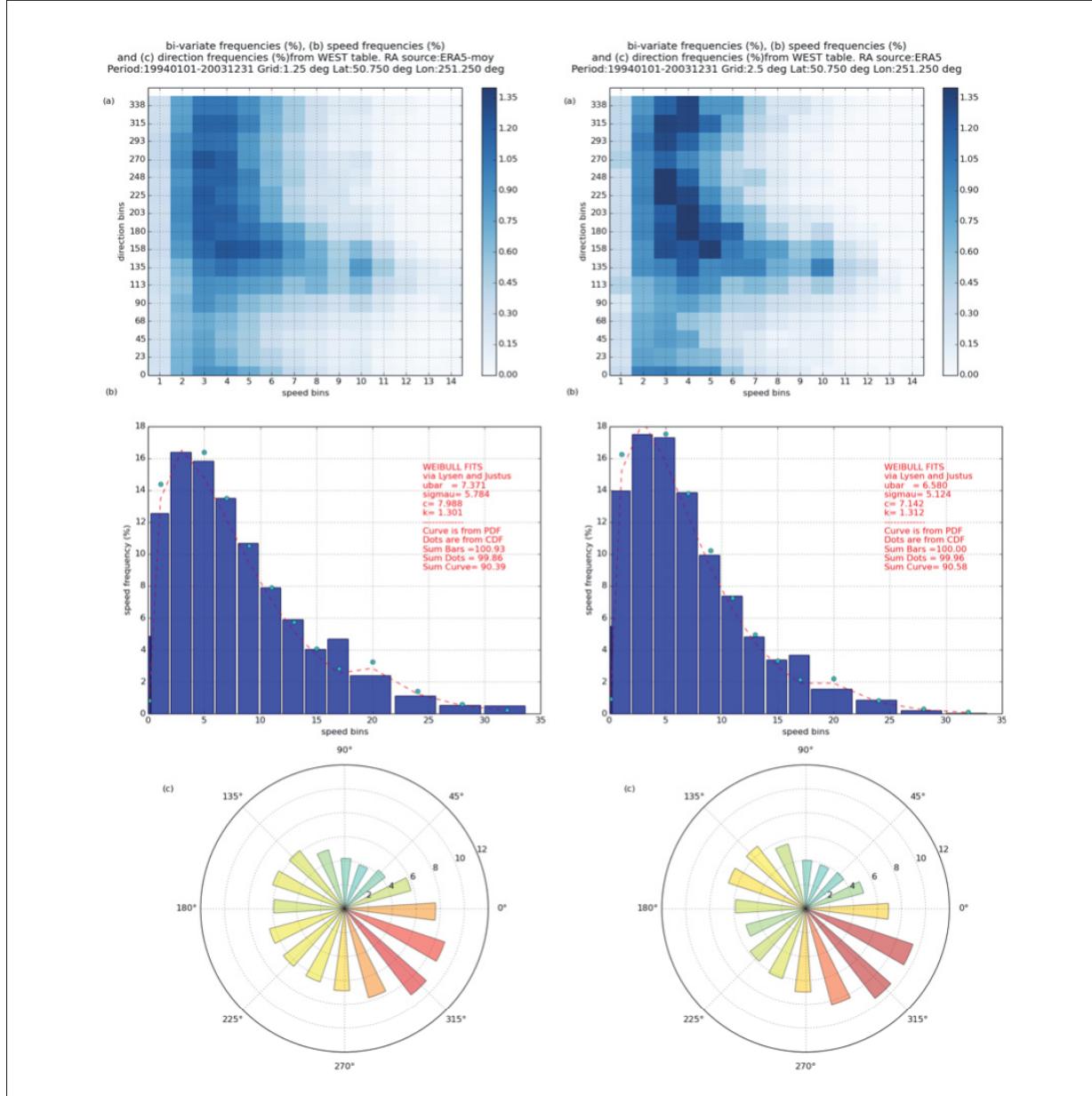


Figure 3.12 Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 moyennée avec 2×2 tables natives à $1,25^\circ$ sur la colonne de gauche et ERA5 à $2,5^\circ$ sur la colonne de droite. La période est de 19940101 à 20031231 et la coordonnée géographique est $50,75^\circ\text{N}$ et $251,25^\circ\text{O}$

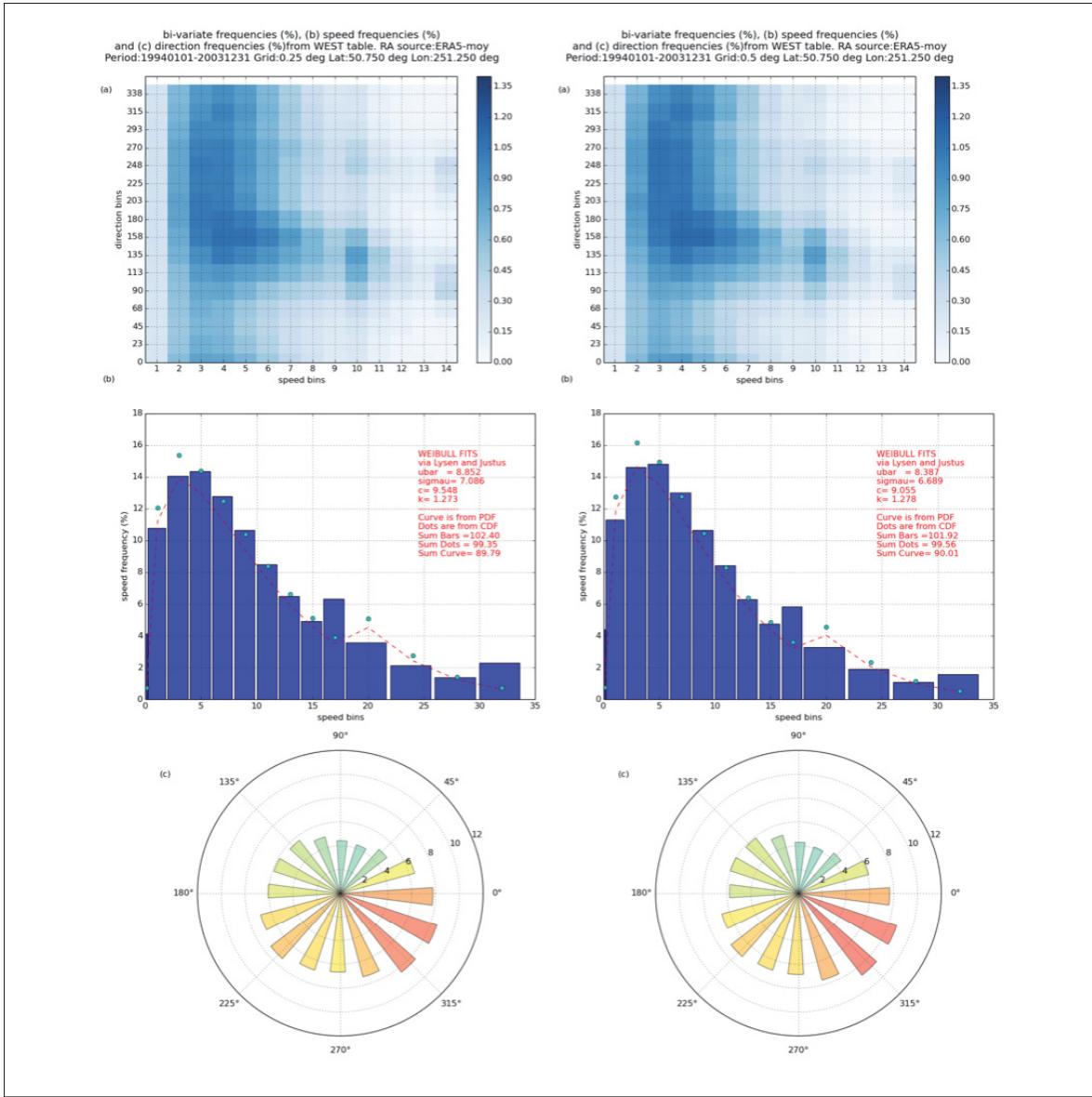


Figure 3.13 Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 moyennée à $0,25^\circ$ sur la colonne de gauche et à $0,5^\circ$ sur la colonne de droite. La période est de 19940101 à 20031231 et la coordonnée géographique est $50,75^\circ\text{N}$ et $251,25^\circ\text{O}$

montre la table ERA5 $2,5^\circ$ native comparativement à la table moyennée de 2×2 tables natives à $1,25^\circ$ et la figure 3.13 présente une table moyennée de 5×5 tables natives à $0,5^\circ$ et une de 10×10 tables natives à $0,25^\circ$.

UGHR donne les intervalles de direction les plus importantes se situant entre 158° et 248° avec un autre sommet entre 315° et 338° pour des vitesses de vents entre 4 et 8 ms^{-1} pour les 4 tables. De plus, on peut observer un maximum relatif à 135° entre 18 et 22 ms^{-1} . Plus la résolution est élevée, UGH est plus faible pour les basses vitesses et plus forte pour les vitesses plus élevées comparativement à ERA5 $2,5^\circ$ des Prairies. UGR est prédominant dans la direction sud-ouest. Bref, c'est le même phénomène qu'on observe que dans le cas de la Gaspésie. Ici, les tables natives n'ont pas été montrées. Toutefois, on remarque un signal récurrent de vent fort trop fréquent même dans un domaine où la topographique est plus homogène. La variabilité spatiale semble être aussi grande dans les régions fortement complexes que dans les régions au relief plus réguliers.

3.6 Table fréquentielle ERA5 $0,25^\circ$ sur un autre point de grille en Gaspésie

Une tentative a été fait pour tenter de trouver une solution à l'anomalie liée à la variabilité accrue de la réanalyse ERA5 $0,25^\circ$ dans la région de la Gaspésie. Une exploration des tables à travers le domaine a été fait afin de soulever un point de grille où il a potentiellement une amélioration à une résolution plus élevée. La coordonnée choisie pour cet exemple est le point C de la figure 3.1, soit $48,250^\circ\text{N}$ et $294,25^\circ\text{O}$.

Sur la figure 3.14, une comparaison entre ERA5 $0,25^\circ$ et $2,5^\circ$ est présentée. Au premier constat, il est clair que la table à $0,25^\circ$ représente significativement mieux la table à $2,5^\circ$ que celle analysée à la figure 3.4, soit ERA5 $0,25$ au point B. UGHR montre un maximum dans l'intervalle de direction de 315° à 318° entre les vitesses 6 à 10 ms^{-1} en plus d'un maximum relatif situé à 180° entre 4 et 6 ms^{-1} . De plus, UGH est très similaire. Les vitesses plus élevées montent une fréquence plus grande mais de façon peu moins marquant. UGR est principalement du nord-ouest pour les 2 tables sauf une petite composante sud-sud-est pour ERA5 $0,25^\circ$. La moyenne du vent, l'écart-type et les paramètres de Weibull sont davantage similaire à la table à $2,5^\circ$. Ceci indique la forte variabilité entre les 100 tables figurant dans le domaine centré au point B. Certaines tables sont catastrophiques tandis que d'autre, celle au point C, présente une concordance significative. Enfin, une analyse avec le module statistique inclue dans WEST serait

pertinent afin de valider cette expérience. Il serait aussi intéressant de cartographier aisément une image géostrophique des paramètres principaux des tables tels que la moyenne, l'écart-type, le vecteur géostrophique pour la direction du vent afin de visualiser cette variabilité.

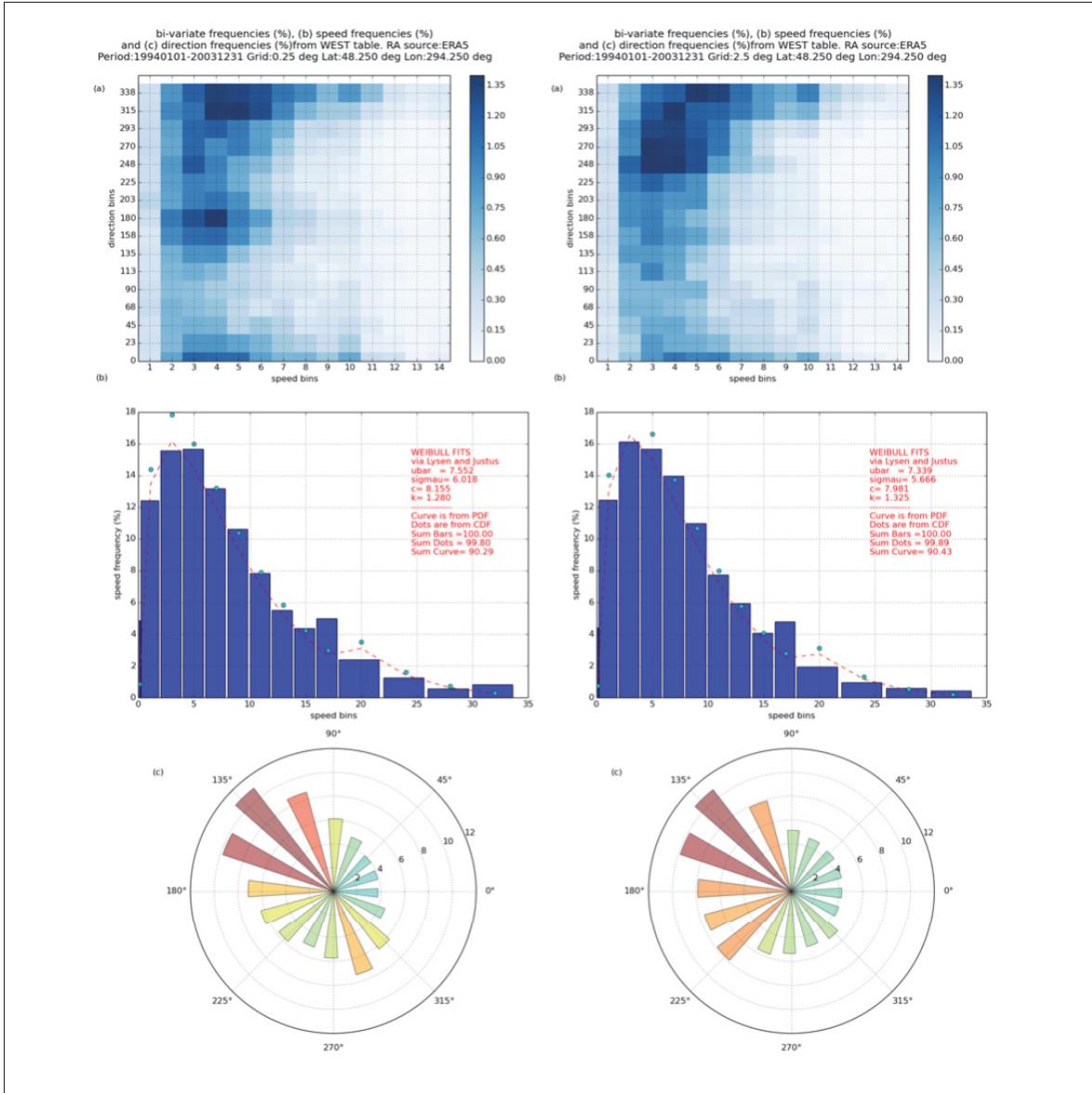


Figure 3.14 Comparaison entre la table fréquentielle ERA5 à $0,25^\circ$ sur la colonne de gauche et ERA5 à $2,5^\circ$ sur la colonne de droite. La période est de 19940101 à 20031231 et la coordonnée géographique est $48,250^\circ\text{N}$ et $294,25^\circ\text{O}$

3.7 Comparaison du paramètre de la moyenne du module de Vg à 1000 mb pour les réanalyses ERA5 0,25° et 2,5°

Au cours de cette recherche, plusieurs défis sont survenus lors de l'incorporation des données ERA5 0,25° dans WEST. Afin de bien cibler le problème de la mauvaise performance de ERA5 dans le modèle, des modifications de l'exécutable gz2vg.Abs qui génère le fichier standard classes_ANU.fst ont été effectuées. Sur tous les points des FST ERA5, des calculs ont été ajoutés pour obtenir les paramètres dont la moyenne du module de Vg (à 1000 mb) (VGM), l'écart-type du module de Vg (VGET), le coefficient k et c de Weibull (formule de Justus et Lysen) (VGK et VGC respectivement), la somme des fréquences de la classification (SFRQ), la latitude et longitude des points de la réanalyses (LAT et LON respectivement), la fréquence de chacun des 16 secteurs inclus dans UGR et la composante de l'histogramme directionnel de fréquence UU et VV, dont $|UU,VV|$ est égale à la fréquence du secteur et UU/VV est égale à la tangente de la direction du secteur.

La figure 3.15a montre VGM de la réanalyse ERA5 2,5° sur l'est du Canada et la figure 3.15b centré en Gaspésie. Le champ représente VGM et les lignes de côte sont en rose. La figure 3.16a montre VGM de la réanalyse ERA5 0,25° sur le Québec et les provinces de l'Atlantique dans le panneau du haut. Le rehaussement des couleurs est légèrement différente afin de mieux percevoir la variabilité sur les chaînes de montagne : 1 les monts Chic-Chocs en Gaspésie, 2 les monts Torngat dans le nord du Labrador, 3 les monts Long Range à Terre-Neuve, 4 l'île du Cap Breton dans le nord de la Nouvelle-Écosse, 5 la chaîne de montagne des Laurentides et 6 la chaîne de montagne des Appalaches. Le panneau du bas de la figure 3.16b montre VGM centré en Gaspésie avec les lignes orangées et le champ représente le relief montagneux (m). La figure 3.15 et 3.16 sont valides pour une moyenne sur un an de réanalyse en 1994 au niveau de la mer (1000 mb).

Tout d'abord, on remarque les fortes moyennes du VGM à 0,25° en comparaison avec celle à 2,5° qui est environ 2 fois moins importante ce qui peut se traduire par une bien plus faible variabilité de VGM à 2,5°. L'hypothèse qui en résulte est qu'il y a une réduction des pressions au niveau de la mer qui cause un problème dans le gradient de pression qui définit le vent géostrophique

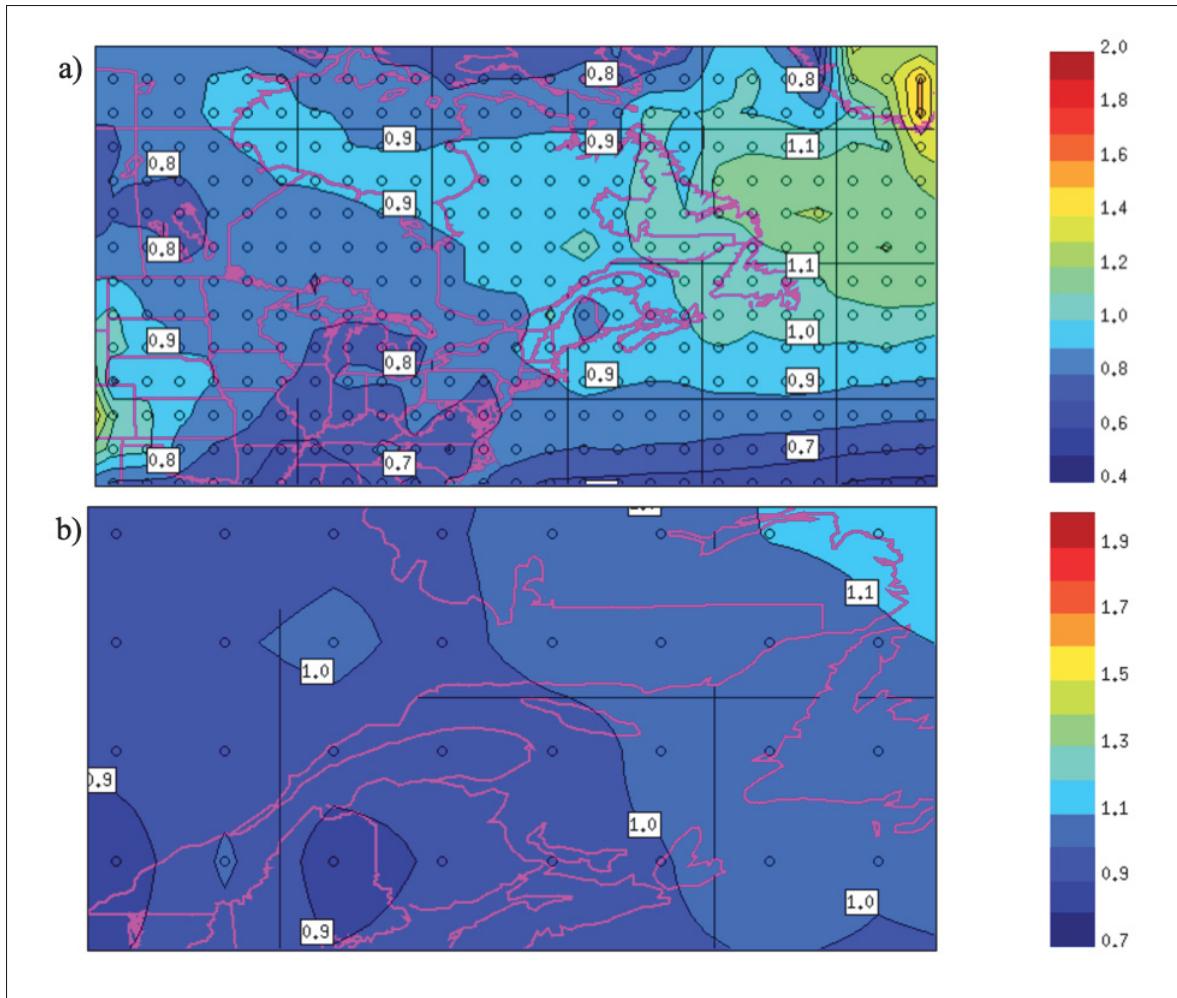


Figure 3.15 Le paramètre la moyenne du module de Vg (à 1000 mb) (VGM) de la réanalyse ERA5 2,5° a) sur l'est du Canada et b) centré en Gaspésie. Le champ représente VGM et les lignes de côte sont en rose. Les cercles noirs représentent les points grilles. Valide pour une moyenne sur un an de réanalyse, 1994 au niveau de la mer (1000 mb)

sous la montagne. Les fortes moyennes de Vg sur les tables fréquentielles sont calculées avec le gradient de pression isobarique. Par conséquent, elles sont fortement amplifiées par l'erreur sous les reliefs montagneux. Ce phénomène ne se perçoit pas avec les ERA5 2,5° puisque le relief est beaucoup trop faible par rapport à la taille de la grille. Ce type d'artefact est un processus connu en météorologie. Les niveaux de pression isobariques traversent les reliefs et cela a pour résultat de créer de la fausse atmosphère sous les montagnes. Mohr (2004) a décrit des problèmes liés au

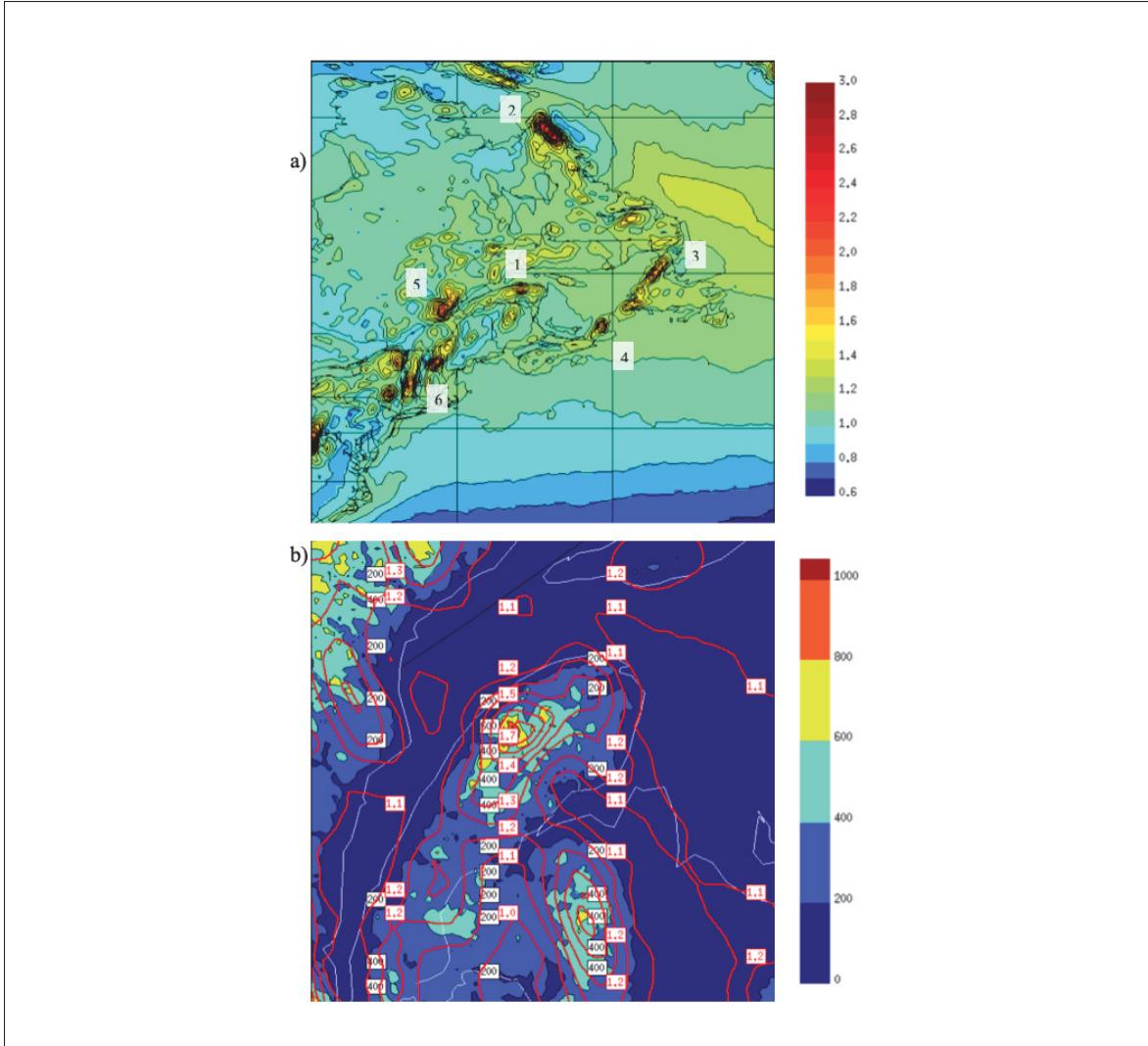


Figure 3.16 Le paramètre la moyenne du module de Vg (à 1000 mb) (VGM) de la réanalyse ERA5 0,25° a) sur l'est du Canada et b) centré en Gaspésie. Dans le panneau a), l'échelle de couleur est pour les valeurs de VGM/10. donc $1=10 \text{ ms}^{-1}$. Valide pour une moyenne d'un an de réanalyse, en 1994, au niveau 1000 mb pour VGM et la topographie par rapport à mer ($z=0$)

champ de pression moyen au niveau de la mer dans l'ouest des États-Unis. Des simulations de modèles à méso-échelle ont été effectuées en utilisant les réanalyses NCEP comme conditions de base. Les vents calculés par le modèle ont été comparés aux vents mesurés dans la vallée inférieure du fleuve Colorado. Les résultats montrent que dans les 1000 premiers mètres, les vents du modèle dans la vallée représentaient beaucoup mieux les vents observés lorsque les

champs GZ d'entrée étaient recalculés hydrostatiquement en dessous de 850 hPa avant de les utiliser comme conditions de base dans le modèle à méso-échelle. Par conséquent, il aurait été plus judicieux d'utiliser les niveaux sigma de ERA5 au lieu des niveaux de pression pour l'incorporation des réanalyses ERA5 0,25° dans WEST. Les niveaux sigma sont parallèles au relief et n'intersectent pas ce dernier et ne causent pas d'atmosphère fictive. Dans le cas de ERA5, comme dans le IFS sous-jacent, cette coordonnée parallèle au terrain est plutôt nommée ETA. Le site rda.ucar.edu (https://rda.ucar.edu/datasets/ds627.0/docs/Eta_coordinate/index.html#sec2) contient des informations et un exemple sur le sujet. Danard et al. (1993) démontrent qu'en imposant une variation linéaire de la température avec le logarithme de la pression et en appliquant la force du gradient de pression horizontale, cela a pour conséquence de réduire l'erreur de troncature dans les modèles atmosphériques en utilisant un système en coordonnées sigma.

D'autre part, la figure 3.17a montre un champ des VGM de ERA5 0,25° et 2,5° superposés dans la région des Prairies canadiennes valide pour une moyenne sur un an le 1994 au niveau de la mer (1000 mb). Les cercles noirs représentent les points de grille de ERA5 0,25° et les cercles rouges ERA5 2,5°. Dans la figure 3.17b, ce champ est superposé sur le relief montagneux de la région représenté par les lignes noires (m). La colline est Cypress Hills située dans le sud-ouest de la Saskatchewan et le sud-est de l'Alberta. Le domaine utilisé afin de comparer les réanalyses ERA5 0,25° sur une région montagneuse (la péninsule gaspésienne) et une région dont le relief est plus homogène (les Prairies canadiennes) s'est avéré biaisé par des collines. Une région montagneuse située dans le sud-ouest de la Saskatchewan et le sud-est de l'Alberta, nommée Cypress Hills, fait partie du domaine. Ceci explique la mauvaise performance de ERA5 0,25° dans cette région. Or, l'alignement du maximum de VGM de ERA5 0,25° et Cypress Hills est très significatif. Donc, cela confirme que l'anomalie des Vg trop forts est due au gradient erroné du GZ sous la montagne. De plus, les plaines des Prairies sont à une altitude d'environ 600 à 700 m. Le problème réside sur les dénivélés dans le domaine qui sont de l'ordre de 500 m. Bref, on constate l'impact de la topographie dans les bas niveaux du domaine. Il est notamment pertinent de vérifier sur les autres niveaux verticaux.

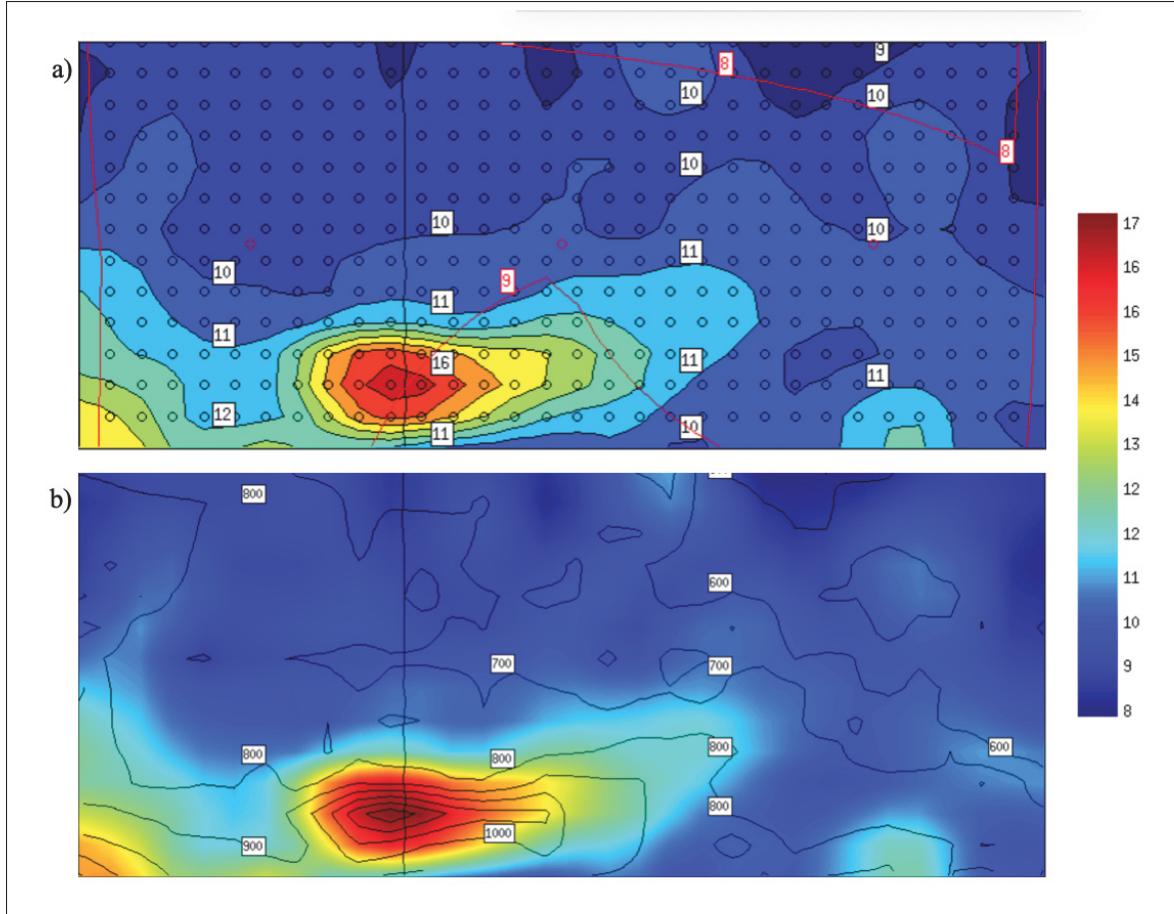


Figure 3.17 VGM de ERA5 0,25° en noir et 2,5° en rouge superposés dans la région des Prairies canadiennes valide pour une moyenne sur un an le 1994 au niveau de la mer (1000 mb). L'échelle de couleur est VGM en ms^{-1}

La vérification est ensuite faite sur les 4 niveaux verticaux inclus dans les statistiques FST des tables, soit à 0, 1500, 3000 et 5500 m. Le but est d'évaluer le comportement de Vg sur le relief dans les niveaux supérieurs. La figure 3.18a montre VGM de ERA5 0,25° dans l'est du Canada sur les 2 premiers niveaux verticaux à 0 et 1500 m. La figure 3.18b est une fenêtre centrée en Gaspésie. Les lignes de contours rouges et noires sont les VGM à 0 et 1500 m respectivement. Les lignes blanches représentent la géographie. Sur la figure 3.18a, la flèche allant de la baie d'Ungava jusqu'au sud de la Nouvelle-Écosse représente une coupe verticale illustrée à la figure 3.19. On remarque que le maximum de Vg sur les Chic-Chocs disparaît lorsque l'on monte de niveau isobarique 1500 m par-dessus le sommet des montagnes. La figure 3.19 montre la

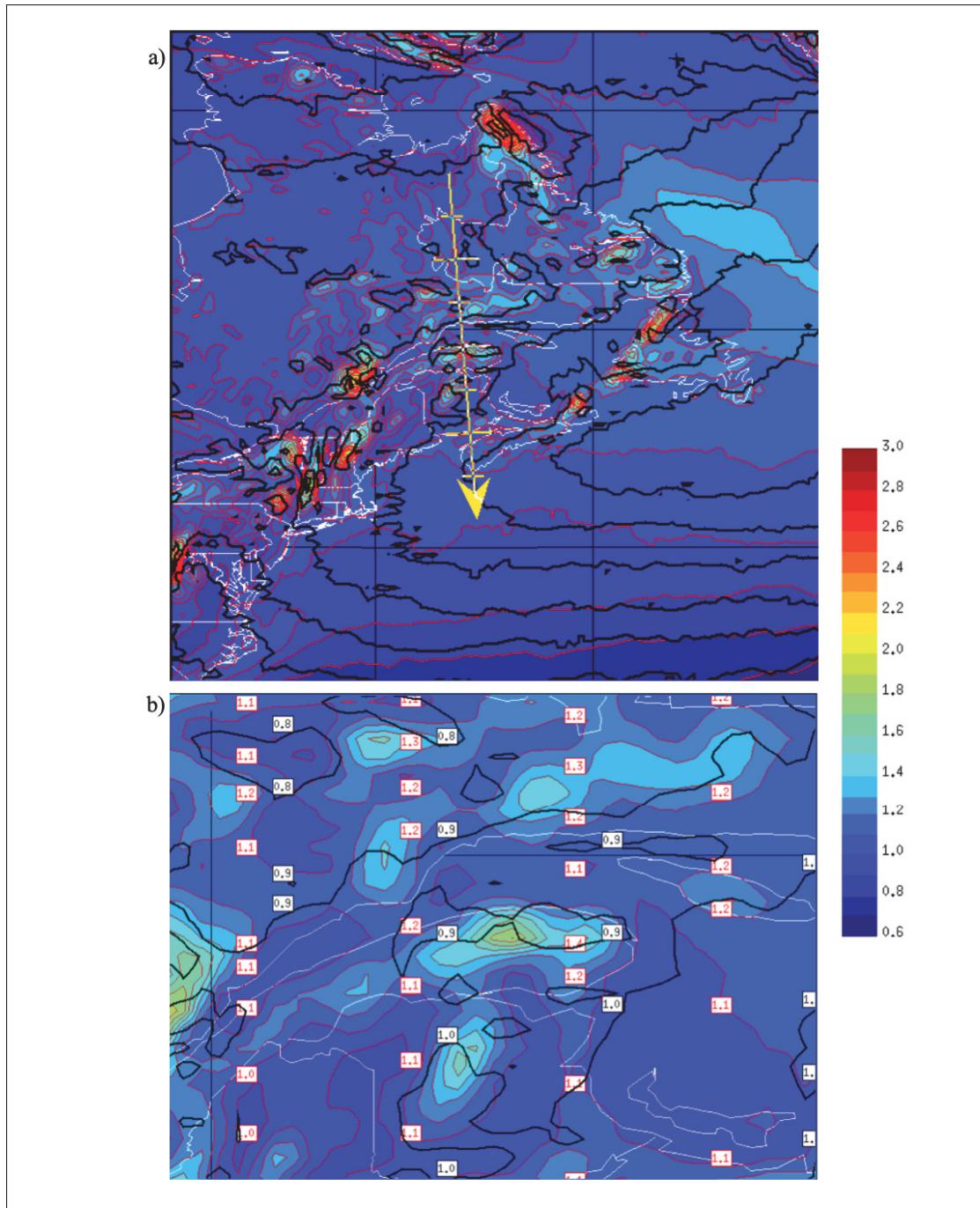


Figure 3.18 VGM de ERA5 0,25° dans a) l'est du Canada sur les niveaux verticaux 0 et 1500 m. Les lignes rouges et noires sont les VGM à 0 et 1500 m respectivement. Les lignes blanches représentent la géographie. En b), VGM centrée en Gaspésie. La flèche dans le panneau a) représente une coupe verticale illustrée à la figure 3.19

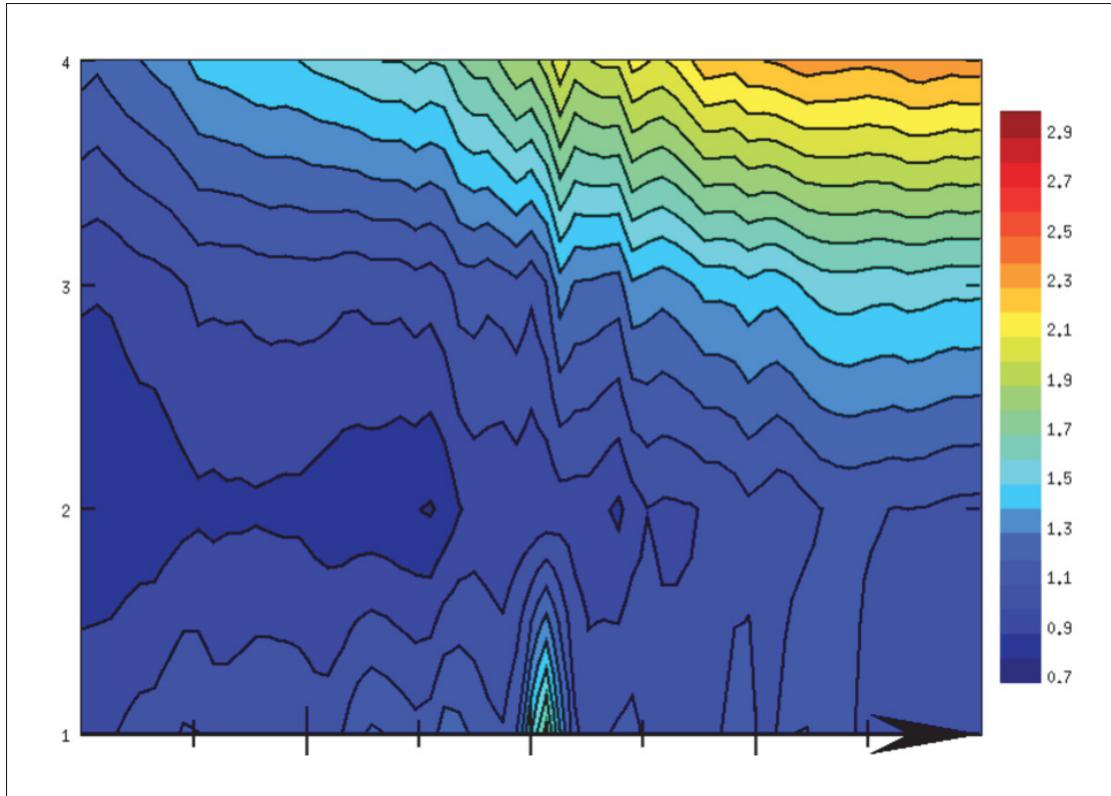


Figure 3.19 Coupe verticale des 4 niveaux de 0 à 5500 m de VGM. La coupe verticale est représentée par une flèche illustrée sur la figure 3.18

coupe verticale des 4 niveau de 0 à 5500 m. On constate à nouveau le maximum en Gaspésie au centre de l'image. On remarque aussi le maximum de V_g , représentant le courant-jet, dans le coin supérieur droit, dans le sud de la région. Ce nouveau constat permet de définir l'anomalie rencontrée tout au long de cette recherche. Le gradient de pression au niveau de la mer reflète trop la topographie puisque les valeurs de GZ fournis par ERA5 de C3S en valeur isobarique utilisent une extrapolation vers le niveau moyen de la mer qui dépend significativement de la hauteur du relief via la relation hydrostatique. Par conséquent, en utilisant cette relation, il est possible d'exprimer la forme intégrale comme :

$$\frac{dGZ}{d\ln(p)} = \frac{-g}{RT} \quad (3.1)$$

où la constante des gaz parfaits $R=8,31 \text{ J kg}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ et T est la température. La forme intégrale pour le cas isotherme prend la forme suivante :

$$p(z) = p_{sfc} \exp^{-(g(z-z_{sfc})/RT)} \quad (3.2)$$

$$p(0) = p_{sfc} \exp^{(g*z_{sfc}/RT)} \quad (3.3)$$

où p_{sfc} et z_{sfc} représentent la pression et la hauteur à la surface respectivement. Toute la partie où $p > p_{sfc}$ représente la fiction et dépend d'une fonction exponentielle du relief (z_{sfc}). Alors, cela signifie qu'il y a une grande empreinte du relief dans $Vg = \text{grad}(p(0))$. Il serait donc plus cohérent d'utiliser un $\text{grad}(p)$ pour $z = z_{sfc}$.

Afin de palier au problème de vent géostrophique sous la montagne, une solution est possible en utilisant les niveaux du modèle (ETA). Cela se fait en changeant de base de données de ERA5 "reanalysis-era5-pressure-levels" par "reanalysis-era5-complete" directement au CDS. La figure 3.20 montre 2 images annuelles de 1994. Dans le panneau du haut, le champ représente VGM sur un niveau ETA à 490 m. Dans le panneau du bas, le champ VGM est représenté sur le niveau de pression isobarique à 1000 mb. Les deux panneaux ont les mêmes contours de topographie. On remarque bien que les régions montagneuses sur les niveaux de pression isobarique représentées par un maximum de VGM hors de l'échelle illustré en blanc. En comparaison avec le panneau du haut, on remarque qu'il y a une amélioration avec l'utilisation des niveaux ETA. Le champ VGM du niveau ETA épouse le relief dans les régions à topographie complexe tandis que le champ VGM aux niveaux de pression isobarique présente une faiblesse en créant une atmosphère non-physique sous le relief montagneux. Pour démontrer l'avantage des données en ETA comparativement aux données isobariques pour le climat géostrophique ($Vg \text{ grad } p$), il est important d'évaluer la distribution spatiale des histogrammes du module $|Vg|$ et de rose des vents Vg . Ces distributions permettent de mettre en évidence les directions erronées et les vitesses surestimées de ERA5 à $0,25^\circ$. La figure 3.21 et 3.22 montrent la distribution

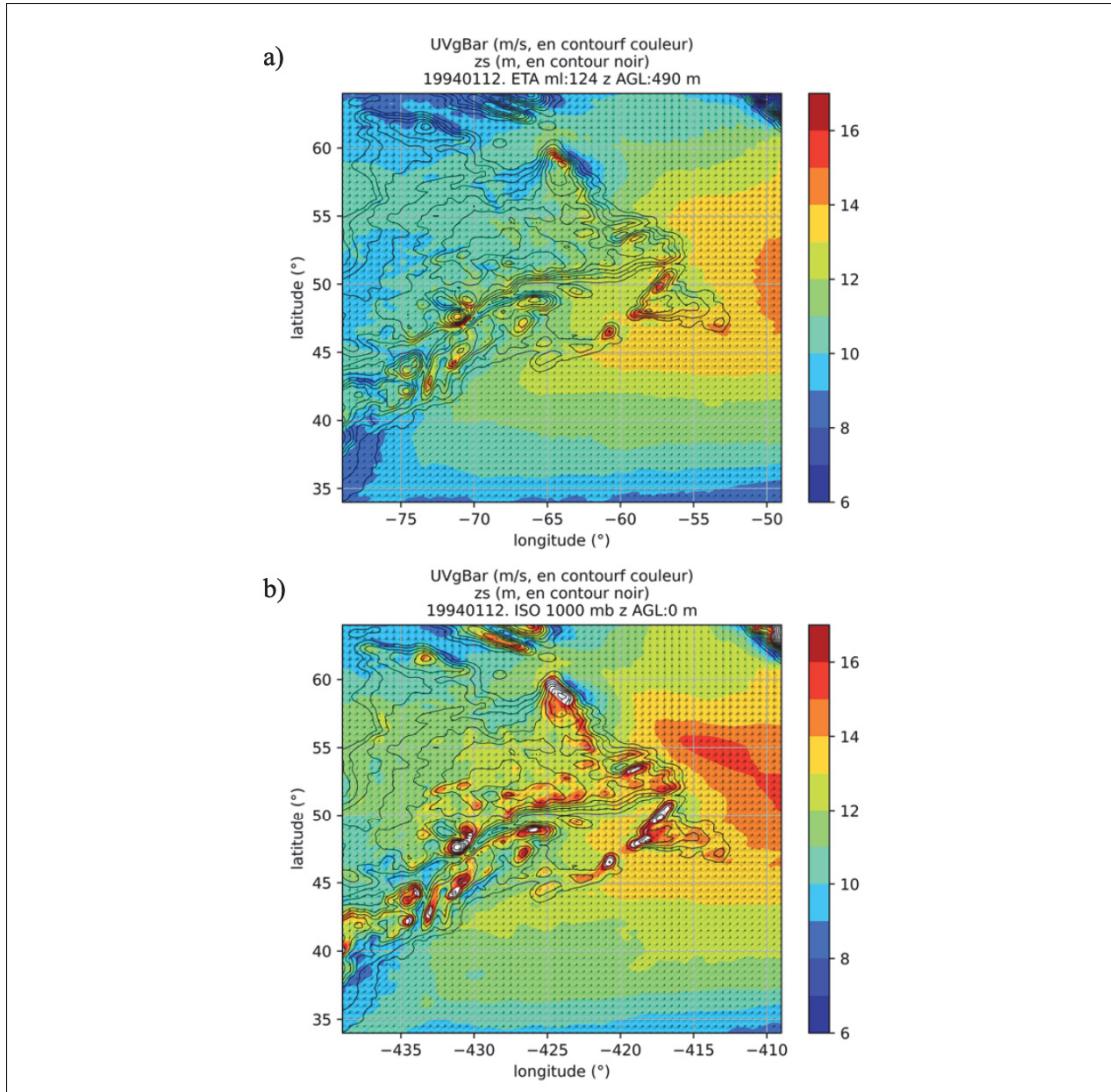


Figure 3.20 VGM en coordonnées a) ETA à 490 m et b) isobariques à 1000 mb dans l'est du Canada

spatiale des histogrammes et rose des vents respectivement pour ERA5 0,25°. Dans les deux figures, le panneau supérieur est la sortie en coordonnées ETA et le panneau inférieur est en coordonnées isobariques. À noter que les figures sont aux 2 points de grille, soit aux 0,5°. Les champs représentent VGM. La ligne rouge sur les histogrammes marque chaque 10 m/s sur l'axe des x. D'une part, dans la figure 3.21, on remarque la différence dans la distribution de la vitesse du vent sur les monts Chic-Chocs entre les données en coordonnées ETA et isobariques. On observe une fréquence d'occurrence plus forte pour les vitesses élevées et plus fait pour

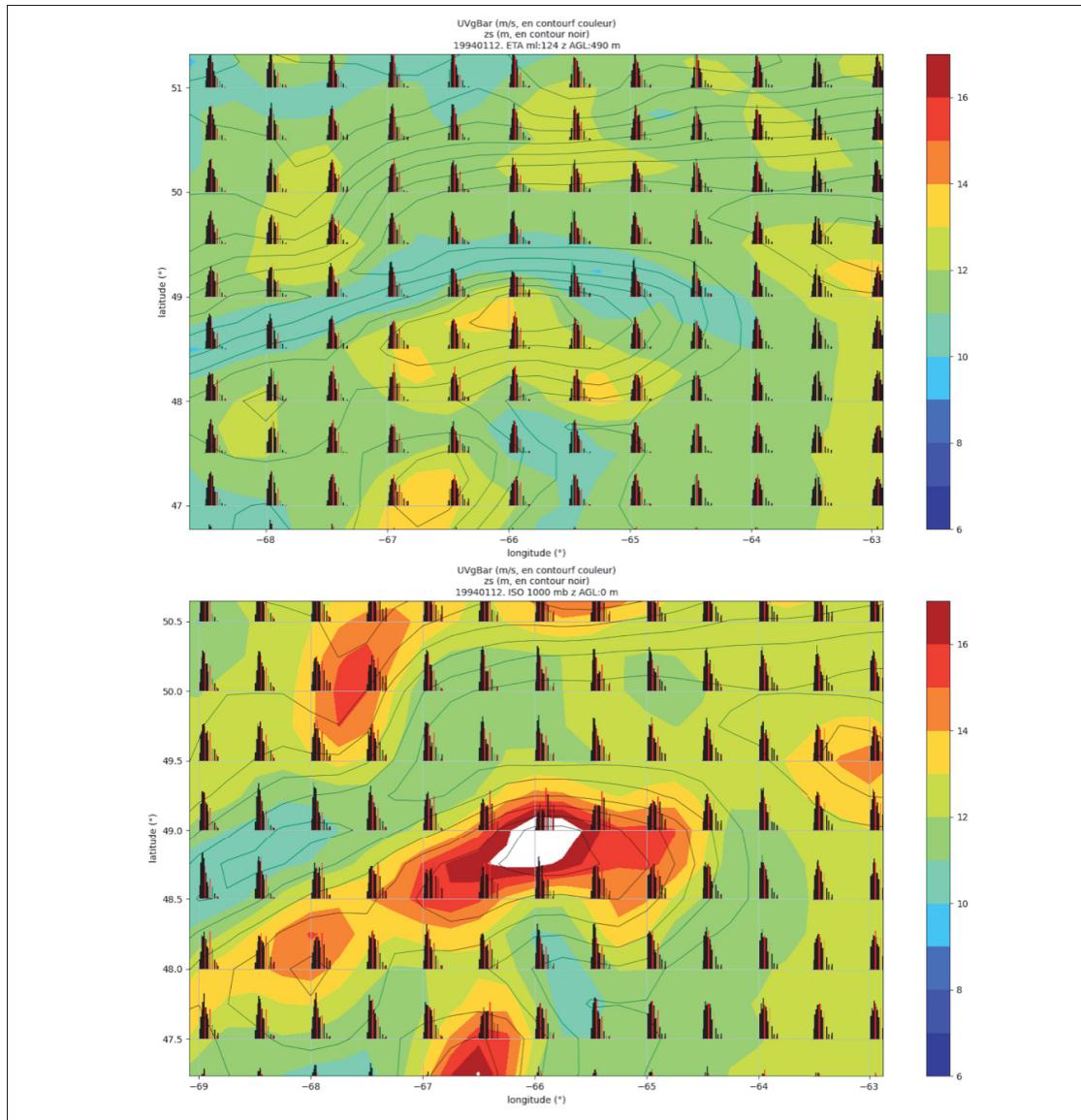


Figure 3.21 Distribution spatiale des histogrammes en coordonnées a) ETA à 490 m et b) isobariques à 1000 mb dans l'est du Canada

les basses vitesses pour VGM en coordonnées isobariques tandis que la distribution représente mieux la réalité en coordonnées ETA. Ceci est en accord avec les résultats de la section 3.3. Dans l'ensemble du domaine, les histogrammes en coordonnées ETA représentent mieux la réalité de façon significative.

D'autre part, on remarque dans la figure 3.22 que pour les roses des vents en ETA, il est plus difficile d'observer une amélioration marquée. Par contre, les roses des vents en ETA sont plus réalistes en ce qui concerne le maintien des fortes fréquences du secteur sud-ouest comparativement aux données isobariques, plus particulièrement dans le golfe du St-Laurent.

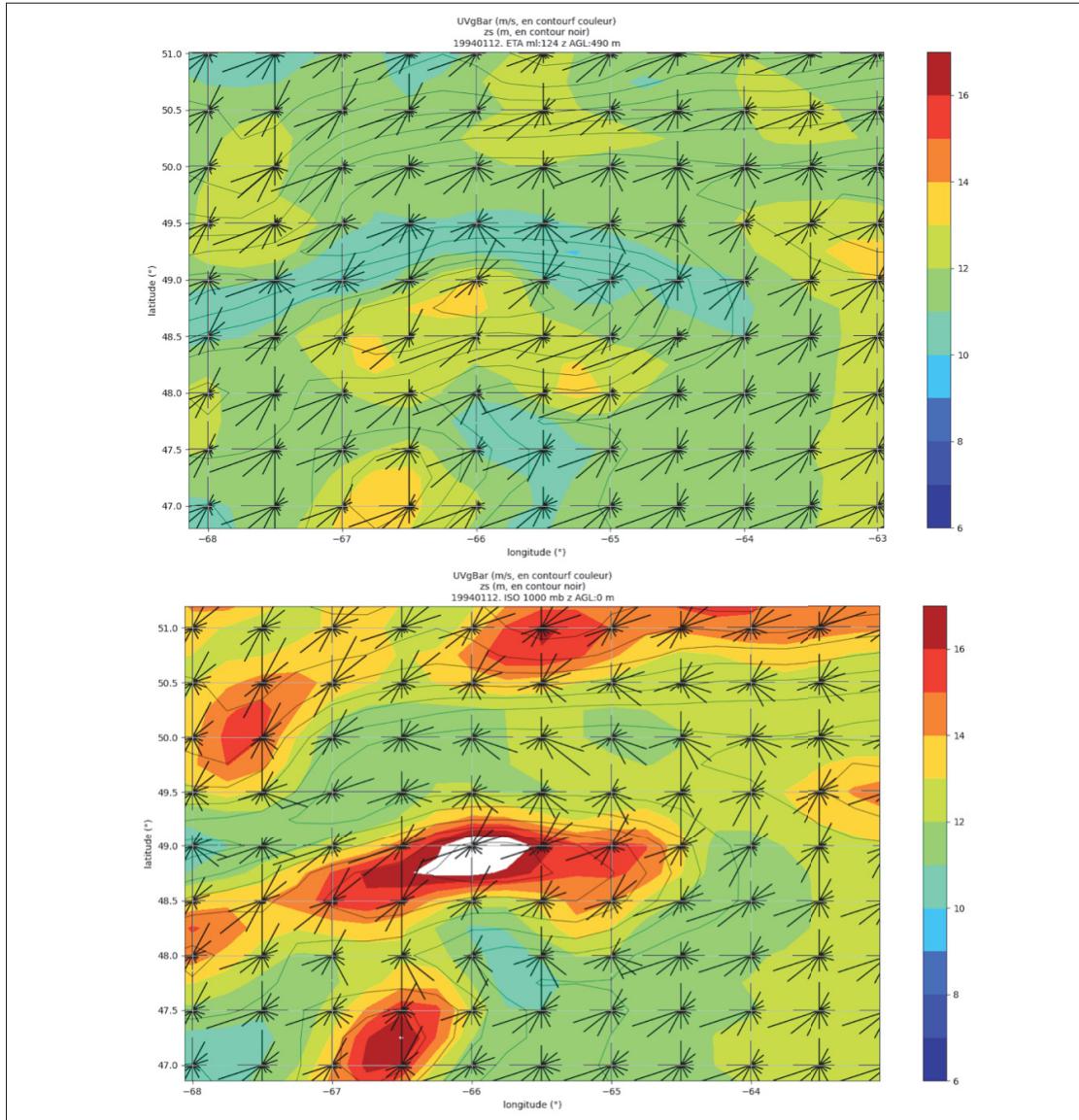


Figure 3.22 Distribution spatiale des roses des vents en coordonnées a) ETA à 490 m et b) isobariques à 1000 mb dans l'est du Canada

3.8 Résumé des résultats

Tout d'abord, une comparaison du champ de la hauteur géopotentielle des réanalyses NCEP et ERA5 a été effectuée et il en résulte que différence entre les champs GZ des diverses réanalyses sont très faibles entre elles. Toutefois, c'est le gradient de GZ qui est déterminant.

Ensuite, une évaluation des réanalyses NCEP et ERA5 a été réalisée. On remarque que l'impact de l'incorporation des données de réanalyse à résolution plus élevée dans le modèle WEST a causé un dénouement inattendu. Les premiers résultats obtenus en comparant les divers réanalyses démontrent que ERA5 0,25° ne performe pas adéquatement comparativement à ERA5 et NCEP à 2,5°. Les statistiques issues de WESTATS montrent l'écart marqué des réanalyses ERA5 à 0,25°. Une hypothèse est émise énonçant que la mauvaise performance à méso-échelle des réanalyses à 0,25° s'explique par un forçage climatique du vent géostrophique trop local. Cette anomalie persiste à 0,5° tandis qu'elle n'est pas présente à 1,25°.

Un outil de moyennage de tables mis en oeuvre durant cette recherche a été mis à l'épreuve. De nouvelles tables ont été construites avec l'ensemble des tables contenues dans le domaine à partir des tables natives à 0,25°, 0,5° et 1,25° afin de reconstruire la table à 2,5°. Une comparaison entre les tables fréquentielles des réanalyses ERA5 moyennées a été faite pour la région de la Gaspésie et dans les Prairies canadiennes. Il en résulte que les tables moyennées à plus haute résolution ressemblent davantage à la table native à 2,5 comparativement aux tables originales à la même résolution. Cette expérience donne le même résultats dans les Prairies canadiennes.

Enfin, la variabilité spatiale importante des réanalyses à 0,25° dans le domaine en Gaspésie a été évaluée. Certaines tables semblent correspondre beaucoup plus aux données d'observation que d'autre. Afin d'avoir une meilleure représentativité avec ERA5 0,25°, il est conseillé de faire un choix plus judicieux du centroïde de la table au lieu de sélectionner simplement celle au centre géométrique du domaine à méso-échelle. Il faut prendre en considération l'artefact de la réduction de la pression géopotentielle. Le chapitre suivant porte sur une analyse plus détaillée et la discussion des résultats.

CHAPITRE 4

ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

À la suite des résultats, une analyse plus approfondie et une discussion des résultats est réalisée dans cette section. Premièrement, une analyse de l'intégration des données ERA5 dans WEST est faite de manière plus concise. Cette section discute aussi de l'impact de la réanalyse à $0,25^\circ$ dans le modèle. Deuxièmement, le moment où la résolution commence à subir un déséquilibre est analysé. Troisièmement, une discussion est faite sur le nouvel outil de moyennage et l'impact de cet outil sur les réanalyses à haute résolution. Quatrièmement, une exploration des tables à $0,25^\circ$ dans le domaine en Gaspésie est faite et discutée. Cinquièmement, l'évaluation du VGM pour ERA5 à $0,25^\circ$ et $2,5^\circ$ est évoquée.

4.1 Impact de l'intégration de ERA5 dans WEST

En comparant les tables des réanalyses ERA5 et NCEP à $2,5^\circ$ sur une période de 10 ans, il en résulte que ERA5 donne des vents moyens et un écart-type plus faible que NCEP. La fréquence bivariée donne un signal plus significatif pour les vitesses de vent de 4 à 8 ms^{-1} dans la direction 203° à 293° pour ERA5. On remarque aussi des fréquences de vitesse du vent plus grande pour les basses vitesses et plus faible pour les vitesses plus élevées avec les réanalyses ERA5 par rapport à NCEP. Pour les deux réanalyses, la direction est principalement du nord-ouest. On constate les mêmes conclusions pour une période de 25 ans. Suite aux simulations MC2, le module WEStats indique que par rapport aux données d'anémométrie, l'erreur moyenne, le RMSD et le coefficient de corrélation sont presque identiques pour une période de 10 et 25 ans pour les deux réanalyses mais un RMSD légèrement meilleur pour ERA5 sur une période de 25 ans. Pour le domaine en Gaspésie au point de grille $48,75^\circ\text{N}$ et $296,25^\circ\text{O}$, les réanalyses ERA5 $2,5^\circ$ sur une période de 25 ans donnent un résultat similaire mais à peine meilleur, presque négligeable. Cette solution est plutôt cohérente avec les suppositions que ERA5 native dégradée à $2,5^\circ$ offre une performance similaire à NCEP. Cette analyse permet de valider que les scripts

du schéma de classification répondent convenablement à l'intégration d'une nouvelle source de réanalyse et qu'il est désormais pertinent d'évaluer le rendement des réanalyses ERA5 à 0,25°.

L'analyse des résultats entre les réanalyses ERA5 à 0,25° et 2,5° sont maintenant discutés. Pour une période de 10 ans et en Gaspésie aux coordonnées 48,75°N et 293,75°O, les réanalyses montrent une discordance significative. ERA5 0,25° présente des vents dominants entre 18 et >34 ms⁻¹ dans les directions généralement du nord et du sud-sud-ouest tandis que ERA5 2,5° présente des vents principalement d'ouest entre 4 et 8 ms⁻¹ comme discuté dans le paragraphe précédent. Ces résultats sont très similaires à ceux que l'on retrouve avec les réanalyses sur une période de 25 ans. Il est intéressant de remarquer l'occurrence hautement significative des vents forts de 18 à 34 ms⁻¹ sur la table de ERA5 0,25°. Ce phénomène indique la présence d'un forçage climatique local particulièrement important. Par conséquent, cela donne une vitesse moyenne de 12,12 ms⁻¹ comparativement à 7,23 ms⁻¹ pour ERA5 2,5° représentant une différence majeure d'environ 4,7 ms⁻¹. De plus, l'écart-type montre une différence considérable pour ERA5 0,25° d'environ 2,6 ms⁻¹. D'autre part, le module WEStats montre une erreur moyenne et un RMSD largement plus grand et un coefficient de corrélation plus faible pour ERA5 0,25° par rapport à ERA5 2,5°, en comparaison avec les observations du MRNQ. Bref, ERA5 0,25° semble sous-estimer l'occurrence des vents faibles et sur-estimer les vents forts par rapport à les réanalyses à 2,5°. Ces résultats sont consistants avec les recherches antérieures de Belmonte et Stoffelen (2019) et de Jourdier (2020) qui démontrent que ERA5 présente des motifs d'erreurs significatifs dues à une forte variabilité sur les vents moyens et une sous-estimation de la vitesse des vents. Belmonte et Stoffelen (2019) ont comparés les champs de vent près de la surface à partir des réanalyses ERA5 avec les observations ASCAT. Ils ont constaté que ERA5 montrent des lacunes significatives en ce qui concerne l'énergie cinétique du vent en termes de composantes zonale et méridionale, la moyenne, le tourbillon, la divergence de vent ce qui a des impacts sur le mouvement vertical atmosphérique se traduisant par un affaiblissement du vent et une déficience sur la flottabilité. Jourdier (2020) s'est plutôt intéressé à la simulation de la production d'énergie éolienne. Il a constaté un problème de ERA5 qui sous-estime les vitesses du vent, ce qui conduit à une sous-estimation majeure de la production d'énergie éolienne, en particulier dans les zones à

topographie complexe comparativement à cette étude où c'est plutôt l'inverse que se produit, un trop fort vent géostrophique V_g sur le relief. Cette analyse permet de valider l'hypothèse que le couplage WEST et ERA5 provoque une anomalie produisant une mauvaise performance à méso-échelle à $0,25^\circ$ qui est due à un forçage climatique du vent géostrophique plus local ce qui rend difficilement applicable une base de données de réanalyse à $0,25^\circ$ dans le modèle WEST à moins de prendre en compte plusieurs tables dans l'initialisation EOLE du MC2 de WEST. Par conséquent, il est défavorable l'application de ERA5 $0,25^\circ$ directement dans WEST pour la cartographie du vent et du potentiel éolien à méso et micro-échelle sans apporter des corrections au schéma de classification ou de l'initialisation.

4.2 La variabilité entre $0,5^\circ$ et $1,25^\circ$

Suite aux résultats inattendus nouvellement mis en évidence, il est approprié de comprendre l'origine de cette anomalie. Une analyse de la performance aux résolutions à $0,5^\circ$ et $1,25^\circ$ pour une période de 10 ans au même point de grille a été fait pour voir s'il est possible de définir à quelle résolution le signal d'une mauvaise performance du modèle à méso-échelle se produit. Tout d'abord, les résultats de ERA5 $0,5^\circ$ montre des résultats très similaire avec les réanalyses à $0,25^\circ$. La fréquence bivariée entre la vitesse et la direction vent présente les mêmes empreintes, soit des vents généralement entre 18 et $>34 \text{ ms}^{-1}$ dans les directions nord et du sud-sud-ouest. La différence entre les vents moyens de ERA5 $0,5^\circ$ et $0,25^\circ$ est d'environ 1 ms^{-1} et un peu plus de $0,5 \text{ ms}^{-1}$ pour l'écart-type. Par analogie, la table issue des réanalyses ERA5 $1,25^\circ$ montre beaucoup plus de similarité avec celle à $2,5^\circ$, soit des vents principalement d'ouest entre 4 et 8 ms^{-1} . De plus, la différence entre les vents moyens et les écart-types de ERA5 $1,25^\circ$ et $2,5^\circ$ sont d'environ 1 ms^{-1} et un peu moins de $0,5 \text{ ms}^{-1}$ respectivement. Selon ces résultats, il est possible d'en déduire qu'il y a un forçage climatique du vent géostrophique qui produit une mauvaise performance à $0,5^\circ$ mais pas à $1,25^\circ$. Une analyse statistique et géostrophique plus approfondie des tables géostrophiques sont nécessaires pour appuyer cette hypothèse. Cependant, compte tenu que la similitude entre ERA5 $0,5^\circ$ et $0,25^\circ$, de même pour ERA5 $1,25^\circ$ et $2,5^\circ$ soit en grande partie équivalente, il est possible de déduire que cette anomalie se manifeste entre

0,5° et 1,25° de résolution. Bien que rien de tel a été effectué dans la littérature puisque c'est seulement WEST qui fait des tables fréquentielles de Vg, cette technique aide à identifier une partie du problème. La taille typique des zones montagneuses peut définir à quelle résolution ERA5 commence à représenter des caractéristiques divergentes de la réalité. Ce sujet est traité à la section 4.5.

4.3 Expérimentation de l'outil de moyennage de tables dans la région de la Gaspésie et des Prairies canadiennes

Afin de palier au problème récemment défini, une technique a été développée dans le but de reconstruire une table avec une résolution de 2,5° à partir d'une série de table ERA5 0,25° native. L'hypothèse est que cette nouvelle table moyennée devrait être équivalente à la table ERA5 2,5° pour le même point et cela aurait comme avantage de mieux représenter la climatologie du vent géostrophique du domaine. Alors, une grille 10 x 10 donnant 100 tables centrées sur le domaine en Gaspésie aux coordonnées 48,75°N et 293,75°O ont été moyennées et ensuite analysées. Il en ressort que la nouvelle table moyennée donne un résultat plus représentatif dans l'ensemble. On remarque quand même une distribution de la vitesse du vent moins prononcée qui se traduit par des vents forts plus fréquents et vice versa. Ceci est cohérent avec la distribution de la fréquence du vent de la table 0,25° originale (figure 3.6 et 3.7) qui affecte la moyenne de façon nuisible. Ensuite, on constate que dans la nouvelle table, les directions des vents sont généralement du nord-ouest contrairement au vent anormal principalement du nord et du sud-sud-est pour ERA5 0,25°. Cette technique a démontré qu'en moyennant les tables à fine résolution pour ne faire des tables plus grandes, celles-ci se ressemblent davantage. Par contre, il est possible d'affirmer que l'hypothèse que le problème soit présent dans la procédure de moyenne fait par C3S s'avère fausse. Le C3S fournit des produits isobariques qui sont bien moyennés lorsque fait la requête pour une réanalyse à plus faible résolution. C'est plutôt WEST qui est induit en erreur lorsqu'on lui fournit des GZ à 0,25° puisqu'il prend le gradient pour obtenir Vg. Enfin, ces démarches ont aussi été effectuées sur un autre domaine. Les Prairies canadiennes ont été choisies pour faire une validation supplémentaire de cette méthode. Toutefois, la région dans les Prairies canadiennes comprennent une régions montagneuses près de la frontière de la Saskatchewan. Les résultats

ont menés à des conclusions équivalentes en termes de représentativités des distributions de la fréquence de la vitesse et directions du vent.

4.4 Exploration des tables ERA5 0,25° dans le domaine en Gaspésie

Lors des investigations dans but d'identifier le problème de forte variabilité de ERA5, une exploration de toutes les tables à 0,25° du domaine a été faite. Parmi l'entièreté des tables analysées, plusieurs d'entre elles sont intéressantes dont une aux coordonnées 48,250°N et 294,25°O. Ce point est situé dans la région de la Baie-des-Chaleurs en Gaspésie, loin des du relief montagneux. Cette dernière est une table native qui présente des statistiques similaires entre les résolutions 0,25°, 0,5°, 1,25° et 2,5° en termes de UGHR, UGH, UGR, le vent moyen et son écart-type. Ceci illustre bien la forte variabilité dans la région de la Gaspésie et montre la sensibilité considérable des variables à méso-échelle dans l'espace. Plusieurs autres tables à 0,25° sont très similaires. Par conséquent, elles ont le potentiel d'avoir une représentativité plus significative de la région méso-échelle. Des simulations à méso-échelle serait nécessaire afin de comparer les données du modèle aux observations et d'appuyer cette supposition.

4.5 Évaluation du VGM des réanalyses ERA5 0,25° et 2,5°

Le paramètre de la moyenne du module de Vg à 1000 mb (VGM) a été comparé pour les réanalyses ERA5 à 0,25° et 2,5°. Le VGM de ERA5 2,5° démontre une bien plus faible variabilité d'environ 2 fois moins importante que celui de ERA5 0,25°. Cela a soulevé l'hypothèse qu'il y a une réduction des pressions géopotentielles au niveau de la mer qui cause une anomalie dans le gradient de pression qui définit le Vg sous la montagne. C'est un artéfact qui est connu en météorologie qui a pour effet de créer une atmosphère numérique sous le relief montagneux puisque les niveaux de pression isobariques les traversent. Ce processus a été traité dans de multiple recherches dont celui de Mohr (2004) qui décrit certains problèmes liés au champ de pression moyen au niveau de la mer dans l'ouest des États-Unis. Or, dans cette étude, il était intéressant de vérifier les hypothèses initiales dans une autre région dont le relief est beaucoup plus homogène. Cependant, le domaine choisi dans les Prairies canadiennes s'est avéré posséder

une colline nommée Cypress Hills dans la région sud-ouest. En répétant la vérification du VGM dans ce domaine, cela a confirmé que l'anomalie des Vg trop forts est due au gradient erroné du GZ sous la montagne et que le problème réside sur les dénivélés de la topographie dans les bas niveaux.

D'autre part, une vérification a été faite sur les 4 niveaux verticaux afin d'évaluer le comportement du Vg sur les niveaux supérieurs. On a remarqué l'anomalie disparaît plus on monte les niveaux isobariques, au-dessus du sommet des montagnes. Cela permet de conclure que le niveau de pression au niveau de la mer reflète trop la topographique et la trop forte dépendance à la hauteur du relief via la relation hydrostatique. Celle-ci a démontée que la pression dépend d'une fonction exponentielle du relief et la grande signature du relief dans le vent géostrophique à la surface. Il serait donc plus consistant d'utiliser un gradient de pression qui suit la topographie ($z = z_{sfc}$). Par conséquent, l'utilisation d'un système de coordonnée sigma de ERA5 semble une meilleure piste pour l'incorporation des données de réanalyse ERA5 0,25° dans WEST. Dans la littérature, Danard et al. (1993) ont notamment utilisés cette méthode et ils en concluent que cela a pour conséquence de réduire l'erreur de troncature dans les modèles atmosphériques. Pour cette raison, il est intéressant d'utiliser des réanalyses ERA5 en coordonnées sigma disponibles à C3S, soit dataset = "reanalysis-era5-complete", afin de remplacer les données isobariques présentement utilisées. De plus, cela permet donc de remplacer l'hypothèse du forçage et de la variabilité climatique trop local de Vg qui s'avère être imprécise.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'énergie éolienne fait partie des expertises mondiales en pleine croissance dont l'une des finalités consiste à permettre de lutter contre les changements climatiques. Dans ce contexte, l'évaluation de la ressource éolienne s'avère être un des aspects les plus importants pour l'installation d'un parc éolien. WEST est un modèle de cartographie du vent établi mis au point par le RPN de EC qui comprend, un module de classification géostrophique de données de réanalyse, un modèle méso-échelle (MC2) et micro-échelle (MSMicro) ainsi qu'un module statistique permettant d'obtenir la climatologie du vent régional à de plus hautes résolutions. WEST a notamment été utilisé pour créer l'Atlas canadien de l'énergie éolienne.

WEST utilise présentement les réanalyses NCEP/NCAR. Toutefois, celles-ci s'avèrent désuètes. Ainsi, l'objectif du projet dont fait l'objet ce mémoire consiste à moderniser le modèle WEST en modifiant la base de données de réanalyse NCEP par ERA5 0,25° et d'en évaluer l'impact sur le potentiel éolien modélisé. Les réanalyses ERA5 ont une plus haute résolution spatio-temporelle que NCEP. Ceci aurait théoriquement pour avantage d'obtenir des vitesses et directions de vent et un potentiel éolien plus représentatif de la réalité.

Or, les résultats obtenus démontrent que l'incorporation de ERA5 dans le modèle WEST ne donne pas le rendement escompté. Ces résultats montrent que ERA5 à 0,25°, sur une période de 10 ans, n'améliore pas les tables fréquentielles, principalement la fréquence de la vitesse et de la direction du vent géostrophique, comparativement à NCEP 2,5°. En fait, cette mauvaise performance à méso-échelle à 0,25° est due à un forçage climatique du vent géostrophique plus local que ce que le module statistique de MC2 est capable de traiter. Par conséquent, cela rend pratiquement impossible l'utilisation de réanalyses à 0,25° telle qu'elles sont actuellement. Cela se traduit par une variabilité accrue localement, qui n'est pas toujours présente selon le domaine analysé. Par conséquent, ce mémoire conclu l'usage de ERA5 dans WEST est défavorable selon l'application telle que la cartographie du vent et le potentiel éolien à micro et méso-échelle.

Pour appuyer cette conclusion, une analyse spécifique du paramètre VGM a permis de montrer qu'il y a une réduction des pressions au niveau de la mer qui cause une anomalie dans le gradient de pression qui définit le V_g sous la montagne. La pression dépend d'une fonction exponentielle du relief via la relation hydrostatique. L'utilisation des données de réanalyses ERA5 en coordonnées sigma afin de remplacer les données isobariques représentent une meilleure piste de solution. Pour cette raison, l'hypothèse du forçage et de la variabilité climatique trop local de V_g est donc invalide. D'autre part, une analyse de la distribution de la distribution spatiale des histogrammes du module $|V_g|$ et de rose des vents V_g ont permis de mettre en évidence les directions erronées et les vitesses surestimées de ERA5 à $0,25^\circ$ rencontrées tout au long de cette étude.

Cette conclusion est corroborée par un avis émis par le C3S, au moment de la rédaction même de ce mémoire, concernant des données ERA5 corrompues.

Afin de poursuivre le développement de ce projet, plusieurs recherches futures peuvent compléter les résultats obtenus dans la présente étude. Tout d'abord, en conservant la méthodologie actuelle, il est conseillé d'augmenter la résolution spatio-temporelle du schéma de classification géostrophique. Cela peut être réalisé en ajoutant des hauteurs préalablement désignées ainsi que les niveaux de pression associés dans le fichier CLASSIF-parms.dot. ERA5 compte 16 niveaux de pression compris entre 1000 mb et 500 mb inclusivement. Dans cette étude, seulement 4 niveaux ont été utilisés. En augmentant la résolution verticale, il y aurait une meilleure représentativité tridimensionnelle de la couche limite ce qui pourrait avoir un effet positif considérable sur l'état initial de l'atmosphère. De plus, il est recommandé d'augmenter la résolution temporelle. Les données sont calculées présentement avec un pas de temps de 6h. ERA5 offre la possibilité d'utiliser un pas de temps allant jusqu'à 1h. Bien que le rehaussement spatio-temporelle démontre des qualités intéressantes, le coût de calcul peut augmenter proportionnellement de façon drastique.

D'autre part, il est recommandé de faire un choix mieux éclairé du centroïde de la table plutôt que de prendre naïvement le centre géométrique du domaine à méso-échelle afin de réussir à bien représenter le climat d'une région à partir des réanalyses ERA5 0,25°.

Il est aussi essentiel d'apporter une correction à la grossière erreur des Vg amplifiés par le relief et d'utiliser les réanalyses ERA5 sur les niveaux du modèle (ETA).

Ensuite, il est suggéré de remplacer le modèle méso-échelle MC2 par MC2-LES (MC2-Large Eddy Scale). Les recherches de Gasset (2014) ont montré que la combinaison des approches méso-échelles et des simulations à grandes échelles (LES) est prometteuse et constitue une base solide permettant à MC2 d'opérer efficacement. De plus, Flores Maradiaga (2018) a aussi utilisé MC2-LES pour la modélisation du vent sur des terrains complexes. Les résultats indiquent que le modèle MC2-LES reproduit efficacement les modèles d'écoulement prévus et donne des résultats précis. Il est donc judicieux d'incorporer le modèle MC2-LES dans WEST pour combiner avec ERA5 à haute résolution pour optimiser le rendement des tables fréquentielles.

Enfin, étant donné que plusieurs recherches ont appliquées le modèle WEST dans les régions montagneuses du Yukon, il est conseillé de développer des recherches futures dans cette région afin d'évaluer l'impact d'une réanalyse à haute résolution intégrée dans WEST.

ANNEXE I

LE MODE D'EMPLOI DE L'OUTIL ECCODES

Il est décrit dans cette annexe comment les utilisateurs peuvent accéder à l'ensemble de données ERA5 via l'infrastructure CDS du C3S. Les données ERA5 peuvent être téléchargées via l'interface Web CDS ou par programmation à l'aide du service CDS API.

La création d'un compte CDS est requis en plus d'accepter la licence Copernicus. Pour télécharger les données ERA5, il faut accéder au stockage de données climatiques du C3S (CDS). Ensuite, écrire 'ERA5' dans la zone de recherche et suivre le lien du titre de l'ensemble de données ERA5 désiré. Pour des informations supplémentaires, visitez le site <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/How+to+download+ERA5>.

Les explications et des exemples montrant comment utiliser l'API CDS se trouve au lien suivant : <https://cds.climate.copernicus.eu/api-how-to>. Ceci est disponible pour les utilisateurs de Windows, macOS et linux.

Le ECMWF a développé un paquet nommé ecCodes fournissant une interface de programmation et un ensemble d'outils pour décoder et encoder des messages dans les formats tels que GRIB ou BUFR. Voici un lien permettant d'obtenir des informations pour l'installation du paquet ecCodes : <https://confluence.ecmwf.int/display/ECC/ecCodes+installation>.

Une liste de recommandation est dressée ci-après afin de permettre une meilleure installation de ecCodes pour linux.

1. Installer CMake en minuscule de la façon suivante : `sudo apt-get install cmake`.

2. Il est important pour le côté python d'avoir le paquet `python2.7-dev` d'installer via la commande `sudo apt-get install python2.7-dev`, sinon le make va avoir erreur pour `gribapi_swig`.

3. Pour le téléchargement de la dernière version de eccodes-X.Y.Z-Source.tar.gz, il est possible de le faire avec la commande wget. Pour faire avec wget il faut trouver l'adresse URL de la version. On ne peut pas le faire directement avec nom de version. Par exemple pour eccodes-2.9.2-Source.tar.gz, le URL est https://confluence.ecmwf.int/download/attachments/45757960/eccodes-2.9.2-Source.tar.gz ?api=v2 alors qu'en utilisant wget, la commande est : wget https://confluence.ecmwf.int/download/attachments/45757960/eccodes-2.9.2-Source.tar.gz ?api=v2.

Ensuite, localement on enlève le ?api=v2 par exemple.

4. Il est recommandé de mettre l'installation à un endroit qui est facile de référencer. Par exemple, \$HOME/eccodes. Ce sera utilisé au lieu de /path/to/where/you/install/eccodes à l'étape suivante.
5. Pour garder un journal de ce qui se passe pendant les opérations de construction, ajoutez un tee dans les commandes :

```
cmake -DCMAKE_INSTALL_PREFIX=/path/to/where/you/install/eccodes .../eccodes-X.Y.Z-Source | tee my-cmake.log
```

et aussi pour la commande make suivante :

```
make |tee my-make.log #Dans un journal distinct
```

À noter que l'option -D dans la commande ci-haut générer uniquement les bibliothèques partagées (*.so).
6. Lors de l'installation finale, il est conseillé d'ajouter un tee : |tee my-install.log.
7. Si une erreur de permission survient, faire sudo make install. Par contre, cela ne devrait pas arriver si INSTALL_PREFIX est à l'extérieur du \$HOME.

8. Mettre à jour le fichier .profile_usr pour inclure ecCodes dans les variables suivantes :

```
export PATH=. :~/ovbin/${BASE_ARCH} :~/eccodes/bin :~/bin :$PATH  
export LD_LIBRARY_PATH=~/ovbin/Linux_x86-64 :~/eccodes/lib :$LD_LIBRARY  
_PATH
```


ANNEXE II

SCRIPT DE LA CONSTRUCTION DES GRAPHES STATISTIQUES

Ce programme permet de construire les graphes statistiques figurant dans le chapitre des résultats. Ce script est écrit pour l'environnement python2. Ses principales entrées sont les tables fréquentielles issues du schéma de classification géostrophique de WEST. Il est possible de créer une figure comportant une ou deux tables. Les variables qui sont possibles de changer sont décrites le long du script.

```
import numpy as np
import os , sys
import matplotlib.pyplot as plt
import pickle

classes = np.array([0.2, 2., 4., 6., 8., 10., 12., 14., 16., 18., 22., 26., 30., 34.])

half=0.5
third=1./3.

def getTableData(TableFile):
    T= np.loadtxt(TableFile,skiprows=2,usecols=[1,2,4])
    Headtxt= np.loadtxt(TableFile,usecols=[5,7,10,11,12,13],dtype=(('string','float')))
    ID=np.loadtxt(TableFile,skiprows=2,usecols=[0],dtype='|S12')
    Tdd=T[:,0]
    Tuv=T[:,1]
    Tf =T[:,2]
    Head=Headtxt[0]
    sp=[]
    Tm1=np.average(Tuv**1,weights=Tf)
    Tm2=np.average(Tuv**2,weights=Tf)
    TsumF=np.sum(Tf)
    return ID,Tdd,Tuv,Tf,Head

def splitTableID(ID):
    N=np.size(ID)
    if verb: print N
    splitID=np.chararray((N, 4),itemsize=4)
    for i in range(N):
        idi=ID[i]
        prefix=idi._getitem_(0,4)
        ddbin= idi._getitem_(5,8)
        uvbin= idi._getitem_(9,11)
        shear= idi._getitem_(11,12)
        splitID[i,:]=[prefix,ddbinc,uvbin,shear]
    if verb: print idi,prefix,ddbinc,uvbin,shear
    return splitID
```

Figure-A II-1 Script de la construction des graphes statistiques

```

def plot_table(Tf,Sectors,Speeds,Shears):
    ptt.Head=Head
    ptt.sp=sp
    ddClass=np.unique(Sectors)
    uuClass=np.unique(Speeds)
    ddbins=np.append(ddClass,min(360.,ddClass[-1]-ddClass[-2]+ddClass[-1]))
    if verb: print "dd bins:", ddbins
    H,Huu,Hdd=ptt.biFreqPlot(Speeds,Sectors,Tf)
    if verb:
        print "H shape",H.shape
        print 'Huu:',Huu,'Huu.__len__():',Huu.__len__()
        print 'classes.size:',classes.size
        print 'Hdd:',Hdd
        print 'uuClass:',uuClass
    ptt.speedFreqPlot(classes[0:Huu.__len__()],Huu)
    ptt.roseFreqPlot(ddbins,Hdd)
    return H, xedges, yedges

ptt.saveFigs=saveFigs

```

Figure-A II-2 Script de la construction des graphes statistiques suite

Les variables WESTpath_X permettent d'entrer le chemin vers le dossier comportant les tables fréquentielles. La variable num permet de définir le nombre de table que l'on veut représenter dans la figure. Les deux entrées possibles sont 1 ou 2.

```

WESTpath_1="/$home/GASPE_0.25/ANU"
WESTpath_2="/$home/NA_2.5/ANU"
num= 2 # number of table to plot

```

Figure-A II-3 Script de la construction des graphes statistiques suite

Pour chacune des tables choisies, il est nécessaire d'entrer le point de grille en i et j correspondant à la table de notre choix. Dans cet exemple, la table de la colonne gauche a comme coordonnée i et j, des valeurs de 5 et 5 respectivement.

```

for i in range(num):
    if i==1:
        WESTpath=WESTpath_1      # 1st table left side
        jWEST=list([5])
        iWEST=list([5])
        sp=[321,323,325]
    else:
        WESTpath=WESTpath_21_ERAS025     # 2nd table right side
        jWEST=list([2])
        iWEST=list([2])
        sp=[322,324,326]

    for j in jWEST:
        for i in iWEST:
            if verb:print WESTpath,j,i
            WESTjpath= os.path.join(WESTpath,str(j))
            WESTjifile=os.path.join(WESTjpath, str(i) +"_table.ef")

            ID,Tdd,Tuv,Tf,Head=getTableData(WESTjifile)
            print WESTpath,j,i,ID[0],np.sum(Tf)/100.

            splitted=splitTableID(ID)
            Prefix=splitted[:,0]
            Sectors=np.array(splitted[:,1]).astype(np.float)
            Speeds=np.array(splitted[:,2]).astype(np.float)
            Shears=splitted[:,3]
            plot_table(Tf,Sectors,Speeds,Shears)
...

```

Figure-A II-4 Script de la construction des graphes statistiques suite

Enfin, il est aussi possible avec la fonction plt.savefig(), d'entrer le chemin vers un fichier dans le format de notre choix afin de l'enregistrer. Le chemin doit être indiqué entre les guillemets comme suit :

```

plt.tight_layout()
plt.savefig('/$home/file/image/figure.png')
plt.show()

```

Figure-A II-5 Script de la construction des graphes statistiques suite

ANNEXE III

SCRIPT DE LA CONSTRUCTION DES TABLES MOYENNÉES PAR COMBINAISON DES TABLES PLUS FINES

Ce programme permet la construction d'une table moyenné par combinaison d'une multitude de tables comme expliqué à la section 2.5. Quelques variables sont possibles d'être changées. Celles-ci sont décrites et commentées dans le script.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import os , sys
from collections import Counter
import pandas as pd
import subprocess
import math

def getTableData(TableFile):
    ID=np.loadtxt(TableFile,usecols=[0],dtype='|S12') #'U6')
    #Q=np.loadtxt(TableFile,usecols=[1,2,3], dtype='float')
    Q=np.loadtxt(TableFile,usecols=[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,
                                    11,12,13,14,15,16,17,18], dtype='float')
    return ID,Q
```

Figure-A III-1 Script de la construction des tables moyennées par combinaison des tables plus fines

La variable newtable permet de définir le chemin et l'endroit à laquelle la nouvelle table sera déposée. De plus, elle permet de définir le nom de la nouvelle table. Dans cet exemple, elle est définie par 1_table.ef. Il est important d'avoir le suffixe .ef pour la compatibilité avec le modèle WEST. La variable header représente l'entête que prendra la nouvelle table. h_table.ef est un

```
newtable='$/home/1_table.ef'
header='$/home/h_table.ef'
```

Figure-A III-2 Script de la construction des tables moyennées par combinaison des tables plus fines suite

fichier externe et son chemin doit être défini. Dans cet exemple, la première ligne d'une table originale est copiée dans ce fichier et est modifié par la suite pour identifier qu'il s'agit d'une table reconstruite par le biais de ce programme.

Les variables jj0, ii0, jj et ii permettent de définir le nombre de table à être utilisé pour la moyenne. Dans cet exemple, les points vont de ii0=1 à ii=10 et de jj0=1 à jj=10 ce qui donne un total de 100 tables utilisées pour la moyenne. Les tables doivent être répertoriées dans un même fichier et le chemin pour y accéder doit être défini dans la variable dire comme indiqué ci-bas.

```
##### get all data files #####
jj0=1
ii0=1
jj=10
ii=10
list_table=[]

for j in range(jj0,jj+1):
    for i in range(ii0,ii+1):
        dire='$/home/gaspe_0.25/tables/ANU'
        directory=os.path.join(dire,str(j))
        print os.path.join(directory, str(i) +"_table.ef")
        list_table.append(os.path.join(directory, str(i) +"_table.ef"))

##### merge toutes les ID et data dans un repertoire #####
filenames = list_table
with open('./merge_tables.txt', 'w') as outfile:
    for fname in filenames:
        with open(fname) as infile:
            infile.readline()
            infile.readline()
            for line in infile:
                outfile.write(line)

##### get data #####
ID,Q=getTableData('./merge_tables.txt')

##### zip - merge 2 array #####
data=zip(ID,Q)

list_val=[]
for i in range(18):#3
    sum_data=Counter()
    for k,v in data:
        sum_data[k] += v[i]

    values=sum_data.values()
    list_val.append(values)

id_fi=sum_data.keys()

##### id facteur #####
all_id=Counter(ID)
val_id=all_id.keys()
val_fac=all_id.values()
```

Figure-A III-3 Script de la construction des tables moyennées par combinaison des tables plus fines suite

```

##### check up id #####
index=[]
for i in range(len(val_id)):
    if id_fi[i] in val_id:
        index1=id_fi.index(val_id[i])
        index.append(index1)
    else:
        print '__PROBLEM 1__'
        break
    print index

##### division par le facteur d'occurrence pour obtenir la moyenne #####
new_list_val=np.array(list_val)/val_fac
stack=np.vstack(new_list_val).T
df=pd.DataFrame(stack,id_fi)
dff=df.sort(columns=5,ascending=False)
pd.option_context('display.float_format', '{: .4f}'.format)

##### get a header #####
with open(header) as f:#header_table.ef) as f:
    with open(newtable, "w") as f1:
        for line in f:
            if 'I:' in line:
                f1.write(line)
            if 'HEADER' in line:
                f1.write(line)
    f1.close
f.close

##### Write new tables #####
with open(newtable, 'a') as f:
    f.write(dff.to_string(header = False))

#### END #####
print 'val_fac'
print dir(all_id)
print val_fac, np.sum(all_id)
print dff
z=new_list_val.T
print z[:,0]
print z[:,2]
ubar=np.average(z[:,0],weights=z[:,2]/z[:,2].sum())
print 'ubar=',ubar

```

Figure-A III-4 Script de la construction des tables moyennées par combinaison des tables plus fines suite

BIBLIOGRAPHIE

- Belmonte Rivas, M. & Stoffelen, A. (2019). Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT. *Ocean Science*, 15(3), 831–852.
- Benoit, R. & Wu, W. (2004). Cartographie et analyse du gisement éolien du Québec par le Système West. *RRSE. doc*, 6.
- Benoit, R., Desgagné, M., Pellerin, P., Pellerin, S., Chartier, Y. & Desjardins, S. (1997). The Canadian MC2 : A semi-Lagrangian, semi-implicit wideband atmospheric model suited for finescale process studies and simulation. *Monthly Weather Review*, 125(10), 2382–2415.
- Benoit, R., Schär, C., Binder, P., Chamberland, S., Davies, H., Desgagné, M., Girard, C., Keil, C., Kouwen, N., Lüthi, D. et al. (2002). The real-time ultrafinescale forecast support during the special observing period of the MAP. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(1), 85–110.
- Carvalho, D., Rocha, A., Santos, C. S. & Pereira, R. (2013). Wind resource modelling in complex terrain using different mesoscale–microscale coupling techniques. *Applied Energy*, 108, 493–504.
- Copernicus Climate Change Service. (2018). ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Repéré le 2020-07-08 à <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>.
- Danard, M., Zhang, Q. & Kozlowski, J. (1993). On computing the horizontal pressure gradient force in sigma coordinates. *Monthly weather review*, 121(11), 3173–3183.
- ECMWF. (2017). ERA5 : data documentation. Repéré le 2020-07-08 à [https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%\\$3A+data+documentation](https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%$3A+data+documentation).
- Frank, H. P. & Landberg, L. (1997). Modelling the wind climate of Ireland. *Boundary-Layer Meteorology*, 85(3), 359–377.
- Frank, H. P., Rathmann, O., Mortensen, N. G. & Landberg, L. (2001). The numerical wind atlas-the KAMM/WAsP method.
- Frey-Buness, F., Heimann, D. & Sausen, R. (1995). A statistical-dynamical downscaling procedure for global climate simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 50(3), 117–131.
- Garratt, J. R. (1994). The atmospheric boundary layer. *Earth-Science Reviews*, 37(1-2), 89–134.

- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C. A., Darmenov, A., Bosilovich, M. G., Reichle, R. et al. (2017). The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of climate*, 30(14), 5419–5454.
- Gruber, K., Regner, P., Wehrle, S., Zeyringer, M. & Schmidt, J. (2020). Towards a global dynamic wind atlas : A multi-country validation of wind power simulation from MERRA-2 and ERA-5 reanalyses bias-corrected with the Global Wind Atlas. *arXiv preprint arXiv :2012.05648*.
- Holton, J. R. (Éd.). (2004). *An Introduction to Dynamic Meteorology* (éd. 4). Academic Press.
- Houchi, K., Stoffelen, A., Marseille, G. & De Kloe, J. (2010). Comparison of wind and wind shear climatologies derived from high-resolution radiosondes and the ECMWF model. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 115(D22).
- IPCC. (2018). Global warming of 1.5°C. Repéré le 2020-07-11 à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf.
- IRENA. (2019). Transforming the energy system – and holding the line on the rise of global temperatures, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Repéré le 2020-07-11 à <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Transforming-the-energy-system>.
- Jackson, P. & Hunt, J. (1975). Turbulent wind flow over a low hill. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101(430), 929–955.
- Jourdier, B. (2020). Evaluation of ERA5, MERRA-2, COSMO-REA6, NEWA and AROME to simulate wind power production over France. *Advances in Science and Research*, 17, 63–77.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J. et al. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society*, 77(3), 437–472.
- Ladd, C. & Bond, N. A. (2002). Evaluation of the NCEP/NCAR reanalysis in the NE Pacific and the Bering Sea. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 107(C10), 22–1.
- Martin, J. E. (2013). *Mid-latitude atmospheric dynamics : a first course*. John Wiley & Sons.
- Mason, P. & Sykes, R. (1979). Flow over an isolated hill of moderate slope. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105(444), 383–395.

- Mohr, M. (2004). Problems with the mean sea level pressure field over the western United States. *Monthly weather review*, 132(8), 1952–1965.
- Olauson, J. (2018). ERA5 : The new champion of wind power modelling ? *Renewable energy*, 126, 322–331.
- Pham, P. (2013). *Improvement of the initialization of the WEST wind ressource software for mountainous region in cold climates*. (Thèse de doctorat, École de technologie supérieure).
- Pinard, J. J.-P., Benoit, R. & Yu, W. (2005). A WEST wind climate simulation of the mountainous Yukon. *Atmosphere-ocean*, 43(3), 259–281.
- Pinard, J.-P. (2007). Wind climate of the Whitehorse area. *Arctic*, 227–237.
- Pinard, J.-P., Benoit, R. & Wilson, J. D. (2009). Mesoscale wind climate modelling in steep mountains. *Atmosphere-ocean*, 47(1), 63–78.
- Paris Agreement. (2015). Repéré le 2020-07-16 à https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf.
- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., Bosilovich, M. G., Schubert, S. D., Takacs, L., Kim, G.-K. et al. (2011). MERRA : NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of climate*, 24(14), 3624–3648.
- Ressources naturelles Canada. (2020). Faits sur l'énergie renouvelable. Repéré le 2020-07-12 à <https://www.rncan.gc.ca/science-data/data-analysis/energy-data-analysis/faits-lenergie-renouvelable/20080>.
- Stull, R. B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*. Springer Science & Business Media.
- Tanguay, M., Robert, A. & Laprise, R. (1990). A semi-implicit semi-Lagrangian fully compressible regional forecast model. *Monthly Weather Review*, 118(10), 1970–1980.
- Thomas, S. J., Girard, C., Benoit, R., Desgagné, M. & Pellerin, P. (1998). A new adiabatic kernel for the MC2 model. *Atmosphere-Ocean*, 36(3), 241–270.
- Troen, I. & Lundtang Petersen, E. (1989). European wind atlas.
- Walmsley, J., Taylor, P. & 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), 157–186.

Walmsley, J. L., Salmon, J. & Taylor, P. (1982). On the application of a model of boundary-layer flow over low hills to real terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 23(1), 17–46.

Yu, W., Benoit, R., Girard, C., Glazer, A., Lemarquis, D., Salmon, J. R. & Pinard, J.-P. (2006). Wind Energy Simulation Toolkit (WEST) : a wind mapping system for use by the wind-energy industry. *Wind Engineering*, 30(1), 15–33.

Zhang, J. (2014). Modeling the impact of wind intensification on Antarctic sea ice volume. *Journal of Climate*, 27(1), 202–214.