

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE
DES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
M. Ing.

PAR
Amélie CAMION

LA MODÉLISATION DES ÉVÉNEMENTS DE GIVRAGE ATMOSPHERIQUE :
INTERPOLATION DE LA NARR POUR L'UTILISATION DE GEM

MONTRÉAL, LE 22 NOVEMBRE 2012

©Tous droits réservés, Amélie Camion, 2012

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Masson, directeur de mémoire
Département génie Mécanique à l'École de Technologie Supérieure
Amélie

M. Benoit, codirecteur de mémoire
Département génie mécanique à l'École de Technologie Supérieure

M. Morency président du jury
Département Génie Mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Glazer membre du jury
Environnement Canada

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

LE 22 NOVEMBRE 2012

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Cette maîtrise a été une source d'apprentissage et m'a permis d'approfondir mes connaissances en météorologie ainsi que de découvrir le milieu éolien. Cette expérience s'est effectuée avec l'aide, le soutien et les conseils de plusieurs personnes.

Je tiens à remercier Robert Benoit, codirecteur, pour son soutien, le partage de sa précieuse expertise et sa patience qui a facilité la compréhension de la modélisation et de la météorologie. Tout au long de ces deux années de recherche, il a toujours été présent et disponible. Merci à Christian Masson sans qui je n'aurais fait partie de la Chaire en Aérodynamismes des Éoliens en Milieu Nordique et qui m'a fait connaître ce milieu enrichissant. Je tiens à remercier l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec le LIMA (Laboratoire International des Matériaux Antigivre) pour leur implication dans ce projet.

Merci à Nicolas Gasset pour sa patience et son aide concernant les manipulations des modèles de prévision numérique. De même qu'un grand merci aux personnes constituant cette Chaire de recherche pour les moments agréables passés ensemble et leur partage des connaissances.

Je tiens à remercier Joël Robert, travaillant à EDF EN (Électricité De France Énergie Nouvelle) pour ses judicieux conseils et sa participation à la pose des instruments de mesure météorologiques. Merci à l'entreprise EDF EN qui a mis à terme ce projet. Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers Guy Fortin pour son expertise et ses connaissances à propos du givrage atmosphérique et les instruments de mesure météorologiques.

De plus, je tiens à remercier mon copain et ma famille qui ont été d'un grand soutien moral et une source d'encouragement tout au long de mes études ainsi que mes amis qui m'ont encouragé.

LA MODÉLISATION DES ÉVÉNEMENTS DE GIVRAGE ATMOSPHÉRIQUE : INTERPOLATION DE LA NARR POUR L'UTILISATION DE GEM

Amélie CAMION

RÉSUMÉ

Aujourd'hui, l'industrie éolienne connaît une croissance grandissante dans les climats froids. Toutefois, cet environnement est propice aux accumulations de glace provoquant des bris des éoliennes et des instruments météorologiques, une diminution de la puissance utile et des dangers pour l'humain. La compréhension et la caractérisation du givrage atmosphérique est donc nécessaire pour optimiser la planification de l'installation des parcs. La confection d'un atlas du givre en Amérique du Nord peut être soutenu par les modélisations à l'aide de modèle de prévision numérique et de schéma de microphysique détaillant les types de précipitations givrantes et leur accumulation. Toutefois, il est important de créer un tel atlas sur une base historique, car ces événements varient à chaque hiver. L'utilisation de fichiers d'entrées doivent donc contenir un maximum de données atmosphériques couvrant un grand domaine géographique pour ainsi s'assurer de couvrir les phénomènes météorologiques importants.

Dans ce travail, une méthodologie, consistant à automatiser une simulation des événements de givre, basée sur l'utilisation de méthodes de simulation méso-échelle, a été développée. Cette méthodologie est un atout à tout atlas du givre permettant de fournir une information plus fine et plus complète sur un site d'intérêt.

L'objectif principal est de développer un outil informatique à l'aide de Matlab afin de rendre compatible les fichiers de la NARR (North Regional Re-Analysis) comme données d'entrée au modèle de prévision numérique GEM (Global Environmental MultiScale). L'utilisation de ce modèle numérique permettra d'effectuer des simulations à méso-échelle des événements givrants du Canada à une résolution spatiale de 32 km. Par la suite, une simulation à plus fine échelle, soit à une résolution de 5 km, permet de raffiner la détection des précipitations givrantes. L'objectif secondaire est l'installation d'instruments météorologiques pouvant fournir des informations concernant la durée, l'intensité et la fréquence des événements givrants. De ce fait, un banc d'essai a été installé comprenant un détecteur de givre et un pluviomètre.

Finalement, les résultats de cette recherche montrent des résultats prometteurs de la modélisation des précipitations givrantes pour la confection d'un atlas givant. Ces modélisations pourront être pilotées par des données de ré-analyse.

VIII

Mots-clés : industrie éolienne, givrage atmosphérique, atlas du givre, modèle de prévision numérique, données de ré-analyse.

LA MODÉLISATION DES ÉVÉNEMENTS DE GIVRAGE ATMOSPHERIQUE : INTERPOLATION DE LA NARR POUR L'UTILISATION DE GEM

AMÉLIE CAMION

ABSTRACT

The wind industry is growing in cold climates. These environments are conducive to ice accumulation causing wind turbine and meteorological instruments failures, output power reduction and humans hazards. Therefore, the understanding and the characterizations of the atmospheric icing are required to optimize the wind farm installation. The production of an icing map in North America can be supported by the numerical weather prediction model and microphysics schemes detailing the different precipitation and accumulation types. Nevertheless, it is important to create such a atlas on a historical basis, because these events vary each winter. The use of input files for these models should contain a maximum of atmospheric data covering a large geographical area to ensure to cover the significant weather phenomena.

In this study, a methodology consisting to model the icing events, based on the meso-scale method, was developed. This methodology is complementary to an icing map allowing to get more information on a local site.

The main objective is to develop a tool to make compatible the input data, NARR (North Regional Re-Analysis), with the weather prediction model GEM (Global Environmental Multi-Scale). With this model, it will be possible to model the icing events in Canada at a spatial resolution of 32 km. Then, a model at a spatial resolution of 5 km will allow to get more information in icing on Québec region. The secondary objective is to install weather instruments what can provide information regarding the duration, intensity and frequency of icing events. Thereby, a measuring station has been installed including an ice meter and an heated rain gauge.

Finally, the results of this research show promising results of the icing precipitation modeling for the preparation of an icing map. These models may be modeled by the reanalyse data.

Keywords: wind industry, atmospheric icing, icing map, numerical weather prediction, reanalyse data.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Les caractéristiques générales	1
1.2 La présentation de la recherche	1
1.2.1 Les objectifs	2
1.2.2 La méthodologie	3
1.3 La structure du mémoire	4
CHAPITRE 2 LA CARTOGRAPHIE DU GIVRE	7
2.1 L'éolien en milieu nordique	7
2.2 Les atlas du givrage atmosphérique	8
2.3 La modélisation du givrage atmosphérique	9
CHAPITRE 3 LA MÉTÉOROLOGIE DES CLIMATS FROIDS	13
3.1 La météorologie physique	13
3.2 La météorologie dynamique	13
3.3 Les précipitations	14
3.3.1 Les phénomènes responsables de la croissance des hydrométéores	16
3.3.2 Les différents types de précipitations	18
3.3.2.1 Le virgas	18
3.3.2.2 La brume et le brouillard	19
3.3.2.3 La pluie	19
3.3.2.4 La neige	20
3.3.2.5 Grêle	21
3.4 Les différentes formations de la glace	21
3.4.1 Le verglas	21
3.4.2 Le givre	22
CHAPITRE 4 LA PRÉVISION NUMÉRIQUE EN AMÉRIQUE DU NORD	25
4.1 Les données météorologiques en Amérique du Nord	25
4.1.1 Le NCEP	26
4.1.2 Les capteurs AVHRR et AMSR	27
4.2 Le modèle de prévision numérique au Canada	27
4.2.1 Les différentes résolutions horizontales	27
4.2.2 Les systèmes de niveaux verticaux	29
4.2.3 Les méthodes de calcul de GEM	29
4.2.4 Les paramétrages des effets physiques	31
4.3 Les schémas de microphysique de Milbrandt et Yau	31
4.3.1 Les moments du schéma de microphysique	32
4.3.2 Les variables du schéma	34

CHAPITRE 5	LA CONCEPTION D'UN BANC D'ESSAI	37
5.1	Le pluviomètre	37
5.2	Le détecteur de givre.....	38
5.3	La mise en place des instruments de mesure	40
5.4	Les calculs des paramètres du givre.....	41
5.5	Un projet en évolution	41
5.5.1	Un bouclier de protection.....	42
5.5.2	Le visibilimètre	42
5.5.3	Le disdromètre	43
CHAPITRE 6	LE LABORATOIRE NUMÉRIQUE	45
6.1	Les outils numériques	45
6.2	L'acquisition des fichiers météorologiques	46
6.3	Les spécifications des grilles	47
6.3.1	La définition de la grille et de la projection de la NARR	48
6.3.2	L'interpolation entre deux différentes projections	50
6.3.2.1	La projection cylindrique.....	51
6.3.2.2	La projection polaire stéréographique	54
6.3.3	Les comparaisons des projections.....	58
6.4	Le traitement des vecteurs du vent.....	60
6.4.1	La rotation vectorielle	62
6.4.2	La validation de la rotation du vent	63
6.5	L'écriture des FST	65
6.5.1	La définition des fichiers standards (FST).....	66
6.5.1.1	La résolution de la grille au 60 ^{ième} parallèle Nord	67
6.5.2	Les variables atmosphériques	68
6.5.3	Les variables de surface	68
6.5.4	Les types d'interpolations.....	69
6.5.5	Les changements d'unités	70
6.5.6	La résolution verticale.....	70
6.6	L'environnement de travail pour le fonctionnement de GEM.....	71
6.6.1	Les généralités	71
6.6.2	La localisation	74
6.6.3	La nouvelle version.....	74
CHAPITRE 7	LA VALIDATIONS DE LA MODÉLISATION GEM	75
7.1	Les modélisations des prévisions numérique de GEM.....	75
7.2	Les validations de GEM-32 km	82
7.2.1	La validation de l'état initial de GEM-32	83
7.2.2	La validation spatio-temporelle de GEM-32	89
7.2.3	La validation des variables de précipitation de GEM-32.....	100
7.2.3.1	La validation du taux de précipitations total de GEM-32.....	101
7.2.3.2	La validation du type d'accumulation de glace de GEM-32	104
7.3	Les validations de GEM-5	110
7.3.1	La Validation à l'état initial de GEM-5.....	111

7.3.2	La validation spatiotemporelle de GEM-5.....	118
7.3.3	La validation des variables de précipitation de GEM-5.....	120
7.3.3.1	La validation du taux de précipitations total de GEM-5.....	120
7.3.3.2	La validation du type d'accumulation de glace de 5 km.....	123
7.4	La comparaison des simulations : GEM-5 et GEM-32.....	127
7.4.1	La validation du taux de précipitation totale.....	128
7.4.2	La validation du type d'accumulation de glace.....	131
7.5	Une cartographie du givre.....	137
CONCLUSION.....		141
RECOMMANDATIONS		143
ANNEXE I	ATLAS DU GIVRAGE ATMOSPHÉRIQUE PUBLICS POUR LE CANADA OU LE QUÉBEC.....	145
ANNEXE II	VARIABLES DE SORTIES DU SCHÉMA M&Y.....	153
ANNEXE III	VARIABLES DE SORTIES DU MODÈLE GEM	155
ANNEXE IV	PROGRAMMATION POUR L'ACQUISITION DES DONNÉES DE LA NARR ET DES CAPTEURS AVHRR ET AMSR.....	157
ANNEXE V	PROGRAMMATION POUR LA DEFINITION DES GRILLE GEOGRAPHIQUE SERVANT À L'ÉCRITURE DES FST.....	159
ANNEXE VI	PROGRAMMATION POUR L'ÉCRITURE DES FST.....	163
ANNEXE VII	PARAMÈTRES DE LA NARR	167
ANNEXE VIII	ATTRIBUT DES FST	169
ANNEXE IX	ÉPAISSEUR DE LA GLACE ET LA TEMPÉRATURE DE MER LE 18 JANVIER 2006 P FICHIERS AVHRR ET AMSR.....	171
ANNEXE X	FICHIERS DE CONFIGURATION «GEM_SETTING.NML» ET «OUTCFG.OUT» UTILISÉS POUR GEM-5 ET GEM-32	173
ANNEXE XI	SUPERPOSITION DES ISOHYPSES DE GEM-32 ET DE LA NARR	177
ANNEXE XII	SUPERPOSITION DES ISOTHERMES GEM-32 ET DE LA NARR	181

ANNEXE XIII	SUPERPOSITION DE L'HUMIDITÉ SPÉCIFIQUE DE GEM-32 ET DE LA NARR.....	185
ANNEXE XIV	SUPERPOSITION DU VENT DE GEM-32 ET DE LA NARR	187
ANNEXE XV	TAUX DE PRÉCIPITATIONS DE GEM-32 ET DE LA NARR.....	191
ANNEXE XVI	SUPERPOSITION DE L'ACCUMULATION DE LA PLUIE DE GEM-32 ET DE LA NARR.....	193
ANNEXE XVII	SUPERPOSITION DES ISOHYPSES DE GEM-5 ET DE LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION	195
ANNEXE XVIII	SUPERPOSITION DES ISOTHERMES DE GEM-5 ET DE LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉSOLUTION	199
ANNEXE XIX	SUPERPOSITION DE L'HUMIDITÉ SPÉCIFIQUE DE GEM-5 ET DE LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉSOLUTION	201
ANNEXE XX	SUPERPOSITION DU VENT DE GEM-5 ET DE LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION	203
ANNEXE XXI	FRÉQUENCES DES ÉCARTS DE LA HAUTEUR GÉOPOTENTIELLE ENTRE GEM-5 ET LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION	207
ANNEXE XXII	FRÉQUENCES DES ÉCARTS DE LA TEMPÉRATURE ENTRE GEM-5 ET LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION	209
ANNEXE XXIII	FRÉQUENCES DES ÉCARTS DE L'HUMIDITÉ SPÉCIFIQUE ENTRE GEM-5 ET LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION	211
ANNEXE XXIV	TAUX DE PRÉCIPITATIONS DE GEM-5 ET DE LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION	213
ANNEXE XXV	SUPERPOSITION DE L'ACCUMUALTION DE LA NEIGE DE GEM-5 ET DE LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION.....	215

ANNEXE XXVI	SUPERPOSITION DE L'ACCUMUALTION DE LA PLUIE DE GEM-5 ET DE LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION.....	217
ANNEXE XXVII	TAUX DE PRÉCIPITATIONS DE GEM-5 ET DE GEM-32 INTERPOLÉ SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION	219
ANNEXE XXVIII	ACCUMULATIONS DE LA NEIGE À UNE RÉOLUTION DE 5 KM ET 32 KM INTERPOLÉ SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION	221
ANNEXE XXIX	ACCUMUALATIONS DE LA PLUIE À UNE RÉOLUTION DE 5 KM ET 32 KM INTERPOLÉ SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION	223
BIBLIOGRAPHIE.....		225

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 3.1	Représentation des mécanismes responsable de la formation des nuages Tiré du site Internet : http://web.gccaz.edu15
Figure 3.2	Taille relative d'une goutte de pluie, d'une goutte nuageuse et d'un noyau de condensation Tirée de Ahrens C.D. (2007, p.164)16
Figure 3.3	L'effet Bergeron Tirée de Ahrens C.D. (2007, p.170).....18
Figure 3.4	Différenciations entre la neige sèche (a), la neige fondante (b), pluie verglaçante (c) et la pluie (d) Tirée de Ahrens C.D. (2007, p.182)20
Figure 3.5	Image du verglas Tirée du site Internet : http://www.linternaute.com/verglas/22
Figure 3.6	Accumulation du givre sur un tube Tirée de Lozowski et al. (1983, p.6)23
Figure 3.7	Événement de givre au Lac Alfred Donné gracieusement par Saint-Laurent Énergie.....23
Figure 4.1	Représentation de la grille globale (a.), variable (b.) et à air limité (c.) Tirée du site Internet : http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn.comm28
Figure 4.2	Représentation des coordonnées isobariques (gauche), sigma (centre) et hybrides (droite) Tirée du site Internet : http://eumetcal.meteo.fr/29
Figure 4.3	Représentation du Message Passing Interface Tirée du site Internet : http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn.comm31
Figure 4.4	Distribution des diamètres des gouttes provenant de différents moments Tirée de J.A.Milbrandt et M.K.Yau (2005, p.3062).....34
Figure 5.1	Représentation extérieure du pluviomètre 52202 de Campbell Scientific Tirée du manuelle d'installation du pluviomètre de Cambell Scientific (2009, p.2)38
Figure 5.2	Détecteur de givre de Goodrich Tirée du manuelle d'installation du détecteur de givre de Cambell Scientific (2009, p.2).....40

XVIII

Figure 5.3	Bouclier de protection Tirée du site Internet : http://www.novalynx.com	42
Figure 5.4	Photo d'un visibilimètre Tirée du site Internet : http://comprendre.meteofrance.com	43
Figure 5.5	Disdromètre optique à laser Tirée du site Internet : http://www.ottfrance.com	44
Figure 6.1	Projection conique conforme de Lambert à un parallèle standard.....	48
Figure 6.2	Domaine de la NARR (bleu foncé) visualisée dans une projection cylindrique	49
Figure 6.3	Représentation de la température [°C] de la NARR sur une grille conforme de Lambert et dans sa projection le 18 janvier 2006 0Z à 1000 mb.....	50
Figure 6.4	Projection cylindrique Tirée du site Internet : http://www.nationalatlas.gov/articles/mapping	51
Figure 6.5	Superposition de la projection cylindrique équidistante (bleu) et conique de Lambert (magenta) sur des axes latitudes-longitudes	52
Figure 6.6	Superposition de la grille conique conforme de Lambert (bleu) dans sa projection et de la grille cylindrique équidistance (rouge).....	53
Figure 6.7	Représentation de la température [°C] de la NARR sur une grille conforme de Lambert et dans sa projection le 18 janvier 2006 0Z à 1000 mb.....	54
Figure 6.8	Projection stéréographique à 90° Sud Tirée du site Internet : http://www.nationalatlas.gov/articles/mapping	55
Figure 6.9	Superposition de la projection conique conforme de Lambert (magenta) avec celle stéréographique (bleu) représentant le domaine de la NARR	56
Figure 6.10	Superposition d'une grille polaire stéréographique (vert) sur une grille conique conforme de Lambert (bleu) dans sa projection	57
Figure 6.11	Interpolation de la température [°C] sur une grille polaire stéréographique dans une projection conique conforme de Lambert le 18 janvier 2006 à 0Z.....	58

Figure 6.12	Comparaison des trois représentations de la NARR sur sa grille d'origine (bleu), sur une grille polaire stéréographique (vert) et sur une grille cylindrique équidistante (rouge)	59
Figure 6.13	Superposition du domaine de la NARR en projection conique conforme de Lambert (magenta), polaire stéréographique (bleu), cylindrique équidistante	59
Figure 6.14	Orientation de la composante v , soit y , du vecteur de la vitesse à tous points de grilles en projection conique de Lambert	61
Figure 6.15	Orientation de la composante v , soit y , du vecteur de la vitesse à tous points de grilles en projection polaire stéréographique (Échantillon de la NARR)	62
Figure 6.16	Représentation vectorielle du vent géostrophique dans l'hémisphère Nord	64
Figure 6.17	Superposition des isohypses [dam] du géopotentiel et des vecteurs du vent [nœud] à une hauteur de 500 mb le 18 janvier 2006 à 0Z	65
Figure 6.18	Plan d'une projection polaire stéréographique défini par RPN	67
Figure 6.19	Les fichiers nécessaires au bon fonctionnement de GEM Tirée du site Internet : http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn.comm	73
Figure 7.1	Superposition des TT [°C] à l'état initial de GEM-32 à un rapport de pression de 0,9950 (bleu) avec la NARR à 30 m le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta)	78
Figure 7.2	Superposition des TT [°C] à l'état initial de GEM-32 à un rapport de pression de 0,9950 (bleu) et une hauteur isobarique de 1000 mb (rouge).....	79
Figure 7.3	Superposition des TT [°C] de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z à une hauteur de 30 m (rouge) et de 1000 mb (magenta).....	80
Figure 7.4	Domaine GEM-32 sphérique à pôle basculé (bleu) superposé au domaine NARR-FST en projection polaire stéréographique.....	82
Figure 7.5	Écarts entres les valeurs de la GZ [dam] à l'état initial de GEM-32 et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z.....	84
Figure 7.6	Superposition des GZ [dam] à l'état initial de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 1000 mb	85

Figure 7.7	Écarts entre les valeurs de la TT [°C] à l'état initial de GEM-32 et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z.....	86
Figure 7.8	Superposition des TT [°C] à l'état initial de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 1000 mb	87
Figure 7.9	Écarts entre les valeurs de HU [kg/kg] à l'état initial de GEM-32 et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z.....	88
Figure 7.10	Superposition du vent [nœud] à l'état initial de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 1000 mb	89
Figure 7.11	Variations temporelles des écarts entre les valeurs de la GZ [dam] de GEM-32 et de la NARR, à une hauteur de 1000 mb	90
Figure 7.12	Superpositions des GZ [dam] à 9 heures de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 9 Z (magenta).....	91
Figure 7.13	Variations temporelles des écarts entre les valeurs de la GZ [dam] de GEM-32 et de la NARR, à une hauteur de 700 mb	92
Figure 7.14	Variations temporelles des écarts entre les valeurs de la TT [°C] de GEM-32 et de la NARR à une hauteur de 1000 mb	93
Figure 7.15	Superpositions des TT [°C] à 9 heures de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 9Z (magenta), à 1000 mb	94
Figure 7.16	Variations temporelles des écarts entre les valeurs de la TT [°C] de GEM-32 et de la NARR à une hauteur de 700 mb	95
Figure 7.17	Superpositions des TT [°C] à 9 heures de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 9Z (magenta) à 700 mb	96
Figure 7.18	Variations temporelles des écarts entre les valeurs de HU [kg/kg] de GEM-32 et de la NARR à une hauteur de 1000 mb	97
Figure 7.19	Superpositions de HU [kg/kg] à 9 heures de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 9Z (magenta), à 1000 mb	97
Figure 7.20	Variations temporelles des écarts entre les valeurs de HU [kg/kg] de GEM-32 et de la NARR à une hauteur de 700 mb	98
Figure 7.21	Superpositions de HU [kg/kg] à 9 heures de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 9Z (magenta), à 700 mb	99

Figure 7.22	Superposition du vent [nœud] à 9 heures de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 9 Z, à 1000 mb (magenta)100
Figure 7.23	Taux de précipitation [10^{-7} m.s ⁻¹] à 9 heures de GEM-32 (haut) et de la NARR (bas) le 18 janvier 2006 à 9Z.....103
Figure 7.24	Corrélation du taux de précipitation [m.s ⁻¹] entre les valeurs de GEM-32 et de la NARR à toutes les 3 heures de simulation.....104
Figure 7.25	Accumulation de la neige [m d'eau] à 9 heures de GEM-32 (dégradé) superposée à la présence de neige dans la NARR (magenta)105
Figure 7.26	Accumulation de la neige [m d'eau] à 18 heures de GEM-32 (dégradé) superposée à la présence de neige dans la NARR (magenta)106
Figure 7.27	Accumulation de la neige [m d'eau] à 27 heures de GEM-32 (dégradé) superposée à la présence de neige dans la NARR (magenta)107
Figure 7.28	Accumulation de la pluie verglaçante [m d'eau] à 27 heures de GEM-32 (dégradé) superposée à la présence de neige dans la NARR (magenta)108
Figure 7.29	Accumulation de la pluie [m d'eau] à 9 heures de GEM-32 (dégradé) superposée à la présence de neige dans la NARR (magenta)109
Figure 7.30	Domaine de GEM-5 (bleu) et GEM-32 (rouge), sphérique à pôle Nord basculé superposé au domaine NARR-FST en projection polaire stéréographique.....111
Figure 7.31	Écarts entre les valeurs de la GZ [dam] de à l'état initial de GEM-5 et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z.....112
Figure 7.32	Superposition des GZ [dam] à l'état initial de GEM-5 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 1000 mb113
Figure 7.33	Écarts entre les valeurs de la TT [°C] à l'état initiale de GEM-5 et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z.....114
Figure 7.34	Superposition des TT [°C] à l'état initial de GEM-5 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 1000 mb115
Figure 7.35	Écarts entre les valeurs de HU [kg/kg] à l'état initial de GEM-5 et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z.....116

Figure 7.36	Superposition des de HU [kg/kg] à l'état initial de GEM-5 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 1000 mb117
Figure 7.37	Superposition du vent [nœud] à l'état initial de GEM-5 (bleu) et de la NARR (magenta), à 1000 mb118
Figure 7.38	Taux de précipitation [10^{-7} m.s ⁻¹] à 9 heures de GEM-5 (haut) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 9Z (bas)122
Figure 7.39	Corrélation du taux de précipitation [m.s ⁻¹] entre les valeurs de GEM-5 et celles de la NARR et pour les 36 heures de la simulation123
Figure 7.40	Accumulation de la neige [m d'eau] à 9 heures de GEM-5 (dégradé) superposée à la présence de neige dans la NARR (magenta)124
Figure 7.41	Accumulation de la pluie verglaçante [m d'eau] à 27 heures de GEM-5 (dégradé) superposée à la présence de pluie verglaçante dans la NARR (magenta)125
Figure 7.42	Accumulation de la pluie [m d'eau] à 9 heures de GEM-5 (dégradé) superposée à la présence de pluie dans la NARR (magenta)126
Figure 7.43	Domaine sphérique à pôle basculé de la modélisation de GEM-5 (bleu) superposé au domaine GEM-32127
Figure 7.44	Taux de précipitation [10^{-8} m.s ⁻¹] à 9 heures de simulation de GEM5 (haut) et de GEM-32 (bas)130
Figure 7.45	Accumulation de neige [mm d'eau] à 9 heures de GEM-5 (haut) et GEM-32 (bas)132
Figure 7.46	Accumulation de pluie verglaçante [mm d'eau] simulée à 27 heures pour GEM-5 (haut) et de GEM-32 (bas)134
Figure 7.47	Accumulation de pluie [mm d'eau] simulée à 9 heures avec GEM-5 (haut) et GEM-32 (bas)136
Figure 7.48	Accumulation du nombre d'heures de givre utilisant les données NARR comme valeurs d'entrée Tirée de Dupire (Dupire, en cours), effectué dans le cadre de son mémoire138
Figure 7.49	Accumulation du nombre d'heures de givre utilisant les données GEM comme valeurs d'entrée Tirée de Dupire (Dupire, en cours), effectué dans le cadre de son mémoire139

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AEMN	Aérodynamisme des Éoliennes en Milieu Nordique
AMRS	Advanced Microwave Scanning Radiometer
ANA	Distribution analytique des tailles des gouttes
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BMF	Binary Model File
COMM	COmmunity for Mesoscale Modeling
DIAG	Distribution d'ordre 2 des tailles des gouttes (a_x diagnostique)
DM	Distributed Memory
EDF EN	Électricité De France Énergie Nouvelle
ÉTS	École de Technologie Supérieure
FIX0	Distribution d'ordre 2 des tailles des gouttes ($a_x = 0$ diagnostique)
FIX3	Distribution d'ordre 2 des tailles des gouttes ($a_x = 3$ diagnostiques)
FST	Standard File
GEM	Global Environnemental Multiscale
GEM-32	Simulation à 32 km de résolution spatiale
GEM-5	Simulation à 5 km de résolution spatiale
GRIB	GRIdded Binary or General Regularly-distributed Information in Binary form
HALO	Bordure externe du domaine globale modélisé
LAM	Limited Area Model
LIMA	Laboratoire de Recherche International des Matériaux Antigivre
M&Y	Milbrandt et Yau

MC2	Mesoscale Compressible Community
METAR	METeorological Aeroport Report
MPI	Message Passing Interface
NARR	North American Regional Reanalysis
NCAR	National Center Atmospheric Research
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NOMADES	National Operational Model Archive and Distribution System
NSERC	Natural Sciences and Engineering Research Council
NWP	Numerical Weather Prediction
NWS	National Weather Service
RDC	Recherche et Développement Coopérative
RPN	Recherche en Prévision Numérique
TM	distribution d'ordre 3 des tailles des gouttes
UQAC	Université du Québec à Chicoutimi
UQAM	Université du Québec à Montréal
WRF	Weather Research Forecasting

LISTE DES UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE BASE

kg	kilogramme
K	degré Kelvin
s	seconde

UNITÉS GÉOMÉTRIQUES

km	kilomètre
dam	décamètre
m	mètre
cm	centimètre
mm	millimètre
µm	micromètre

UNITÉS DE TEMPS

h	heure
min	minute
s	seconde

UNITÉS MÉTÉOROLOGIQUE

°C	degrés Celsius
Z	heure Zulu
kt	nœuds (1 kt = 0.514 m/s)
mb	millibar
kg/kg	kilogramme d'eau par kilogramme d'air sec
mm/h	millimètre par heure
Z	heure Zulu

UNITÉS MÉCANIQUE

kg/m ³	kilogramme par mètre cube
m/s	mètre par seconde
m/s ²	accélération gravitationnelle
Ghz	giga hertz
hz	hertz
°	degrés

UNITÉS DE PUISSANCE

kW	kilowatt
MW	mégawatt
J	joule

AUTRES

%	pourcentage
GB	Gigaoctet

LISTE DES SYMBOLES

$1/\lambda_X$	facteur de l'échantillon des hydrométéores[m]
Ep_{ice}	épaisseur de la glace captée [mm]
N_{0X}	concentration des hydrométéores par unité de volume initiale..... [m ⁻³]
$N_X(D)$	concentration des hydrométéores par unité de volume..... [m ⁻³]
P_{sol}	pression atmosphérique au sol[mb]
$\bar{T}$	température moyenne atmosphérique [K]
$\vec{U}$	vecteur du vent..... [m/s]
V_g	vent géostrophique[m/s]
a_X	dispersion du spectre des diamètres des hydrométéores..... [-]
d_{sonde}	diamètre de la sonde du détecteur de glace.....[m]
l_{sonde}	longueur de la sonde du détecteur de glace[m]
$m_{captée}$	masse de la glace captée[g]
m_{glace}	masse de la glace.....[g]
x_{ps}, y_{ps}	coordonnée en projection polaire stéréographique[m]
$x_{sphère}, y_{sphère}$	coordonnée sur une sphère ellipsoïde[m]
φ_0	latitude du plan sécant à la Terre [°]
D	diamètre des gouttes.....[m]
E	coefficient de captation [-]
e	épaisseur de la glace captée par le détecteur de glace Goodrich[m]
f	fraction de l'accumulation de glace..... [-]
F	fréquence de vibration de la sonde.....[hz]

$F.E.$	facteur d'échelle [-]
g	accélération gravitationnelle [m/s ²]
G_{ni}, G_{nj}	dimension du domaine globale de la modélisation [m]
GZ	hauteur géopotentielle [dam]
HU	humidité spécifique [kg/kg]
l_{ni}, l_{nj}	dimension du sous-domaine de la modélisation [m]
LWC	teneur en eau liquide [g/m ³]
P	pression atmosphérique [mb]
R	constante spécifique des gaz parfaits [J/kg.K]
r	rayon [m]
t	durée d'un évènement météorologique [s]
TT	température atmosphérique [°C]
u'	composante horizontale du vent après interpolation [m/s]
u	composante horizontale du vent [m/s]
v'	composante verticale du vent après interpolation [m/s]
v	composante verticale du vent [m/s]
V	vitesse de chute des gouttes [m/s]
X	catégorie d'hydrométéore [-]
Z	altitude [km]
θ	angle de rotation [°]
σ	hauteur en rapport de pression [-]
φ	latitude du pôle Nord [°]

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Les caractéristiques générales

L'industrie éolienne s'est manifestement améliorée depuis ces vingt-cinq dernières années. La puissance unitaire moyenne des éoliennes installée dans le monde est passée de 65 kW en 1985 à 2 MW en 2005. Depuis 2008, des turbines de 3,5 MW et de 5 MW sont rencontrées dans le commerce. Aujourd'hui, des recherches s'effectuent pour la construction de turbine pouvant fournir 12 MW. Ces chiffres démontrent une réelle augmentation de la capacité installée. En effet, depuis ces dix dernières années, cette capacité croît de 25 % à 30 % par année (Saulnier B. et Reid R., 2009). Ainsi, le domaine éolien est en pleine expansion. Cette expansion se voit également dans les climats froids. Toutefois, les conséquences à de telles localisations entraînent des pertes de puissances des parcs ou des risques de bris prématurés des matériaux (Peltola E. et al., 2005).

1.2 La présentation de la recherche

Le projet de maîtrise présenté dans ce mémoire est un élément d'un projet plus global dont l'objectif est de produire un atlas de givre à résolution suffisante pour l'industrie éolienne pouvant répertorier les événements givrants selon la fréquence, la durée et l'intensité. Pour définir ces caractéristiques, plusieurs classes sont estimées en s'appuyant sur un index du givre, qui à son tour ciblera une échelle de sévérité (Fortin et Perron, 2009). Cet index est calculé à l'aide de charte de sévérité du givre et en fonction des profils aérodynamiques des éoliennes, du type d'hydrométéore ainsi que d'une fréquence d'apparition. Cet atlas permettra d'évaluer les pertes de productions dues au givre et d'obtenir de meilleures prévisions de la puissance d'un parc éolien. Par ailleurs, il pourra également être utile lors de l'analyse d'un site potentiel pour effectuer un choix judicieux concernant le type d'éolienne, adéquat au climat, et les instruments appropriés à l'analyse du parc. Ce projet effectué dans le cadre d'un projet de collaboration entre l'IREQ (Institut de Recherche d'Hydro-Québec) et la

Chaire de recherche AEMN (Aérodynamique des Éoliennes en Milieu Nordique) de l'ÉTS (École Supérieure de Technologie). Ce projet est financé par le CRSNG (Conseil de Recherche en Science Naturelle et Génie) dans le cadre du programme RDC (Recherche et Développement Coopératif). Par ailleurs, des chercheurs du LIMA (Laboratoire Internationale des Matériaux Antigivrant) de l'UQAC (Université du Québec À Chicoutimi) sont également impliqués dans ce projet. Cet atlas est réalisé par un doctorant et deux étudiants de maîtrise. L'investigation du premier étudiant de maîtrise consiste à faire une cartographie du givre au niveau du moyeu. À partir des fichiers météorologiques de ré-analyses de la NARR (North American Regional Reanalysis), il adapte la méthodologie des indicateurs de givre, développée par Comeau pour le givre au sol (Comeau, 2006) à la hauteur des moyeux d'éolienne. L'étude du second étudiant de maîtrise est décrit dans ce mémoire consiste à utiliser de la NARR afin de piloter les simulations méso-échelle afin de déterminer les différents types précipitations à un temps donné et un lieu précis. L'utilisation d'un modèle de prévision atmosphérique permettra de considérer la topographie. Pour ce faire, une première validation s'effectue à l'échelle de la NARR, puis à plus fine échelle, soit à 5 km de résolution spatiale. Pour cette validation, aucune cascade n'a été utilisée. De ces deux recherches, l'étudiant au doctorat pourra ainsi élaborer un atlas du givre au niveau du moyeu tout en considérant la topographie plus fine que celle de la NARR.

1.2.1 Les objectifs

L'objectif principal de cette maîtrise est de développer une méthodologie afin d'automatiser les simulations des événements de givre utilisant les fichiers de la NARR comme données d'entrée au modèle de prévision numérique GEM (Global Environmental Multi-scale) afin d'effectuer des simulations atmosphériques à méso-échelle. L'utilisation de fichiers météorologiques de la ré-analyse permet d'effectuer un atlas répertoriant les événements givrants valides de 1979 à 2008 englobant le Canada et les États-Unis. Pour cette étude, deux simulations seront effectuées. Une première modélisation s'effectue à une résolution spatiale de 32 km, soit la même que celle de la NARR et englobe le Canada. La décision de faire un premier calcul à cette résolution permet de valider la cohérence des fichiers de la ré-analyse

modélisés avec GEM. Toutefois, cette résolution ne tient pas compte de certains phénomènes météorologiques, car l'échelle est trop grossière. C'est pourquoi une seconde série de calculs est effectuée à plus fine échelle et permet de démontrer la possibilité de modéliser des paramètres de précipitations givrantes à plus fine échelle. Cette modélisation est à une résolution de 5 km et contient uniquement le Québec. Cette modélisation à plus fine échelle permet de reproduire les phénomènes d'ascension ou de subsistance des masses d'air. Par ailleurs, cette modélisation pourra être observée les précipitations locales, essentiel à la confection d'un atlas du givre consistant à déterminer localement la fréquence, la sévérité et la durée des événements de givrage atmosphérique. Pour les deux modélisations, les simulations et les validations s'effectuent sur une période de 36 heures, soit du 18 janvier 2006 à 0 Z au 19 janvier 2006 à 12 Z. L'objectif secondaire de ce mémoire est la confection d'un banc d'essai contenant un pluviomètre et un détecteur de givre qui pourront servir comme base de validation par le doctorant.

1.2.2 La méthodologie

Les données de la NARR sont disposées sur une projection et un format GRIB (GRIdded Binary ou General Regularly-distributed Information in Binary form) qui n'est pas compatible avec le modèle de prévision numérique GEM. Il est donc nécessaire d'effectuer un changement de coordonnées et une interpolation des variables météorologiques vers les points d'un maillage 'équivalent' dans une nouvelle projection compatible avec GEM. Le laboratoire numérique développé dans le cadre de ce travail de maîtrise comprend, dans un premier temps, le téléchargement des fichiers de ré-analyses via le site internet de NOMADS (National Operational Model Archive and Distribution System) du NCEP (National Center for Environmental Prediction). Ces fichiers constituent une base de données de 1979 à 2008 à une résolution temporelle de 3 heures et englobent l'Amérique du Nord (NCEP, 1979). Les deux projections étudiées dans cette étude et utilisées par le modèle de prévision numérique GEM sont la projection cylindrique (latitudes et longitudes perpendiculaires) et polaire stéréographique (RPN-COMM, 1979). En réponse à l'analyse de ces 2 types de projection, il est démontré, dans cette étude, que la projection polaire stéréographique

contient un maximum de données de la NARR et a donc été adoptée dans ce projet. Dans un deuxième temps, un utilitaire réalisant les étapes nécessaires à la conversion de fichiers GRIB à FST (Fichier STandard) a été développé.

Pour cette étude, GEM est utilisé en mode LAM (Limited Area Model). Ce modèle atmosphérique a donc besoin d'un pilotage latéral, provenant de la NARR durant la période de simulation. C'est pourquoi la projection de la NARR doit être convertie dans une des projections pouvant être inscrites dans les FST, afin qu'elle soit compatible avec GEM. Une fois ces nouveaux fichiers écrits, ils peuvent être utilisés en tant que fichiers d'entrée au modèle de prévision numérique. La validation s'effectuera en comparant les données de sorties du modèle, à une résolution spatiale de 32 km et de 5 km, avec celles contenues dans la NARR. Concernant la modélisation à 5 km de résolution spatiale, aucune «cascade» n'est effectuée. Le laboratoire numérique de la simulation des événements de givre développé dans le cadre de ce travail de maîtrise est une implantation de cette méthodologie.

1.3 La structure du mémoire

Suite à ce premier chapitre d'introduction, les chapitres 2, 3 et 4 font parties de la revue de la littérature. Le chapitre 2 définit l'enjeu de l'implantation des parcs éoliens dans les climats nordiques. Par le fait même, les différentes cartographies de précipitations y sont énumérées. Le chapitre 3 apporte une brève définition de la météorologie dans les climats froids. Les caractéristiques différenciant les hydrométéores y sont décrites ainsi que les phénomènes responsables de leur croissance. De même que les distinctions entre le givre et le verglas sont décrites. Le chapitre 4 apporte une brève description sur les paramètres du modèle de prévision numérique et définit les fichiers météorologiques utilisés pour cette étude.

Le chapitre 5 comprend les étapes nécessaires à la mise en place d'une tour météorologique ainsi qu'une description du choix des instruments de mesure. Cette tour de mesure permet d'obtenir des mesures *in situ* d'observation du givrage atmosphérique. Cette acquisition de données permettra une validation plus poussée.

Le chapitre 6 décrit la méthodologie dans le cadre de ce projet de maîtrise en énumérant les outils informatiques utilisés, en définissant le type de grille générée et en expliquant la préparation de l'environnement de travail pour la modélisation atmosphérique.

Le chapitre 7 présente les résultats obtenus.

Ce dernier chapitre est suivi par la conclusion qui ressort les points importants du mémoire et résume les résultats. Par la suite, des recommandations sont émises.

CHAPITRE 2

LA CARTOGRAPHIE DU GIVRE

2.1 L'éolien en milieu nordique

Il y a plusieurs avantages à l'installation des éoliennes en milieu nordique tels que la masse volumique de l'air plus élevée ou encore la vitesse de vent plus importante (Peltola E. et al., 2005). Ces augmentations accroît considérablement la puissance disponible dans le vent (Manwell J.F., McGowan J.G. et Rogers A.L., 2002). Toutefois, les basses températures peuvent occasionner des bris des matériaux et l'arrêt des éoliennes. La température ambiante est un paramètre essentiel à connaître pour le choix des composantes des éoliennes telles que le diamètre du rotor, la programmation des réglages du calage des pales ou encore des matériaux utilisés. Une éolienne commerciale moderne peut fonctionner à des températures avoisinant -20°C. En dessous de cette valeur, l'éolienne doit être construite avec des aciers spéciaux capables de résister à de plus faible température (Saulnier B. et Reid R., 2009). Au Canada, ces aciers sont d'usage courant et ne sont donc pas plus dispendieux que les bons aciers ordinaires.

L'accrétion de la glace sur des structures, telles que des câbles électriques, des pylônes, des ailes d'avions ou encore des pales d'éoliennes, cause des dommages matériels et accroît les risques et le danger pour les humains (Leblanc, 2007). Sur les structures des éoliennes, cette accumulation se forme surtout au niveau des pales en réduisant l'efficacité aérodynamique, ce qui diminue la production de puissance d'un parc et augmente les bris mécaniques et électriques, les vibrations, le débalancement des turbines, l'arrêt des turbines ou encore le bris de la structure (Fortin et Perron, 2008). Les deux méthodes rencontrées sur le marché pour remédier aux problèmes de l'accumulation de la glace sont l'antigivre et le dégivrage. La structure des équipements de dégivrage englobe l'électro thermique, les micro-ondes, un courant d'air chaud ou encore les produits chimiques. L'antigivre regroupe la fabrication de revêtements glaciophobes ou encore l'application de peinture noire. Dans les deux cas, des coûts d'installations et d'analyses sont nécessaires.

Le nombre d'évènements, l'intensité et la fréquence du givrage sont des paramètres essentiels à connaître afin d'optimiser le dégivrage et ainsi de déterminer le mode d'opération à prendre. De même que ces informations permettent de calculer l'estimation de la production du parc ainsi que l'augmentation de la durée de vie des matériaux. Il est donc important de protéger certains parcs éoliens quant aux évènements givrants afin de prévenir les bris et tenter de réduire les coûts d'exploitation. Ainsi, une prévision du givre permet de mieux connaître l'emplacement géographique des évènements ainsi que d'acquérir une meilleure connaissance sur leurs fréquences et leurs durées. Il n'existe toutefois pas encore de programmes ou de méthodes développées pour estimer les pertes de production du au dégivrage (Barring-Gould I. et al., 2010).

2.2 Les atlas du givrage atmosphérique

L'atlas du givrage atmosphérique consiste à documenter, à l'aide de cartes géographiques, la répartition spatiale et temporelle des évènements givrants. Généralement, de tels atlas montrent les heures annuelles de givrage ou leur fréquence, sans tenir compte de la topographie locale (Comeau, 2008). Le projet « New Ictools » propose une méthode d'évaluation du climat givrant (Tamelin B. et al., 2005). Il consiste à détecter les évènements givrants particulièrement pour les fabricants, les opérateurs et les consultants dans le développement de l'énergie éolienne en Europe. Ce projet permettra par exemple, d'acquérir des informations concernant les statistiques d'apparitions des évènements givrant en fonction de différents sites, d'améliorer les connaissances des équipements de dégivrage et d'antigivrage, d'améliorer la sécurité des humains à proximité ou encore les statistiques d'opération des éoliennes sous des conditions givrantes. Pour étudier un site en climat froid, il est conseillé d'y effectuer des mesures du site, de tenir compte de la topographie locale et d'utiliser les données d'aéroports. Ces dernières données fournissent généralement plus d'information qu'une tour de mesure. Par ailleurs, Hydro-Québec possède un réseau de glaciomètre connu sous le nom de « Passive Ice Meters ». Ce collecteur permet d'évaluer les dépôts de glace sur des surfaces horizontales et cylindriques représentant les quatre points

cardinaux. Ces analyses permettent d'évaluer l'accumulation de glace sur une ligne électrique et de déterminer la fréquence des événements.

Il est possible de créer une base de données fiable pour la caractérisation des climats froids en se basant sur des instruments météorologiques. Ces instruments permettent d'effectuer une mesure directe du site sans devoir établir des approximations ou des corrélations. Toutefois, l'entretien de ces instruments doit être fait continuellement et des données peuvent être manquantes. Les données manquantes sont généralement due aux bris des instruments, à un mauvais enregistrement des valeurs ou alors à l'accumulation de glace. De même que certaines données sont confidentielles et il est difficile, voir impossible, d'y accéder. De plus, ces instruments doivent être à proximité d'une source d'électricité ce qui enlève l'opportunité de sonder l'atmosphère dans des régions reculées. Une telle base de données doit alors contenir des algorithmes devant unifier l'enregistrement, autant spatial que temporel. Il est donc essentiel d'effectuer une cartographie du givre avec des données observées en complémentarité à des données simulées à l'aide de modèle atmosphérique tel que GEM.

2.3 La modélisation du givrage atmosphérique

Le principal avantage de la modélisation spatiale du givrage est la possibilité d'effectuer une évaluation quantitative des paramètres de précipitation sur un maillage uniforme. Grâce à de tels modèles, il est également possible d'obtenir des données pour une résolution temporelle de l'ordre de la minute et à fine échelle. De telles résolutions peuvent être plus fines que celles des données d'aéroports ou des mâts de mesure. Aujourd'hui, ces modèles prennent en considération davantage de paramètres météorologiques décrivant mieux les phénomènes de précipitations. Ces modèles sont très complexes et sont basés sur une meilleure connaissance des phénomènes météorologiques. De plus, l'amélioration de ces modèles est bénéfique autant pour l'augmentation de la précision de la modélisation à fine échelle que sur la diminution du coût du calcul. Grâce à la modélisation, il est possible d'établir une base historique des valeurs des précipitations givrantes. Cependant, il n'existe pas d'atlas caractérisant l'accumulation de glace en utilisant de telles données.

Aujourd'hui, il n'existe pas de bases de données historiques sur les événements du givre. Toutefois, certains modèles simulent des faits historiques pour une courte période afin de comprendre un événement en particulier ou encore pour connaître l'efficacité du modèle à les simuler. Il est important d'avoir un atlas répertoriant ces événements sur une base historique, car ils sont variables d'un hiver à l'autre.

D'autres modèles reposent sur des statistiques en s'appuyant sur des valeurs de certains paramètres météorologiques. Ces modèles estiment des périodes de givrage atmosphérique en s'appuyant sur l'humidité relative et la température de même que certains utilisent la hauteur des nuages, la nébulosité et la visibilité (Comeau, 2009). Toutefois, ce type de modèle ne prend pas en compte toute la complexité des précipitations de l'atmosphère, telle que la microphysique des nuages.

Certains atlas de givre du Canada et même du Québec sont publics (Voir ANNEXE I, p.145). Les atlas concernant la pluie verglaçante répertorient : les heures moyennes annuelles (McKay et Thompson, 1969), le nombre de jours moyens ou encore la fréquence annuelle du nombre de ces événements (Laflamme et Periard, 1996). Il existe d'autres atlas incluant la pluie et la bruine verglaçantes (Stuart et Isaac, 1999) ou encore la pluie, la grêle verglaçantes (Cortinas et al., 2004). Cependant, il n'existe pas de cartes démontrant la répartition du givre due à des brouillards givrants, phénomènes fréquents au Québec, ou encore la différenciation du type d'accrétion formant du givre ou du verglas (Comeau, 2008).

Dans le cadre du projet de la confection d'un atlas givrant, Comeau (Comeau, 2008) a fait une étude qui consistait à déterminer le nombre d'heures annuel des événements givrants au sol. Pour arriver à ses fins, elle a effectué une archive des données METAR (METeorological Airport Report) et des données de la NARR (North American Regional Reanalysis). Elle a uniformisé la résolution spatiale et temporelle de ces données pour une meilleure comparaison entre les deux types de fichiers et ainsi obtenir d'avantages de données METAR. Les événements givrants sont détectés lorsque l'humidité relative est supérieure à 92 % et que la température est inférieure à -10°C. Par la suite, le temps total, où de

l'accumulation de glace est détectée, est calculée et la moyenne des heures de toutes les années est déterminée. Toutefois, la complexité de la météorologie n'est pas considérée, telle que la topographie ou encore la physique des nuages. Le projet d'Aurélien Gayraud (Gayraud, 2009) a consisté à modéliser les précipitations givrantes avec le modèle de prévision atmosphérique MC2 (Mesoscale Compressible Community) est utilisé avec une sous version du schéma de microphysique de Milbrandt et Yau (Gayraud, 2009). Elle a fait son étude pour 3 événements distincts et les résultats sont prometteurs. Cette étude a démontré de bons résultats concernant les variables de précipitations. La cartographie du givre devra être effectuée à l'aide de statistique déterminant les fréquences et l'intensité des événements, supportés par la détection, la différenciation des types de précipitations et d'accumulations grâce à un modèle de prévision numérique.

CHAPITRE 3

LA MÉTÉOROLOGIE DES CLIMATS FROIDS

Pour effectuer une modélisation numérique de l'atmosphère, dont l'élaboration s'appuie sur des lois fondamentales de la physique et de la dynamique, il est important de comprendre les phénomènes météorologiques. Ces derniers varient principalement en fonction de la température, de l'humidité, de la pression, des aspérités de la surface terrestre, de l'action du soleil ou encore de la vitesse du vent.

3.1 La météorologie physique

La météorologie physique comprend le rayonnement électromagnétique, la thermodynamique météorologique et la physique des nuages. Le rayonnement électromagnétique est le rayonnement du Soleil absorbé ou réfléchi par la Terre et l'atmosphère. Les variations de ce rayonnement électromagnétique provoquent les changements de température qui engendrent les variations de pression et de vitesse du vent. La formation des hydrométéores et la formation des différents types de précipitations, solide et liquide, sont également dépendantes de cette variation de température. L'interaction complexe entre les variables d'État est régie par des lois thermodynamiques de la météorologie. Enfin, la physique des nuages étudie principalement les particules formant les nuages appelés hydrométéores ainsi que leurs précipitations.

3.2 La météorologie dynamique

La météorologie dynamique permet d'expliquer les mouvements de l'atmosphère à l'origine des déplacements des masses d'air. Les forces définissant l'équation du mouvement sont définies par deux catégories. Dans un premier temps, il y a les forces dites apparentes telles que la force centrifuge et la force de Coriolis. Puis, il y a celles dites réelles qui englobent la force du gradient de pression, la force de gravité et la force de (Wallace et Hobbs, 2006). Les mouvements atmosphériques reposent sur trois lois fondamentales qui sont la conservation

de la masse, la conservation de l'énergie et la conservation du mouvement. Ces lois sont définies par les équations de Navier-Stokes, équations aux dérivées partielles non linéaires décrivant les mouvements des fluides dans l'approximation des milieux continus. Ces équations permettent de suivre les variations des conditions atmosphériques. Les processus de la microphysique sont dépendants des mouvements atmosphériques en trois dimensions et connexes à la variable temporelle. Par exemple: l'augmentation de l'écoulement du vent dans un cumulonimbus favorise l'accroissement par collection des gouttelettes, la migration d'une masse d'air peut amener à la dissipation d'un brouillard ou encore l'élévation de l'air chaud et humide peut provoquer de la précipitation. Ainsi, la formation des différents hydrométéores et leurs précipitations sont en fonction des mouvements atmosphériques.

3.3 Les précipitations

Les nuages se forment suivant les phénomènes de condensation et d'évaporation. L'air est un mélange d'air sec, de vapeur d'eau et est considéré comme un gaz parfait. Lorsque ce mélange gagne de l'altitude, ce gaz se refroidit par expansion et condense. Quatre mécanismes principaux peuvent être à l'origine de ce processus (Ahrens, 2007). Le premier est convectif. Ce phénomène est observé lorsque le sol a emmagasiné assez de chaleur provenant du rayonnement solaire et qu'une masse d'air froide le traverse. Sous l'effet de la poussée d'Archimède, l'air chaud monte, se refroidit et se condense. Des gouttelettes se forment et créent un nuage. Le deuxième mécanisme rencontré est la convergence. Plusieurs masses d'air convergent en un point au sol créant une compression. La pression étant plus faible en altitude, l'air a tendance à s'élever pour retrouver un équilibre. De cette ascension, l'air se condense. Le soulèvement peut également se faire en raison de l'orographie : lorsqu'elle rencontre une montagne, celle-ci monte en altitude et le phénomène de condensation débute. Finalement, la création de nuage s'observe lorsqu'un front chaud rencontre un front plus froid et de ce fait, l'air chaud se condense. La Figure 3.1 démontre ces quatre mécanismes.

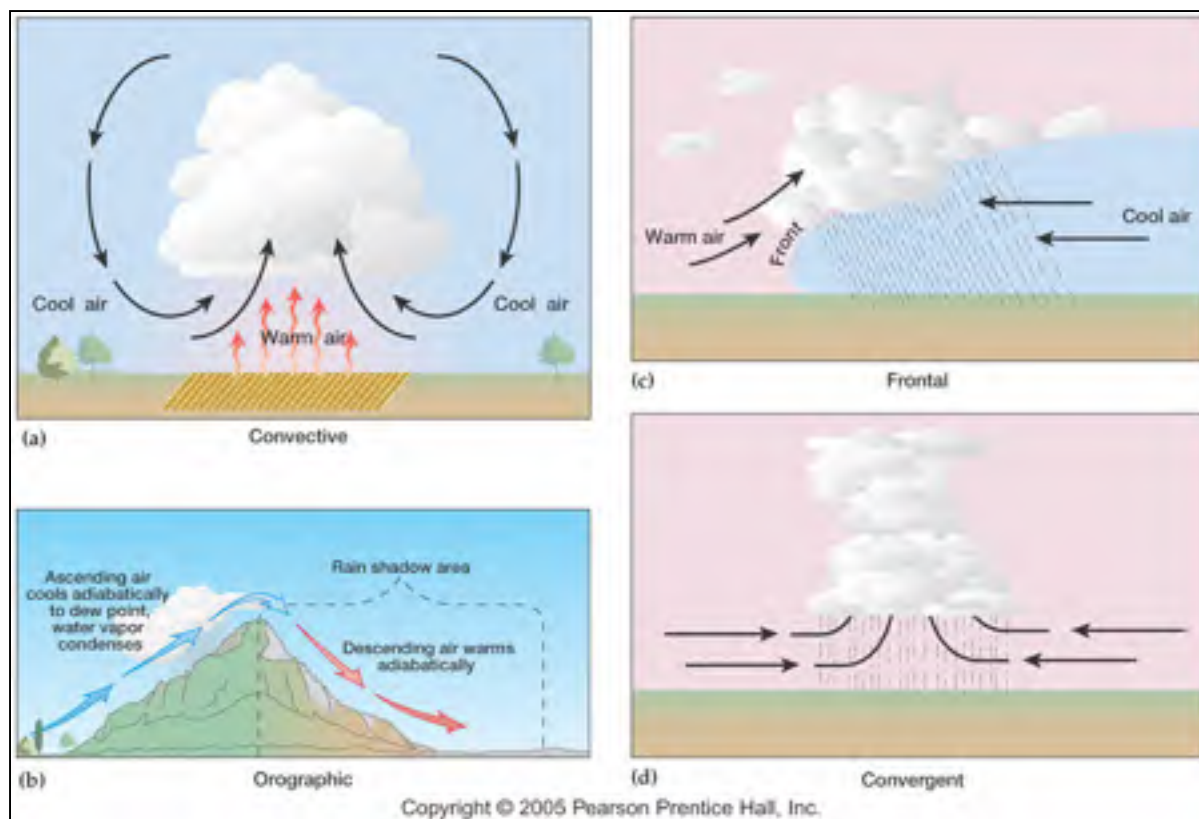


Figure 3.1 Représentation des mécanismes responsable de la formation des nuages
Tiré du site Internet : <http://web.gccaz.edu>

Lorsqu'une gouttelette est formée, elle peut être statique, monter ou redescendre. Si elle redescend, le processus d'évaporation peut s'amorcer ou alors elle peut croître par collection à d'autres gouttelettes. Si elle monte, elle peut également croître par collision et coalescence. Ces processus contribuent à la croissance des gouttelettes ou encore des nuages. Les noyaux de condensation doivent avoir une taille d'au moins $0.2 \mu\text{m}$. Pour que ces noyaux de condensation quittent le nuage, il doit prendre de l'expansion. La taille d'une gouttelette nuageuse est d'environ 0.02 mm , soit 100 fois plus grosses qu'un noyau de condensation. Pour obtenir de la précipitation liquide, une goutte nuageuse atteindra en moyenne un diamètre de 2 mm . Par ailleurs, une goutte nuageuse ayant un diamètre de 0.5 mm est considérée comme étant de la bruine. La Figure 3.2 répertorie ces diamètres.

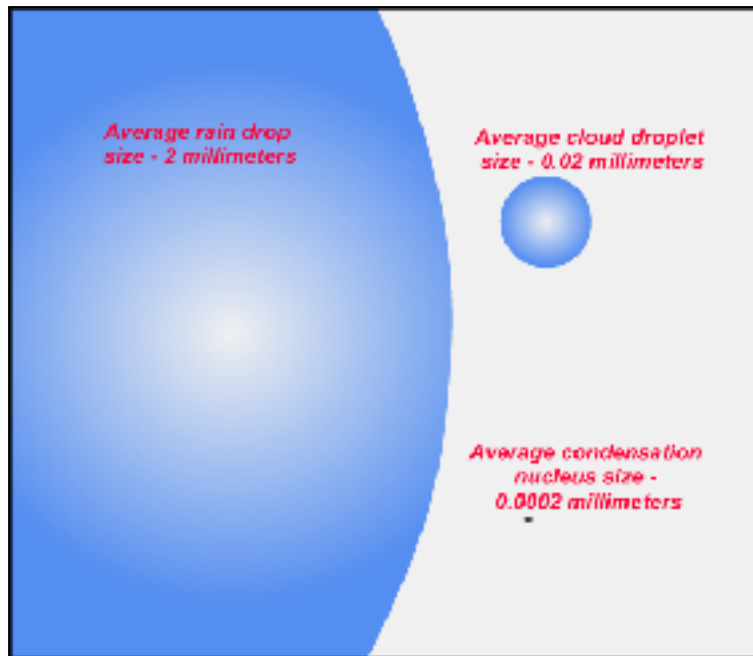


Figure 3.2 Taille relative d'une goutte de pluie,
d'une goutte nuageuse et d'un noyau de condensation
Tirée de Ahrens C.D. (2007, p.164)

La distinction de la taille des hydrométéores peut se faire à l'aide d'instruments météorologiques ou encore grâce à la modélisation. La distinction des différents hydrométéores demeure sensible étant donné les petites dimensions à observer et les microprocessus permettant la croissance des gouttes.

3.3.1 Les phénomènes responsables de la croissance des hydrométéores

L'équilibre des gouttes nuageuses formant un nuage dépend de l'équilibre entre les phases d'évaporation et de condensation. Si cet équilibre subsiste, il existe alors un équilibre dynamique entre l'eau liquide et la vapeur d'eau. Pour que des noyaux de condensations atteignent les dimensions nécessaires pour générer de la précipitation, deux phénomènes entrent en jeu, la collision et la coalescence (Ahrens, 2007). En mouvement dans le nuage, les plus grosses gouttes captent les plus petites, augmentent leur volume et leur masse. Ce phénomène est la collision et apparaît lorsque les gouttes ont des tailles et des vitesses de

chutes différentes. La coalescence est le processus qui définit le fusionnement entre les petites gouttes et les grosses gouttes. Ces deux phénomènes sont observés dans les nuages chauds où la température de leur base est supérieure de l'isotherme 0°C . Dans ce type de nuage, les hydrométéores formés sont liquides ou gazeux. Dans le cas où l'eau est sous forme liquide dans un environnement où la température est inférieure au point de congélation, on dit que l'eau est en surfusion. La congélation de l'eau dans l'air pur, soit sans particules solides en suspension, peut se faire autour de -40°C (Ahrens, 2007). Ce cas est extrêmement rare, car l'atmosphère contient des particules solides hydrophiles favorisant l'activation de la glaciation de l'eau en augmentant la température de solidification.

Dans un nuage froid, le type de précipitation diffère en fonction de la taille des hydrométéores ainsi que de la stratification de la température de l'atmosphère. Trois mécanismes physiques distincts ont été observés pour la formation de noyaux de congélations (Ahrens, 2007). Le premier mécanisme se définit par de la vapeur d'eau se déposant sur un noyau glacé et gèle à son contact. Dans ce procédé, l'eau passe de l'état vapeur à l'état solide sans passer par la phase liquide. Le second mécanisme résulte d'un noyau de congélation se trouvant prisonnier d'une gouttelette d'eau. L'eau passe de la phase liquide à solide et contribue à l'augmentation de la masse du noyau de congélation. Enfin, le dernier mécanisme est de l'eau en surfusion subissant un choc mécanique. Dans ce cas, le noyau congèle instantanément. Dans un nuage froid, ce choc est généralement occasionné par une goutte rencontrant un cristal de glace, ce phénomène est l'accrétion. C'est également ce phénomène qui est souvent la cause de l'accumulation de glace sur les pales des éoliennes. Lorsque le moyeu se trouve dans un nuage froid, les pales balayent ces gouttes surfondues et sous l'effet du choc, les gouttes se solidifient et s'accumulent sur les pales. Une fois que le noyau de congélation est formé, son accroissement se fait selon deux mécanismes. Le premier est l'effet Bergeron et explique la croissance des cristaux de glace sous le point de congélation. Ce mécanisme est représenté à la Figure 3.3. Dans ce cas, la pression de vapeur saturante de l'air ambiante est supérieure à celle de la glace. Il y a donc un transfert d'eau, sur les cristaux de glace. Le second processus est l'agrégation de petits cristaux de glace sur de plus gros cristaux de glace.

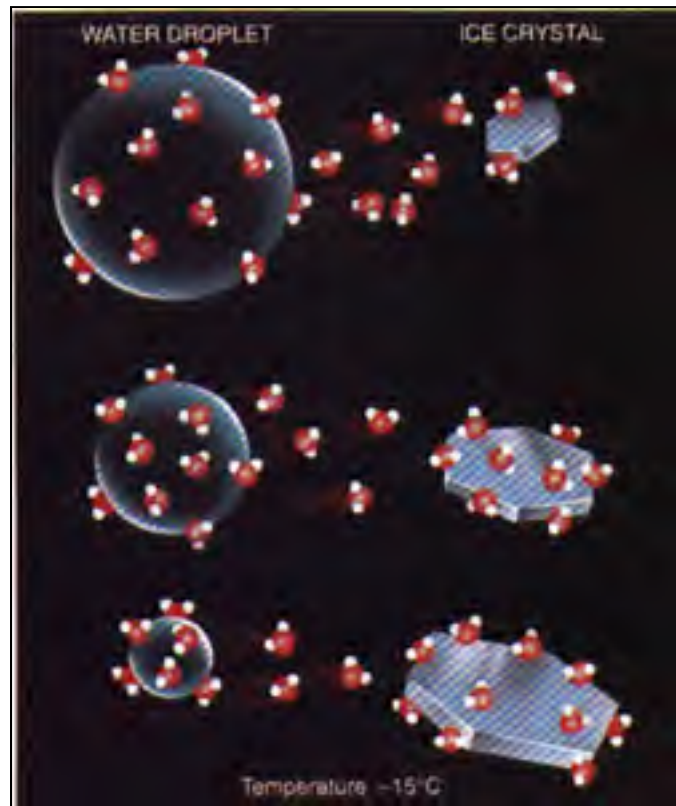


Figure 3.3 L'effet Bergeron
Tirée de Ahrens C.D. (2007, p.170)

3.3.2 Les différents types de précipitations

Les types de précipitation peuvent appartenir à l'état solide ou liquide. Puis, grâce à la stratification de la température de l'atmosphère, l'état de l'eau peut alterner jusqu'au sol. Les hydrométéores atteindront des diamètres différents dépendamment s'ils constituent de la bruine ou du brouillard ou encore selon le type de précipitations suivantes : le virgas, la pluie, la neige ou encore la grêle (Ahrens, 2007).

3.3.2.1 Le virgas

Le virgas est une précipitation des hydrométéores qui n'atteignent pas le sol. Dans ce cas, la pression partielle de la vapeur d'eau de l'air ambiant non saturée n'est pas en équilibre avec

les particules. Les gouttes d'eau ou les cristaux de glace formés perdent de la matière en sortant d'un nuage ce qui provoque leur ascension. Ce type de précipitation ne crée pas d'accumulation d'eau liquide ou solide au sol, mais peut ensemençer d'autres nuages plus bas ou engendrer de la turbulence.

3.3.2.2 La brume et le brouillard

Les gouttes d'eau liquide possédant un diamètre inférieur à 0.5 mm forment de la brume. Elles sont observées dans les nuages chauds à basse altitude et elles sont en suspension dans l'air. La brume est souvent observée dans les régions côtières ou très humides. Elle apparaît lorsque les mouvements verticaux ne sont pas assez forts pour créer le phénomène de collision. Le brouillard est également formé de fines particules d'eau solide ou liquide en suspension, mais plus dense que la brume. Il est de même composition qu'un nuage, mais sa base touche le sol. La visibilité par temps de brume est supérieure à celle par temps de brouillard. Sa formation est due à une diminution de la température créant de la condensation ou de la sublimation. Ce refroidissement résulte souvent du cycle diurne ou encore d'une masse d'air chaud traversant une surface froide. Il existe différents types de brouillards tels que radiatif, orographique, de précipitation, d'advection, d'inversion ou d'évaporation. Lorsque la température est suffisamment basse, les gouttelettes en surfusion gèlent au contact d'un objet. C'est la formation de brouillards givrants.

3.3.2.3 La pluie

La pluie est une précipitation entièrement liquide. Les gouttes de pluie atteignant le sol sont généralement d'un diamètre supérieur à 5 mm. Si la pluie provient d'un nuage froid, elle sera sous forme solide en sortant du nuage et au fur et mesure qu'elle se rapprochera du sol, sa température augmentera et se liquéfiera. La pluie est givrante lorsque les hydrométéores traversent une masse d'air dont la température est sous le point de congélation.

3.3.2.4 La neige

La neige est dite sèche ou mouillée, appelée également neige fondante. Dans le premier cas, les flocons de neige ne traversent pas de masse d'air dont la température est supérieure au point de congélation. Toutefois, s'ils traversent une masse d'air chaud, ils se liquéfient pour devenir de la neige mouillée.

La Figure 3.4 montre les profils de température différenciant la neige sèche, la neige fondante, la pluie verglaçante et la pluie. La neige dite sèche est observée lorsque les hydrométéores traversent une atmosphère où la température est toujours sous le point de congélation. La neige dite mouillée ainsi que la pluie verglaçante sont observées lorsque les hydrométéores gelés traversent une couche atmosphérique où la température est supérieure au point de congélation, puis traverse une couche atmosphérique où la température est inférieure au point de congélation. Toutefois, de la pluie verglaçante sera formée si la couche atmosphérique, où la température est au-dessus du point de congélation, est plus importante. Finalement, de la pluie est observée si la couche atmosphérique possède une température supérieure au point de congélation.

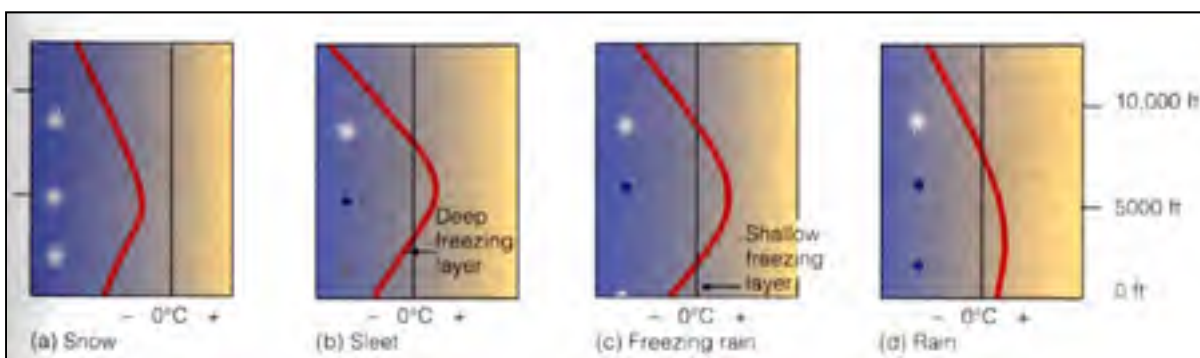


Figure 3.4 Différenciations entre la neige sèche (a), la neige fondante (b), pluie verglaçante (c) et la pluie (d)
Tirée de Ahrens C.D. (2007, p.182)

3.3.2.5 Grêle

La grêle peut être considérée comme douce ou dure. Dans le premier cas, l'hydrométéore a une forme quasi sphérique et un diamètre entre 2 et 5 mm. Ils sont légers et fragiles. Au contact du sol, ils peuvent rebondir ou se fracturer. Ils sont généralement formés de plusieurs gouttes d'eau gelées. La grêle classifiée de dure a une forme irrégulière et a un diamètre supérieur à 5 mm. Ils sont généralement formés en collectionnant beaucoup d'amas de grêle douce.

3.4 Les différentes formations de la glace

On distingue différents types de glaces : la neige mouillée, le verglas, le givre dit dur et le givre dit mou. La neige mouillée a pour densité entre 300 kg/m^3 à 600 kg/m^3 . Son adhésion est faible, toutefois, gelée elle peut s'avérer de forte adhésion. Le givre et le verglas ont une adhérence beaucoup plus importante.

3.4.1 Le verglas

Le verglas est de l'eau en surfusion qui s'est solidifié après un choc mécanique. Au sol, le verglas se forme à une température avoisinant 0°C . Une fraction de l'eau gèle et de l'eau liquide reste prisonnière de la glace. La glace, se formant presque instantanément, a une apparence transparente. La Figure 3.5 représente l'apparence de ce type d'accrétion. Par conséquent, sa densité maximale se rapproche de celle de l'eau liquide, soit 917 kg/m^3 . Des tests en soufflerie ont démontré que son accumulation sur un objet cylindrique épousait sa forme et ressemblait à une lentille.



Figure 3.5 Image du verglas

Tirée du site Internet : <http://www.linternaute.com/verglas/>

3.4.2 Le givre

Il y a formation de givre lorsque toute l'eau liquide de la gouttelette d'eau en surfusion se solidifie avant l'impact sur un l'objet. Ainsi au sol, lorsqu'il y a accumulation de givre, quelques particules d'air sec demeurent emprisonnées d'où son aspect visuel laiteux et opaque. La température finale de la glace, qui recouvrira une pale d'éolienne par exemple, est inférieure à la température de solidification de l'eau et supérieure celle de l'air ambiant. Sa densité est comprise entre 600 et 850 g/m^3 . Des tests en soufflerie ont démontré que son accumulation sur un objet cylindrique n'épousait pas la forme de l'objet et de petites cornes on tendance à se former telles que le démontre la Figure 3.6. L'accumulation de givre réduit la portance des pales d'une éolienne plus que celle du verglas. La Figure 3.7 montre un exemple d'accumulation de givre observée au Lac Alfred.

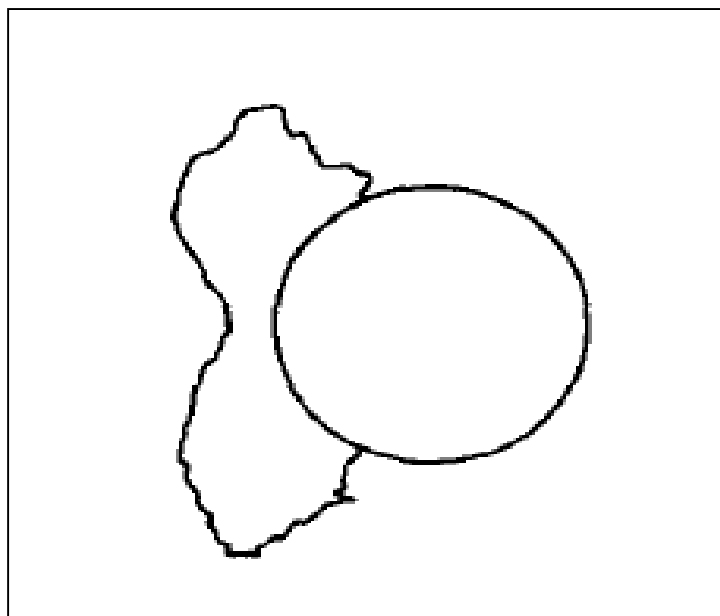


Figure 3.6 Accumulation du givre sur un tube
Tirée de Lozowski et al. (1983, p.6)



Figure 3.7 Événement de givre au Lac Alfred
Donné gracieusement par Saint-Laurent Énergie

CHAPITRE 4

LA PRÉVISION NUMÉRIQUE EN AMÉRIQUE DU NORD

Les modèles de prévisions numériques sont conçus pour effectuer, dans un contexte de production opérationnelle, une prévision de l'atmosphère dans un temps rapproché ou encore contribuer à la recherche ou à la consultation. Les modèles ont besoins d'une condition initiale pour les équations pronostiques de Navier-Stokes et ainsi modiser en fonction du temps. Généralement, le temps initial est fourni par des fichiers d'observations de l'atmosphère ou des données déjà modélisées. La plus fine échelle, la micro-échelle, est utilisée pour des études locales dans un domaine possédant moins de 10 km latérale. Cette échelle sert, par exemple, pour les études de la formation des gouttelettes ou alors tracer un produit toxique dans l'atmosphère. La méso-échelle est utilisée pour faire les prévisions numériques sur un domaine de quelques centaines de km et elle est l'intermédiaire entre la plus fine échelle et celle planétaire. L'échelle synoptique ou l'échelle planétaire s'étend sur plusieurs milliers de km et plusieurs jours.

4.1 Les données météorologiques en Amérique du Nord

Les fichiers regroupant les données météorologiques sont sous forme d'analyse ou de ré-analyses. Ils contiennent la description des paramètres météorologiques sur un maillage en trois dimensions pour une zone donnée à un temps donné. Les modèles de prévisions évoluent continuellement, donc le schéma d'assimilation des données des fichiers d'analyses peut différer au niveau de la résolution spatio-temporelle et de la description des variables géophysiques. Les fichiers dits de ré-analyses ont une résolution spatio-temporelle constante à condition que le schéma d'assimilation constant. Ces deux types de fichiers sont une reprise de tous les processus météorologiques sur une longue période à partir des l'archives de donnée brute. Ils constituent ainsi une base de données historique de la météorologie pouvant s'étaler sur plusieurs dizaines d'années. Dans les deux cas, la répartition géographique est homogène et le maillage comporte plusieurs niveaux verticaux.

4.1.1 Le NCEP

Le NCEP possède des bases de données de ré-analyse, dont la NARR. Ce sont des données tridimensionnelles de l'atmosphère pour une période allant de 1979 à aujourd'hui et elles sont générées à partir du modèle de PNT Eta (Messinger et al., 2006). Ces fichiers sont disponibles sous forme de GRIB de 1979 à 2008 et une mise à jour à été fait de 2008 à aujourd'hui, apportant des amélioration (GRIB2). Dans cette étude, les fichiers utilisés sont de 1979 à aujourd'hui. Ces données ont une résolution spatiale horizontale de 32 km avec 45 niveaux isobariques et une résolution temporelle de 3 heures. Ces fichiers sont principalement utilisés pour faire des études diagnostiques du climat à méso-échelle. Ils sont soutenus par une grille et une projection conique conforme de Lambert. Cette base de données est gratuite et disponible sur le site internet : <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/>. Les fichiers de la NARR sont utilisés pour initialiser le modèle de prévision de cette étude. Cela permettra éventuellement de créer un historique des évènements givrant de 1979 à 2008 pour la formation de l'atlas du givre prévu dans le projet de Lamraoui (Dupire, en cours; Lamraoui, en cours). Les variables utilisées provenant de ces fichiers de ré-analyse sont celles essentielles au démarrage de GEM; la hauteur géopotentielle, la température, l'humidité spécifique, les composantes du vent, la température au sol et profonde. Pour des fins de validation, le taux de précipitation et les variables concernant la présence de neige, de pluie verglaçante et de pluie sont analysés. Les variables définissant la température et la vitesse du vent ont été validées à l'aide des observations de radiosondes et des observations de station de surface sur le territoire de la NARR (Messinger et al., 2006). Concernant les variables de pluie et de neige, les valeurs générées par les algorithmes se comparent également bien aux observations (Manikin, 2005). Toutefois, la validation de la prévision de pluie verglaçante générée est un peu moins bonne. Pour les autres variables utilisées dans cette étude, il n'a pas été possible de trouver leur validation dans la littérature.

4.1.2 Les capteurs AVHRR et AMSR

Deux variables essentielles au démarrage du modèle de prévision numérique ne sont pas présentes dans les fichiers NARR : la température de surface de la mer et l'épaisseur de la glace de mer. De ce fait, ces deux variables sont obtenues grâce aux capteurs AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) et AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer). Les fichiers provenant de ces deux radiomètres ont une résolution spatiale de $0,25^\circ$ et une résolution temporelle de 24 heures (Richard W. Reynolds, 2007). De 1979 à 2002, les capteurs utilisés pour obtenir ces deux variables sont de type AVHRR provenant d'un satellite infrarouge. Depuis 2002, se sont ajoutés les capteurs de type AMSR. L'utilisation de ces micro-ondes réduit sensiblement les erreurs de la collecte des données pour l'estimation de la température de la mer près des côtes. Les capteurs AVHRR apportent toujours leur contribution pour des domaines loin des côtes. Les fichiers d'analyses contenant ces deux variables sont disponibles via le site internet : <ftp://nomads.ncdc.gov/SST/OISSTv2>.

4.2 Le modèle de prévision numérique au Canada

Au Canada, deux modèles numériques sont utilisés. Le premier est GEM (Global Environmental Multiscale) pour la prévision du temps. Le second est MC2 (Mesoscale Compressible Community) qui est utilisé pour la recherche et le développement ou pour la consultation en entreprise. Ces deux modèles ont été mis au point par le RPN (Recherche en Prévision Numérique) et continuent à évoluer. Ces deux modèles peuvent fonctionner avec les paramétrages des processus des effets de la physique, souvent appelés librairie physique et est accessible via le site web de RPN COMM : <http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/rpn.comm>.

4.2.1 Les différentes résolutions horizontales

Le modèle GEM est supporté par de différents types de grilles numériques : une grille globale, une grille variable et une grille à aire limitée. Initialement, le modèle GEM a été conçu pour fonctionner à l'échelle planétaire grâce à sa grille globale. La résolution variable,

visant un lieu géographique précis, a une grille spatiale irrégulière : plus grossière sur les limites latérales pour ensuite s'affiner sur un lieu précis. Cette grille a une limite latérale pour ensuite zoomer au centre. La méthode à aire limitée consiste à extraire un échantillon de la carte globale. Pour ce type de grille, un HALO doit être déterminé. Le HALO est un pourcentage de points de la grille situés en bordure et servant à joindre les limites de la grille à la dynamique de l'intérieur de celle-ci. Pour ces trois types de grilles numériques, pour augmenter la précision en réduisant l'inhomogénéité métrique de la grille, l'équateur numérique peut subir une rotation arbitraire et ainsi amener la région d'intérêt à un équateur numérique, car à cet endroit le maillage n'est pas déformé. Cette méthode est reconnue pour l'étude des fluides, car le milieu est isotrope, ce qui signifie une invariance des propriétés du milieu pour toutes propagations du fluide. La Figure 4.1 rappelle les trois représentations de la grille de calcul de GEM ; globale, variable et à aire limitée.

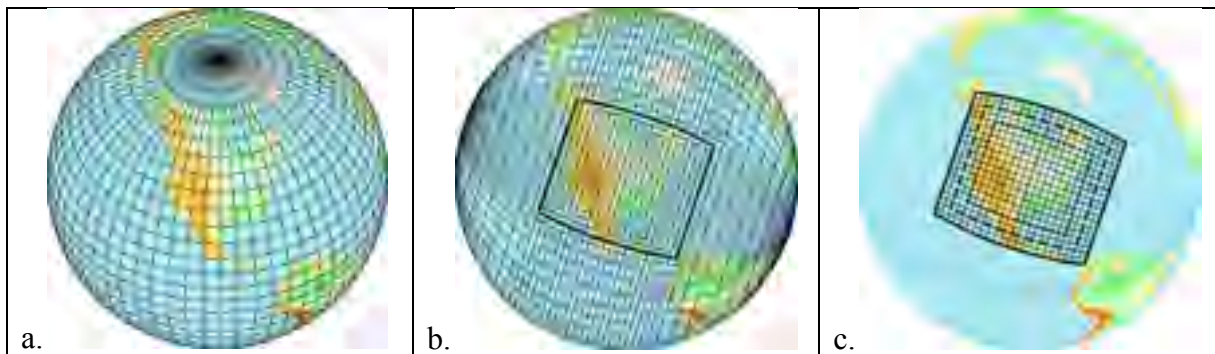


Figure 4.1 Représentation de la grille globale (a.), variable (b.) et à air limité (c.)

Tirée du site Internet : <http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn.comm>

La grille à aire limitée démontrée dans la Figure 4.1 c, donne un exemple de la représentation du HALO. Dans cet exemple, ce HALO est alors entre le premier trait discontinu à l'intérieur de la grille et celui qui est continu la limitant.

4.2.2 Les systèmes de niveaux verticaux

Le modèle effectue des résolutions d'équations sur des niveaux hybrides. Il est toutefois compatible avec des fichiers d'entrées où les variables sont associées à des niveaux isobariques ou des niveaux appelés sigma. Les coordonnées sigma représentent le rapport entre la pression du niveau étudié $P(x, y, z, t)$ et la pression au sol $P_s(x, y, t)$. Ce sont des coordonnées adimensionnelles et décroissent avec l'altitude partant de 1 au sol à 0, représentant pratiquement le vide. Les coordonnées hybrides sont une combinaison des systèmes de coordonnées de pression et sigma pouvant définir un fort relief sur des niveaux proche de la surface ($\sigma \approx 1$). Ce système a pour avantage de suivre le relief proche de la surface et de s'estomper en altitude jusqu'à devenir quasi horizontale dans les hautes couches. C'est ce type de coordonnées qui est le plus commode pour un modèle numérique, car il y a moins de distorsion. La Figure 4.2 rappelle ces trois types de coordonnées sur lesquelles peuvent être représentées les paramètres météorologiques.

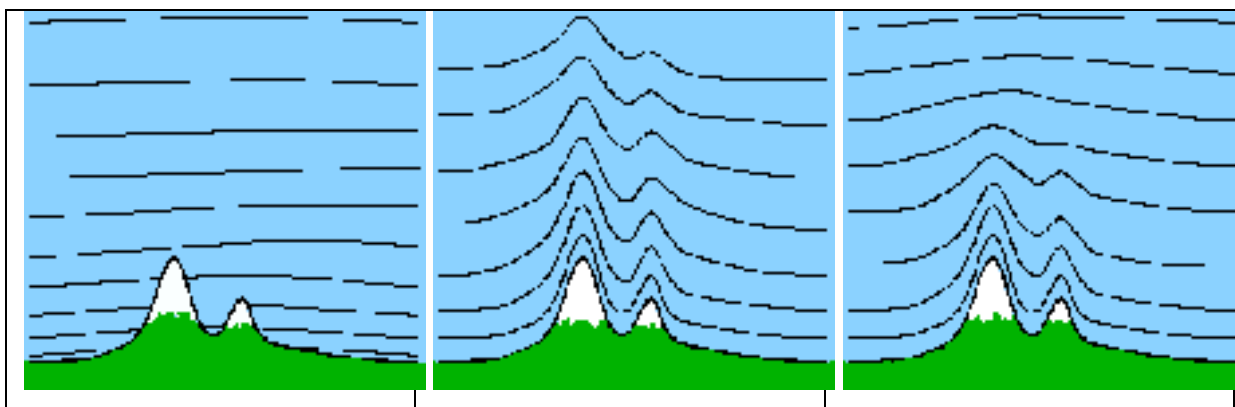


Figure 4.2 Représentation des coordonnées isobariques (gauche), sigma (centre) et hybrides (droite)

Tirée du site Internet : <http://eumetcal.meteo.fr/>

4.2.3 Les méthodes de calcul de GEM

Le fonctionnement de GEM requiert trois types de fichiers contenant les données des paramètres météorologiques, les données climatiques et les variables de la géophysique. Ces

derniers fichiers contiennent des données atmosphériques sur un maillage en trois dimensions servant aux conditions initiales et aux pilotages des limites latérales. Le fichier climatique est configuré par défaut dans modèle de prévision numérique et contient la distribution moyenne servant aux paramétrages de la physique. Ces données peuvent être utilisées pour tous les cas simulés et ne varient pas dans le temps. Le fichier contenant les paramètres géophysiques est généré par un outil développé par RPN, appelé « GenGeo ». Pour toutes modélisations, il est important de générer ce fichier à la même résolution que les fichiers météorologiques. Pour cette étude, la modélisation LAM (Limited Area Model) utilise des fichiers météorologiques, ou fichiers d'analyse contenant les variables météorologiques sur différents niveaux atmosphériques, incluant la surface, et sur un intervalle de temps. Ce type de fichier peut être obtenu des modèles de prévisions numériques, provenant des archives d'analyses de modèles et d'assimilation de données, ou encore d'une base de données historique. Plusieurs processeurs peuvent être utilisés pour réduire le temps que prend les modélisations. Selon le nombre de processeurs utilisés, un partitionnement sépare le domaine initial (G_{ni} , G_{nj}) en sous-domaines (l_{ni} , l_{nj}) à tailles égales. Le modèle détermine des conditions limites latérales de chaque partition et définit les paramètres météorologiques, climatiques et géophysiques. Le calcul s'effectue à partir de cette bordure, nommée HALO, jusqu'au centre. Ce HALO contient les variables initiales, fournies par le fichier d'entrées. Il peut représenter le 10^{ième} d'une grille de calcul. Le modèle GEM assure la cohérence de la représentation des cartes modélisées à partir de plusieurs processeurs contrôlés par l'interface MPI (Message Passing Interface) et l'utilisateur. La Figure 4.3 représente un calcul utilisant deux sous-domaines.

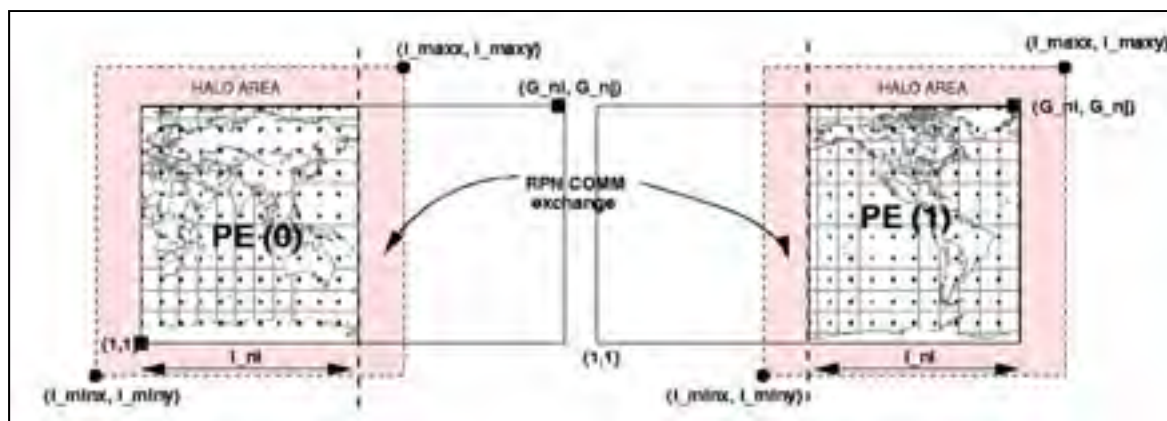


Figure 4.3 Représentation du Message Passing Interface
Tirée du site Internet : <http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn.comm>

4.2.4 Les paramétrages des effets physiques

Le modèle s'appuie sur des fonctions, des scripts et des définitions de constantes regroupées dans une librairie informatique nommée RMNLIB. Cette bibliothèque contient des fonctions, des scripts et des constantes définissant le paramétrage physique et dynamique du modèle. Le paramétrage physique consiste à caractériser les phénomènes les plus importants de l'atmosphère et de la surface. Ce paramétrage s'appuie sur une série de fonctions thermodynamiques placée dans cette librairie. La physique de l'atmosphère fonctionne en complémentarité avec des sous-routines dynamiques. Le programme gère le contrôle et la communication entre la physique et la dynamique. Il existe différents schémas numériques définissant l'atmosphère, et tous sont généralement complémentaires et interdépendants. Ces schémas concernent la définition de la physique telle que la radiation, la quantité de mouvement ou encore la définition des paramètres de la couche limite.

4.3 Les schémas de microphysique de Milbrandt et Yau

La présente étude s'est appuyée, pour la détection des précipitations givrantes et leur accumulation, sur le schéma de microphysique des nuages de Milbrandt et Yau. Le schéma de Milbrandt et Yau propose un paramétrage numérique des processus de la microphysique

(Milbrandt et Yau, 2005). Il permet de définir six différents hydrométéores : les gouttelettes nuageuses (1), les gouttes de pluie (2), les cristaux de glaces (3), la neige (4), la grêle douce (5) et la grêle dure (6) (Voir ANNEXE II et ANNEXE III). Il existe deux rôles majeurs à ce type de schéma ; le calcul de la sédimentation et celui des termes de puits et de sources contribuant à l'évolution de la taille des différents hydrométéores et de leur rapport de mélange. Ce schéma représente le spectre de la taille des différentes catégories d'hydrométéores selon une fonction gamma telle que :

$$N_X(D) = N_{0_X} D^{\alpha_X} e^{-\lambda_X D} \quad (4.1)$$

Avec $N_X(D)$ la concentration des hydrométéores par unité de volume [m^{-3}] et par unité de diamètre D [m^{-1}] et pour une catégorie d'hydrométéore X , N_{0_X} l'initialisation de la distribution des hydrométéores [m^{-3}], $1/\lambda_X$ un facteur de l'échantillon [m] et α_X la dispersion du spectre des diamètres des gouttes aussi appelé « shape parameter ». Ce dernier paramètre peut-être variable ou fixe.

Milbrandt et Yau ont mis en évidence trois schémas correspondant à trois types de moments : simple, double ou triple. Plus le nombre de moments est élevé, plus il existe de variables pronostiques servant à prédire et décrire les hydrométéores. Par ailleurs, la complexité de ces schémas subsiste dans la méthode ainsi que le nombre de variables utilisées pour le calcul des paramètres de l'équation (4.1). La partie 4.3.1 de ce document apporte une brève définition de ces moments.

4.3.1 Les moments du schéma de microphysique

Le premier schéma prédit uniquement le rapport de mélange à tous points du maillage tridimensionnel de GEM des six hydrométéores lorsqu'ils sont présents dans l'atmosphère. Le rapport de mélange exprime le ratio de la masse totale du type d'hydrométéore par la masse totale d'air sec et s'exprime en kg/kg. Ces termes sont calculés à l'aide de processus microphysiques tels que la collection, l'accrétion, la conversion, la fonte, la nucléation ou

encore la diffusion de vapeur. Ces termes sont classifiés comme source ou puits et contribuent à augmenter ou diminuer la valeur du rapport de mélange. Pour effectuer cette prédiction, les paramètres N_{0X} et α_X sont fixées.

Le schéma à deux moments donne également, à tous points de grille de GEM, une prévision des rapports de mélange. S'y joint le nombre des hydrométéores, soit le nombre de particules dans un volume. Cette dernière variable est essentielle à la définition de la taille des particules, de la sédimentation, de la collision ou des propriétés radiatives des nuages. Le nombre d'hydrométéores apporte des précisions sur le taux de croissance et la sédimentation, bases des précipitations. L'avantage d'un tel schéma est que le rapport de mélange agit indépendamment de la concentration totale des hydrométéores. Par exemple, si des particules grossissent par accrétion ou diffusion, la masse totale des particules change, mais pas le nombre. De même que lorsqu'il y a agrégation ou dissociation des gouttes, le nombre de particules change, mais pas la masse.

Le schéma à trois moments définit les mêmes variables que le schéma d'ordre deux auxquelles s'ajoute la réflectivité. Cette fonction représente l'étendue spectrale ou la dispersion de la distribution des tailles des hydrométéores. Même si ce moment à une meilleure précision relative, le moment d'ordre deux est plus utilisé du à son coût de calcul plus faible.

Figure 4.4 La Figure 4.4 montre la distribution $N_X(D)$ des tailles des gouttes en fonction de différentes hauteurs, du temps de simulation et de la distribution. La distribution notée ANA représente celle analytique, TM l'ordre trois, DIAG la distribution d'ordre deux avec α_X différents pour des diamètres supérieurs et inférieurs à 8 mm, FIX3 la distribution d'ordre deux avec $\alpha_X = 3$, FIX0 la distribution d'ordre deux avec $\alpha_X = 0$. La distribution d'ordre deux avec $\alpha_X = 3$ est celle qui est la plus utilisée du à sa plus grande précision et son temps de calcul qui est plus court.

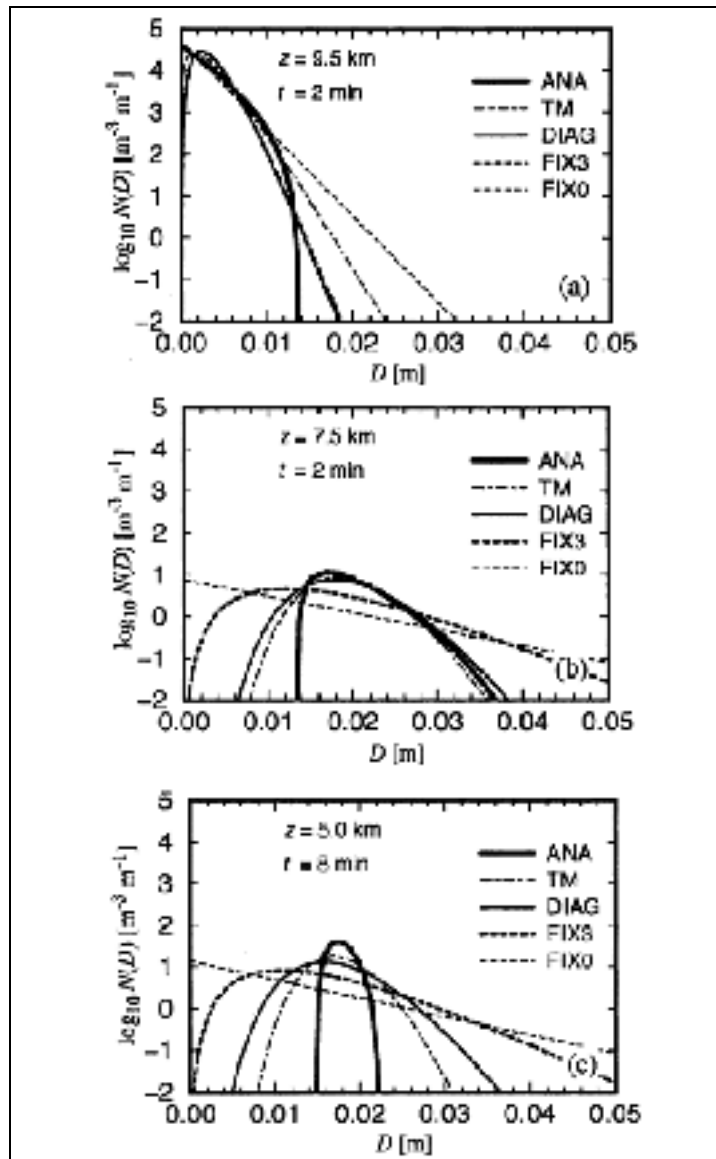


Figure 4.4 Distribution des diamètres des gouttes provenant de différents moments
Tirée de J.A.Milbrandt et M.K.Yau (2005, p.3062)

4.3.2 Les variables du schéma

Grâce au schéma de la microphysique, plusieurs nouvelles variables provenant de la sortie du modèle sont accessibles à l'utilisateur. Elles concernent la détection des différentes phases de l'eau dans l'atmosphère ainsi que la prévision du type de précipitation.

Une nomenclature a été conçue afin de définir le rapport de mélange (Voir ANNEXE II). De plus, il est possible d'extraire les variables concernant le taux de précipitation [m/s] (Voir ANNEXE II, Tableau-A II-2) et l'accumulation [m] (Voir ANNEXE II, Tableau-A II-3). Le taux de précipitation est représenté comme un flux de masse, soit un transfert de masse en fonction de la vitesse du mouvement. L'accumulation est la quantité d'un type de précipitations accumulé au sol, depuis le début de la modélisation d'un événement. Étant donné que ce schéma de microphysique est complémentaire à d'autres schémas atmosphériques, il est possible d'extraire des variables de précipitation de ces derniers schémas (Voir ANNEXE III Tableau-A III-1) ou de l'accumulation (Voir Annexe III, Tableau-A III-2). Il est à noter que le schéma considère qu'il y a de la grêle dure si le diamètre de ce type d'hydrométéore est supérieur à 1 cm. De même que le taux de précipitations mixtes est défini si et seulement si le taux de précipitation totale (solide et celui liquide) est supérieur à 0.01 mm/h. De même que le diamètre moyen volumétrique des différents hydrométéores fait également partie des variables de sorties.

CHAPITRE 5

LA CONCEPTION D'UN BANC D'ESSAI

La conception d'un banc d'essai permet la validation du modèle atmosphérique avec des données *in situ*. Pour cette étude, un détecteur de glace et un pluviomètre chauffant ont été installés avec la collaboration d'EDF EN Canada (Énergie De France Énergie Nouvelle) et la Chaire de recherche AEMN. Les instruments appartiennent à Christian Masson, professeur à l'ÉTS et directeur de la Chaire AEMN. Les données sondées par ces deux appareils appartiennent également à M. Masson ainsi qu'au partenaire ayant contribué à l'installation, EDF EN Canada. Lors de ce projet, les données de ces instruments n'étaient pas disponibles. Donc aucune validation du modèle n'a pu être faite avec ces données.

5.1 Le pluviomètre

Le pluviomètre enregistre le taux de la teneur en eau liquide pour tous les types de précipitations s'il possède un système de dégivrage ou d'antigivre. Ce taux s'exprime en millimètre par heure [mm/hr]. Pour l'utilisation de cet appareil en condition hivernale, certains fonctionnent avec de l'antigel, d'autres avec un système de chauffage intégré. Le modèle de pluviomètre choisi est le pluviomètre à auget 52202-L et est équipé d'un système de chauffage intégré (voir Figure 5.1).



Figure 5.1 Représentation extérieure du pluviomètre 52202 de Campbell Scientific
Tirée du manuel d'installation du pluviomètre de Campbell Scientific (2009, p.2)

Il mesure 39 cm et pèse 1,6 kg. Les précipitations pénètrent par l'orifice supérieur dont le diamètre est de 16 cm. Le collecteur, en forme d'entonnoir, est chauffé pour transformer l'eau de l'état solide à l'état liquide lors des conditions hivernales. La puissance de chauffage requise est de 18 W. Le pluviomètre à auget est constitué de deux contenants qui se remplissent d'eau successivement. Lorsqu'un des deux contenants est plein, il bascule et l'autre partie se remplit. Il y a alternance jusqu'à ce que les précipitations cessent. Cet instrument a une précision de 0.1 mm/h.

5.2 Le détecteur de givre

Le détecteur de glace, utilisé pour la conception de ce banc d'essai, construit par l'entreprise Américaine B.F. Goodrich est le modèle 0872F1 (dernière version lors de l'achat en 2009, voir Figure 5.2). Cet instrument automatisé fonctionne avec une sonde qui, s'il n'y a pas d'accumulation de glace, vibre à une fréquence de résonance de 40 kHz. Le capteur est une sonde de forme cylindrique pour une détection qui s'effectue à 360°. La sonde a une longueur de 25,4 mm et un diamètre de 6,35 mm. Lorsque les hydrométéores se collent à la sonde, sa masse augmente et sa fréquence de vibration diminue. Le minimum d'épaisseur de givre que la sonde peut détecter est de 0.5 mm, mais peut en supporter jusqu'à 25 mm avec une précision de 0.13 mm. L'équation programmée pour déterminer la relation entre la fréquence

de résonance et l'épaisseur de givre est une équation empirique telle que définie dans l'équation ci-dessous :

$$Ep_{ice} = (-0,00015 \times F + 6) \times 25,4 \quad [mm] \quad (5.1)$$

Avec F la fréquence de vibration de la sonde s'exprimant en Hz.

Lorsque la fréquence de vibration atteint sa valeur minimum, un signal est envoyé par l'instrument vers la sonde et la température augmente graduellement pour faire fondre la glace formée. Le temps alloué pour le chauffage de la sonde est déterminé par l'utilisateur et peut aller jusqu'à une minute. Dès que la sonde atteint la température requise et que le givre s'est dissipé, celle-ci revient à sa fréquence de vibration initiale et le système chauffant se met en veille. Le cycle se répète autant de fois que nécessaire. L'ensemble de ces cycles détermine le temps de l'évènement givrant et le nombre renseigne sur la fréquence des évènements givrants. Les valeurs quantitatives de l'accumulation de la glace sont la somme des valeurs maximales mesurées. Pour plus de précision, l'enregistrement de la variation de la fréquence de vibration de la sonde s'effectue toutes les dix secondes. La Figure 5.2 montre le détecteur de givre choisi pour cette étude.



Figure 5.2 Détecteur de givre de Goodrich
Tirée du manuel d'installation du détecteur
de givre de Campbell Scientific (2009, p.2)

La puissance du détecteur de givre est de 10 W en mode fonctionnement et de 380 W en mode dégivrage.

5.3 La mise en place des instruments de mesure

Il n'existe pas de normes concernant la mise en place de ces instruments. Ils ne doivent pas être ensevelis sous la neige et ne doivent pas interférer entre eux. Pour éviter tous bris lors des chutes de glace, il est recommandé de ne pas les placer à proximité d'autres instruments. De même que le choix de cette isolation diminue les chances que la prise de mesure soit faussée par la turbulence. Ils doivent en outre être accessibles pour une maintenance régulière. Pour quantifier l'accumulation de glace pour la construction des éoliennes, ces deux instruments ont été installés dans un parc éolien à proximité d'une autre tour météorologique afin de bénéficier de davantage de variables mesurées; la vitesse du vent sur différents niveaux, la température, l'humidité et la pression.

5.4 Les calculs des paramètres du givre

Grâce à ces données observées, le diamètre volumétrique médian des hydrométéores, la teneur en eau liquide, la densité du givre, le point de rosée et le taux d'accumulation du givre peuvent être estimés. Étant donné que de l'eau liquide ou de l'air peut être emprisonnée dans la glace accumulée, qu'une fraction de la masse captée doit être considérée.

$$m_{glace} = f \times m_{captée} \quad (5.2)$$

Avec m_{glasse} la masse de la glace, $m_{captée}$ la masse captée par l'instrument, et f la fraction de l'accumulation de la glace comprise entre 0 et 1. Plus le régime est sec, plus f tend vers 1. La masse captée est en fonction de la teneur en eau liquide LWC , du coefficient de captation de l'instrument E , de la vitesse de chute des gouttes V , du diamètre d_{sonde} et de la longueur l_{sonde} de la sonde, de l'épaisseur de la glace e et de la durée de l'évènement t .

$$m_{captée} = LWC \times E \times V \times (d_{sonde} + e) \times l_{sonde} \times t \quad (5.3)$$

La teneur en eau liquide s'exprime en g/m^3 et son expression mathématique diffère en fonction du type de précipitation. Il est donc important d'obtenir des données d'observation de chaque type de précipitation afin de différencier leurs apparitions dans un hiver. Pour cette sonde, le coefficient de captation est de 0,6. L'épaisseur de la glace et la durée de l'évènement sont données par le détecteur de givre et la vitesse du vent est donnée par des anémomètres.

5.5 Un projet en évolution

Il est possible de protéger le détecteur de givre à l'aide d'un bouclier de protection. De même qu'il existe d'autres instruments pouvant contribuer à déterminer des paramètres essentiels à la détection du givre et ainsi raffiner le calcul de la masse de la glace. Ces instruments

complémentaires au pluviomètre et au détecteur sont le visibilimètre ou le disdromètre.

5.5.1 Un bouclier de protection

Un bouclier de protection pourrait être installé autour du pluviomètre, réduisant la turbulence et donc les erreurs induites lors des mesures de précipitation. Toutefois, très peu de documentation existe sur cette protection supplémentaire et son installation demande une logistique plus importante. La Figure 5.3 illustre cet instrument :



Figure 5.3 Bouclier de protection
Tirée du site Internet : <http://www.novalynx.com>

5.5.2 Le visibilimètre

La visibilité se mesure avec des objets dont les distances sont connues. Cette évaluation est toutefois subjective, car elle dépend autant des propriétés de l'atmosphère que des capacités de l'observateur. Par ailleurs, les observations par un humain s'effectuent difficilement la nuit. Un visibilimètre (voir Figure 5.4) est composé d'un émetteur et d'un récepteur. Son principe repose sur la diffusion de la lumière dans les particules en suspension dans l'atmosphère donc sur la densité des particules. Le capteur émet un flux lumineux et le récepteur mesure la diffusion de ce flux. La diffusion est proportionnelle à la densité des particules dans l'air et la visibilité est inversement proportionnelle au signal reçu. Les

mesures sont comprises entre 10 et 60 km avec une incertitude de 20 %. L'image ci-dessous montre le visibilimètre utilisé par Météo France.



Figure 5.4 Photo d'un visibilimètre
Tirée du site Internet :
<http://comprendre.meteofrance.com>

Cet instrument est utilisé pour différencier le brouillard et la brume et les données sont mesurées dans un champ restreint et inférieur à 360°.

5.5.3 Le disdromètre

Cet instrument mesure la distribution des hydrométéores en fonction de leurs diamètres. Le type de disdromètre utilisé pour détecter les précipitations aussi bien liquides que solides est un disdromètre optique à laser. La Figure 5.5 montre l'instrument vendu chez OTT France, fournisseur d'instruments captant les hydrométéores et utilisé par EDF (Électricité de France).



Figure 5.5 Disdromètre optique à laser
Tirée du site Internet : <http://www.ottfrance.com>

Il permet de distinguer la bruine, la pluie, la neige, la neige fondue, la grêle ou encore les précipitations mixtes. Les données mesurées sont la taille et la vitesse de chute des particules. De ces deux derniers paramètres, il est possible d'en déduire le spectre des diamètres, l'accumulation des particules ainsi que l'énergie cinétique.

CHAPITRE 6

LE LABORATOIRE NUMÉRIQUE

Cette partie comporte les étapes nécessaires à l'interpolation des fichiers de la NARR en fichier standard d'Environnement Canada; soit FST (File STandard). Les fichiers FST servent surtout à stocker des données géo spatiales en format binaire à accès direct. Toutes les fonctions FST sont une composante de RMNLIB (RPN-COMM, 1979). Des outils spécifiques existent pour la lecture, l'écriture ou le codage des données et font partie de la librairie RMNLIB. Dans un premier temps, un programme acquiert les fichiers de la NARR et ceux contenant l'état de la surface de la mer (Richard W. Reynolds, 2007) grâce aux capteurs satellitaires AVHR et AMSR (Voir ANNEXE IV). Par la suite, une seconde programmation définit une grille pour l'enregistrement des fichiers FST (Voir ANNEXE V). Enfin, une troisième programmation interpole les données de la NARR et les enregistre dans les fichiers FST (Voir ANNEXE VI).

6.1 Les outils numériques

Pour cette étude, les outils de Matlab sont principalement utilisés pour la programmation du laboratoire numérique comportant les trois programmations. M_MAP, en source libre (Pawlowicz, 2005), est un outil cartographique de Matlab. Grâce à cet outil, il est possible de transformer les coordonnées latitude et longitude en une coordonnée cartésienne x et y et vice versa. Il permet également de tracer des lignes de côte jusqu'à une résolution d'un quart de degrés. Pour effectuer la lecture des fichiers GRIB (NCEP, 1979), le décodeur utilisé est celui développé par le NCEP. Il permet de lire la structure de ce type de fichier et d'en retirer les données météorologiques en trois dimensions. En ce qui concerne les fichiers FST, la manipulation de ses données peut être effectuée à l'aide de fonction en langage Fortran écrit par le RPN COMM introduit dans RMNLIB. Il est maintenant possible d'écrire et de lire ces fichiers grâce à des fonctions en langage Matlab, appelées M_FST développées par François Caron et Robert Benoit (Caron et Benoît, 2009). De plus, les applications de RMNLIB sont employées telles que « xvoir » pour obtenir l'inventaire des variables des FST sous forme de

tableau ou encore « xrec » pour visualiser ces variables sous forme cartographique en deux dimensions. De même que l'application « pgsm » est utilisée pour interpoler des variables lors d'un changement de grille entre des fichiers FST. Étant donné que la première modélisation possède un domaine semblable à celui de la NARR et la seconde à plus fine échelle se limite au Québec, « pgsm » est utilisée pour interpoler les données de la première modélisation vers la grille de la deuxième modélisation. Cette étape permet une meilleure validation.

6.2 L'acquisition des fichiers météorologiques

Les fichiers de la NARR et ceux des capteurs AVHRR et AMSR ne sont pas disponibles à la même résolution temporelle et spatiale. Ainsi, la méthode de retranscription des variables est différente. Les fichiers de la NARR sont sous forme binaire séquentielle et sont disponibles huit fois par jour. Par convention, en météorologie, ces heures calées sur l'heure de Greenwich, heure UTC, sont annotées d'un « Z ». Ces différentes heures fournies par la NARR sont 00 Z, 03 Z, 06 Z, 09 Z, 12 Z, 15 Z, 18 Z et 21 Z. La résolution spatiale est de 32 km et le méridien centrale traverse le centre du Canada et des États-Unis. Le format binaire GRIB1 de la NARR est utilisé par les instituts pour acheminer les prédictions météorologiques. C'est également un format qui est le plus utilisé mondialement pour créer une base de données historiques de l'état de l'atmosphère. Une première banque de données de la NARR a été acquise par Comeau (Comeau, 2008) et appartient maintenant à l'ÉTS. Ces fichiers sont disponibles de 1979 à 2008. Toutefois, les niveaux verticaux varient de 1000 mb à 500 mb. Pour l'utilisation du modèle de prévision numérique incluant un schéma de microphysique, il est important d'obtenir les données s'étendant jusqu'à la tropopause. C'est pourquoi, pour cette étude, les fichiers de la NARR contenant les niveaux isobariques entre 1000 mb et 100 mb sont téléchargés pour un intervalle de temps allant de 1979 à 2008. Les fichiers comportant les données de AVHRR et AMRS sont sous forme binaire séquentielle et ne sont disponibles qu'une fois par jour sur une période de 1979 à 2008. Étant donné qu'avant 2002 le seul capteur utilisé est AVHRR et qu'après cette année les données du AMSR s'y ajoutent, la base de données de NCDC (National Climatic Data Center) est

différent. Ces données sont accessibles via le site internet : <ftp://nomads.ncdc.gov/SST> différenciant l'analyse de la température de la mer et de l'épaisseur de la glace de mer entre 1979 à 2002 et entre 2002 à 2008.

Chacune des heures disponibles de la NARR représente un fichier. Ainsi, pour l'étude d'une journée, huit fichiers de la NARR doivent être téléchargés et un seul pour les fichiers contenant la température de la mer et l'épaisseur de la glace de mer. De ce fait, dans cette étude, les valeurs des variables marines sont considérées comme constantes pour une journée et couvrent toute la planète sur un maillage latitude-longitude.

6.3 Les spécifications des grilles

Les données originales de la NARR sont sur une projection conique conforme de Lambert à un parallèle standard. Cependant, GEM est compatible avec des données entrantes stockées sur une grille cylindrique ou polaire stéréographique. Les fichiers FST ne supportent pas non plus la projection conique conforme de Lambert. Les données de la ré-analyse doivent donc être interpolées sur une grille appartenant à un de ces deux types de projections. Les données de la NARR sont enregistrées à l'aide de différents appareils météorologiques, puis associés à un point de grille à l'aide d'un algorithme d'assimilation de données. Ces points de grilles ont un positionnement géographique en latitudes et longitudes définies par un type de projection cartographique. Lors d'un changement de projection, il est nécessaire d'interpoler les valeurs des données météorologiques de la grille source à la grille cible. Pour le laboratoire numérique, la grille source appartient à une projection conforme de Lambert et la grille cible appartient soit à une projection polaire stéréographique soit à une projection cylindrique équidistante.

Une grille est représentée sous la forme d'un plan cartésien. Une projection géographique est la projection d'une portion de la sphère terrestre sur une surface plane, pouvant être rapportée sur un plan. Toutefois, si une grille est représentée dans une autre projection, alors sa forme n'est, généralement, plus cartésienne. Le point d'origine de la grille est défini par le type de

projection. Il peut être positionné sur un des coins de la grille, au centre de celle-ci ou encore sur un des pôles. Les coordonnées de chaque point de la grille dépendent du positionnement du point d'origine et donc du type de projection.

6.3.1 La définition de la grille et de la projection de la NARR

La projection cartographique de la NARR est conique conforme de Lambert. Elle conserve les angles et les aires. Pour obtenir ce type de projection, il suffit de projeter chaque point du globe sur un cône qui a pour sommet un des pôles. Dans ces fichiers de ré-analyse, le pôle est le Nord. Ce cône peut être tangent au globe et ainsi être défini par un parallèle de référence. Il peut également être sécant et alors avoir deux parallèles standards. La Figure 6.1 illustre cette projection sur un cône tangent à la sphère terrestre.

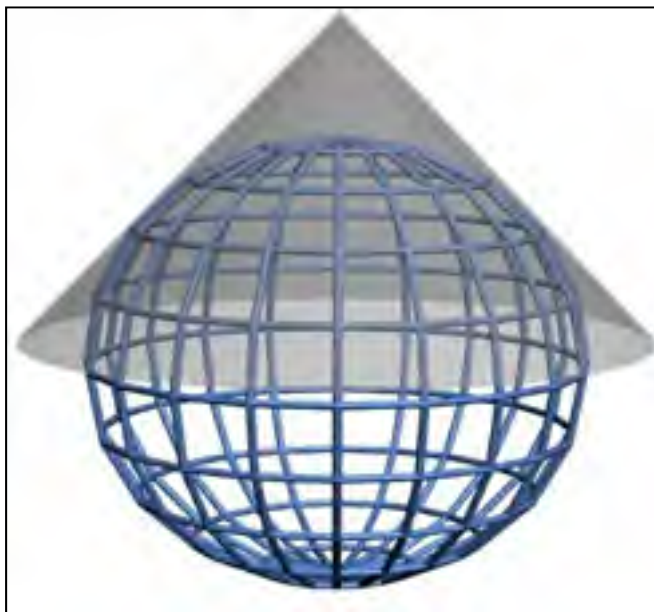


Figure 6.1 Projection conique conforme de Lambert à un parallèle standard

Tirée du site Internet :

<http://www.nationalatlas.gov/articles/mapping>

Le NCEP décrit la grille utilisée pour la NARR (NCEP, 1979). Cette dernière possède 349 points de grille horizontale par 277 points de grille verticale, chacun espacé de 32 km. Les

coordonnées géographiques de chaque coins de la grille sont décrit commençant par le premier point (1,1) qui se situe sur les latitude et longitude (1.000°N, 145.5°W). Cette projection est tangente à la Terre sur la latitude 50°N et le méridien de référence est situé à 107.0°W. Grâce à ces paramètres géographiques (Voir ANNEXE VII, Tableau-A VII-1), il est possible de reproduire entièrement la grille de la NARR à l'aide du logiciel de M_MAP et de sa fonction « m_proj » (Pawlowicz, 2005). Il est à noter que les valeurs des parallèles standards et celui central, utilisé pour reproduire la grille conique conforme de Lambert sont représentatifs à la NARR (Voir ANNEXE VII, Tableau-A VII-1). La Figure 6.2 montre le domaine de la NARR (bleu foncé) superposée à la carte planétaire (bleu pâle).

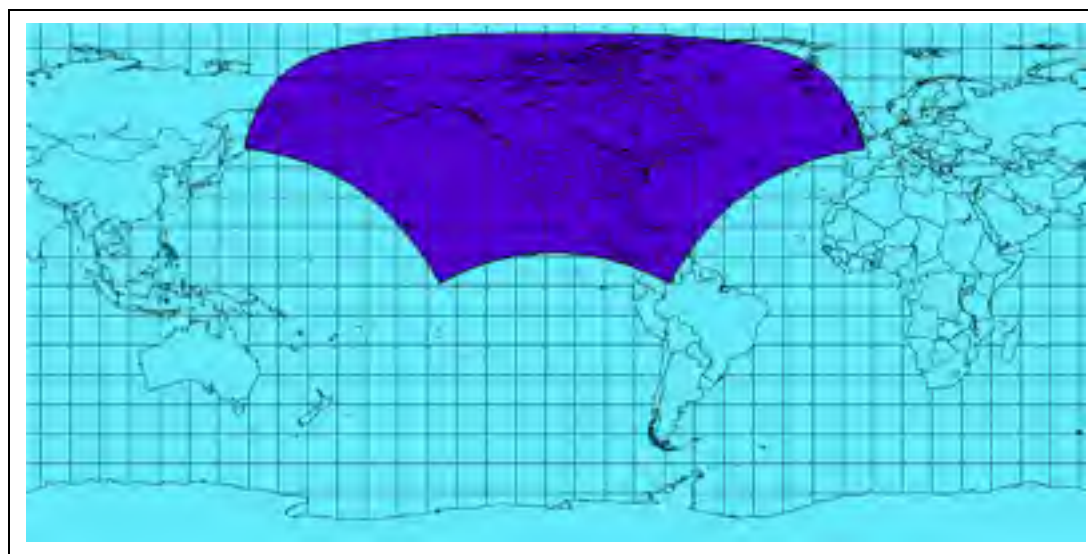


Figure 6.2 Domaine de la NARR (bleu foncé) visualisée dans une projection cylindrique

Une fois les latitudes et longitudes, représentatives à la NARR, assignées, sa grille peut être calculée. L'interpolation s'effectue entre les points de grilles de deux différentes projections et non pas les coordonnées latitudes et longitudes. C'est pourquoi la grille source et la grille cible, exprimées en coordonnées x et y, doivent être construites. Pour effectuer la grille représentative de la NARR, la fonction « m_ll2xy.m » de M_MAP est employée. Cette fonction permet de convertir les longitudes et latitudes, déterminées précédemment, en coordonnées cartésiennes x et y.

La Figure 6.3 est un exemple de la NARR sur sa grille conique conforme de Lambert et dans sa projection. Cette cartographie montre les valeurs de la température à une hauteur de 1000 mb le 18 janvier 2006 à 0Z.

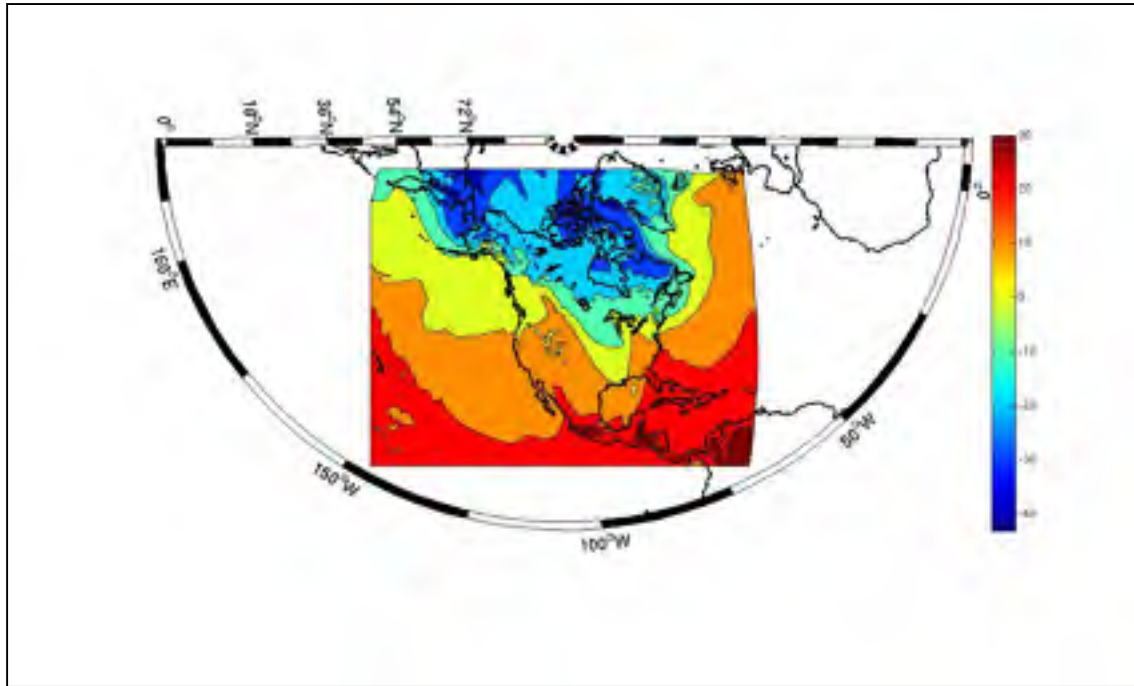


Figure 6.3 Représentation de la température [°C] de la NARR sur une grille conforme de Lambert et dans sa projection le 18 janvier 2006 0Z à 1000 mb

La visualisation de la température sur la grille de la NARR dans sa projection ne représente pas un rectangle parfait. Cette imperfection vient des valeurs non inscrites ou invalides dans les fichiers de la ré-analyse. Étant donné que la grille cible est contenue dans la grille conique conforme de Lambert, ces valeurs invalides ne seront pas comprises dans la nouvelle grille.

6.3.2 L'interpolation entre deux différentes projections

La grille cible servant à accueillir les valeurs interpolées doit être comprise dans le domaine de la NARR. Dans cette partie, les deux types de projections compatibles avec GEM sont comparés pour savoir celle qui épouse un plus grand domaine à l'intérieur du domaine de la

NARR. Le but étant d'effectuer un atlas du givre du Canada, il est nécessaire de reproduire le plus grand domaine possible de la NARR dans un fichier FST.

6.3.2.1 La projection cylindrique

Cette projection possède des méridiens et des parallèles projetés sur un cylindre tel que représenté sur la Figure 6.4 ci-dessous :

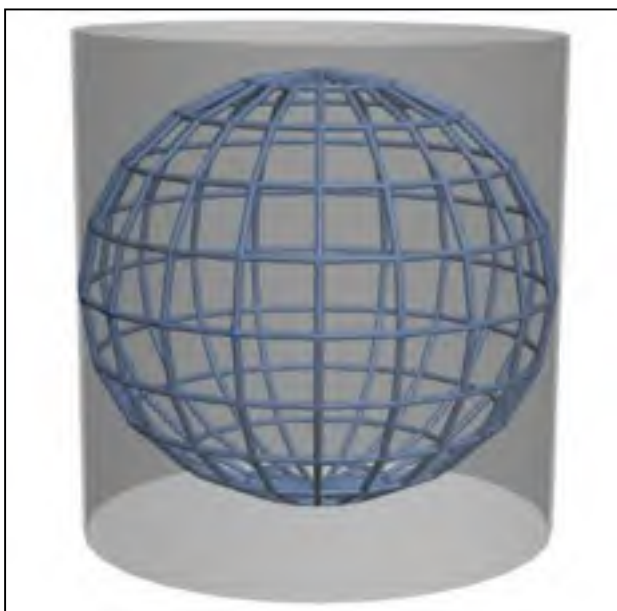


Figure 6.4 Projection cylindrique

Tirée du site Internet :

<http://www.nationalatlas.gov/articles/mapping>

Cette projection comprend la projection cylindrique de Mercator et la projection cylindrique équidistante. Comme la projection conique de Lambert, la projection cylindrique de Mercator est conforme. Les extrémités sont étirées avec les pôles à l'infini. Ce type de carte est utilisé pour des petits domaines où l'étirement est insignifiant ou pour des domaines d'étude situés sur de basses latitudes. Pour cette étude, comme le domaine de la NARR est proche des pôles et englobe le Canada et les États-Unis, il n'est pas avantageux d'utiliser ce type de projection. Dans le second cas, la projection cylindrique équidistante est aphylactique. Elle conserve les

distances le long des méridiens. Elle reproduit les latitudes et les longitudes comme des coordonnées cartésiennes et a donc la forme d'un parallélogramme à angle droit. Ce type de projection est approprié pour la représentation mondiale. Pour déterminer la carte cylindrique équidistante d'aire maximale appartenant au domaine de la NARR, il suffit de maximiser un parallélogramme à angle droit dans la projection conique conforme de Lambert tel que présente la Figure 6.5. Cette cartographie représente la superposition des limites du domaine NARR en projection conique conforme de Lambert (magenta) avec celles de sa représentation maximale en projection cylindrique équidistante (bleu).



Figure 6.5 Superposition de la projection cylindrique équidistante (bleu) et conique de Lambert (magenta) sur des axes latitudes-longitudes

La distance croissante des méridiens et des parallèles est du même ordre de grandeur que la taille des cellules de la grille de la NARR, soit de 0.3° . La Figure 6.6 représente la superposition des limites latérales des domaines de la projection cylindrique équidistante (rouge) avec celle conique conforme de Lambert. Cette image est produite à l'aide de M_MAP, cette fois, dans une projection conique conforme de Lambert:

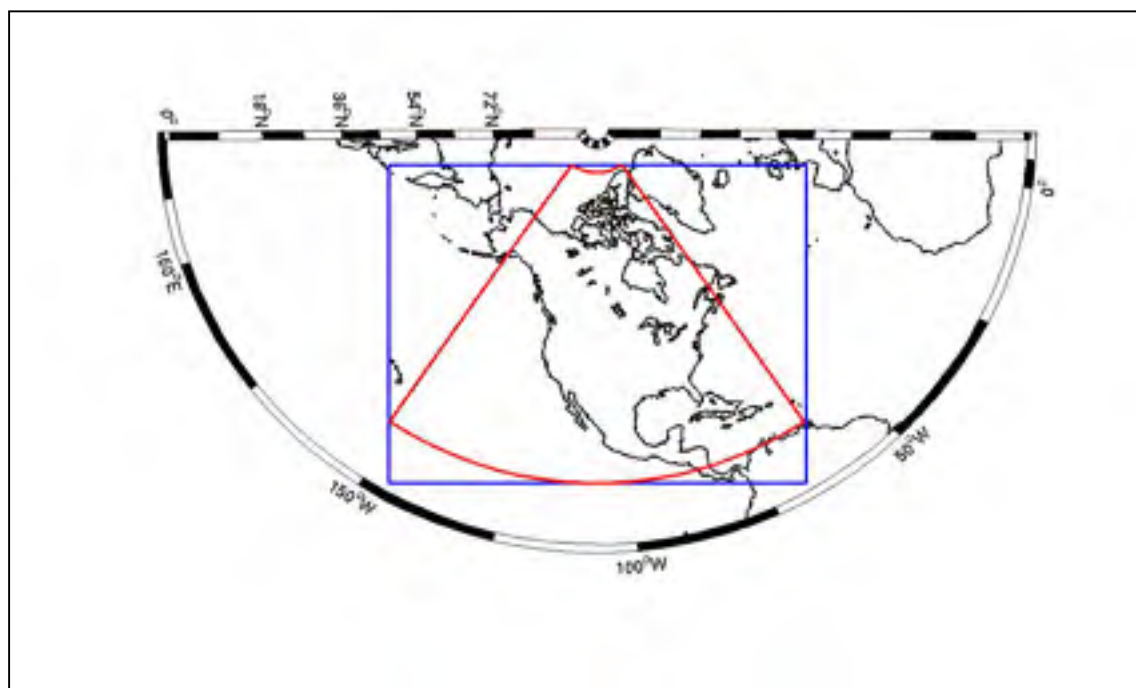


Figure 6.6 Superposition de la grille conique conforme de Lambert (bleu) dans sa projection et de la grille cylindrique équidistance (rouge)

Au Nord de la grille cylindrique, les points sont plus rapprochés. Dans cette région, il y a plus de points de grille qui se situent sur moins de parallèle et de méridiens, c'est-à-dire que l'on retrouve une plus grande densité des paramètres météorologiques. Ce type de grille représente un domaine géographique plus petit, soit environ 50 % de l'aire de la NARR et donc beaucoup de ses valeurs n'y sont pas représentées. La Figure 6.7 montre un exemple de l'interpolation de la température [$^{\circ}\text{C}$] à 1000 mb de la grille conique conforme de Lambert vers une grille cylindrique équidistante.

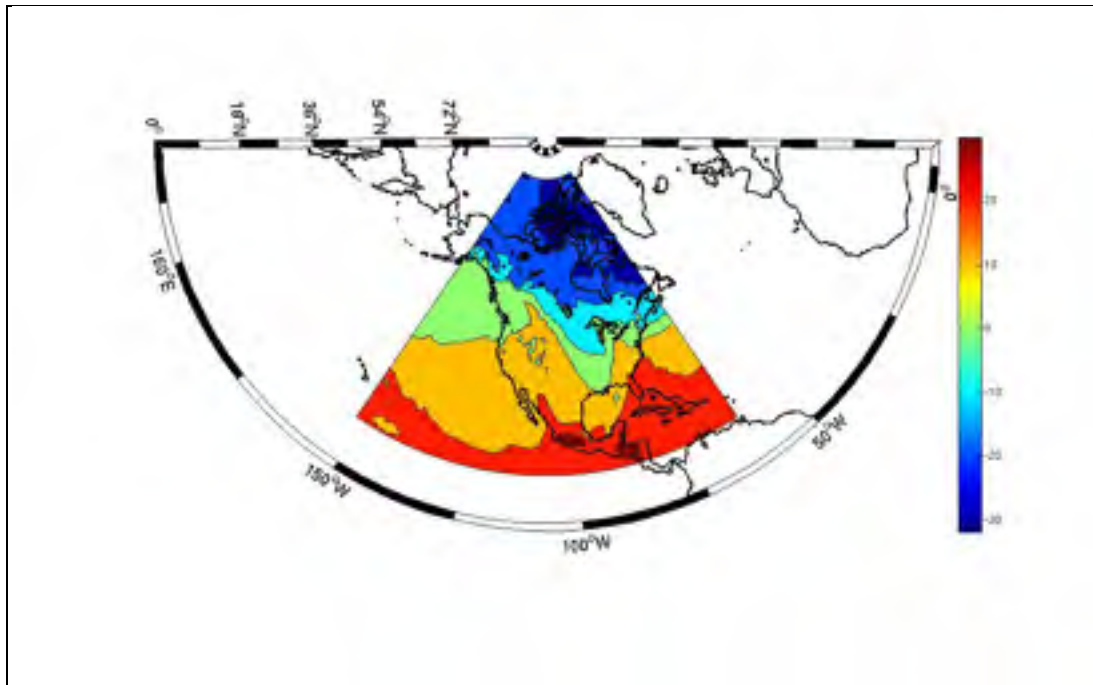


Figure 6.7 Représentation de la température [°C] de la NARR sur une grille conforme de Lambert et dans sa projection le 18 janvier 2006 0Z à 1000 mb

Une partie de l'Est et du Sud-Est du Canada ainsi que des mers voisines ne sont pas représentés. Ce sont des régions où naissent beaucoup de phénomènes météorologiques donc ces données sont essentielles à cette étude. De plus, l'atlas du givre vise initialement à couvrir le Québec. Or, dans ce cas, la grille cible coupe le Nord-Est de la province. Le site internet du DAI (Données Accès Intégration) offre des fichiers de la NARR en latitudes et longitudes sur un plus grand domaine (DAI, 2010). Toutefois, ces fichiers météorologiques sont créés avec des données de ré-analyses mondial à très basses résolutions. Il convient alors d'obtenir une grille ayant une plus grande superficie et englobant tout le territoire Nord américain et les océans voisins.

6.3.2.2 La projection polaire stéréographique

La projection stéréographique est la représentation du globe sur un plan tangent ou sécant à la Terre. Pour des fichiers FST, les seules options retenues sont les deux plans sécants à 60° de latitude Nord ou Sud. Pour obtenir une projection polaire stéréographique, le pôle doit se

situer à l'opposé du plan de la projection. Alors, pour cette étude, le plan doit se situer au pôle Sud. Ce type de projection est conforme. La Figure 6.8 ci-dessous montre la projection polaire stéréographique Sud.

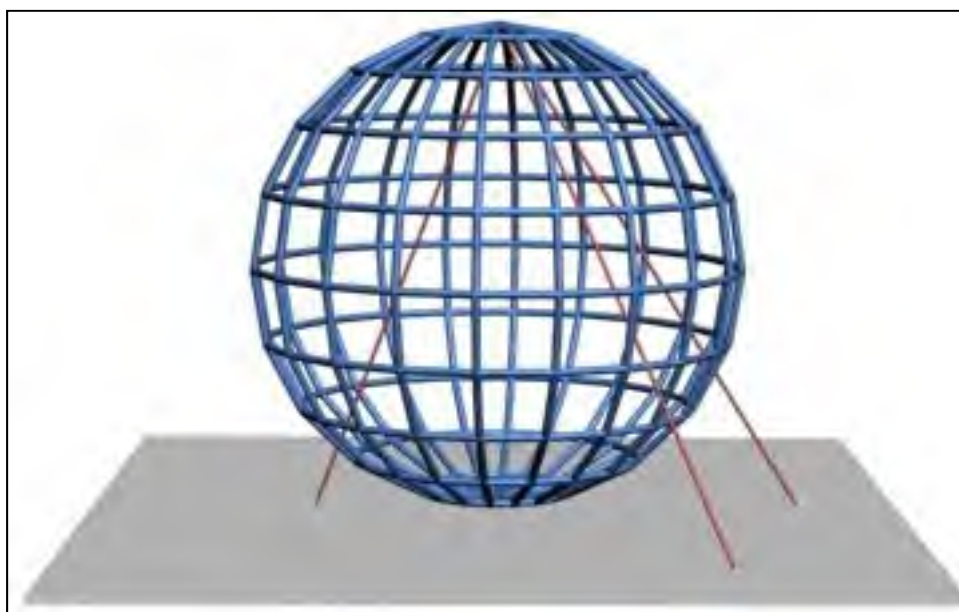


Figure 6.8 Projection stéréographique à 90° Sud
Tirée du site Internet : <http://www.nationalatlas.gov/articles/mapping>

Comme mentionnée précédemment, l'interpolation des données météorologiques peut s'effectuer d'une grille conique de Lambert vers une grille polaire stéréographique. Dans un premier temps, une grille polaire stéréographique est définie dans sa projection native, avec un ensemble de valeurs métriques (x , y). Une seconde étape consiste à reporter cette grille polaire stéréographique dans une projection conforme de Lambert. La projection polaire stéréographique est définie par M_MAP avec des abscisses et des ordonnées représentées par une fraction, exprimée en unité du rayon terrestre, alors que la définition d'une grille dans une projection conique de Lambert est en mètre.

Pour effectuer la première étape, les caractéristiques de la projection polaire stéréographique sont définies à l'aide de la fonction « m_proj.m ». Dans ce cas, la latitude et la longitude centrale ont pour valeurs 90° N et -107° W. Puis, les coordonnées en latitude et longitude de

la grille de la NARR en projection conique de Lambert sont converties dans une projection polaire stéréographique. Pour ce faire, la fonction « m_ll2xy.m » est utilisée. De cette nouvelle grille polaire stéréographique, les latitudes et longitudes de la projection polaire stéréographique peuvent être définies grâce à la fonction « m_xy2ll.m ». La cartographie démontrée dans la Figure 6.9, montre la superposition des limites de la NARR en projection conique conforme de Lambert (magenta) et en projection polaire stéréographique (bleu). Cette cartographie est effectuée à l'aide du logiciel d'Environnement Canada « xrec », conçu pour la représentation des fichiers FST en deux dimensions. Pour des fins de comparaisons, la Figure 6.5 et la Figure 6.9 sont représentées sur des axes de latitudes et de longitudes. Il est ainsi facile d'affirmer que la représentation de la NARR dans une projection polaire stéréographique couvre une plus grande superficie que sa représentation dans une projection cylindrique équidistante.

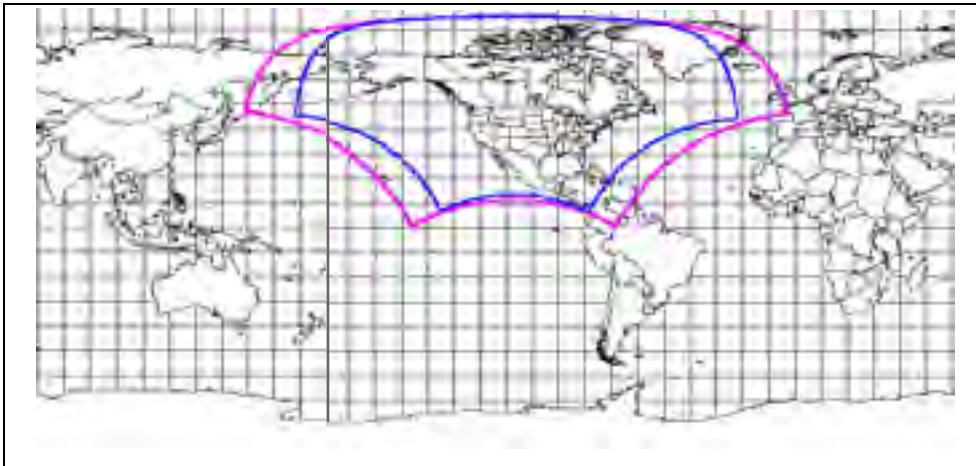


Figure 6.9 Superposition de la projection conique conforme de Lambert (magenta) avec celle stéréographique (bleu) représentant le domaine de la NARR

La seconde étape consiste à reproduire la grille polaire stéréographique dans une projection Lambert conforme. Les coordonnées en latitudes et longitudes de la projection polaire stéréographique sont définies dans une projection conique de Lambert. De la même manière que précédemment, les fonctions du logiciel M_MAP sont utilisées. La Figure 6.10 représente la superposition des limites latérales de la grille native de la NARR (bleu) avec la

nouvelle grille polaire stéréographique (vert), où seront interpolées les futures variables atmosphériques. Cette cartographie est effectuée à l'aide du logiciel M_MAP dans une projection conique conforme de Lambert.

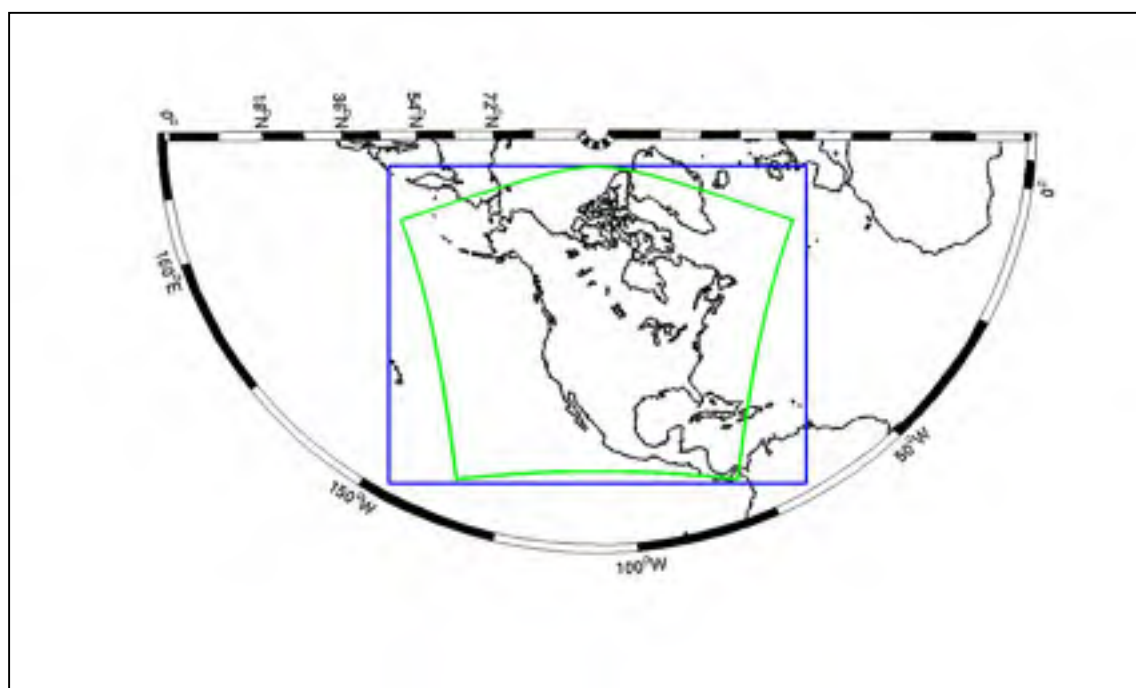


Figure 6.10 Superposition d'une grille polaire stéréographique (vert) sur une grille conique conforme de Lambert (bleu) dans sa projection

La grille polaire stéréographique étant plus petite que celle conique conforme de Lambert, toutes les données météorologiques ne peuvent être reportées. Lorsque l'emplacement des points de grilles polaires stéréographique est défini, les paramètres météorologiques peuvent y être interpolés. Cette nouvelle grille pourra accueillir les variables météorologiques sur l'ensemble du continent Nord américain. Tel que montré à la Figure 6.10, le profil des grilles coniques conformes de Lambert et celle polaire stéréographique se ressemblent. De plus, due à sa plus petite taille, la grille polaire stéréographique ne prend pas compte les valeurs indésirables ou invalides observées précédemment dans la grille conique de Lambert (Voir Figure 6.3). La Figure 6.11 représente l'interpolation de la température [°C] à une hauteur de 1000 mb sur une grille polaire stéréographique dans une projection conforme de Lambert.

Cet exemple de ce nouveau domaine de la NARR montre qu'il est semblable à son domaine natif et recouvre tout le Canada, essentiel pour l'atlas du givrage atmosphérique.

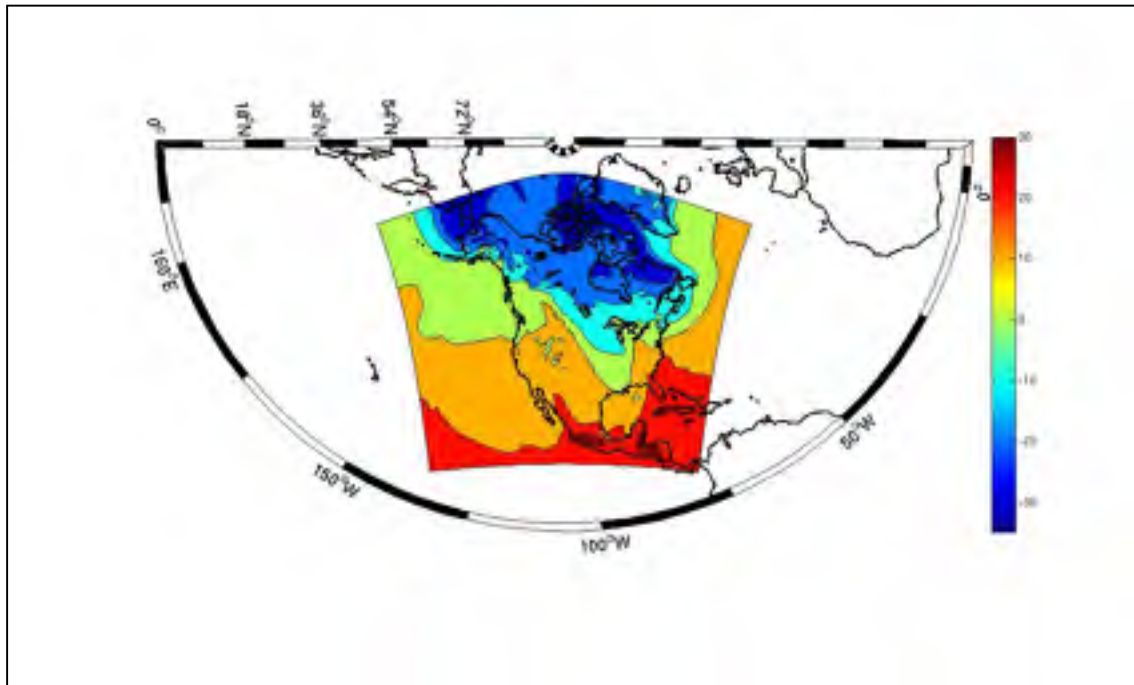


Figure 6.11 Interpolation de la température [$^{\circ}\text{C}$] sur une grille polaire stéréographique dans une projection conique conforme de Lambert le 18 janvier 2006 à 0Z

6.3.3 Les comparaisons des projections

La Figure 6.12 représente, dans une projection conique conforme de Lambert, la superposition de la grille conique conforme de Lambert (bleu), la grille cylindrique équidistante (rouge) et la grille polaire stéréographique (vert). Cette image montre que la grille cylindrique équidistante est plus petite que celle polaire stéréographique, de ce fait, un plus petit domaine géographique peut accueillir l'interpolation des paramètres météorologique. De plus, la Figure 6.13 montre la superposition de la grille conique conforme de Lambert (magenta), la grille cylindrique équidistante (rouge) et la grille polaire stéréographique (bleu) sur une projection avec les latitudes et longitudes perpendiculaires. Cette dernière image est effectuée avec le logiciel « xrec » d'Environnement Canada. Cette

cartographie appuie davantage l'utilisation de la grille polaire stéréographique pour cette étude, du à sa plus grande ressemblance avec le domaine de la NARR.

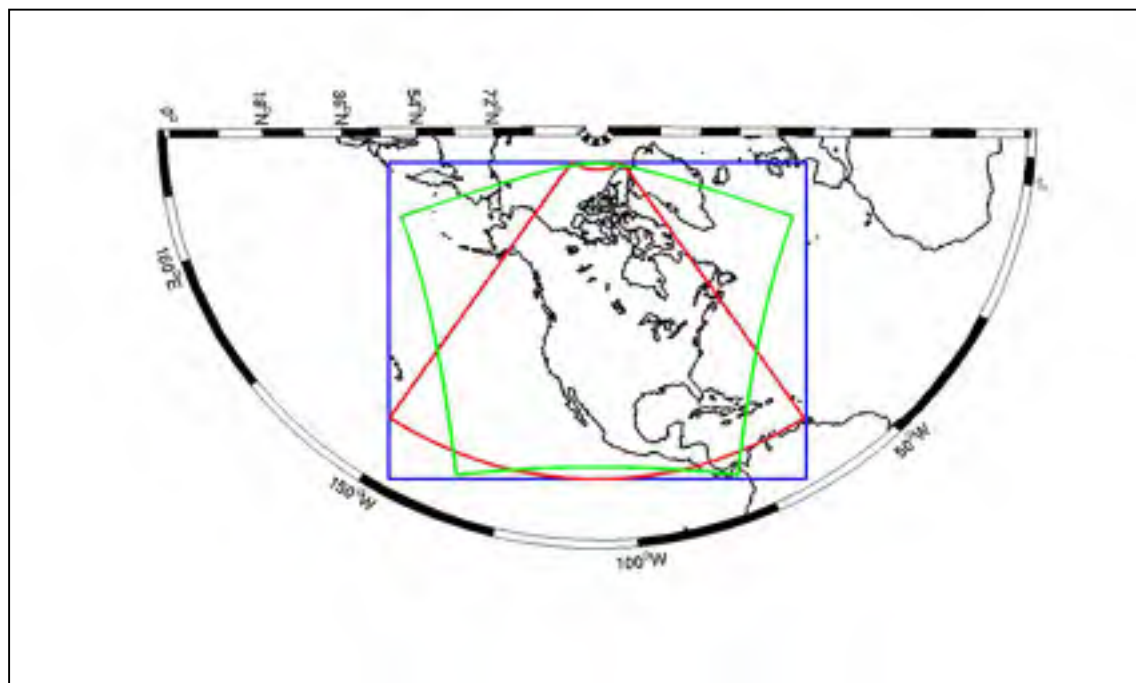


Figure 6.12 Comparaison des trois représentations de la NARR sur sa grille d'origine (bleu), sur une grille polaire stéréographique (vert) et sur une grille cylindrique équidistante (rouge)

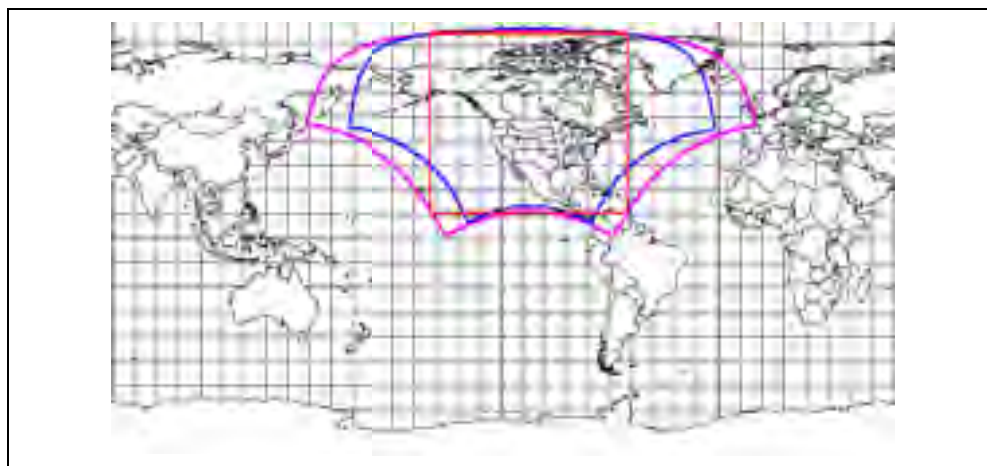


Figure 6.13 Superposition du domaine de la NARR en projection conique conforme de Lambert (magenta), polaire stéréographique (bleu), cylindrique équidistante

La grille servant à l'interpolation devra être celle qui se rapproche le plus de la grille native couvrant un plus grand domaine géographique. Comme mentionnée précédemment, la grille cylindrique coupe une partie de part et d'autre du territoire canadien. De plus, la forme de cette grille est triangulaire comparativement à la forme quadrilatère de la grille native et beaucoup de données météorologiques n'y seront représentées. De ces faits, l'interpolation se fait sur une plus petite surface tandis que la forme de la grille stéréographique est semblable à la grille native et englobe un plus grand domaine. Ainsi, l'interpolation se fera sur une grille polaire stéréographique.

6.4 Le traitement des vecteurs du vent

Étant donné que l'interpolation s'effectue d'une grille conique conforme de Lambert à une grille polaire stéréographique, une rotation vectorielle du vent est nécessaire, car les axes sont différents. Le vecteur représentant le vent $\vec{U}$ est défini par deux composantes u et v , soit deux scalaires qui dépendent des axes d'un référentiel. La première composante a pour direction le Nord et la seconde l'Est. Dans cette étude, les deux référentiels sont définis par la projection conique conforme de Lambert et polaire stéréographiques. Il doit donc y avoir une transformation des composantes u et v lors du passage d'un référentiel à l'autre. Pour ce faire, il faut établir les directions Est et Nord locaux pour tous les points de la grille x et y . L'axe du Nord local est celui du méridien local. Dans les deux cas, étant donné que ce sont des projections conformes, l'axe de l'Est local est la rotation horaire de 90° de l'axe du Nord. Dans la projection conique conforme de Lambert, le vecteur unitaire de la composante de v , soit $\vec{y}$, est le Nord de la carte, et l'Est, soit $\vec{x}$, est perpendiculaire à ce Nord. La Figure 6.14 représente le vecteur unitaire de la composante v en projection conique conforme de Lambert. Cette cartographie est générée grâce au logiciel M_MAP.

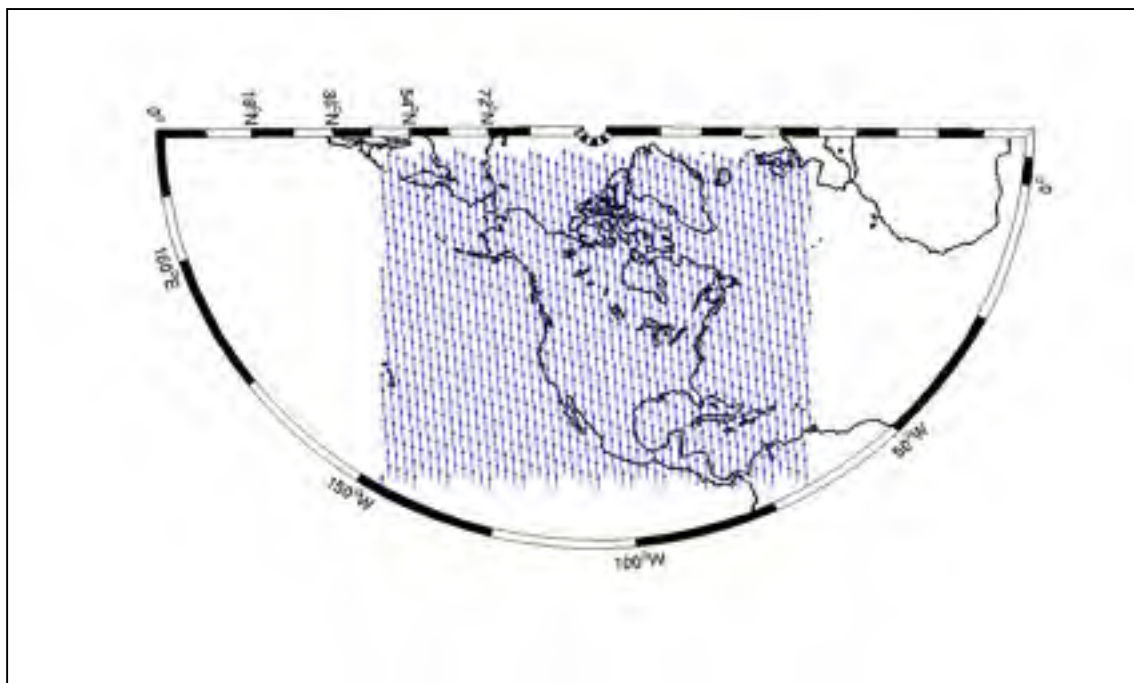


Figure 6.14 Orientation de la composante v , soit $\vec{y}$, du vecteur de la vitesse à tous points de grilles en projection conique de Lambert

Dans une projection polaire stéréographique le vecteur unitaire de la composante v a pour direction le Nord central de la grille et le vecteur unitaire de la composante de u est perpendiculaire à celui de la composante v . Ainsi, les axes sont variables et dépendant de leur position géographique. La Figure 6.15 représente le vecteur unitaire de la composante v en projection polaire stéréographique.

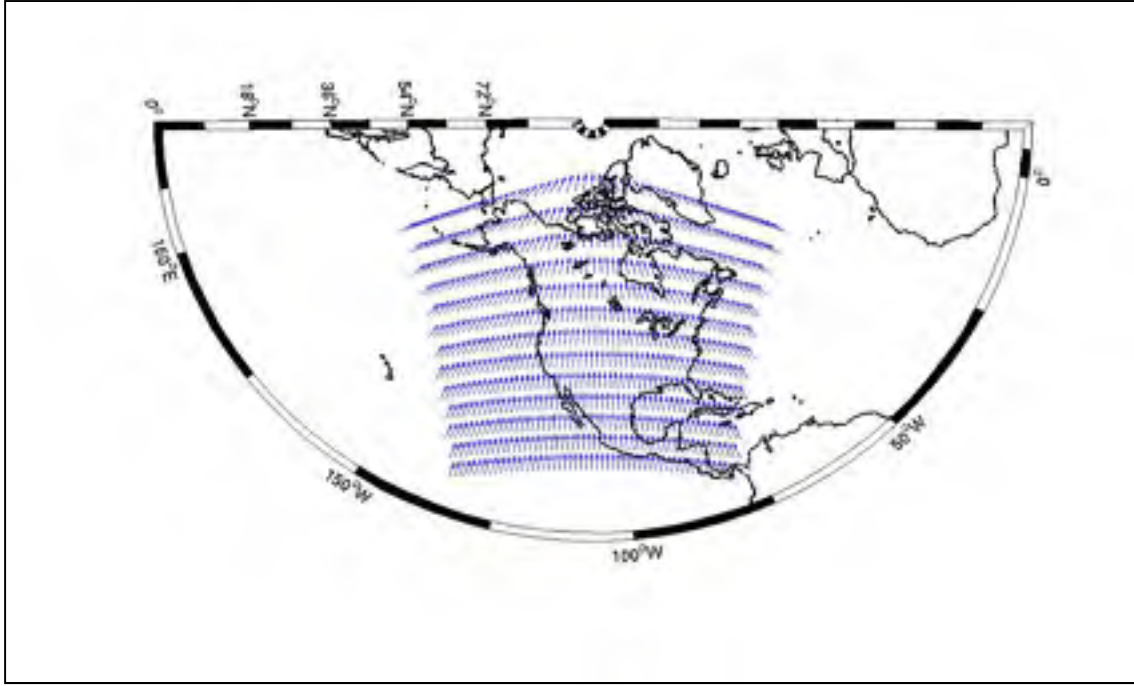


Figure 6.15 Orientation de la composante v , soit $\vec{y}$, du vecteur de la vitesse à tous points de grilles en projection polaire stéréographique (Échantillon de la NARR)

Pour transformer les composantes du vent il faut effectuer une rotation vectorielle par l'angle θ entre l'axe y et l'axe du Nord local.

6.4.1 La rotation vectorielle

D'après le plan vectoriel Euclidien orienté, la rotation est définie selon l'angle de rotation θ calculé de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} u' = u\cos\theta - v\sin\theta \\ v' = u\sin\theta + v\cos\theta \end{cases} \quad (6.1)$$

Avec u' et v' les composantes du vent après l'interpolation. Pour ce faire, les valeurs de l'angle de rotation θ sont calculées à tous points de la grille. C'est-à-dire que pour chaque point de la grille polaire stéréographique (x_{ps}, y_{ps}) , un nouveau point de grille est associé à une sphère ellipsoïde $(x_{sphère}, y_{sphère})$. Par la suite, un angle de rotation est calculé pour

chacun des points en utilisant les propriétés trigonométriques de la fonction tangente telle que :

$$\theta = Tan\left(\frac{x_{ps} - x_{sphère}}{y_{ps} - y_{sphère}}\right) \quad (6.2)$$

Ainsi, pour passer d'une grille conique conforme de Lambert à une grille polaire stéréographique, les composantes du vent subissent une rotation changeant la direction du vecteur de la vitesse.

6.4.2 La validation de la rotation du vent

Pour valider ce calcul vectoriel, le vent en altitude est comparé à la direction d'un vent hypothétique nommé : vent géostrophique. Ce vent est défini par l'équilibre entre la force du gradient de pression et la force de Coriolis générée par la rotation de la Terre. En altitude, cet équilibre est une bonne approximation du vent réel. Le vecteur, représentant la force due au gradient de pression, a pour direction le centre de la basse pression, tandis que la force de Coriolis a une direction perpendiculaire au vent géostrophique (V_g). Dans l'hémisphère Nord, la force de Coriolis agit vers la droite du vent géostrophique. La résultante de ces deux forces est nulle pour le cas du vent géostrophique et est donc parallèle aux isobares. En altitude, ce vent peut différer jusqu'à 10 % du vent réel. La Figure 6.16 démontre la représentation de l'équilibre de ces deux forces dans le cas d'un vent géostrophique :

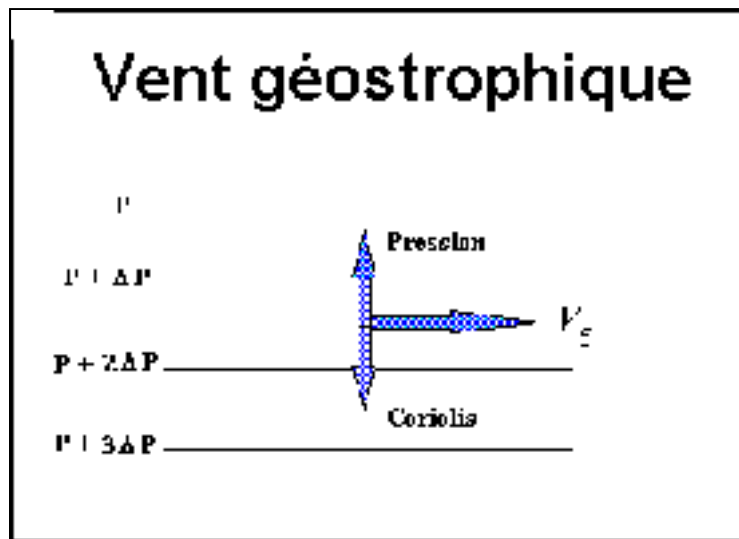


Figure 6.16 Représentation vectorielle du vent géostrophique dans l'hémisphère Nord

Ainsi, en altitude, le vent géostrophique est parallèle aux isobares. Pour satisfaire le vent hypothétique, le vent interpolé sur une grille polaire stéréographique est observé à une hauteur de 500 mb et superposé aux isohypses de géopotentiel (GZ) équivalant aux champs de pression. La Figure 7.17 représente la superposition des isohypses [dam] à une hauteur de 500 mb et du vecteur du vent [nœuds] le 18 janvier 2006 à 0Z.

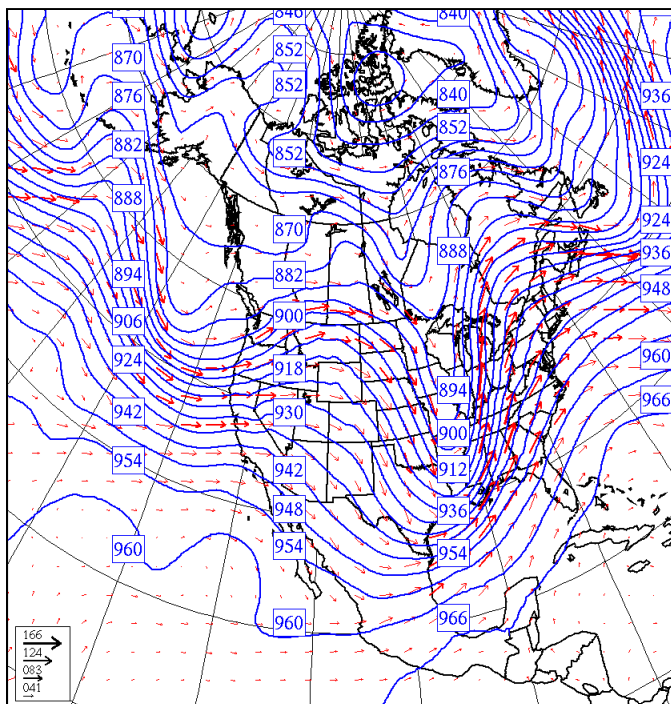


Figure 6.17 Superposition des isohypses [dam]
du géopotential et des vecteurs du vent [nœud] à
une hauteur de 500 mb le 18 janvier 2006 à 0Z

Cette image démontre que le vecteur du vent suit les isohypses en laissant la basse pression à sa gauche. De ce fait, l'interpolation vectorielle des vents se trouve validée.

6.5 L'écriture des FST

Cette partie consiste à extraire les données contenues dans les fichiers de la NARR ainsi que les données marines, et de les inscrire dans un seul fichier FST pour une heure à la fois. Pour écrire des fichiers de type FST, il existe un *plugin* Matlab appelé M_FST non publié et conçu par François Caron et Robert Benoit (Caron et Benoit, 2009). Ces programmations sont retrouvées dans RMNLIB et fonctionnent seulement sous LINUX.

6.5.1 La définition des fichiers standards (FST)

Les fichiers FST, conçus par le groupe RPN d'Environnement Canada, sont sous la forme binaire et documentée sur le site internet : <http://collaboration.cmc.ec.gc.ca>. Ils ne sont compatibles qu'avec les outils informatiques d'Environnement Canada et les modèles de prévisions numériques, GEM et MC2. C'est également sous cette forme de fichier que sont écrits les fichiers géophysiques et climatiques requis par GEM. Les FST comportent des attributs, nommés clés, qui définissent les propriétés des champs sur lesquels on peut faire des enquêtes de lecture. L'équation (6.3) représente un exemple de l'utilisation d'une fonction de `M_FST` utilisant les clefs nécessaire à l'écriture des FST (Voir ANNEXE VIII). Cette fonction sert à écrire les variables météorologiques dans un fichier FST.

$$\begin{aligned} err = fstecr(&BUF, npak, unit, date, deet, npas, \\ &ni, nj, nk, ip1, ip2, ip3, typvar, nomvar, etiket, grtyp, \\ &ig1, ig2, ig3, ig4, datyp) \end{aligned} \quad (6.3)$$

Le premier argument de la fonction « `fstecr` » représente les données matricielles à écrire (`BUF`). Par la suite, le nom du fichier FST accueillant les nouvelles valeurs est défini (`unit`). Comme l'écriture des NARR s'effectue pour un temps historique, les clefs concernant la prévision (le nombre de pas de temps ou le nombre d'heures de prévision) peuvent être définies (`date`, `deet`, `npas`). Puis, chaque champ spatial a des attributs pour la dimension horizontale (`ni`, `nj`), verticale (`nk`) et la résolution temporelle (`ip2`, `ip3`). Le type de variable (`typvar`), le nom des variables (`nomvar`, `etiket`) et le type de grille (`grtyp`) sont des arguments également à décrire. De plus, la compaction de l'écriture et la définition des variables quelles soient climatiques ou prévisionnelles, doit être déterminées en nombre de bits, soit en 16 ou en 32 bits (`npak`). Finalement, les caractéristiques géographiques de la grille doivent être données (`ig1`, `ig2`, `ig3`, `ig4`).

6.5.1.1 La résolution de la grille au 60^{ième} parallèle Nord

Dans un fichier FST, lorsque la grille définie est polaire stéréographique, le plan sur lequel sont projetées les données, est sécant à la Terre au 60^{ième} parallèle, tel que le montre la Figure 6.18.

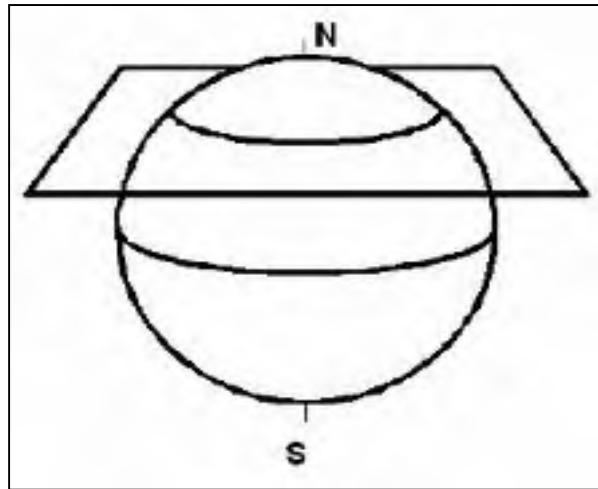


Figure 6.18 Plan d'une projection polaire stéréographique défini par RPN

Cependant, l'outil informatique M_MAP positionne ce plan au pôle. Il existe donc un facteur d'échelle entre les grilles formées par M_MAP et celles inscrites dans les fichiers FST. Le positionnement de chaque point de cette projection est représenté par une latitude φ et un rayon r dépendant du rayon de la Terre R . Pour une projection polaire stéréographique avec un plan de projection sécant de latitude φ_0 , le Facteur d'Échelle en tout point est déterminé de la manière suivante :

$$F.É. = \frac{1 + \sin(\varphi_0)}{1 + \sin(\varphi)} \quad (6.4)$$

Avec φ_0 la latitude 60° Nord et φ la latitude du pôle Nord. Ce facteur d'étirement à une valeur de 1.38. Ainsi, au 60^{ième} parallèle Nord, le plan sécant est 1,38 plus petit que celui

tangent au pôle. Il est donc possible de définir la position de chaque point en calculant le rayon de la position grâce à l'équation (6.5) :

$$r(60^\circ) = \frac{1 + \sin(60^\circ)}{1 + \sin(90^\circ)} * r(90^\circ) \quad (6.5)$$

6.5.2 Les variables atmosphériques

À l'entrée du modèle, les champs météorologiques essentiels au démarrage de GEM doivent être lus et placés sur la grille de calcul de GEM définie par l'utilisateur. En ce qui concerne les fichiers météorologiques en trois dimensions, cinq variables sont essentielles au démarrage de GEM telles que la température, les deux composantes du vent, la hauteur géopotentielle et l'humidité spécifique. L'interpolation des variables atmosphériques pour le changement de projection s'effectue par polynômes cubiques par GEM. Si le modèle tente d'obtenir du FST une de ces variables et qu'elle ne s'y trouve pas, alors celui s'arrête.

6.5.3 Les variables de surface

Tel qu'énoncé auparavant, GEM a besoin de trois types de fichiers; les fichiers météorologiques en trois dimensions, les fichiers géophysiques et ceux comprenant la climatologie. Les deux derniers fichiers sont constants dans le temps. La climatologie à une résolution d'une centaine de kilomètres. Pour une meilleure précision, il est important d'avoir les données de la géophysique à la même résolution que la maille de GEM. Ainsi, pour cette étude, la géophysique est générée à 32 km et à 5 km à l'aide du logiciel « Gengeo » d'Environnement Canada et de la définition de la grille de GEM. Pour ces données, l'interpolation n'est alors pas nécessaire. Toutefois, six variables de surface ne sont pas présentes dans ces fichiers de climatologie et doivent être interpolées : l'humidité du sol, la température de surface, la température profonde, la température de la mer, l'épaisseur de glace en mer et l'épaisseur de la neige. Comme l'épaisseur de la glace marine (Voir Figure A

IX-1) et la température de la mer (Voir Figure A IX-2) n'appartiennent pas aux fichiers de la NARR, une programmation a été réalisée par Robert Benoit afin d'extraire ces variables des fichiers AVHRR et AMSR.

Pour des fins de validation de GEM, il est primordiale d'extraire de la NARR vers un FST en projection polaire stéréographique, les paramètres concernant le taux de précipitations et l'apparition des différents types d'hydrométéores. Ainsi, est ajoutée à l'interpolation, les variables concernant la présence de neige, de pluie verglaçante, de pluie. Ces variables d'accumulation sont sur une période de trois heures et sont comparables à celles modélisées par GEM depuis le temps initial. La validation de GEM comportera alors une interpolation depuis la précipitation sur une grille GEM vers la grille polaire stéréographique des précipitations NARR.

6.5.4 Les types d'interpolations

L'interpolation des valeurs météorologiques peut se faire avec différents polynômes d'interpolation en fonction du type de variables météorologiques. L'interpolation des variables de l'atmosphère s'effectue de manière cubique tandis que pour les variables au sol, l'interpolation est de type linéaire. L'interpolation se fait niveau par niveau en deux dimensions. Pour l'utilisation de la fonction d'interpolation à 2 dimensions de Matlab, « interp2 », il est important que les coordonnées cartésiennes grille (x , y) de la grille native soient monotoniques et aient les mêmes dimensions spatiales que la grille source. Par ailleurs, tel qu'énoncé précédemment, le programme « pgsm » d'Environnement Canada est utilisé pour des fins de validations. Cette étape permettra d'homogénéiser la grille de la modélisation à une résolution spatiale de 32 km avec celle à une résolution spatiale de 5 km. Une interpolation cubique est alors utilisée pour les variables atmosphérique, linéaire pour les variables à la surface et l'approche du plus proche voisin pour les variables de précipitation (qui est de nature discrète). Cependant, l'interpolation de la présence d'hydrométéore servira à des fins de validation et non à la modélisation.

6.5.5 Les changements d'unités

Les variables de la NARR n'ont pas les mêmes unités physiques que celles compatibles avec le modèle de prévision numérique. Un changement des unités est alors nécessaire avant l'interpolation. Une mauvaise valeur peut amener à de mauvais calculs de GEM, ou encore à son arrêt. Le tableau ci-dessous montre les variables interpolées de la NARR à un fichier FST ainsi que leurs unités.

Tableau 6-1 Variables utilisées pour cette étude et les unités

<i>Variables</i>	<i>Variable FST</i>	<i>Unités FST</i>	<i>Variable NARR</i>	<i>Unités NARR</i>
<i>Composantes Est-Ouest du Vent</i>	UU	nœud	UGRD	m/s
<i>Composantes Nord-Sud du Vent</i>	VV	nœud	VGRD	m/s
<i>Température</i>	TT	°C	TMP	K
<i>Hauteur Géopotentielle</i>	GZ	dam	HGT	gpm
<i>Humidité Relative</i>	RH	kg/kg	SPFH	kg/kg
<i>Présence de Neige</i>	SN	mm	CSNOW	1 ou 0
<i>Présence de Pluie</i>	RN	mm	CFRZR	1 ou 0
<i>Présence de Pluie Verglaçante</i>	FR	mm	CRAIN	1 ou 0
<i>Pression à la surface du sol</i>	P0	mb	PRMSL	Pa
<i>Pression moyenne à la surface de la mer</i>	PN	mb	MSLET	Pa
<i>Taux de précipitation total</i>	P2+P4	m/s	PRATE	Kg/m ² /s
<i>Épaisseur de la couche de neige</i>	SD	cm	SNOD	m

6.5.6 La résolution verticale

La NARR possède des valeurs sondées de 8 m en dessous du sol pour s'étendre à une altitude de 18 km au-dessus du sol, soit à 100 mb en hauteur isobarique. Pour une meilleure précision des calculs, GEM a besoin des paramètres météorologiques définis sur le plus de niveaux isobariques possible s'étendant jusqu'à la stratosphère. Les fichiers de la NARR possèdent

des variables observées sur des niveaux isobariques espacés de 25 mb entre 1000 mb à 700 mb et entre 300 mb à 100 mb et subsiste un espacement de 50 mb de 300 mb à 700 mb. Lors de l'écriture des fichiers FST, les variables associées à des niveaux isobariques, gardent les mêmes niveaux. C'est le cas pour la hauteur géopotentielle, température, l'humidité spécifique et le vent. Concernant la température profonde, soit la température à l'intérieur du sol, la hauteur observée dans la NARR est de 800 cm dans le sol. La retranscription de cette 'hauteur' dans les fichiers FST est de 0 mb. De la même manière que dans les NARR, les variables de surface sont associées au niveau noté 'surface' et non 1000 mb. Ces variables seront également associées à un niveau de 0 mb, dans les fichiers FST.

6.6 L'environnement de travail pour le fonctionnement de GEM

6.6.1 Les généralités

Pour effectuer une modélisation, deux exécutables sont essentiels au fonctionnement du modèle GEM : GEMNTR et GEMDM. Le premier est un programme d'entrée et est piloté par un script nommé : « Um_runent.sh ». Cette étape permet la lecture des fichiers d'entrées contenant les variables météorologiques, climatologiques et géophysiques sur un maillage tridimensionnel de GEM. Par la suite est générée l'écriture de fichiers de type BMF (Binary Model File). Ce type de fichier consiste à enregistrer seulement les limites latérales du maillage des données d'entrée. De ce fait, moins de mémoire vive est utilisée lors du calcul. Un fichier « stdout » est généré pour contenir les messages émis par GEMNTR, le script de calcul de cet exécutable, le nombre de processeurs utilisés ou encore la version du modèle est utilisée.

Le second exécutable est le programme principal de GEM et est piloté par un script sous le nom de : « Um_runmod.sh ». Cet exécutable requière des fichiers des données d'entrées, de type BMF, ainsi que deux fichiers de configurations : « gem_settings.nml » et « outcfg.out ». Les paramètres de ces fichiers sont définis par l'utilisateur. Pour cette étude, les fichiers sont présentés dans l'ANNEXE X. Le premier fichier contient les choix des paramètres servant au

calcul, tels que le choix du nombre de processeurs (*Ptopo*), appelé topologie, la description de la grille et le choix des schémas physiques ou dynamiques utilisés. La description de la grille contient le type de projection utilisé (*Grd_typ_S*), la résolution spatiale (*Grd_dx*), la position terrestre de la grille (*Grd_xlon1*, *Grd_xlat1*) ainsi que la possibilité d'avoir une rotation de l'équateur numérique (*Grd_xlon2*, *Grd_xlon2*). Les différents paramètres de calculs contiennent par exemple le nombre de points du HALO (*Glb_pil*), la date de départ (*Pil_jobstrt*) et celle de la fin du calcul (*Pil_jobend*) ainsi que son incrémentation temporelle. La définition de la dynamique contient par exemple, le nombre de fois que le modèle calcule les statistiques des paramètres météorologiques (*Step_gstat*) ou et le nombre de Courant. Ce nombre sans dimension est utilisé dans les simulations par élément fini et sert de condition de convergence qui limite le pas de temps. Le nombre de Courant maximal est de 1, mais en pratique, sa limite se rapproche de 0,6. Différents types de schémas de la physique peuvent être sélectionnés pour définir l'atmosphère (*physics_cfgs*). Le fichier nommé «outcfg.out» définit les fichiers de sorties de GEM. Il sert également à déterminer le type et le nombre de niveaux verticaux utilisés (*levels*), à définir les variables qui seront transcrites dans les fichiers de sortie (*sortis*), et à fixer la fréquence de sortie de ces fichiers.

Les fichiers standards de RPN de sortie sont générés en trois types de fichiers. Les fichiers de sortie ayant pour suffixe *dm* ou *pm* comprennent les variables dynamiques et physiques sur des niveaux verticaux natifs du modèle. Les fichiers avec le suffixe *dp* contiennent les variables dynamiques retranscrites sur des niveaux de pression. Tout comme précédemment un fichier de contrôle est généré pour suivre le calcul effectué par GEM.

Deux scripts, avec des extensions *log*, ont été écrits pour automatiser la création de l'environnement adéquat à la modélisation ainsi que pour démarrer un calcul avec GEM. La première programmation, « créer_exp.sh », sert à créer les dossiers nécessaires qui accueilleront les deux exécutables principaux (GEMNTR, GEMDM), les fichiers de contrôles et les fichiers de sorties. La deuxième programmation, « run_exp.sh » sert à débiter le calcul et à exécuter les deux scripts « Um_runent » et « Um_runmod ». La Figure 6.19

démontre la schématisation de cet environnement en démontrant les fichiers, les exécutables et les scripts nécessaires au démarrage et au calcul de GEM.

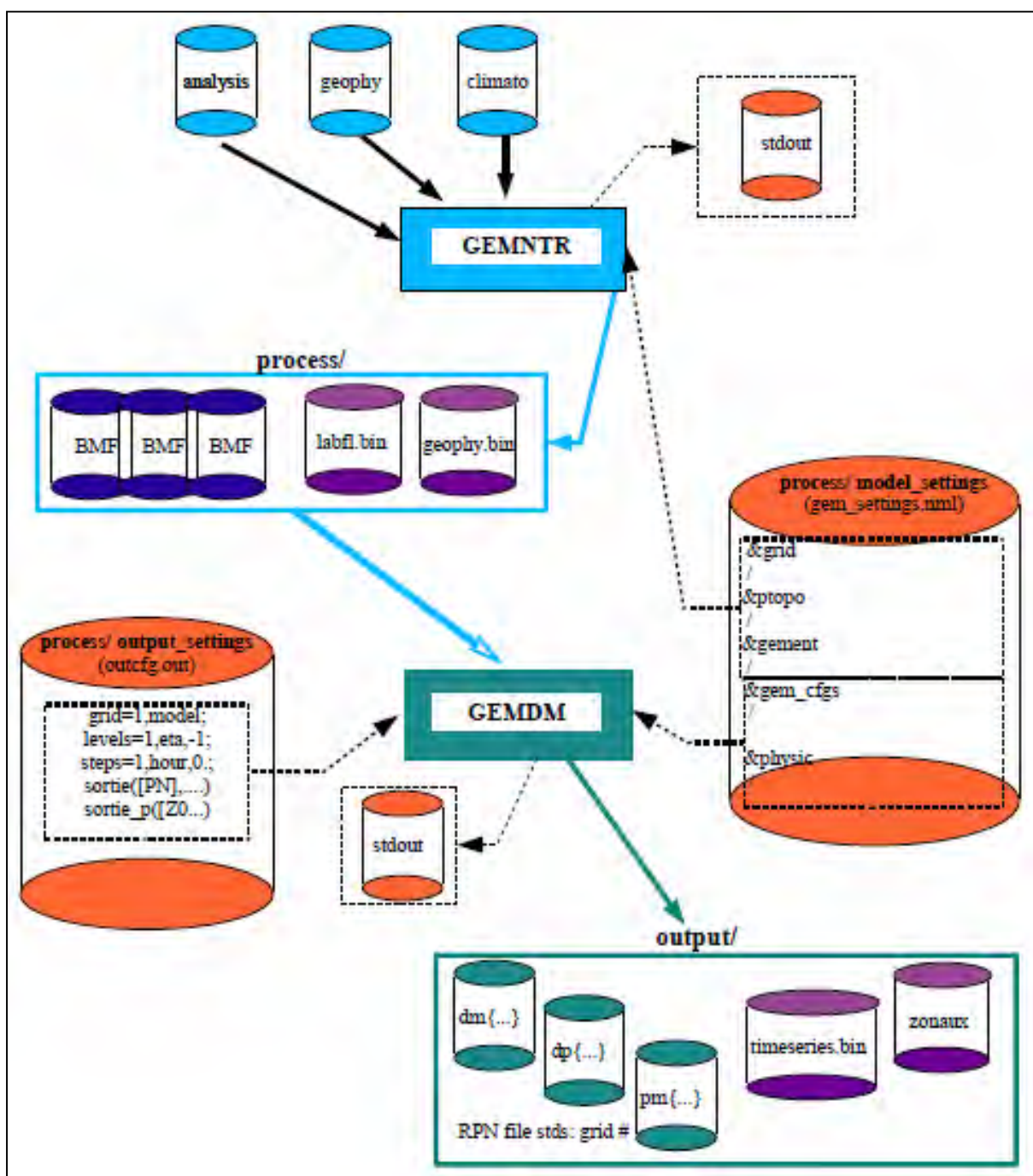


Figure 6.19 Les fichiers nécessaires au bon fonctionnement de GEM
Tirée du site Internet : <http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn.comm>

6.6.2 La localisation

La version de GEM 3.3.0 ainsi que la physique 4.5 sont actuellement installées sur les grappes de calcul Betz et Boreas de l'ÉTS. La grappe de calcul Betz possède 10 nœuds de calcul ayant chacun un processeur de 2,34 Ghz et une mémoire 0,98 GB. En prenant en considération le nœud principal, qui dirige les calculs de GEM sur les différents nœuds, la mémoire totale de cette grappe d'ordinateur s'élève à 9,8 GB. Boréas comprend 58 nœuds possédant chacun 8 processeurs de 1,95 Ghz et une mémoire de 15,67 GB. En considérant le nœud principal, sa mémoire totale s'élève à 916,66 GB. Pour une résolution globale, GEM requiert de plusieurs processeurs dépassant ceux disponibles sur Betz. Ainsi, pour cette étude, tous les calculs s'effectuent sur Boréas.

6.6.3 La nouvelle version

Une nouvelle version 4.2.0 de GEM, et du schéma de microphysique de Milbrandt et Yau (Maillot et al., 2010) sont maintenant installés, depuis l'automne 2011. Cette étude a débuté lorsque seulement la version 3.3.0 de GEM était installée. De ce fait, les modélisations ont été effectuées avec cette dernière version. La nouvelle version de GEM-LAM et du schéma de microphysique, maintenant installée à l'ÉTS, est la même que celle qui a fait ses preuves lors des Jeux olympiques à Vancouver en 2010. Cette version est une amélioration de la version 3.3.0. et peut donc être téléchargée via le site internet de RPN-COMM et la nouvelle version de la physique est 5.2.1.

En ce qui concerne le schéma de microphysiques, de nouvelles variables de sorties telles que la densité de masse de la neige ou encore le taux de précipitation total de la neige sont maintenant disponible. D'après les deux auteurs (Maillot et al., 2010)

de ce schéma, lors des jeux Olympiques à Vancouver en 2010, ce fut la première fois que leur schéma fonctionnait pour ce type de prévision opérationnel, et ce, avec grand succès.

CHAPITRE 7

LA VALIDATIONS DE LA MODÉLISATION GEM

Ce chapitre porte sur les validations en comparant les valeurs obtenues par simulation avec celles de la NARR en projection polaire stéréographique, effectuée précédemment. La simulation est sur une période de 36 heures, soit du 18 janvier 2006 à 0Z au 19 janvier 2006 à 12 Z. Cette date a été étudiée par Aurélie Gayraud (Gayraud, 2009), qui a démontré qu'il existait des événements météorologiques avec des précipitations givrantes. Cette dernière étude a été effectuée grâce aux analyses météorologiques basées sur l'assimilation, exécutées par GEM, des données d'Environnement Canada. Ces fichiers d'analyses possèdent une résolution spatiale de 100 km (Gayraud, 2009).

7.1 Les modélisations des prévisions numérique de GEM

Dans un premier temps, la simulation est effectuée avec une résolution spatiale de 32 km (GEM-32), pilotée par 13 fichiers de ré-analyse, couvrant 36 heures. Cette première validation permet d'assurer une bonne lecture des fichiers de la NARR et de démontrer leur compatibilité avec le modèle de prévision numérique GEM. Ainsi, les résultats de GEM-32 devront ressembler aux valeurs de la NARR. Par la suite, une seconde simulation est produite avec une résolution spatiale de 5 km (GEM-5). Cette modélisation permet de valider le raffinement de la prévision numérique avec les fichiers de la NARR rendus compatibles pour la lecture de GEM. Si cette simulation est effectuée à 5 km de résolution, c'est pour obtenir davantage d'information concernant la prévision des précipitations givrantes et de leur accumulation. GEM-5 est pilotée également par la NARR à une résolution de 32 km, car pour la version 3.3.0, aucune simulation en cascade n'a été réussie dans le cadre de cette étude. Pour effectuer ces calculs, le fichier contenant les paramètres de la géophysique est généré avec la même résolution spatiale que celles choisies pour la modélisation GEM-5 et GEM-32. Cette démarche est effectuée à l'aide du programme «gengeo» d'Environnement Canada.

La validation, pour les deux simulations, s'effectue en comparant les valeurs simulées par GEM avec les valeurs de données d'entrées, soit celles de la NARR. En tout premier lieu, des histogrammes représentant les fréquences spatiales des écarts entre les valeurs simulées et la ré-analyse sont calculées au temps initial de la simulation. Ces écarts sont la soustraction entre les données de sorties de GEM et celles de la NARR (Écart = GEM - NARR) et sont représentés sous forme d'histogrammes. Les variables utilisées pour cette comparaison sont celles essentielles au démarrage de GEM; la hauteur géopotentielle, la température, l'humidité spécifique et les vecteurs du vent. Étant donné que l'humidité relative n'est disponible qu'à deux mètres du sol dans les fichiers de la NARR et l'humidité spécifique sur plusieurs niveaux de l'atmosphère, c'est ce dernier paramètre qui est comparé. Pour valider l'état initial de la simulation, les comparaisons sont effectuées à la surface, à une hauteur de 700 mb et une hauteur de 300 mb. La comparaison à la surface peut se faire soit sur des niveaux isobariques ou métriques (ce choix s'effectuera ultérieurement).

Les valeurs des paramètres météorologiques des fichiers de sorties de GEM sont sur des niveaux isobariques et sur des niveaux de rapport de pression, appelés sigma ou notés σ . Il est donc possible de comparer les différents paramètres de GEM reposant sur des niveaux sigma avec ceux associés à des niveaux métriques de la NARR. Les valeurs associées au niveau $\sigma=1$ servent de condition aux frontières à la surface de la Terre. Il est alors préférable de faire l'analyse pour $\sigma < 1$, soit de $\sigma=0,9950$. La valeur de $\sigma=0,9950$ est le premier niveau intérieur du maillage choisi pour GEM. Comme l'air est considéré comme un gaz parfait, l'équation hydrostatique est utilisée, afin de convertir cette hauteur en mètre.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma \equiv \frac{P}{P_{sol}} = 1 \text{ au sol} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial z} = -\sigma \frac{g}{R\bar{T}} \end{array} \right. \quad (7.1)$$

Avec R la constante spécifique de l'air sec qui est de $287 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, g l'accélération gravitationnelle de 9.8 m.s^{-2} , $\bar{T}$ la température moyenne $[K]$, σ rapport entre la pression locale avec celle au sol et z la hauteur en mètre. La température moyenné sur les 36 heures de cette

étude est de 300 K, et la variation de sigma est de 1 à 0,9950. Avec ces paramètres, la hauteur métrique représentant la variation de pression de 0,9950 est de 44 m. Dans la NARR, la hauteur la plus proche de cette valeur est de 30 m. Ainsi, une première comparaison est effectuée entre les valeurs à 30 m du sol et à $\sigma=0,9950$. La Figure 7.1 montre la superposition des isothermes à l'état initial de GEM-32, pour un rapport de pression de 0,9950 (bleu) avec celles de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z à 30 m du sol (magenta). Cette image, effectuée à l'aide de l'outil «xrec» d'Environnement Canada, montre qu'il existe des écarts incohérents de température, et ce, même au niveau de la mer. Ces écarts ne sont donc pas dus à la différence de la géophysique utilisée par GEM et par la NARR. Toutefois, à ce temps initial ($t=0$), ces écarts peuvent être dus à une redéfinition des valeurs de la température afin de satisfaire l'équation hydrostatique intégrée dans le modèle. Ainsi, à $t=0$, GEM laisse les hauteurs géopotentielle intactes et ajuste les valeurs de la température pour satisfaire les équations 7.1 pour tous points de grilles. Il est également montré que le modèle génère des températures plus élevées que celle de la NARR.

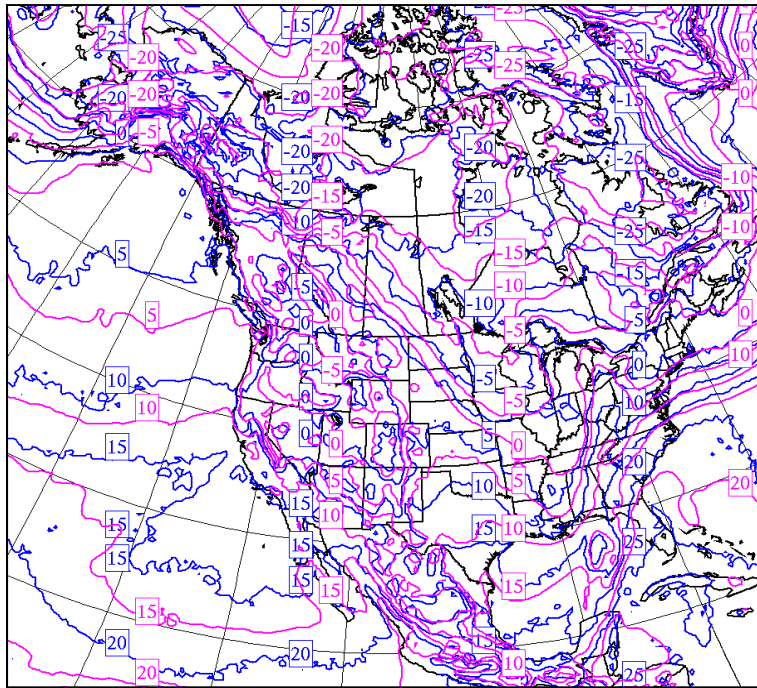


Figure 7.1 Superposition des TT [°C] à l'état initial de GEM-32 à un rapport de pression de 0,9950 (bleu) avec la NARR à 30 m le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta)

La Figure 7.2 montre la superposition des isothermes à l'état initial de GEM-32, pour un rapport de pression de 0,9950 (bleu) et à une hauteur isobarique de 1000 mb (magenta). Cette image montre la cohérence de l'évolution verticale de ce paramètre.

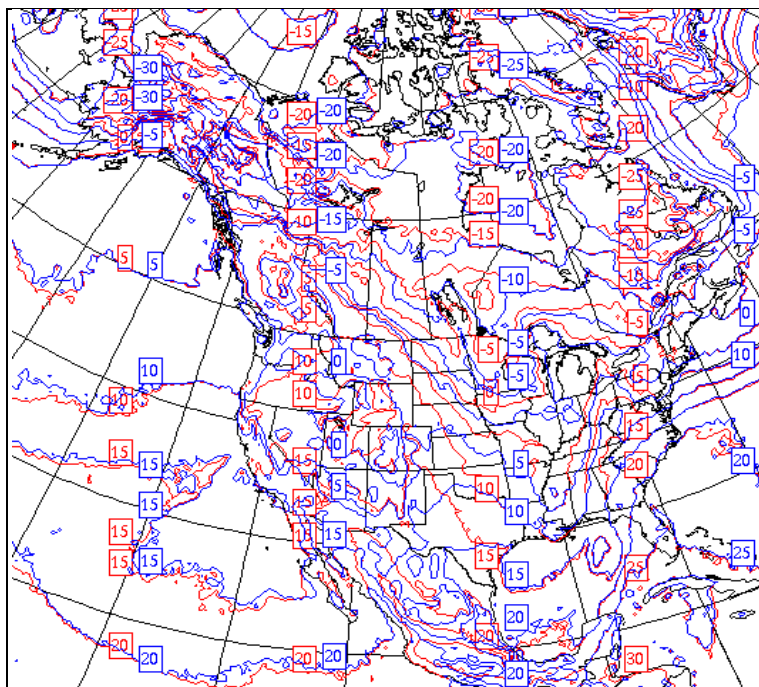


Figure 7.2 Superposition des TT [°C] à l'état initial de GEM-32 à un rapport de pression de 0,9950 (bleu) et une hauteur isobarique de 1000 mb (rouge)

La Figure 7.3 montre la superposition de la température [°C] observée dans les fichiers de la ré-analyse, le 18 janvier 2006 à 0Z à une hauteur de 30 m (rouge) et à 1000 mb (magenta). Cette image présente de trop grands écarts entre les isothermes sur les deux niveaux verticaux. Ainsi, étant donné qu'il existe une incohérence concernant l'évolution verticale de la température près du sol dans la NARR, la validation de cette étude s'effectue à 1000 mb, 700 mb, 300 mb. Le choix de ces trois hauteurs permet de valider la lecture des fichiers d'entrée aux limites de l'atmosphère, 1000 mb et 300 mb, ainsi que à une hauteur attendue de la couche nuageuse, soit à 700 mb. Cette dernière hauteur est primordiale pour la modélisation des précipitations givrantes et donc du givrage atmosphérique.

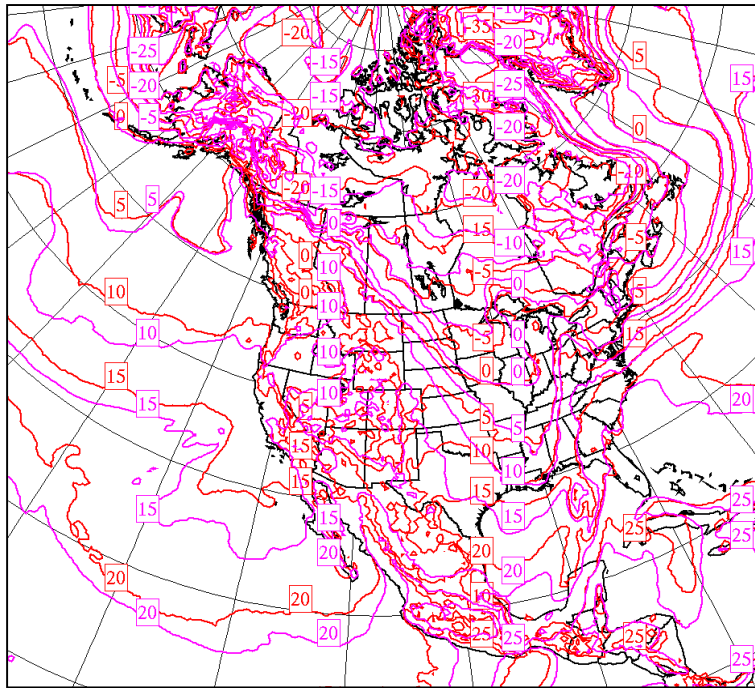


Figure 7.3 Superposition des TT [°C] de la NARR
le 18 janvier 2006 à 0Z à une hauteur
de 30 m (rouge) et de 1000 mb (magenta)

Après avoir validé les paramètres essentiels au démarrage de GEM sur les trois hauteurs isobariques, une seconde comparaison est effectuée en fonction du temps de la simulation, à toutes les trois heures, heures disponibles de la NARR. Cette validation est également effectuée pour GEM-5 et GEM-32. Ce type de validation est, de la même manière que précédemment, représenté par le calcul des fréquences des écarts entre les fichiers simulés et ceux de la ré-analyses. Ces écarts sont également la soustraction entre les fichiers modélisés et ceux de la ré-analyse ($\text{Écart} = \text{GEM} - \text{NARR}$). Finalement, les variables de précipitations sont validées pour les deux types de simulation. Dans un premier temps, la corrélation du taux de précipitation total [m.s^{-1}], incluant les précipitations liquides et solides, est calculée. Cette variable apparaît de manière quantitative dans les deux types de fichiers. Les valeurs concernant l'accumulation totale de la de neige, de la pluie verglaçante et de la pluie sont quantitatives dans les fichiers de sorties de GEM. Toutefois, dans la NARR, ces paramètres sont annotés du chiffre 1 s'il existe un de ces types de précipitations et de 0 s'il n'y en a pas. À des fins de validation, à l'aide de la programmation de Matlab et des outils de M_MAP

(Pawlowicz, 2005), une cartographie en projection conique conforme de Lambert est créée en superposant les données quantitatives modélisées avec celles qui sont booléennes (1 et 0) de la ré-analyse. Le taux de précipitation et l'existence de leur accumulation sont analysées à 9Z, 18Z et 27Z.

Pour comparer la simulation GEM-5 avec celle de GEM-32, le programme « pgsm » d'Environnement Canada est utilisé pour transposer la grille de GEM-32 sur une grille possédant les mêmes caractéristiques que GEM-5. Pour arriver à ces fins, le programme « pgsm » effectue une interpolation, pour chacune des variables traitées, et le type d'interpolation est défini par l'utilisateur. De cette méthode, une interpolation cubique est utilisée pour les variables du démarrage de GEM et une interpolation arrondie, appelée interpolation par plus proche voisin, pour les variables de précipitations. Étant donné que les résultats de l'accumulation de la neige, de la pluie et de la pluie verglaçante sont annotés de 1 ou 0, une interpolation arrondie est adéquate.

Pour valider le module du vent, la cartographie représentant la superposition vectorielle entre GEM et NARR est effectuée à l'aide du logiciel d'Environnement Canada, « xrec ». Cette fonction utilise implicitement le même interpolateur que «pgsm».

Concernant la validation de GEM-32, une comparaison est effectuée avec la cartographie du givrage atmosphérique de Dupire (Dupire, en cours). Pour son projet d'étude, Dupire effectue une cartographie en accumulant un nombre d'heures de givre au niveau du moyeu, soit entre 50 m et 80 m d'altitude ou encore pour une hauteur σ comprise entre 0,995 et 0,992. Cette méthode s'appuie sur celle utilisée par Comeau (Comeau, 2008) qui consiste à déterminer les heures des événements givrant lorsque la température est inférieure à 0°C et que l'humidité relative est supérieure à 92%, à 10 m de la surface, soit $\sigma \sim 0.999$. Cette dernière étude repose sur une méthode d'extrapolation verticale basée sur la couche de surface turbulente et repose sur les fichiers de la NARR. Le but de cette validation est d'utiliser les valeurs de GEM pour générer une même carte et ainsi la comparer avec celle générée avec la NARR. Pour ce faire, les matrices de la température et de l'humidité spécifique, à toutes les heures de la simulation

et à une hauteur de rapport des pressions de 0,9950, sont utilisées en tant que données d'entrées à l'algorithme de Dupire (Dupire, en cours). Cette méthode sert à de recréer une carte des évènements du givre à une résolution temporelle d'une heure. Les évènements givrants sont accumulés sur la durée de la simulation, soit 36 heures et sans extrapolation verticale.

7.2 Les validations de GEM-32 km

La grille servant de calcul à la modélisation est contenue dans celle de la NARR et couvre un maximum de domaine. La Figure 7.4 montre la grille sphérique à pôle Nord basculé servant à GEM-32 (bleu) superposée à celle de la NARR sur une projection polaire stéréographique.

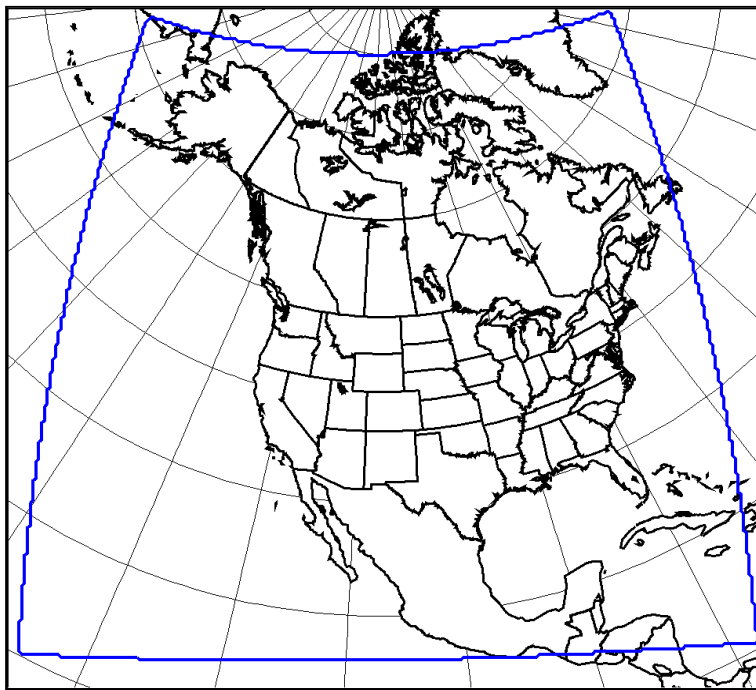


Figure 7.4 Domaine GEM-32 sphérique à pôle basculé (bleu) superposé au domaine NARR-FST en projection polaire stéréographique

Étant donné que les deux grilles appartiennent à une projection différente, les frontières ne coïncident pas. La grille de la simulation contient 230 points en abscisse par 220 points en

ordonnée ayant pour résolution spatiale $0,288^\circ$, soit 32 km. Elle mesure 7360 km d'Ouest en Est et 7040 km du Nord au Sud. Les coordonnées centrales sont 107° Ouest et 48° Nord. Pour obtenir le même axe que la NARR, il n'y a pas de rotation de l'équateur numérique. Les valeurs géographiques choisies de cet équateur sont de latitude 50° Ouest et de longitude 95° Nord pour GEM-32. Ce dernier pointe directement vers l'Est et est situé au centre du domaine. Par la suite, pour réaliser cette étude, quatre processeurs de la grappe de calcul nommée Boréas sont utilisés, soit 2x2 processeurs. Le nombre de points constituant le HALO est de 10, soit 4 % des points de grilles. Les fichiers de sorties sont disponibles à toutes les heures. Le pas de temps utilisé par le modèle, pour avoir un nombre de courant de 0,6, est de 300 secondes (pour une vitesse de vent zonale de 65 m/s) et le nombre de pas de temps est 432. Pour toutes les validations de cette étude, le HALO n'est pas considéré, car il existe une discontinuité des valeurs des paramètres entre cette aire et l'intérieur de la grille de calcul. Ainsi, dans ce chapitre, les images et les calculs sont effectués sans cette bordure. Cette différence est normale et permet la définition des limites latérales de GEM.

Une modélisation avec un pôle numérique basculé aurait probablement compris Terre-Neuve. Il serait bénéfique, pour la confection de l'Atlas du givre, d'investiguer la possibilité d'obtenir des simulations englobant cette province.

7.2.1 La validation de l'état initial de GEM-32

Concernant la validation de la hauteur géopotentielle (GZ), la Figure 7.5 montre les fréquences des écarts géopotentiels en décamètre (dam) entre l'état initial de la simulation et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z et pour les trois niveaux isobariques; soit 1000 mb, 700 mb, 300 mb. Pour effectuer ce graphique, les écarts sont classés par intervalle de 0.1 dam.

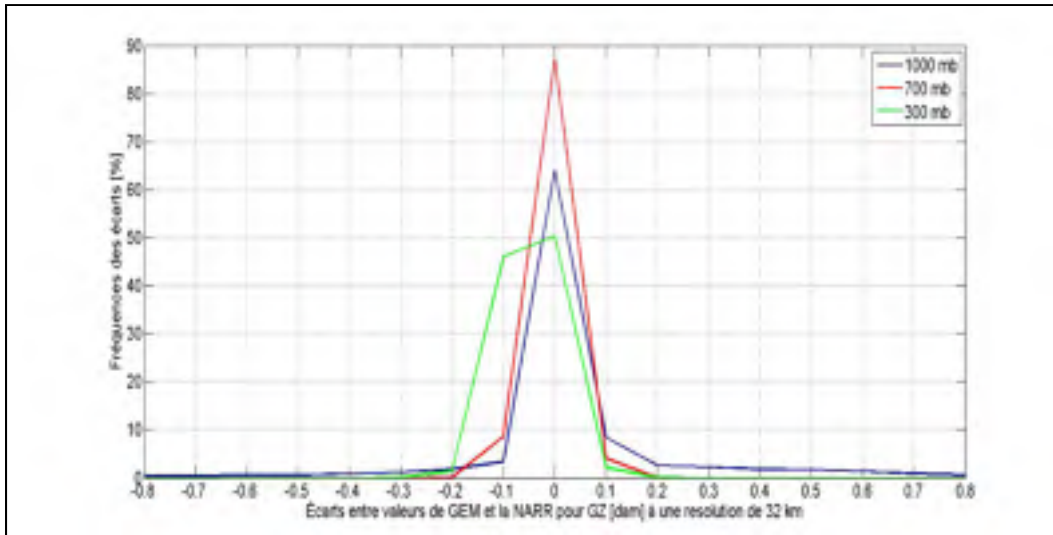


Figure 7.5 Écarts entre les valeurs de la GZ [dam] à l'état initial de GEM-32 et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z

Ces écarts sont tous centrés en zéro et varient majoritairement entre -0.2 dam et 0.2 dam. La Figure 7.6 montre la superposition des isohypses à l'état initial de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), pour une hauteur de 1000 mb. Cette image démontre une cohérence entre les deux types de données, autant en mer que sur Terre. Cette observation confirme donc que GEM fait un ajustement hydrostatique des températures, au temps initial, afin de satisfaire les valeurs des isohypses restées intactes. De plus, à cette hauteur, le calcul de la hauteur géopotentielle peut s'effectuer sous le sol et contient des valeurs arbitraires pour GEM ainsi que pour la NARR. Les écarts rencontrés sont au centre de la grille, ce qui est en adéquation avec la manière de calcul de GEM. C'est-à-dire que le modèle acquiert une autonomie de calcul vers le centre de la grille, typique du mode LAM. La superposition des isohypses à des hauteurs de 700 mb et 300 mb, démontre que les différences diminuent avec la hauteur (Voir Figure A XI-1). À 300 mb, la valeur de la hauteur géopotentielle varie de 830 dam à 970 dam soit 100 à 300 fois les valeurs observées à 1000 mb. Il est donc normal de rencontrer une augmentation des écarts à ce niveau.

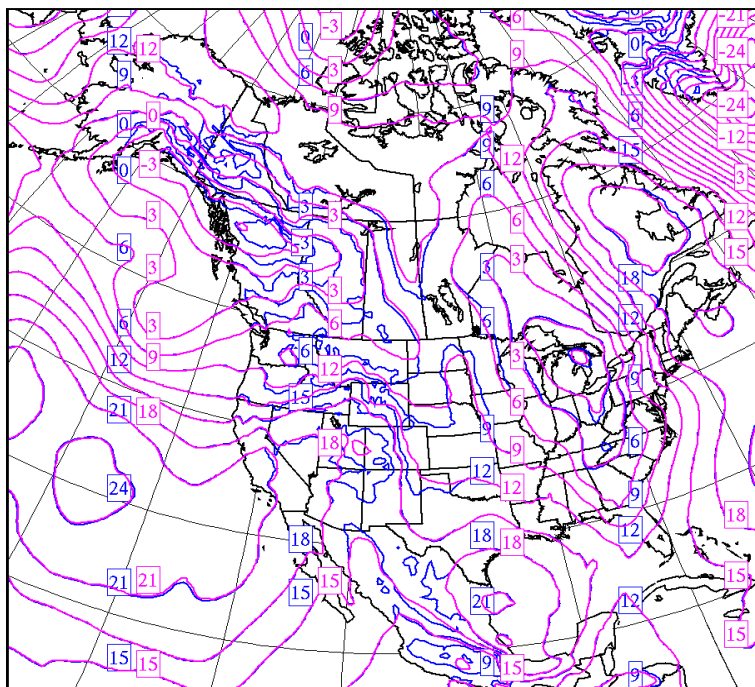


Figure 7.6 Superposition des GZ [dam] à l'état initial de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 1000 mb

De la même manière que précédemment, la Figure 7.7 montre des histogrammes des fréquences des écarts de la température (TT) en degrés Celsius [°C]. Les écarts calculés à 1000 mb sont échelonnés de 1°C tandis que pour les hauteurs de 700 mb et 300 mb les écarts sont échelonnés de 0.01°C. Pour les trois niveaux, les fréquences les plus élevées sont pour des écarts nuls. En hauteur, ces écarts sont principalement entre -0.5°C et 0.5°C. Cependant, à 1000 mb, l'étendue des écarts est plus grande et le modèle a tendance à surélever ces valeurs, tel que discuté précédemment, à cause de l'ajustement hydrostatique.

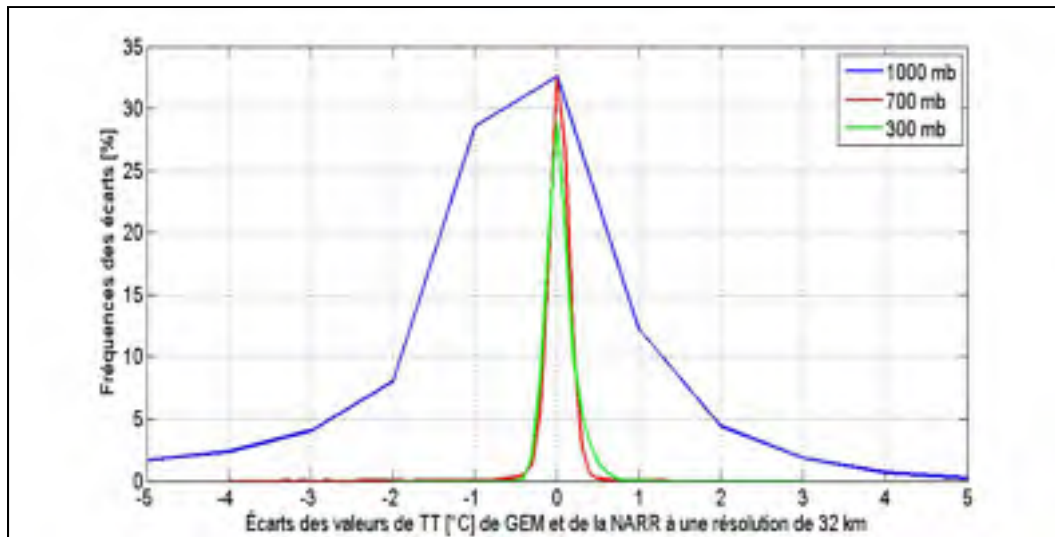


Figure 7.7 Écarts entre les valeurs de la TT [°C] à l'état initial de GEM-32 et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z

La Figure 7.8 représente la superposition des isothermes à l'état initial de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta) à 1000 mb.

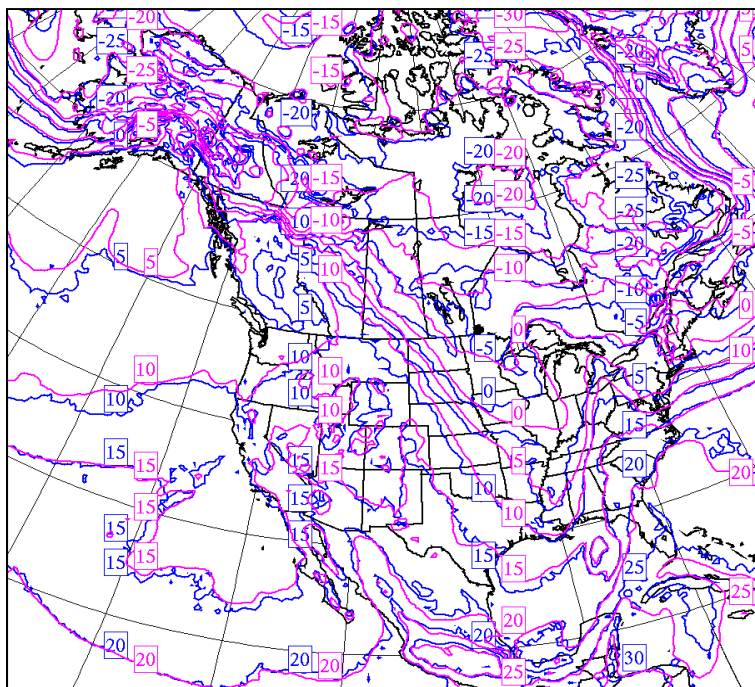


Figure 7.8 Superposition des TT [°C] à l'état initial de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 1000 mb

Tout comme l'observation de la hauteur géopotentielle, les écarts entre les valeurs simulées et de la NARR diminuent avec la hauteur. De ce fait, à des hauteurs de 700 mb et à 300 mb, les isothermes modélisées sont pratiquement superposés à ceux de la NARR (Voir Figure A XII-1).

La Figure 7.9 montre les fréquences des écarts pour l'humidité spécifique (HU) ayant pour unité des kg d'eau par kg d'air sec. Pour ce paramètre, l'échelle est de 0.0002 kg/kg pour les hauteurs de 1000 mb et 700 mb et de 0.00001 kg/kg pour 300 mb. Tout comme la température, les fréquences les plus élevées sont pour des écarts nuls. De même que, en hauteur ces écarts s'atténuent et à la surface, ils croissent. À une hauteur de 300 mb, étant donné que l'atmosphère contient moins d'humidité, les écarts sont pratiquement nuls.

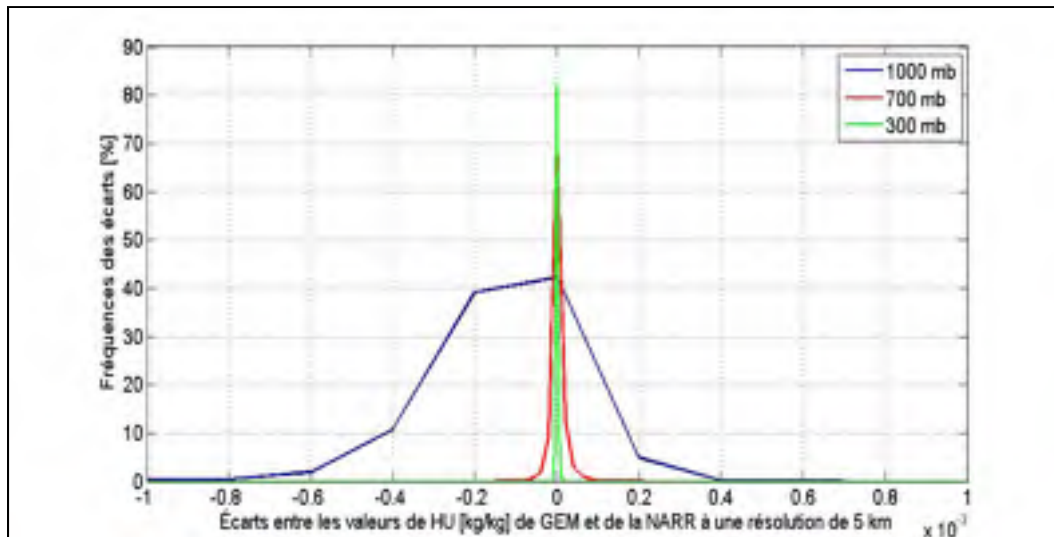


Figure 7.9 Écart entre les valeurs de HU [kg/kg] à l'état initial de GEM-32 et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z

Le comportement de la simulation pour la température et l'humidité spécifique est semblable, soit les écarts sont plus grands à une hauteur de 1000 mb. Dans la majorité du domaine de calcul, les écarts sont nuls, toutefois, le modèle sous-estime la quantité d'humidité spécifique sur la côte Ouest du continent et sous les Rocheuses. Les écarts attendus au centre de la grille, sont également observés en superposant ces iso lignes et s'estompent en hauteur (Voir Figure A XIII-1 et Figure A XIII-2). C'est également dans les mêmes régions qu'il existe de plus grands écarts de la hauteur géopotentielle et de la température. Les erreurs survenues au temps initial et à une hauteur de 1000 mb sont généralement où il existe de forts reliefs. Comme mentionnés, ces écarts sont attendus étant donné que dans les régions à forts reliefs, GEM et la NARR utilisent leur propre méthode pour paramétrer les variables météorologiques en dessous de ces reliefs.

La Figure 7.10 montre la superposition du vent [nœud] à l'état initial de GEM-32 (bleu) et celui observé dans les fichiers de la ré-analyse le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à une hauteur de 1000 mb. En général, le sens, la direction et la norme sont quasi identiques. Les faibles différences surviennent dans la direction, où une faible rotation est observée.

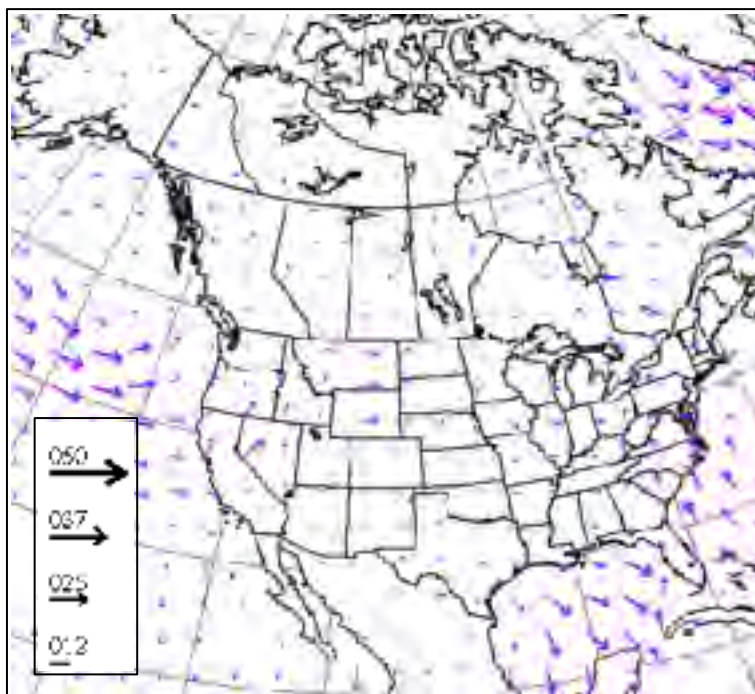


Figure 7.10 Superposition du vent [nœud] à l'état initial de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 1000 mb

L'observation du vent à des hauteurs de 700 mb et 300 mb, montre également une bonne validation de la modélisation de ce vecteur (Voir Figure A XIV-1).

7.2.2 La validation spatio-temporelle de GEM-32

Cette validation est l'analyse des écarts ($\text{Écart} = \text{GEM} - \text{NARR}$) entre les valeurs simulées et de la ré-analyse pour des hauteurs de 1000 mb et à 700 mb, pour toutes les 3 heures de la simulation.

La Figure 7.11 montre les fréquences des écarts de la hauteur géopotentielle (GZ) à 1000 mb de la simulation. À l'état initial de la simulation, les fréquences sont calculées à tous les 0.1 dam (Voir Figure 7.5), tandis que pour les heures suivantes de la modélisation, ces fréquences sont calculées à tous les 2 dam. Cette image démontre qu'à 3 heures de la simulation, l'étendue des écarts augmente et que dans la majorité des cas, la fréquence la plus

élevée est pour des écarts nuls. Cette observation confirme l'hypothèse attendue, soit que les fichiers modélisés ne sont qu'une lecture des fichiers d'entrées et donc une copie conforme. Après ce temps fondamental, malgré la croissance de l'étendue des écarts, les courbes ont un même comportement. En général, les fréquences les plus élevées apparaissent lorsqu'il n'y a pas d'écart et les courbes sont quasi-symétriques en ce point où peu de biais existent entre GEM-32 et la NARR.

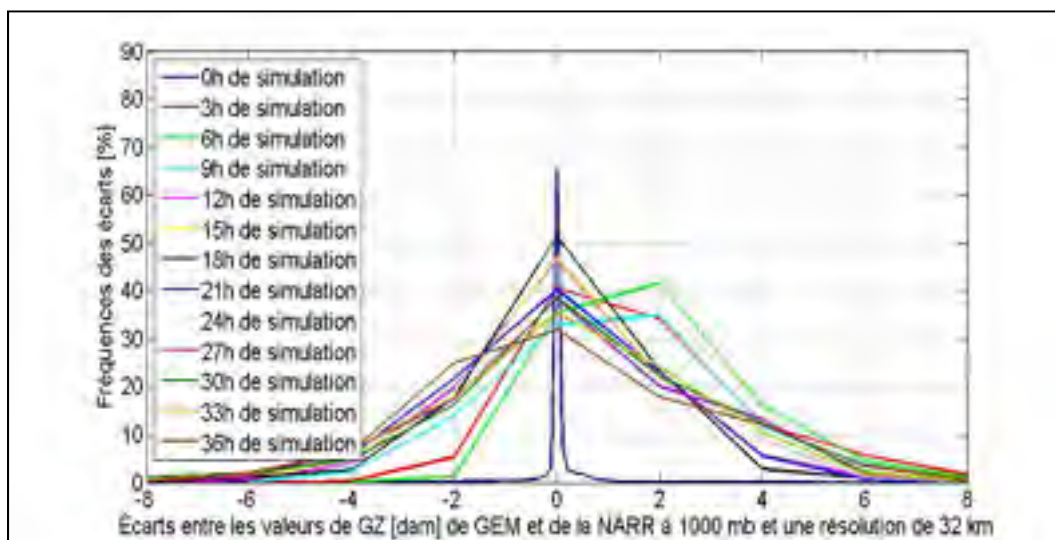


Figure 7.11 Variations temporelles des écarts entre les valeurs de la GZ [dam] de GEM-32 et de la NARR, à une hauteur de 1000 mb

La Figure 7.12 représente la superposition des isohypses à 9 heures de GEM-32 (bleu) et de la ré-analyse le 18 janvier 2006 à 3Z (magenta), à une hauteur de 1000 mb. Cette cartographie démontre que les hauteurs géopotentielle modélisées et observées dans la ré-analyses possèdent une même tendance et une même variation des gradients. C'est-à-dire que dans les deux cas, une haute pression est observée dans l'océan Pacifique au niveau de la Californie, une basse pression survole le Sud de l'Ontario ainsi que de forts gradients traversent le détroit d'Hudson. La comparaison avec la modélisation des géopotentiels à l'état initial de la simulation (Voir Figure 7.6), garantie qu'il existe une continuité temporelle de la modélisation. Toutefois, les histogrammes, représentés dans la Figure 7.11, montrent que les écarts augmentent après 9 heures de simulation. Cela démontre que les différences observées à un temps donné engendrons des erreurs sur le suivant. Étant donné, qu'au temps initial, la

modélisation n'est qu'une reproduction de l'information des fichiers d'entrés, la croissance de l'étendu des écarts est attendue. Malgré que la majorité des écarts est de 2 dam, les isohypses provenant de GEM suivent ceux de la NARR.

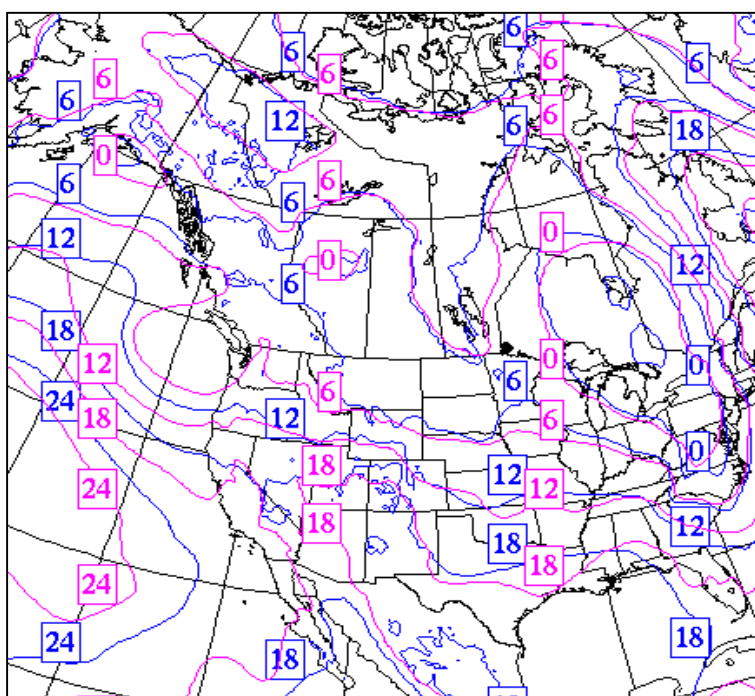


Figure 7.12 Superpositions des GZ [dam] à 9 heures de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 9 Z (magenta)

En altitude, les différences entre les valeurs modélisées et celles de la ré-analyse diminuent avec la hauteur, soit à 700 mb et 300 mb (Voir Figure A XI-2). De même qu'à 18 heures et 27 heures de simulation, les tendances entre les géopotentiels simulés et observés dans la NARR sont semblables et la haute et basse pression ont une même position géographique, et ce, pour 1000 mb (Voir Figure A XI-3), 700 mb (Voir Figure A XI-4) et 300 mb (Voir Figure A XI-5). Toutefois, le modèle tend à sous estimer la hauteur géopotentielle. La Figure 7.13 montre la fréquence des écarts de la hauteur géopotentielle, à 700 mb entre les valeurs simulées et de la ré-analyse. À cette hauteur, les courbes des tendances des fréquences se ressemblent entre elles et les étendues des écarts se resserrent par rapport à 1000 mb.

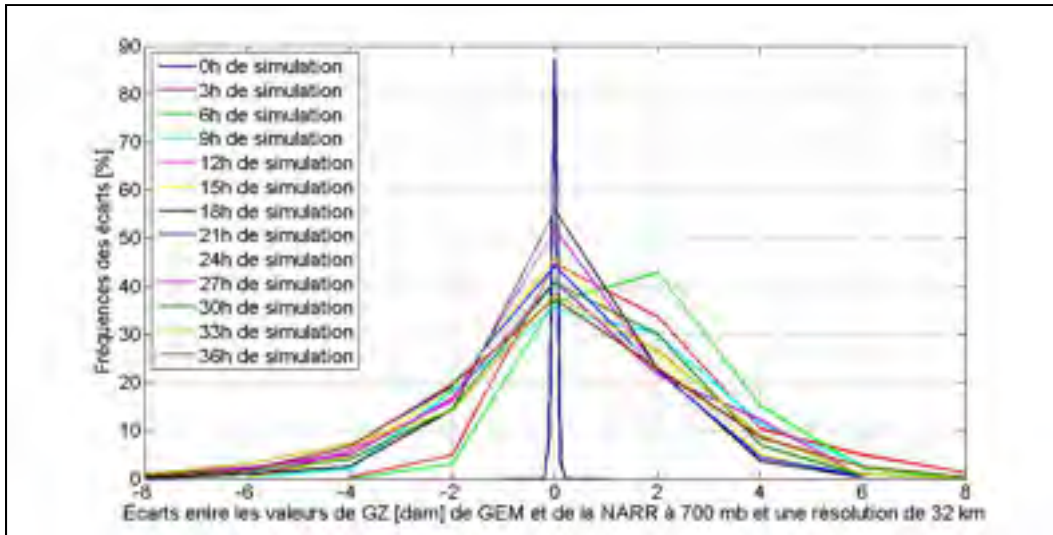


Figure 7.13 Variations temporelles des écarts entre les valeurs de la GZ [dam] de GEM-32 et de la NARR, à une hauteur de 700 mb

En conséquence, la hauteur géopotentielle a une cohérence dans l'évolution spatiale et temporelle de la modélisation. Après le temps initial, des erreurs sont engendrées d'une part due à l'autonomie spatiale du modèle vers le centre de la grille et d'autre part à son autonomie temporelle. De même que les écarts rencontrés à l'état initial ont une répercussion sur les prochains pas de temps.

Concernant la température, les mêmes analyses sont effectuées et représentées dans la Figure 7.14. Pour effectuer ce graphique, les écarts sont calculés à tous les 1°C, tout comme l'analyse au temps initial de la simulation et démontrée dans la Figure 7.7. Après le temps initial, les fréquences des écarts nuls décroissent pour osciller entre 24% et 28%. La Figure 7.14 montre que pour toutes les 3 heures de la simulation, les courbes ont une excellente symétrie centrée pour des écarts nuls et des tendances semblables.

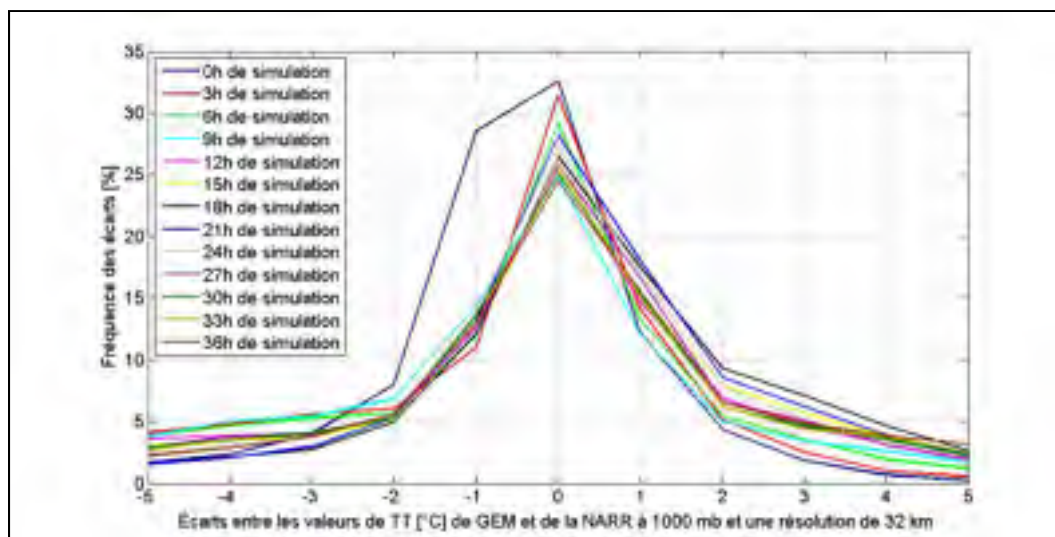


Figure 7.14 Variations temporelles des écarts entre les valeurs de la TT [°C] de GEM-32 et de la NARR à une hauteur de 1000 mb

La Figure 7.15 représente la superposition des isothermes à 9 heures de GEM-32 et de la NARR le 18 janvier 2006 à 9Z, à une hauteur de 1000 mb. Une des différences majeures se situe à proximité des Rocheuses. À l'Ouest de cette chaîne de montagnes, l'air est humide et froid et à l'Est l'air est chaud et sec. Ainsi, dans ce cas, lorsque l'air est plus chaud le modèle sous-estime la température et lorsque l'air se refroidit, le modèle surestime ce paramètre. Cette chaîne de montagnes s'étend aux Mexique avec la chaîne de montagnes Sierra orientale et la différence de température suit cette dénivellation. De plus, le Mexique est bordé à l'Ouest par une seconde chaîne de montagnes; la Sierra Madre Occidentale. Ainsi, les écarts proviennent là où il existe de forts reliefs. À l'Est du Canada, de plus grands écarts de température surviennent dans la région du Québec. La modélisation est plus fragile lorsqu'il existe des dénivelés ainsi que sur la frontière entre la terre et les océans. En comparaison avec la Figure 7.8, la Figure 7.15 montre qu'à 1000 mb, les températures sont semblables dans les mêmes régions. Les valeurs les plus élevées sont situées où de hautes pressions subsistent et les plus basses sont observées dans les régions des basses pressions. Tout comme l'état initial de la modélisation, les écarts s'estompent à 700 mb et 300 mb (Voir Figure A XII-2). Cette conclusion peut également se faire à 18 heures et 27 heures de simulation à une hauteur de 1000 mb (Voir Figure A XII-3). Les isothermes modélisées et observées dans la NARR possèdent les mêmes tendances. De même que d'après la Figure

7.14, l'étendu des écarts est semblable entre ces deux temps de modélisations. Ainsi, une bonne évolution temporelle est assurée.

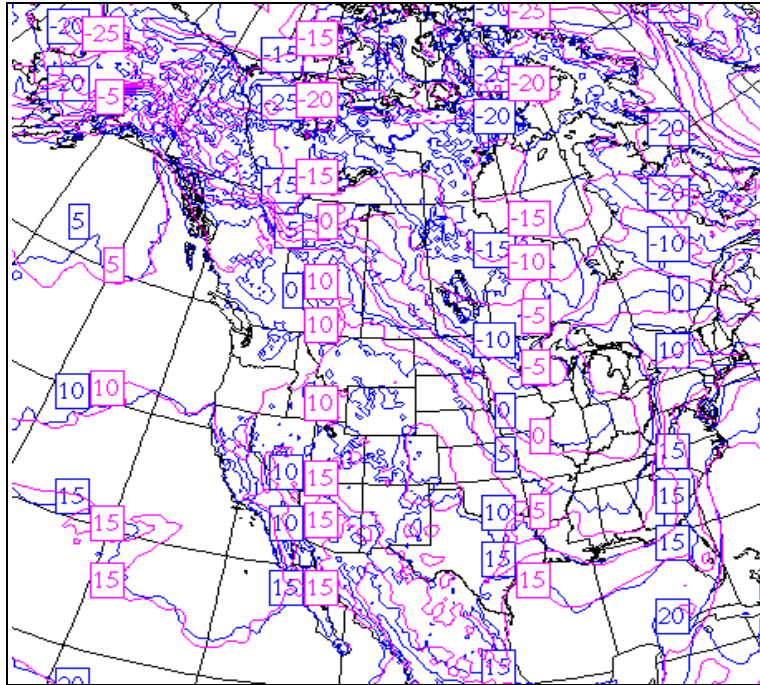


Figure 7.15 Superpositions des TT [°C] à 9 heures de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 9Z (magenta), à 1000 mb

L'analyse des histogrammes des fréquences des écarts à 700 mb, montre une bonne modélisation de la température à une hauteur attendue de la couche nuageuse. La Figure 7.16 suivante démontre les fréquences des écarts de températures entre GEM et la NARR à 700 mb à toutes les trois heures de GEM-32. Pour ce graphique, les courbes sont toutes centrées en zéro, soit les fréquences les plus rencontrées sont pour un écart nul. Tout comme cette même analyse à 1000 mb (Voir Figure 7.14), l'étendue des écarts croît en fonction du temps. Ce qui prouve encore une fois que l'autonomie temporelle du modèle amène des différences entre les deux types de fichiers. De plus, à 700 mb, l'étendue des écarts est plus petite. La Figure 7.17 montre la superposition des isothermes à 9 heures de GEM-32 et de la NARR le 18 janvier 2006 à 9Z, à une hauteur de 700 mb. En effet, les isothermes modélisées et observées dans la NARR se suivent.

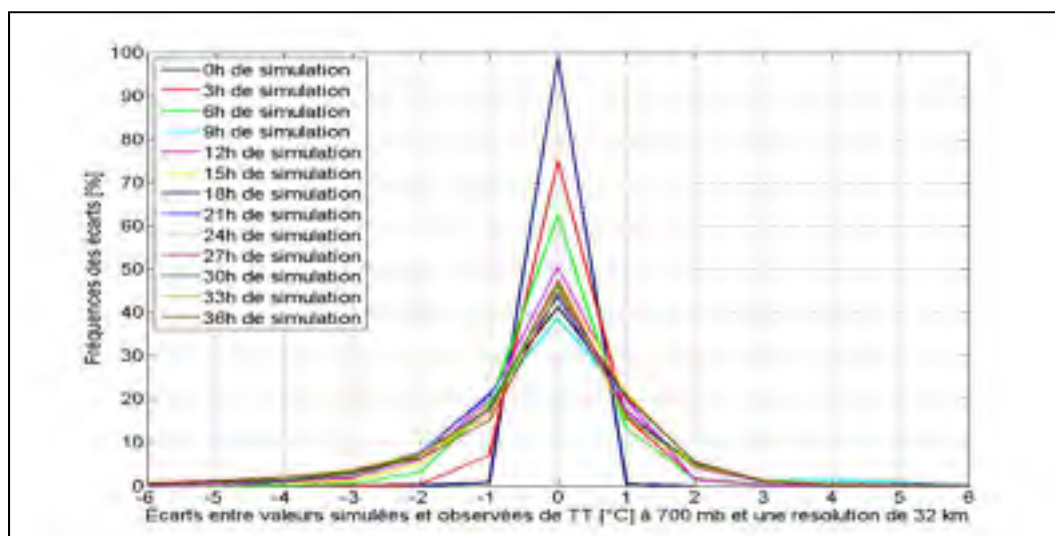


Figure 7.16 Variations temporelles des écarts entre les valeurs de la TT [°C] de GEM-32 et de la NARR à une hauteur de 700 mb

De même que la modélisation à 700 mb pour la 18^{ième} et la 27^{ième} heure de simulation est satisfaisante (Voir Figure A XII-4). La majorité des écarts est nulle et le modèle surestime autant de fois qu'il sous-estime la température. Par la même occasion, ce phénomène est également observé à une hauteur de 300 mb (Voir Figure A XII-5). Ainsi, la modélisation de cette variable est cohérente autant au niveau spatial que temporel.

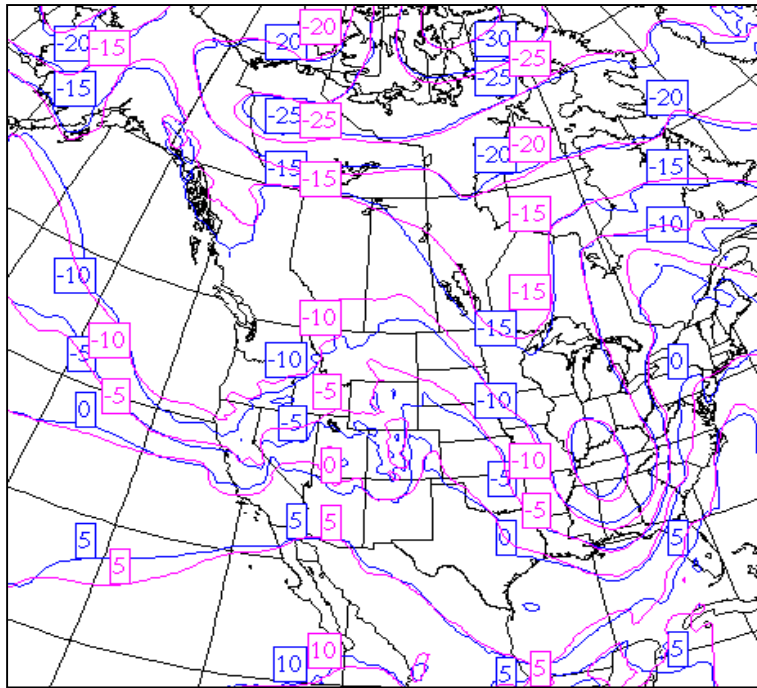


Figure 7.17 Superpositions des TT [°C] à 9 heures de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 9Z (magenta) à 700 mb

Concernant la validation temporelle de l'humidité spécifique, la fréquence des écarts est échelonnée de 0.0002 kg/kg. La Figure 7.18 démontre les fréquence des écarts de l'humidité spécifique entre GEM-32 et la NARR à 1000 mb. Contrairement au paramètre de la température, après 12 heures de simulations les écarts les plus fréquents ne sont plus nuls et le modèle à tendance à surestimer ce paramètre. Malgré cette dernière observation, la validation des précipitations givrantes effectuée ultérieurement est prometteuse. La Figure 7.19 montre la superposition de l'humidité spécifique à 9 heures de simulation avec celle de la NARR le 18 janvier 2006 à 9Z. Cette carte démontre en effet que le modèle à tendance à surélever ce paramètre. Cette conclusion est également effectuée à 18 heures et 27 heures simulation (Voir Figure A XIII-3), tout comme le démontre la Figure 7.18.

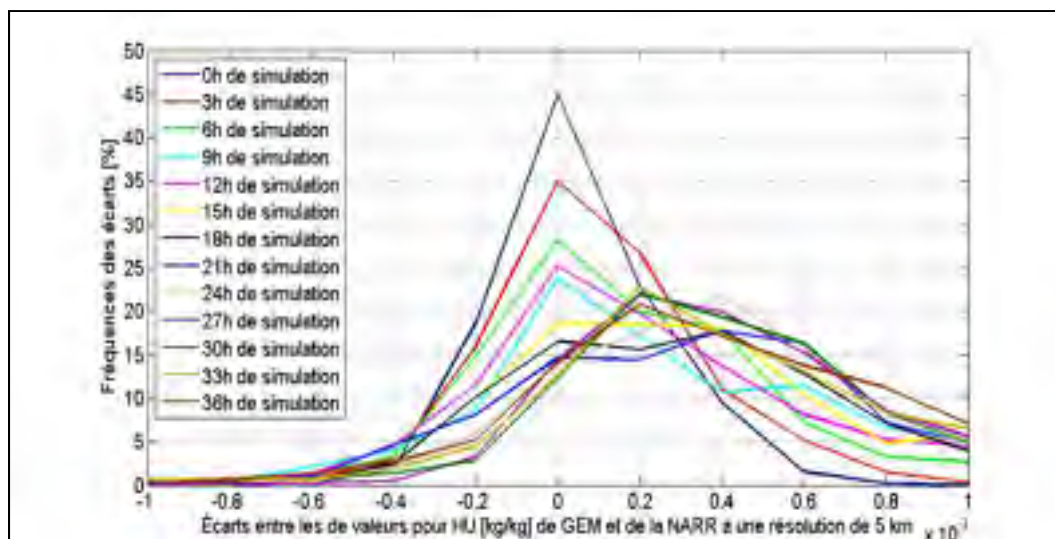


Figure 7.18 Variations temporelles des écarts entre les valeurs de HU [kg/kg] de GEM-32 et de la NARR à une hauteur de 1000 mb

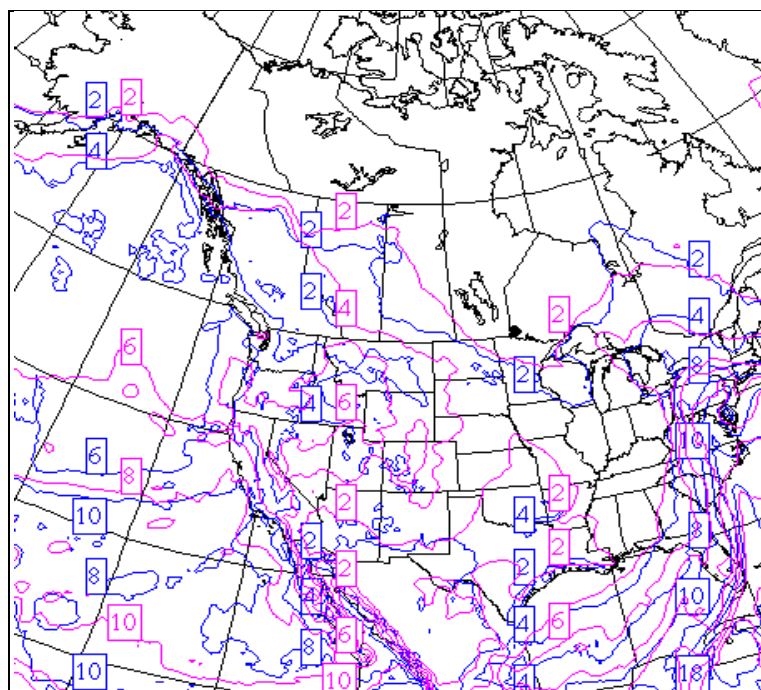


Figure 7.19 Superpositions de HU [kg/kg] à 9 heures de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 9Z (magenta), à 1000 mb

À 700 mb, l'observation des histogrammes des fréquences des écarts est concluante. Les courbes ont une même tendance, symétrique et centrée en zéro. Ainsi, les écarts sont moins importants qu'à 1000 mb. La Figure 7.20 relate ces faits et l'augmentation des écarts démontre donc un comportement normal et attendu. Dans ce cas-ci, un comportement semblable est observé dans la modélisation de la température et de l'humidité spécifique à une hauteur attendue de la couche nuageuse. La Figure 7.21 démontre la diminution des écarts avec la superposition des iso contours de l'humidité spécifique à 9 heures de simulation avec ceux de la NARR. Malgré que la fréquence des écarts nuls diminue avec le temps de la simulation, les résultats de la comparaison de l'humidité relative, à 18 heures et 27 heures de simulation, sont concluants (Voir Figure A XIII-3 et Figure A XIII-4).

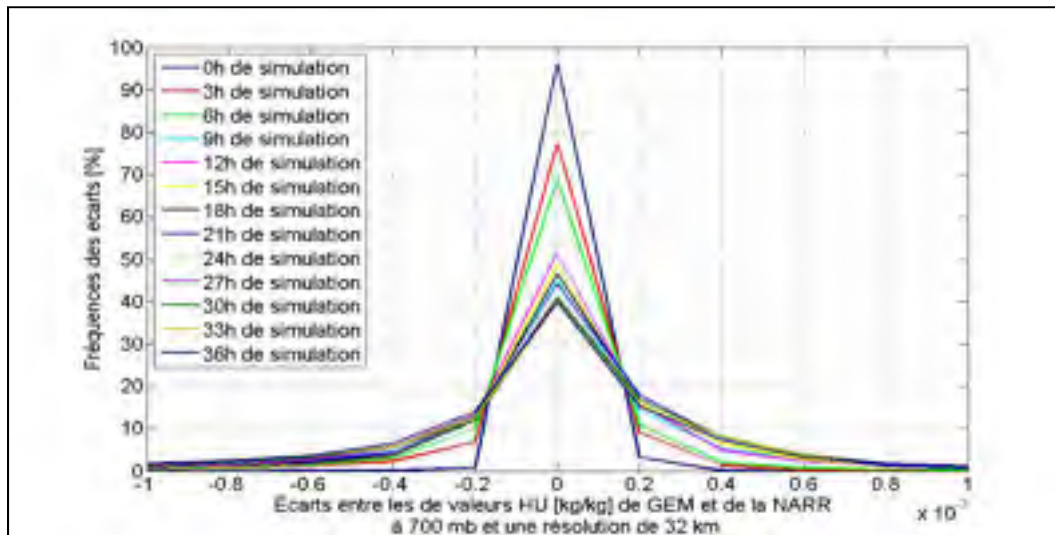


Figure 7.20 Variations temporelles des écarts entre les valeurs de HU [kg/kg] de GEM-32 et de la NARR à une hauteur de 700 mb

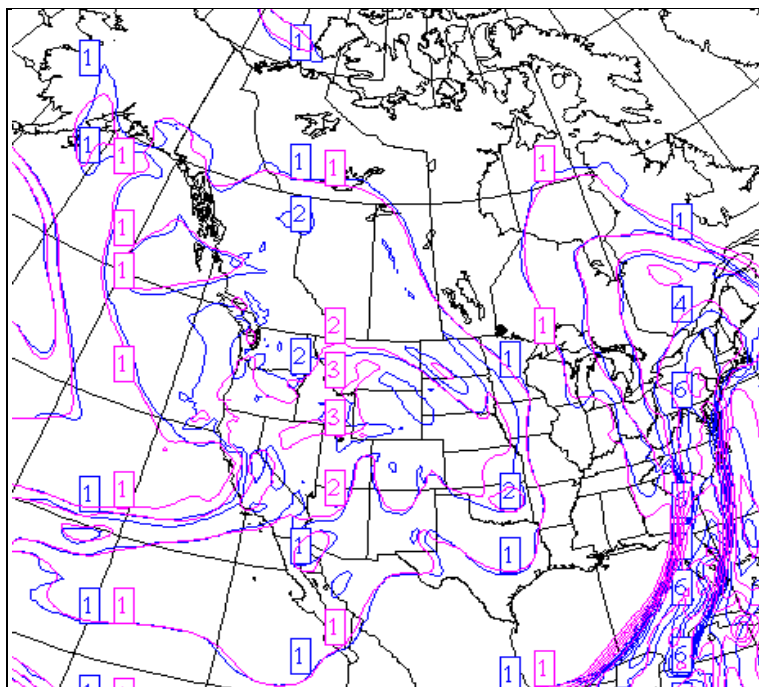


Figure 7.21 Superpositions de HU [kg/kg] à 9 heures
de GEM-32 (bleu) et de la NARR le
18 janvier 2006 à 9Z (magenta), à 700 mb

Concernant le vent, après 9 heures de simulations, des écarts observés sont définis par une légère rotation ou une différence au niveau de la norme. La Figure 7.22 montre la superposition du vent à 9 heures de GEM-32 (bleu) avec celui observé dans la NARR le 18 janvier 2006 à 9Z (magenta), à une hauteur de 1000 mb. Cette cartographie montre que les vecteurs du vent simulés et ceux observés dans la NARR sont semblables, à savoir qu'en général, la direction, la norme et le sens sont identiques. Les légères déviations sont observées où l'on retrouve de forts phénomènes météorologiques tels que les hautes et les basses pressions ou encore dans le détroit d'Hudson. Ainsi, la validation temporelle de ce paramètre modélisé est prometteuse. De même que dans la couche nuageuse les écarts entre le vent simulé et celui observé dans la NARR sont faibles (Figure A XIV-2), validant l'équation hydrostatique. Ces observations sont également possibles à 18 heures et 27 heures de simulation (Voir Figure A XIV-3, Figure A XIV-4, Figure A XIV-5).

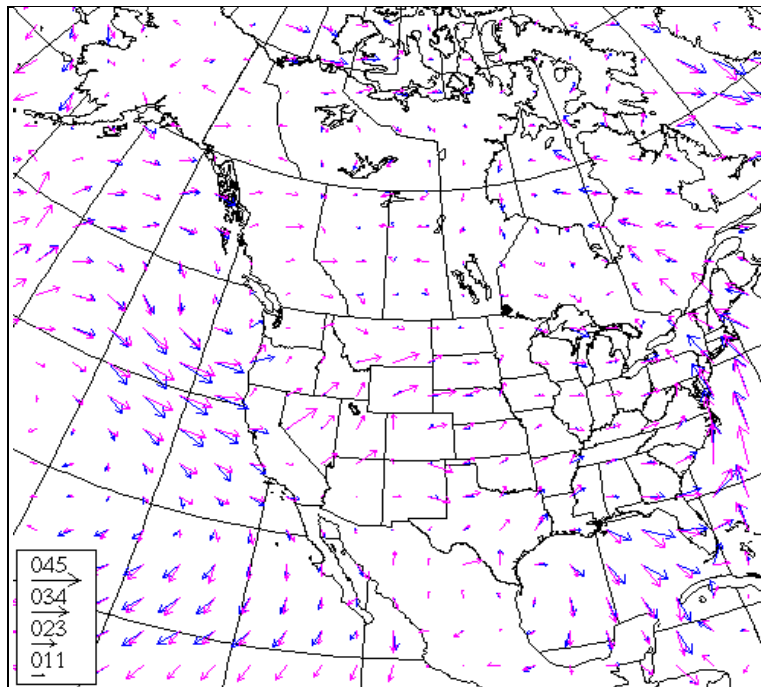


Figure 7.22 Superposition du vent [nœud] à 9 heures
de GEM-32 (bleu) et de la NARR le
18 janvier 2006 à 9 Z, à 1000 mb (magenta)

7.2.3 La validation des variables de précipitation de GEM-32

Pour effectuer cette validation, la corrélation entre les valeurs du taux de précipitation [m/s] simulées et de la ré-analyse est calculée. Par la suite, des graphiques booléens sont considérés pour comparer la présence de neige, de pluie verglaçante et de pluie. Le graphique booléen définit la présence de l'hydrométéore par le chiffre 1 et leur absence par 0. Il est à rappeler qu'aucune hauteur métrique ou isobarique n'est mentionnée pour ce paramètre, seule la mention « surface » est connue. Ainsi, pour ces variables, les comparaisons sont entre les paramètres de précipitations modélisés à un rapport de pression de 0,9950 et ceux observés dans la NARR considérée à la « surface ». Comparativement aux validations précédentes, l'analyse des précipitations modélisées se compare à un niveau sigma de 0,9950 et non de 1000 mb.

7.2.3.1 La validation du taux de précipitations total de GEM-32

Il est plus difficile de modéliser les variables de précipitations, car elles dépendent de plusieurs variables d'états, telles que la hauteur géopotentielle, la température, l'humidité spécifique, le vent ainsi que tous les processus complexes de la microphysique inclus dans le schéma de Milbrandt et Yau. Donc, les erreurs induites, lors de leur modélisation, se répercutent sur les variables de précipitation. Le modèle requiert aussi d'un temps de latence pour le calcul de toutes variables de précipitation, c'est-à-dire qu'au temps initial le modèle est exécuté à partir de fichiers météorologiques ne possédant pas de valeur de précipitations. Leur calcul est généré après un temps d'ajustement appelé « spin up ». Pour cette étude, la validation de la modélisation des précipitations est effectuée à 9 heures, 18 heures et 27 heures de simulation. Ces dernières valeurs sont comparées avec celles observées dans la NARR le 18 janvier 2006 à 9Z, le 18 janvier à 18 Z et le 19 janvier 2006 à 3Z. Le modèle de prévision numérique GEM représente le taux de précipitation ayant pour unité des m.s^{-1} , tandis que dans la NARR ce paramètre est en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. En approximant la masse volumique des précipitations à celle de l'eau, soit de 1000 kg.m^{-3} , la comparaison peut ainsi s'effectuer dans les mêmes unités [m.s^{-1}]. Pour ce cas, le taux de précipitation a pour ordre de grandeur, 10^{-7} m.s^{-1} , qui équivaut à $0,36 \text{ mm.hr}^{-1}$.

Dans un premier temps la Figure 7.23 démontre les valeurs de ce paramètre à 9 heures de simulation GEM-32 (haut) et celui observé dans la ré-analyse Nord américaine (bas) le 18 janvier 2006 à 9Z. Les traces de précipitations sont représentées par la couleur gise. L'image de la NARR démontre à l'Ouest des États-Unis un fort taux de précipitation sur la Californie et sur sa frontière avec l'Oregon variant de 10^{-7} m.s^{-1} à $12.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ soit de $0,36 \text{ mm.hr}^{-1}$ à $4,32 \text{ mm.hr}^{-1}$. Dans les sorties de GEM, ce taux est plus faible et est rencontré dans l'Ouest de la Californie. Toutefois, un taux de précipitation est observé dans la NARR au-dessus de l'Océan Atlantique et au Sud de l'Alaska, de même que dans le Nord du Canada, valeurs qui apparaissent comme des traces dans la modélisation. À l'Est du pays, le taux de précipitation observé dans la ré-analyse est également élevé au New Hampshire, Vermont et New York allant jusqu'à $13.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$, soit $4,68 \text{ mm.hr}^{-1}$. Cette observation est également présente dans

les fichiers de sorties de GEM, avec un taux légèrement plus faible, soit de $9.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ soit de $3,24 \text{ mm.hr}^{-1}$. Dans les deux cas, de la précipitation existe, démontrant l'existence d'un front froid longeant la côte américaine jusqu'à l'Ouest de Cuba. Les deux fichiers montrent qu'il existe également de faibles taux sur le Québec, à l'embouchure du Saint-Laurent et qui s'étendent jusqu'à la Baie d'Hudson et l'océan Arctique. Toutefois, la modélisation sous-estime le taux de précipitation comparativement aux données observées dans la NARR. À 18 heures de simulation, dans les deux types de fichiers, un déplacement d'Ouest en Est des précipitations est observé et il y a une dispersion de la précipitation dans l'Ouest des États-Unis (Voir Figure A XV-1). De même que le front, défini par la précipitation à l'Est des Amériques, se déplace vers l'Est dans les deux cas. Toutefois, ce taux est plus important dans la modélisation et il existe une augmentation de ce taux au Québec. À 27 heures de simulation et le 9 janvier 2006 à 3Z, le front ne paraît plus et traverse l'Atlantique (Voir Figure A XV-2). Pour cette heure, la modélisation montre que ce taux couvre pratiquement tout le pays pour s'étendre au Nunavut. Cette apparition existe également dans la NARR, mais s'étend davantage. Dans les deux cas, les taux de précipitations possèdent en général une même tendance et couvrent des domaines semblables. Ainsi, la modélisation du taux de précipitation est en adéquation avec les données observées dans la ré-analyse car la tendance de ce paramètre est semblable et les systèmes possèdent une même évolution spatio-temporelle.

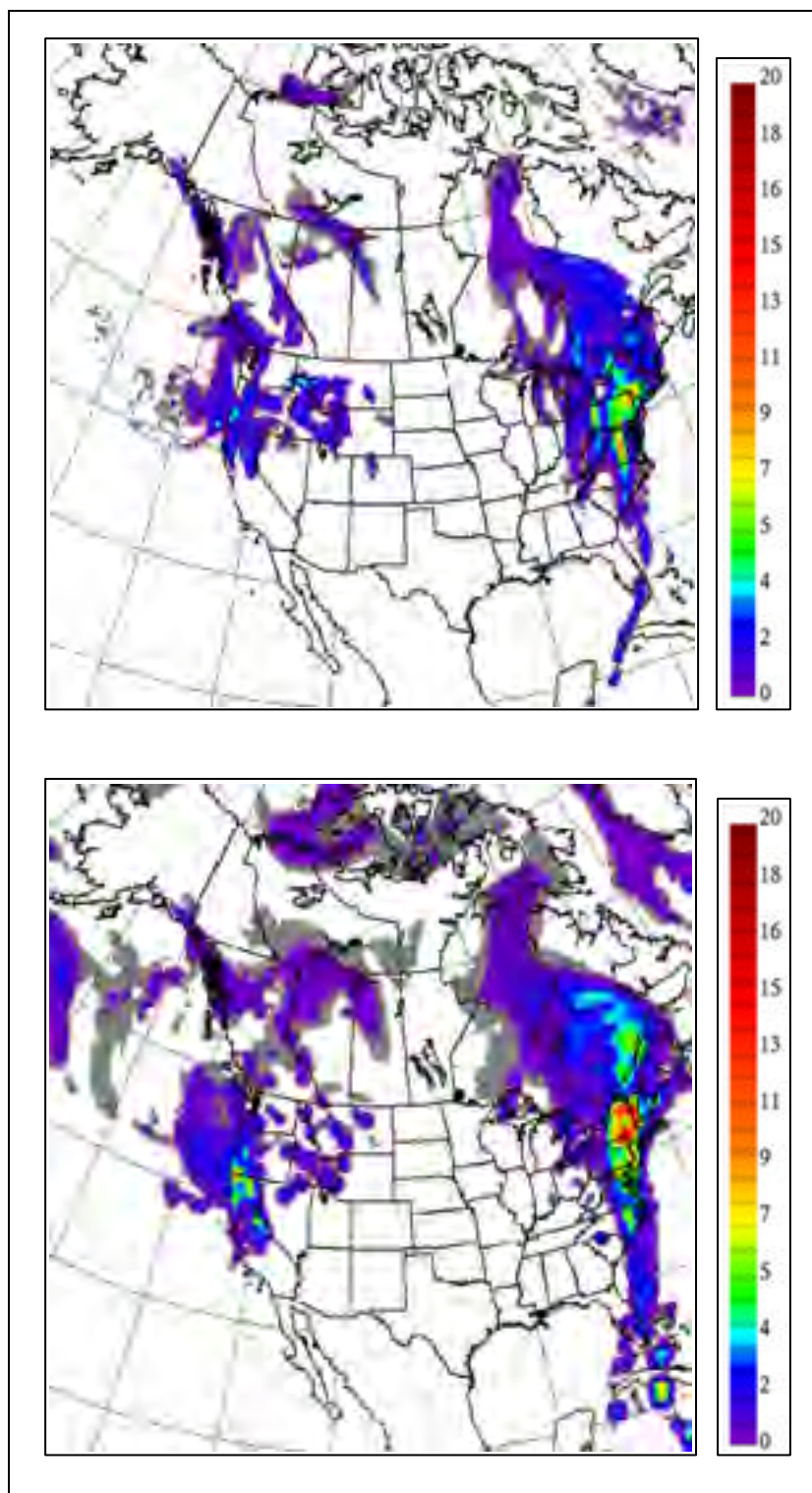


Figure 7.23 Taux de précipitation [10^{-7} m.s^{-1}] à 9 heures de GEM-32 (haut) et de la NARR (bas) le 18 janvier 2006 à 9Z.

Le calcul de la corrélation du taux de précipitation s'effectue à partir de la 3^{ème} heure de la simulation, car à l'instant initiale, la valeur de ce paramètre n'est pas disponible. Cette corrélation s'effectue à toutes les 3 heures, heures disponibles dans le NARR. La Figure 7.24 montre que les corrélations sont supérieures à 0,3, de la 3^{ème} heure à la 27^{ème}. Ensuite, une baisse importante est observée, ce qui démontre qu'il est plus difficile de modéliser ce type de variable passé une certaine heure de simulations. Ainsi, dans cette étude, la période de validité de la modélisation GEM des taux de précipitations est de l'ordre d'une journée.

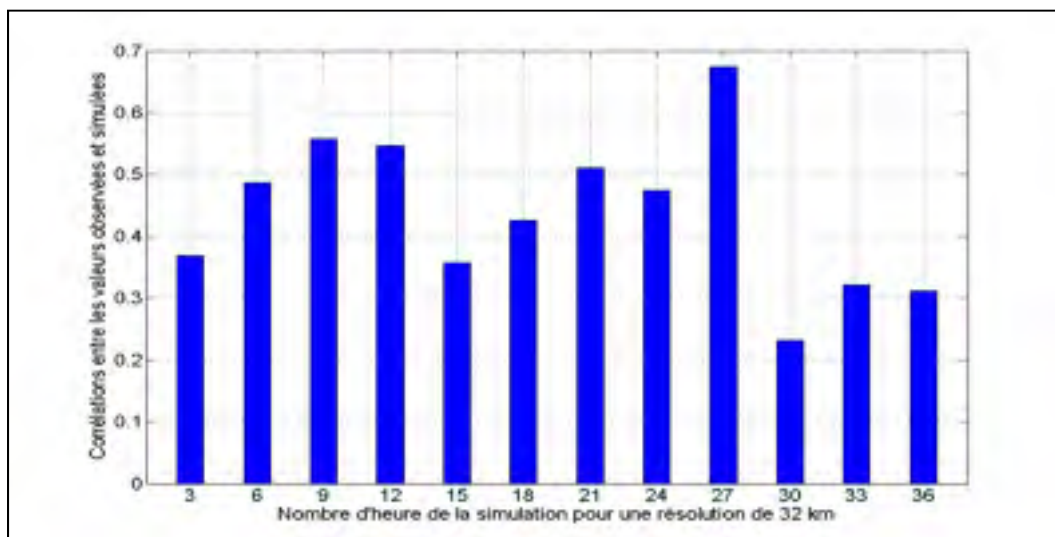


Figure 7.24 Corrélation du taux de précipitation [m.s^{-1}] entre les valeurs de GEM-32 et de la NARR à toutes les 3 heures de simulation

7.2.3.2 La validation du type d'accumulation de glace de GEM-32

La validation du type de précipitation est effectuée grâce à des graphiques booléens, s'appuyant sur les valeurs de la NARR, superposées aux valeurs quantitatives provenant de la simulation. Dans cette étude, les comparaisons s'effectueront avec les paramètres définissant la présence de neige, de pluie verglaçante et de pluie (Voir Tableau 6-1). La NARR enregistre ces variables par tranche de trois heures, tandis que GEM additionne les valeurs simulées d'accumulation depuis le début de l'évènement, soit le 18 janvier 2006 à 0Z. Ainsi, pour les valeurs de la NARR toutes accumulations seront cumulées depuis le début de

l'évènement. La Figure 7.25 suivante montre la quantité totale de l'accumulation de neige [m] après 9 heures de simulation. Ces valeurs sont superposées au graphique booléen définissant la présence de neige observée dans la NARR (magenta). Les variables comparées sont nommées SN dans les FST et CSNOW dans la NARR et cette image est effectuée à l'aide du logiciel M_MAP où la projection sélectionnée est conique conforme de Lambert.

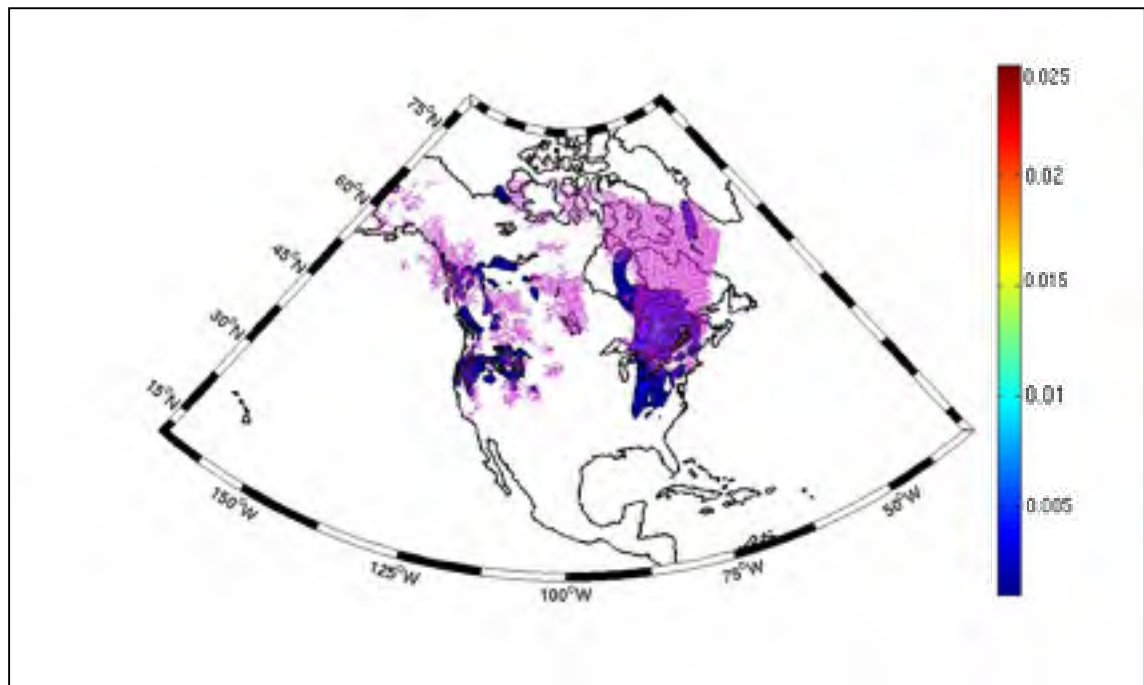


Figure 7.25 Accumulation de la neige [m d'eau] à 9 heures de GEM-32 (dégradé) superposée à la présence de neige dans la NARR (magenta)

Sur le littoral Ouest de l'Amérique du Nord, l'accumulation de neige varie de 0 à 3 mm, équivalent en eau. Cette accumulation couvre également la Colombie-Britannique, le Sud du territoire du Nord-Ouest, le Nord de l'Alberta et le Nord-Ouest de la Saskatchewan. De même qu'une forte concentration se trouve en Idaho. Dans la NARR, l'apparition de neige est observée dans ces mêmes régions. Dans l'Est du Canada, de la neige est modélisée dans la Baie d'Hudson s'étendant dans le Nord et l'est de l'Ontario et au Sud du Québec avec une forte accumulation de 5 mm. La NARR montre également de la présence de neige dans ces régions, mais sur un plus grand ensemble. Cependant, dans tous les cas, la présence de neige observée dans la NARR couvre les accumulations totales de neiges les plus élevées.

L'accumulation n'a pas beaucoup varié entre la 9^{ième} et la 18^{ième} heure de simulation, ainsi que dans la NARR le 18 janvier 2006 entre 9Z et 18Z. La Figure 7.26 montre l'accumulation totale de neige à 18 heures de simulation superposée à la présence de neige dans la NARR le 18 janvier à 18Z.

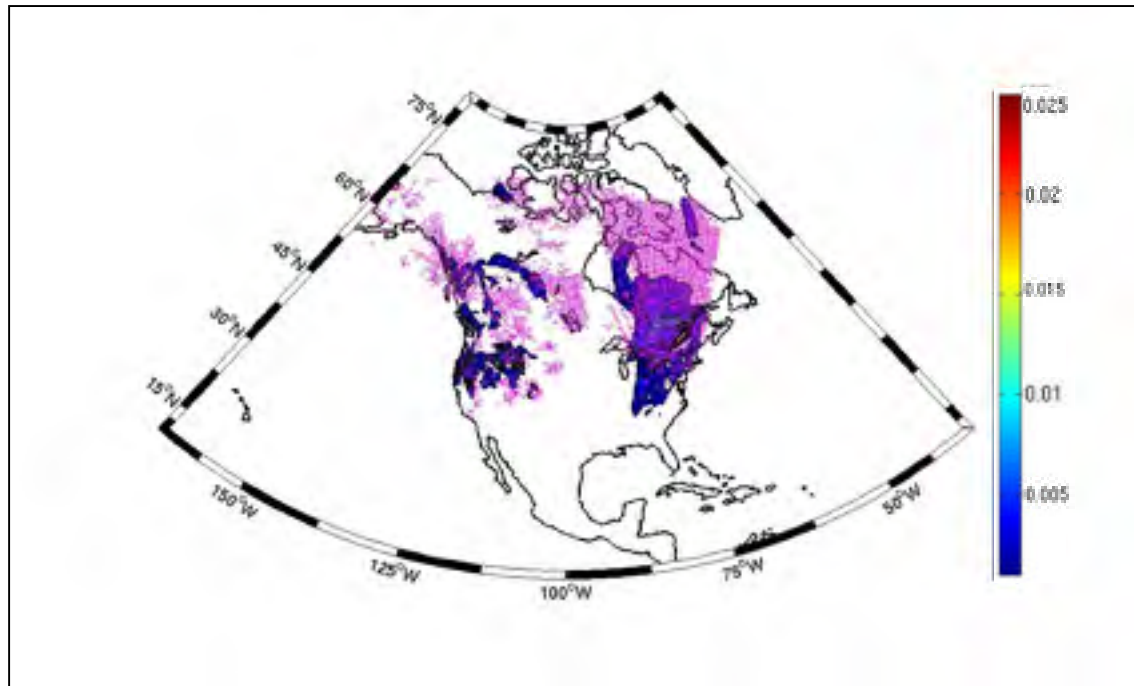


Figure 7.26 Accumulation de la neige [m d'eau] à 18 heures de GEM-32 (dégradé) superposée à la présence de neige dans la NARR (magenta)

La Figure 7.27, montre l'accumulation totale de neige [m] à 27 heures de simulations. L'augmentation de l'accumulation de neige est visible entre la 18^{ième} heure et la 27^{ième} heure, soit plus qu'entre la 9^{ième} et la 18^{ième} heure. Dans ces trois derniers cas, la présence de neige est plus importante au Nord de la province dans le cas de la NARR. De même que, dans les régions où l'accumulation de la neige simulée est plus importante, la NARR démontre une présence de neige.

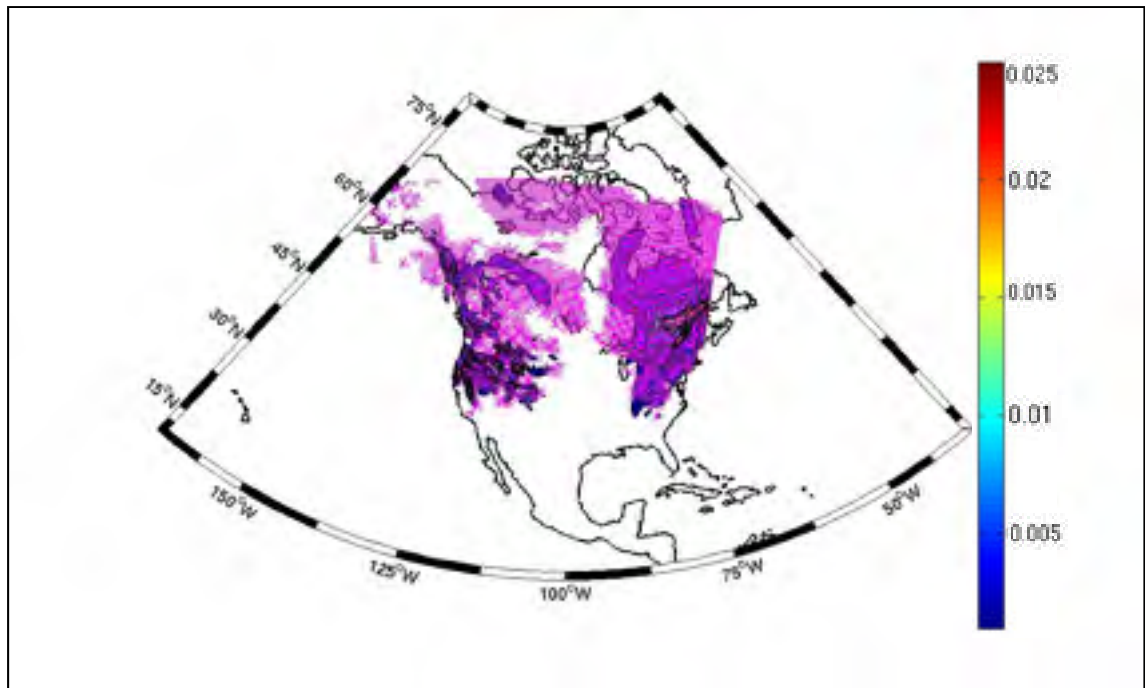


Figure 7.27 Accumulation de la neige [m d'eau] à 27 heures de GEM-32 (dégradé) superposée à la présence de neige dans la NARR (magenta)

Pour cet évènement, l'accumulation de la pluie verglaçante [m] est très faible et centrée sur le Sud du Québec. De ce fait, il n'y a que la 27^{ième} heure de représentée pour des fins de validation. Toutefois, quelques traces de pluie verglaçante simulées apparaissent dans le Nord de la province, mais pas dans les données provenant de la NARR. Ainsi, GEM considère que de la pluie verglaçante contribue au taux de précipitation dans cette région. La Figure 7.28 démontre l'accumulation de pluie verglaçante à 27 heures de simulation. La présence de légère trace de ce verglas débute à la 9^{ième} heure. Toutefois, ce n'est qu'après le 19 janvier que la plus forte accumulation peut être observée. Les variables comparées sont nommées FR dans les FST et CRAIN dans la NARR.

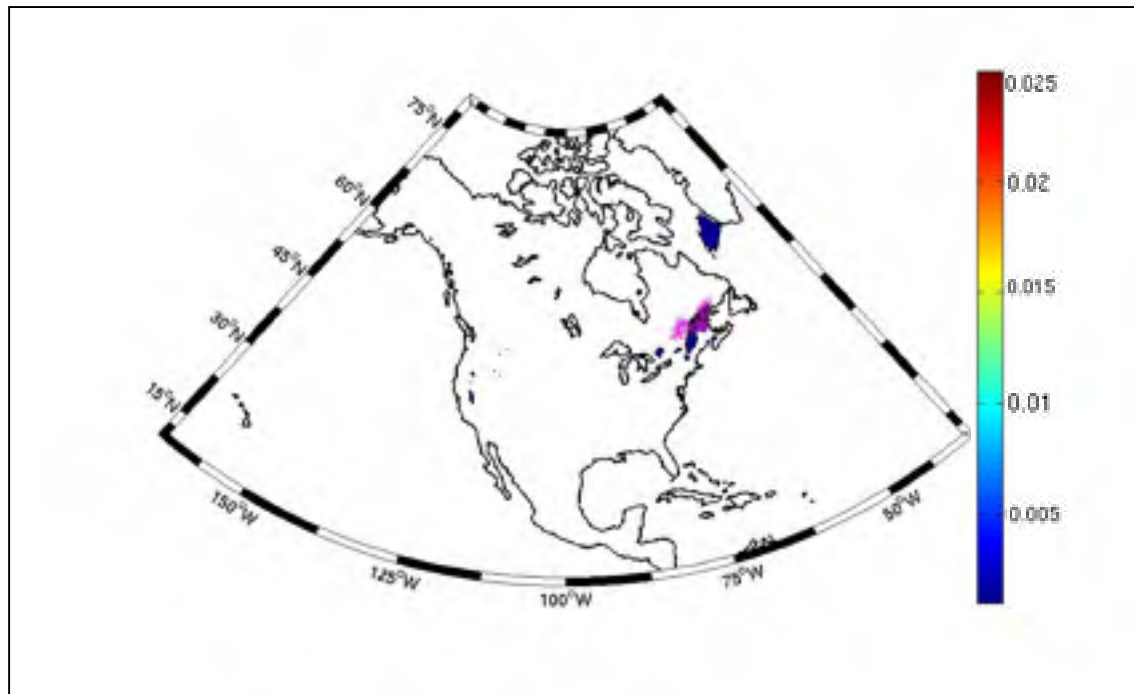


Figure 7.28 Accumulation de la pluie verglaçante [m d'eau] à 27 heures de GEM-32 (dégradé) superposée à la présence de neige dans la NARR (magenta)

Concernant la pluie, de fortes accumulations totales [m] sont prévues pour cet événement. La Figure 7.29 montre la présence de pluie observée dans la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 à 9Z superposée à l'accumulation de la pluie à 9 heures de simulation (dégradé). Les variables comparées sont nommées RN dans les FST et CFRZR dans la NARR. On la retrouve dans l'Ouest du continent et une plus forte accumulation dans l'Est de la province du Québec. Dans ces deux régions, les données de la ré-analyse couvrent celles modélisées. Après 18 heures et 27 heures de simulation, il est démontré que cette accumulation borde l'Ouest du Canada (Voir ANNEXE XVI) et elle augmente dans le Nord. Toutefois, dans le NARR, la pluie est présente dans le Pacifique Nord et pas dans la simulation. Le modèle montre l'existence de cette accumulation sur le littoral du Sud de la Colombie-Britannique et s'étendant jusqu'en Floride et sur l'océan Pacifique Nord. Tout comme les données de la NARR, de la pluie est modélisée bordant le Sud du Québec et s'étendant sur le littoral Ouest des États-Unis jusqu'à l'Ouest de Cuba. Cette démarcation est en adéquation avec le front froid analysé précédemment. La pluie simulée à 18 heures et à 27 heures de simulations

démontre une accumulation qui croît vers l'océan Atlantique. D'une manière générale, la modélisation des paramètres de précipitation est prometteuse.

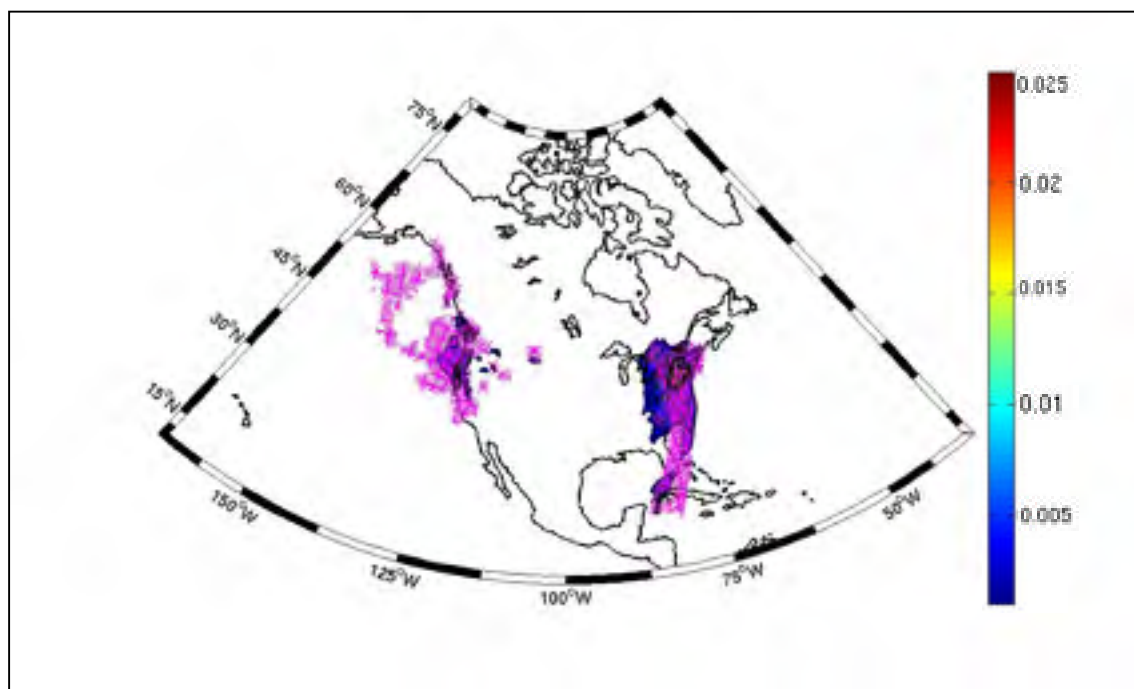


Figure 7.29 Accumulation de la pluie [m d'eau] à 9 heures de GEM-32 (dégradé) superposée à la présence de neige dans la NARR (magenta)

L'analyse de ce paramètre à 18 heures (Voir Figure A XVI-1) et 27 heures (Figure A XVI-2) de simulation ainsi que pour les deux types de fichiers, montre que ce système migre vers l'Océan Atlantique. La détermination des différentes précipitations modélisées reste en général fidèle aux observations dans la NARR. Dans tous les cas, dans les régions où il existe de fortes accumulations, la NARR couvre également ces régions. Dans l'Ouest du Québec, les précipitations sont un mélange de pluie verglaçante, de pluie et de neige (voir Figure 7.27, Figure 7.28 et la Figure A XVI-2). Toutefois, à l'Ouest du Canada, des précipitations de pluie occupent un plus grand domaine que dans la modélisation. De plus, dans le Nord du Québec, un faible taux de précipitation est modélisé et le type d'accumulation est défini par un mélange de pluie verglaçante et de neige. Pour cette même région, la ré-analyse montre qu'il existe bel et bien un taux de précipitation, mais défini par une accumulation de neige seulement. Il est expliqué dans le Chapitre 3 que la différenciation entre la pluie verglaçante

et la neige est subtile. Ainsi, la distinction de leur modélisation ou de leur enregistrement dans les fichiers de ré-analyses est d'autant plus difficile à effectuer. En considérant ces difficultés, la validation de ces paramètres est encourageante.

7.3 Les validations de GEM-5

La grille choisie pour cette deuxième modélisation possède 450 points en abscisse par 450 en ordonnée et à une résolution spatiale de 0.045° , soit 5 km. Elle a donc la forme carrée de 2250 km de côté. Elle est centrée à la coordonnée 68° Ouest et 53° Nord et englobe tout le Québec. Pour être dans les mêmes conditions que précédemment, cette modélisation s'effectue sans rotation de l'équateur numérique et les coordonnées sont 60° Ouest et 53° Nord. De même que quatre processeurs, soit 2 par 2, du super ordinateur Boréas sont requis. Le nombre de points de grille, définissant le HALO, est de 20, soit 4% de la grille et le pas de temps du modèle est de 90 secondes. Ainsi, pour atteindre une simulation de 36 heures, le modèle doit effectuer 1440 pas de temps. La Figure 7.30 compare la carte de la NARR interpolée sur une projection polaire stéréographique, la grille de GEM-5 sphérique à pôle Nord basculé (bleu) et celle de GEM-32 (rouge).

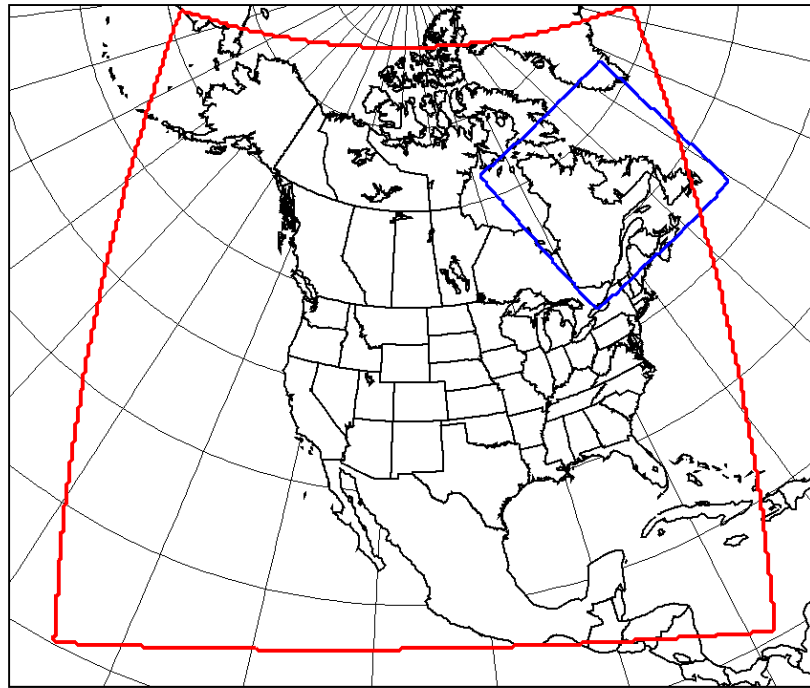


Figure 7.30 Domaine de GEM-5 (bleu) et GEM-32 (rouge), sphérique à pôle Nord basculé superposé au domaine NARR-FST en projection polaire stéréographique

7.3.1 La Validation à l'état initial de GEM-5

Pour effectuer cette validation, la grille de la NARR, en projection polaire stéréographique, a été redéfinie à l'aide de l'application «pgsm» d'Environnement Canada, afin d'obtenir les mêmes caractéristiques que la grille GEM-5. Tout comme précédemment, la validation à l'état initial de la simulation s'effectue en calculant les fréquences des différences entre les variables simulées et celles observées dans la NARR à 1000 mb, 700 mb et 300 mb. De même qu'il est à rappeler que ces différences sont la soustraction entre les valeurs de la modélisation avec celles de la ré-analyse. La Figure 7.31 démontre ces écarts pour la hauteur géopotentielle sur les trois niveaux respectifs et échelonnés de 0.1 dam. À 1000 mb, la fréquence des écarts nuls sont de 76%, soit 13% de plus que les résultats de la modélisation de GEM-32 (Voir Figure 7.5) et à 700 mb, cette fréquence passe de 97 % à 98%. Les écarts sont plus grands à 300 mb, ce qui n'est pas différent de l'observation pour GEM-32. Pour les trois hauteurs, l'étendue des écarts est principalement entre -0.2 dam et 0.2 dam.

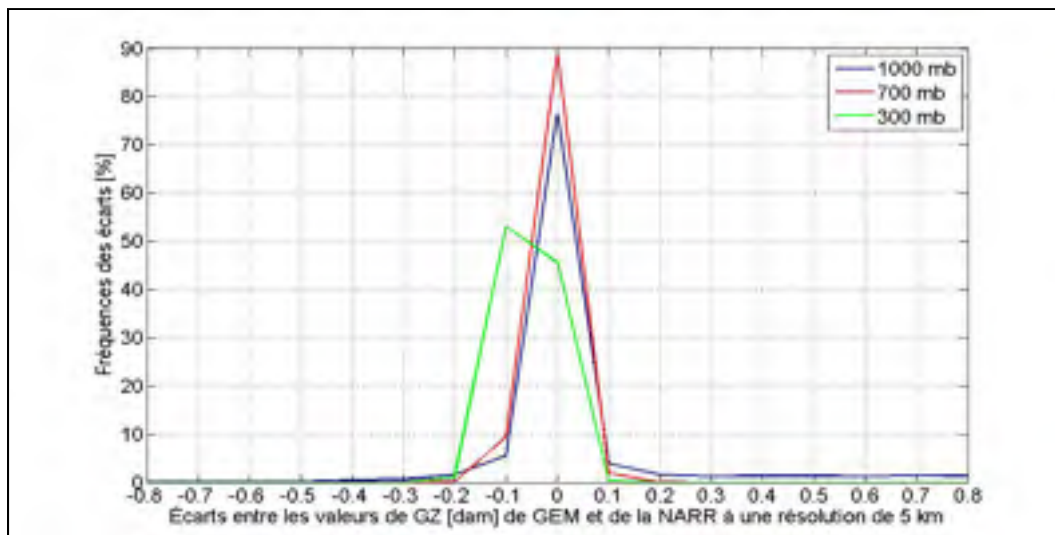


Figure 7.31 Écarts entre les valeurs de la GZ [dam] de à l'état initial de GEM-5 et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z

La Figure 7.32 représente la superposition de la hauteur géopotentielle [dam] à l'état initial de GEM-5 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 1000 mb. Les isohypses sont pratiquement identiques même s'il existe de fort gradients de part et d'autre de la haute pression. Les principales différences se retrouvent au centre de la grille, ce qui résulte d'un comportement attendu du modèle. Tout comme la simulation de GEM-32, une irrégularité des iso lignes est observée à 1000 mb et s'estompe en altitude. En effet, dans la couche nuageuse ainsi qu'à 300 mb (Voir Figure A XVII-1), les isohypses modélisés sont confondus avec ceux de la NARR, ce qui est conforme aux observations précédemment. La Figure 7.32 représente une haute pression définie par des valeurs croissantes de la hauteur géopotentielle au centre de la province. Ce système est également observé lors de la simulation GEM-32 (Voir Figure 7.6).

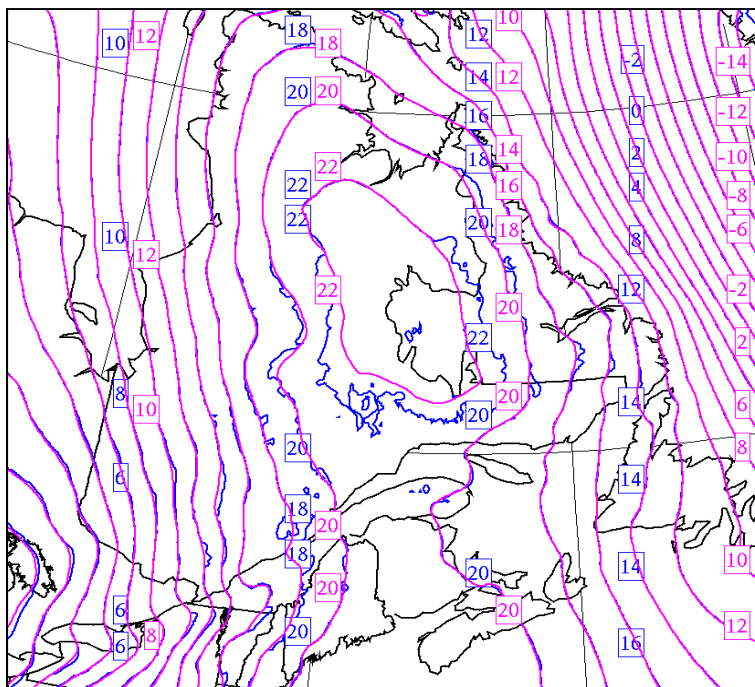


Figure 7.32 Superposition des GZ [dam] à l'état initial de GEM-5 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 1000 mb

La Figure 7.33 représente les histogrammes des fréquences des écarts de la température [°C] à l'état initial de GEM-5.

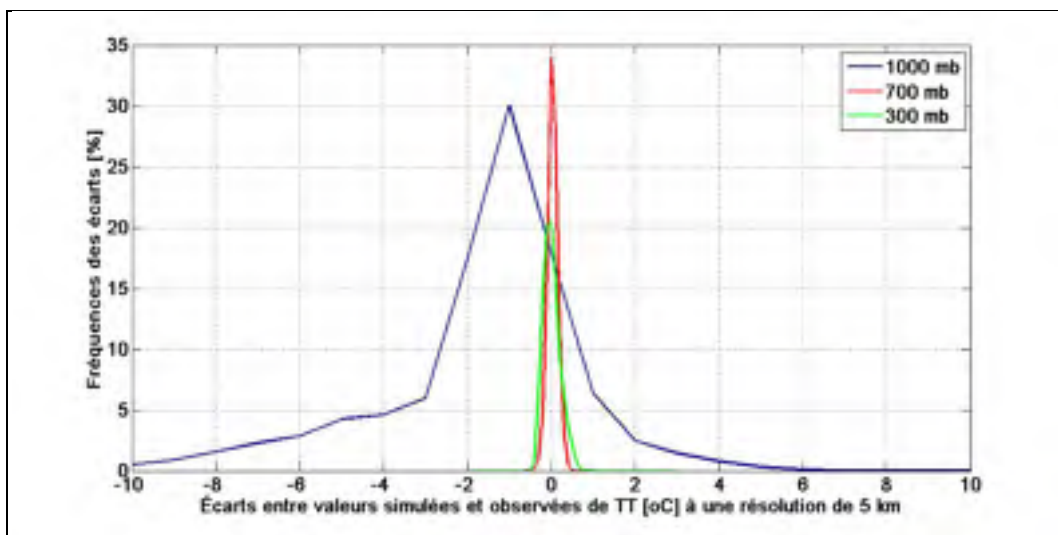


Figure 7.33 Écarts entre les valeurs de la TT [°C] à l'état initial de GEM-5 et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z

Même si au temps initial de la simulation, les fichiers modélisés ne sont qu'une reproduction des fichiers d'entrée, certaines différences sont concentrées dans les régions à forts reliefs. Il est à rappeler que cette hypothèse ne s'applique pas à l'état initial de la modélisation de la température, car ce paramètre est calculé afin de satisfaire l'équation hydrostatique du modèle. Par exemple, de plus forts écarts apparaissent dans la région du mont Torngat, point culminant du Québec, où le modèle sur estime la température. Ce phénomène est également observé dans la région de la province de Terre-Neuve-Et-Labrador où il existe également de fortes dénivellations. La Gaspésie est partagée entre les écarts positifs et négatifs. Sur la Côte et la Haute Gaspésie, le modèle surestime ce paramètre tandis que dans la Baie des Chaleurs, il est sous-estimé.

De la même manière que la validation des isohypses, la superposition de la température à une hauteur isobarique de 1000 mb démontre qu'il existe également des irrégularités des iso lignes, comportement attendu du modèle. La Figure 7.34 représente les isothermes à l'état initial de GEM-5 (bleu) avec celles observées dans la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z, à une hauteur de 1000 mb. En altitude, cette discontinuité s'atténue jusqu'à disparaître et les isothermes modélisées sont superposées avec celles observées dans la ré-analyse autant à 700 mb qu'à 300 mb (Voir Figure A XVIII-1).

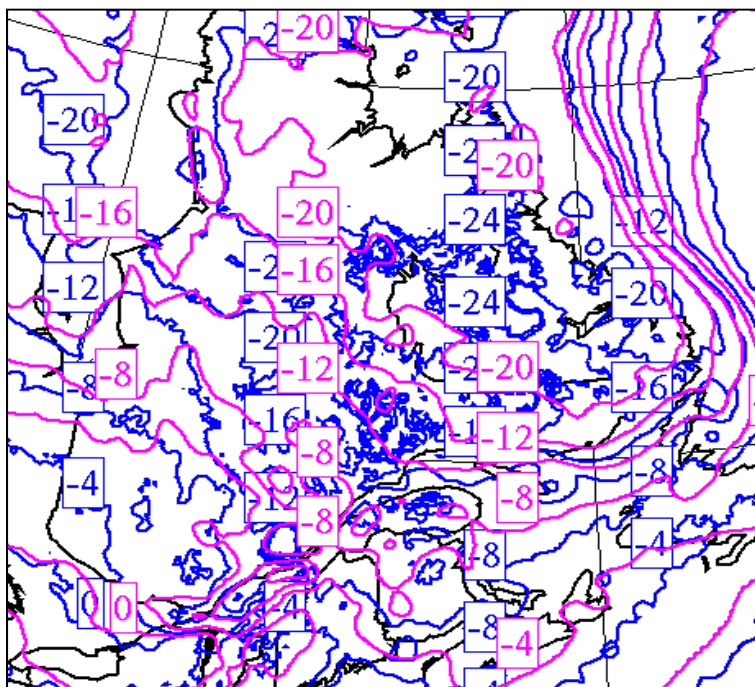


Figure 7.34 Superposition des TT [°C] à l'état initial de GEM-5 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 1000 mb

Pour ce qui est de la validation de l'humidité spécifique, le même comportement de la température est observé. En effet, le calcul des fréquences des écarts montre les écarts diminués pour cette résolution. La

Figure 7.35 démontre les histogrammes des fréquences des écarts de l'humidité spécifiques [kg/kg] entre les valeurs de GEM-5 et de la NARR pour les trois niveaux. Dans ce cas-ci, à une hauteur de 300 mb, 82 % des écarts sont nuls comparativement à la résolution plus grossière où 75 % des écarts sont nuls. De même qu'à 70 mb, cette même fréquence se trouve augmentée. À 1000 mb, cette fréquence passe de 28 % à 42 %.

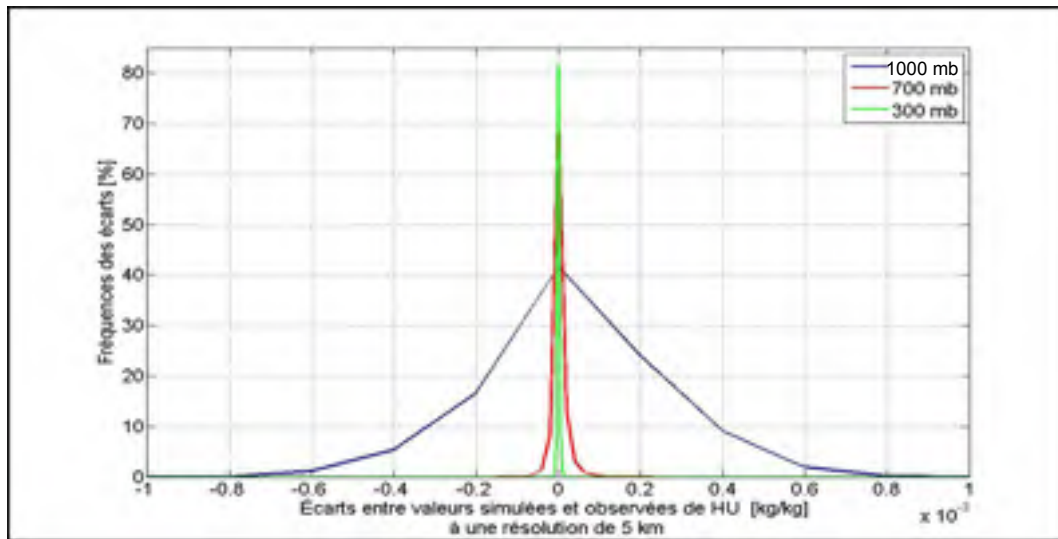


Figure 7.35 Écarts entre les valeurs de HU [kg/kg] à l'état initial de GEM-5 et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z

La Figure 7.36 démontre la superposition de l'humidité spécifique à l'état initial de la simulation GEM-5 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à une hauteur de 1000 mb.

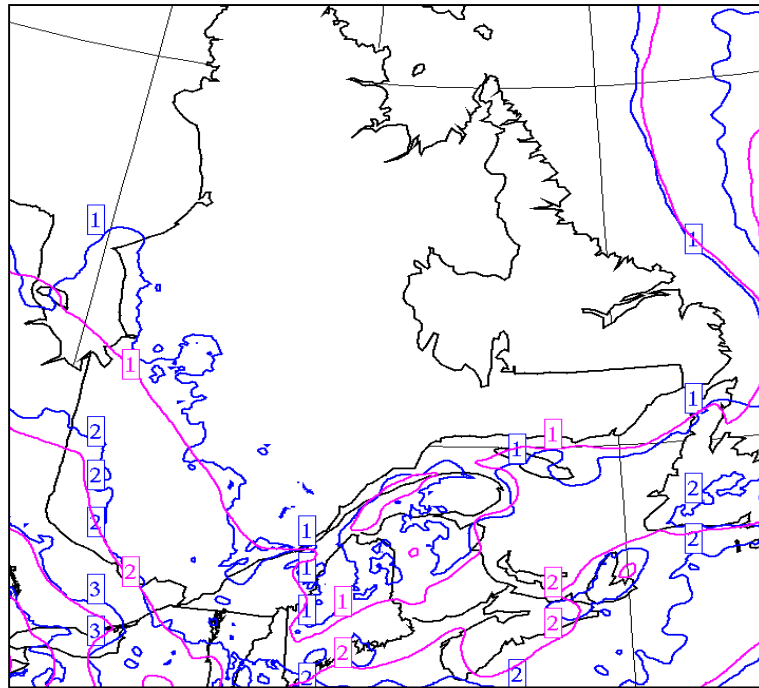


Figure 7.36 Superposition des de HU [kg/kg] à l'état initial de GEM-5 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 1000 mb

Dans une couche nuageuse, le modèle a tendance à surestimer ce paramètre dans le Sud de la province et de le sous-estimer dans le Nord (Voir Figure A XIX-1). Malgré ces observations, les iso contours possèdent une même tendance.

La Figure 7.37 représente la superposition du vent à 9 heures de la simulation GEM-5 (bleu) avec celui observé dans la ré-analyse le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 1000 mb. En général, les vecteurs du vent modélisés sont superposés à ceux de la NARR. Toutefois, certaines erreurs sont définies par une légère rotation du vecteur au centre de la région. La comparaison entre les vecteurs du vent de la simulation et de la ré-analyse pour une hauteur de 700 mb (Voir Figure A XX-1), montre que ces écarts diminuent avec la hauteur et que les vecteurs simulés sont confondus avec celui de la NARR.

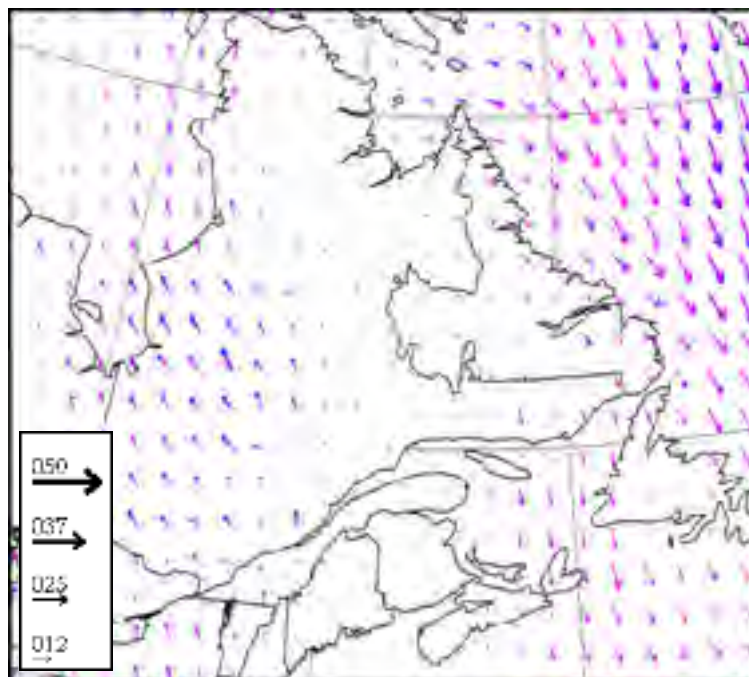


Figure 7.37 Superposition du vent [nœud] à l'état initial de GEM-5 (bleu) et de la NARR (magenta), à 1000 mb

7.3.2 La validation spatiotemporelle de GEM-5

La validation de la modélisation GEM-5 reprend la même méthode que celle pour GEM-32, soit en calculant les fréquences des écarts de la hauteur géopotentielle, de la température et de l'humidité spécifique à 1000 mb et dans une couche nuageuse à 700 mb. Pour cette simulation, il existe de plus grands écarts, entre GEM et la NARR, que ceux analysés pour GEM-32. Toutefois, la modélisation des variables de précipitation reste satisfaisante. Ces différences peuvent provenir d'une modélisation, à 5 km de résolution spatiale, effectuée avec des fichiers d'entrées de la NARR à 32 km de résolution spatiale. En effet, étant donné que les « cascades » n'ont pas été réussies pour cette étude, la modélisation de GEM-5 s'est effectuée avec la NARR comme fichier d'entrée.

En ce qui concerne la modélisation de la hauteur géopotentielle à 1000 mb, les écarts les plus élevés se trouvent entre 0 dam et 4 dam (Voir Figure A XXI-1). Toutefois, à une hauteur de

700 mb, aucune règle ne s'applique et les différentes courbes ne suivent pas de tendances (Voir Figure A XXI-2). La cartographie représentant la superposition des isohypses, à 9 heures de simulation GEM-5 et de la NARR le 18 janvier à 9Z, montre des tendances semblables et une cohérence entre les deux types de fichiers analysés (Voir Figure A XVII-2 et Figure A XVII-3). Ainsi, les erreurs montrées dans les histogrammes proviennent des différences quantitatives des iso contours entre les deux fichiers. De mêmes observations sont également analysées à la 18^{ième} et 27^{ième} heure de simulation (Voir Figure A XVII-4, Figure A XVII-5, Figure A XVII-6). La variation des isohypses, autant dans GEM-5 que la NARR, prédit une basse pression traversant la province du Sud-Ouest au Nord-Ouest. De même que, dans les deux cas, une haute pression longe la côte Est maritime de la province. Ainsi, malgré les résultats des histogrammes, la superposition des isohypses modélisés avec ceux de la NARR démontrent une même tendance. Toutefois, le modèle surélève la hauteur géopotentielle.

Concernant la température et l'humidité spécifique, l'évolution temporelle de ces deux variables est similaire. À 1000 mb, l'étendue des fréquences des écarts est plus importante et le modèle a tendance à surestimer ces deux paramètres, autant pour la modélisation de la température (Voir Figure A XXII-1) que pour l'humidité spécifique (Voir Figure A XXIII-1). Toutefois, à 700 mb, les courbes sont symétriques et centrées en zéro (Voir Figure A XXII-2 et Figure A XXIII-2). En augmentant la résolution, le nombre de points modélisés sous le relief se trouve augmenté pouvant engendrer plus d'erreurs pour GEM-5 que pour GEM-32. De même que, tel que mentionné précédemment, GEM et la NARR ne possèdent pas le même outil d'interpolation météorologique à l'intérieur des reliefs. À 1000 mb et à 9 heures, 18 heures et 27 heures de simulation (Voir Figure A XVIII-2), les plus hautes températures sont observées dans les mêmes zones géographiques que les valeurs les plus élevées de la hauteur géopotentielle. Ainsi, les hautes températures suivent la haute pression, ce qui est conforme à la réalité. Il est à noter que ces remarques sont également applicables dans une couche nuageuse (Voir Figure A XVIII-3 et Figure A XVIII-4). Les valeurs élevées de l'humidité relative se trouvent principalement dans le Sud-Est de la province évoluant vers le Nord-Est. Cette évolution temporelle de ce paramètre définit donc le trajet du système

météorologique prédit à ces dates (Voir Figure A XIX-2, Figure A XIX-3 et Figure A XIX-4). Concernant le vent, les écarts croissent de la limite latérale vers le centre. Mais dans l'ensemble, le vent simulé est semblable à celui de la NARR (Voir Figure A XX-2, Figure A XX-3, Figure A XX-4, Figure A XX-5, Figure A XX-6). De même qu'en général, GEM-32 à une plus grande stabilité dynamique que GEM-5. À 9 heures de simulation, des écarts sont observés pour GEM-32, tandis que les vecteurs de GEM-5 sont superposés. À 18 heures de simulations, GEM-5 surestime la NARR à 1000 mb et 700 mb. Toutefois, les vecteurs du vent simulés par GEM-32 sont superposés à la NARR. À 27 heures de simulation de GEM-32, les vecteurs sont conformes à GEM-5 comparativement à GEM-5. Ainsi, GEM-32 se rapproche de la NARR d'un point de vue dynamique et en fonction l'évolution temporelle.

7.3.3 La validation des variables de précipitation de GEM-5

La validation du taux de précipitation ainsi que la différenciation des types d'accumulation s'effectuent de la même manière que précédemment. Dans un premier temps, la corrélation du taux de précipitation est calculée. Puis, des graphiques booléens sont utilisés pour comparer les trois types de précipitation présents dans cet évènement; la neige, la pluie verglaçante et la pluie.

7.3.3.1 La validation du taux de précipitations total de GEM-5

La Figure 7.38 montre le taux de précipitation [m.s^{-1}] de l'ordre de 10^{-8} m.s^{-1} , soit 0.036 mm.h^{-1} , à 9 heures de GEM-5 (haut) et dans le NARR le 18 janvier à 9Z (bas). Dans les deux cas, ce taux de précipitation est présent sur la moitié Sud du Québec et dans la mer du Labrador. Toutefois, les données de la ré-analyse démontrent qu'il existe un plus fort taux dans le Vermont, la Baie d'Hudson ainsi que dans la mer du Labrador. Cette observation est également effectuée pour GEM-32 (Voir Figure 7.23). De plus, au niveau du Mont Valin, ayant un point culminant de 980 m, la NARR démontre un plus haut taux. De même que le contour des différents taux de précipitations [m.s^{-1}], simulés à l'aide de GEM-5, ne paraît pas lisse comparativement à la modélisation de GEM-32. Donc GEM-5 est plus conforme à la

réalité. La comparaison de ce paramètre à 18 heures (Voir Figure A XXIV-1) et à 27 heures de simulation (Voir Figure A XXIV-2), démontre que ce taux passe du Sud au Nord de la province. À 18 heures de simulation, l'évènement couvre une plus grande superficie de la province du Québec. Le positionnement du plus haut taux se trouve au niveau de Sept-Îles. Dans la NARR, le système évolue de la même manière. À 27 heures de simulation, la précipitation s'est estompée dans l'Ouest de la province et devient plus importante au niveau du Labrador pour atteindre un taux de 144.10^{-8} m/s. Donc, en général, le taux de précipitation simulé avec GEM-5 semble être retardé par rapport à celui de la NARR, tout comme GEM-32.

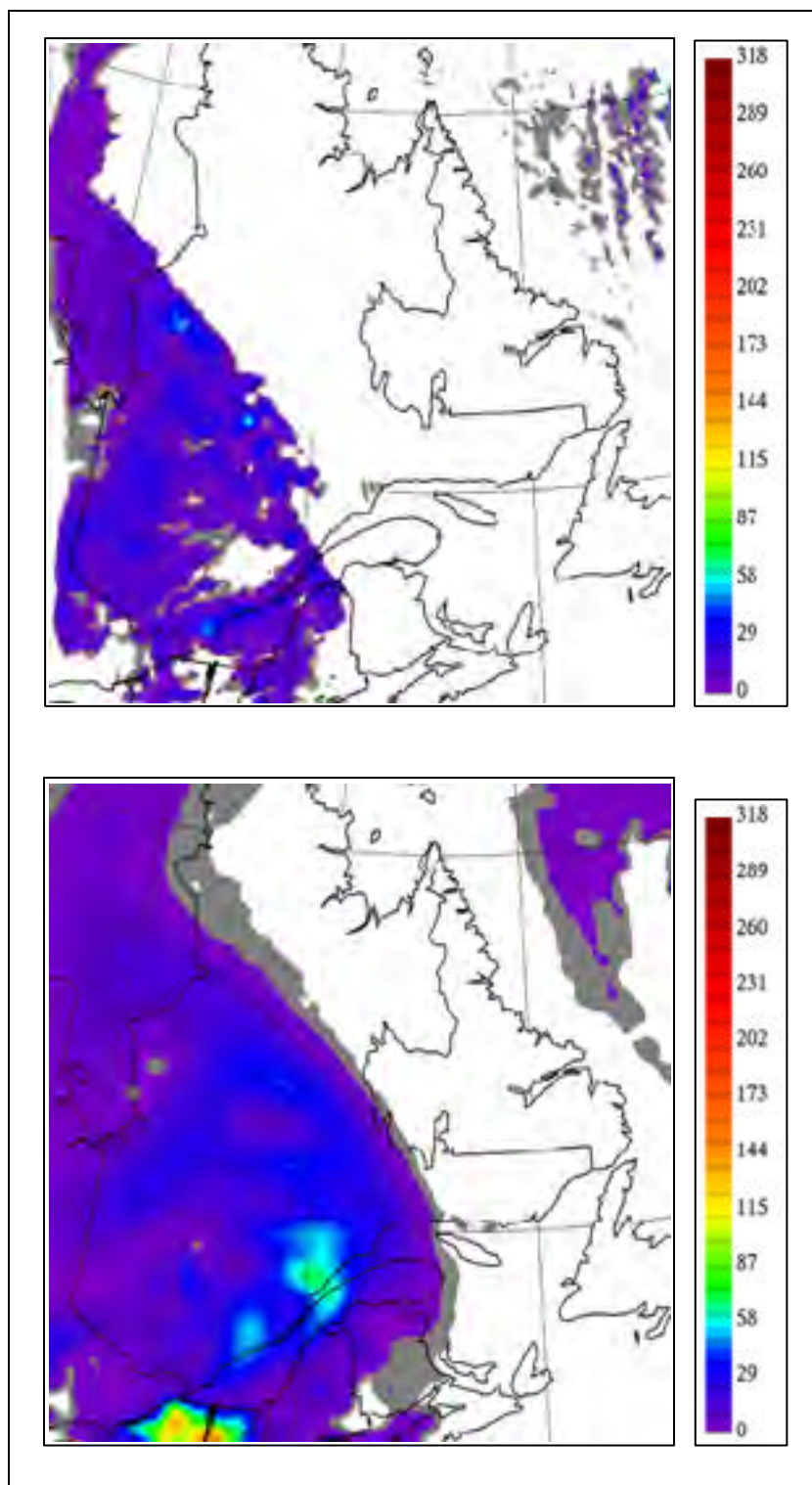


Figure 7.38 Taux de précipitation [10^{-7} m.s^{-1}] à 9 heures de GEM-5 (haut) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 9Z (bas)

Tout comme l'analyse de GEM-32, la corrélation entre les variables simulées et celles de la ré-analyse est calculée et démontrée dans la Figure 7.39. De la même manière que pour la Figure 7.24, ces dernières corrélations démontrent également une baisse après la 18^{ième} heure de simulation et la 27^{ième} heure de simulation. Avant ces deux heures, les corrélations se situent entre 0.3 et 0.6, observation effectuée pour la modélisation précédente avant la 27^{ième} heure de simulation. Pour une modélisation des précipitations sur une longue période de temps, il sera probable que le modèle devra être réinitialisé après la 18^{ième} heure de simulation pour plus de précision.

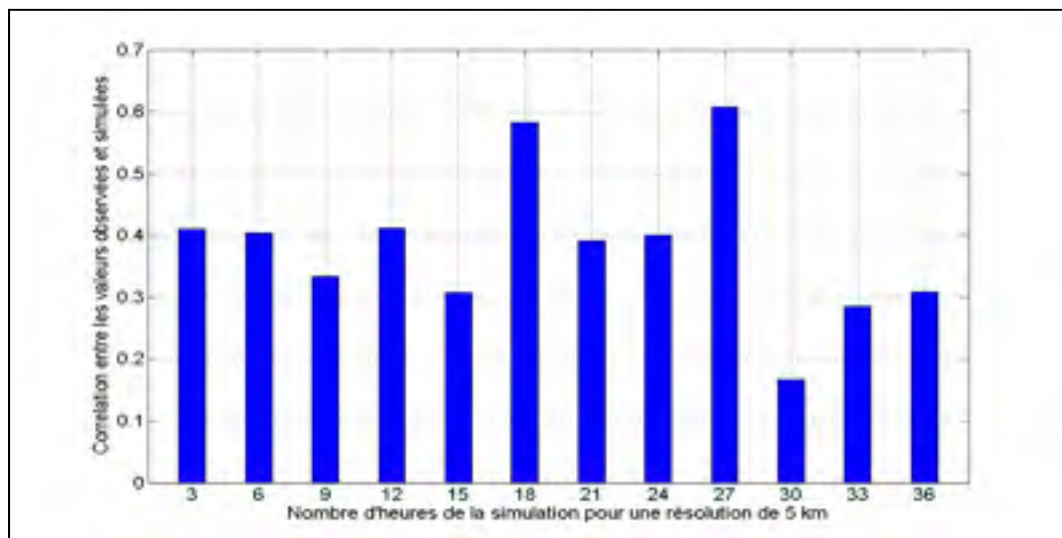


Figure 7.39 Corrélation du taux de précipitation [m.s^{-1}] entre les valeurs de GEM-5 et celles de la NARR et pour les 36 heures de la simulation

7.3.3.2 La validation du type d'accumulation de glace de 5 km

De la même manière que précédemment, les analyses suivantes s'effectuent avec les variables d'accumulation totale [m] de neige, de pluie verglaçante et de pluie, à 9 heures, 18 heures et 27 heures de simulation. La Figure 7.40 montre l'accumulation totale de neige [m] à 9 heures de simulation (dégradé) superposée à celle observée dans la NARR le 18 janvier 2006 à 9 Z (magenta.). De la neige est modélisée dans le Sud-est du Québec, longeant la frontière de l'Ontario. L'accumulation de neige observée dans la NARR couvre une plus

grande région. Elle débute dans la Baie d'Hudson, traverse le Québec et s'étend jusque dans le Maine. De même que de la neige est observée dans la mer du Labrador. Dans cette région le modèle ne détecte pas ce type de précipitation. Toutefois, du verglas est simulé dans cette région (voir Figure 7.41).

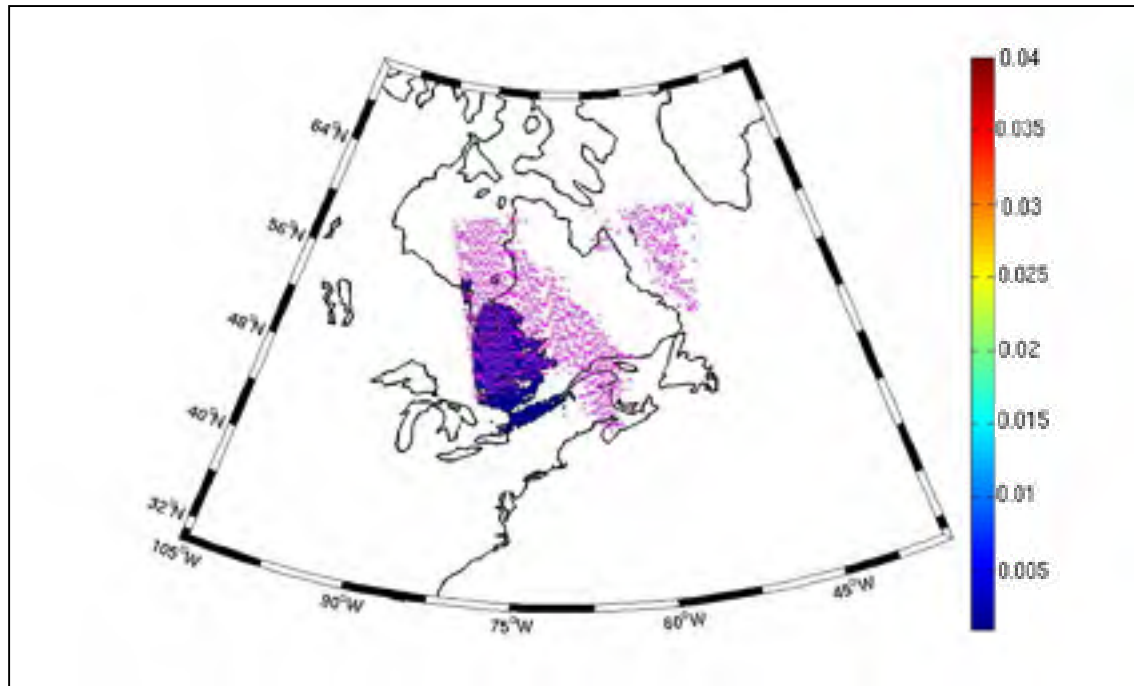


Figure 7.40 Accumulation de la neige [m d'eau] à 9 heures de GEM-5 (dégradé) superposée à la présence de neige dans la NARR (magenta)

À 18 heures de simulations, l'accumulation s'étend dans la Baie d'Hudson de même que sur la frontière de Terre-Neuve-et-Labrador (Voir Figure A XXV-1) et de l'accumulation commence à paraître dans le Nord de Québec. Tout comme l'analyse à GEM-32, il n'y pas une grande augmentation de cette accumulation entre la 9^{ième} et la 18^{ième} heure de simulation, comparativement aux observations le 19 janvier 2006 à 3 Z où la NARR et GEM-5 démontrent qu'une accumulation s'étend sur toute la province (Voir Figure A XXV-2). Il y a toutefois une assez bonne corrélation entre les deux fichiers.

Concernant la pluie verglaçante, ce type de précipitation est faible devant les deux autres types de précipitation. À la 27^{ième} heure de simulation, cette accumulation tend vers 1 mm au

Sud de Québec et sur mince superficie longeant la côte Est de la Province. L'accumulation de la pluie verglaçante observée dans la NARR couvre un plus grand domaine. La Figure 7.41 démontre ces faits.

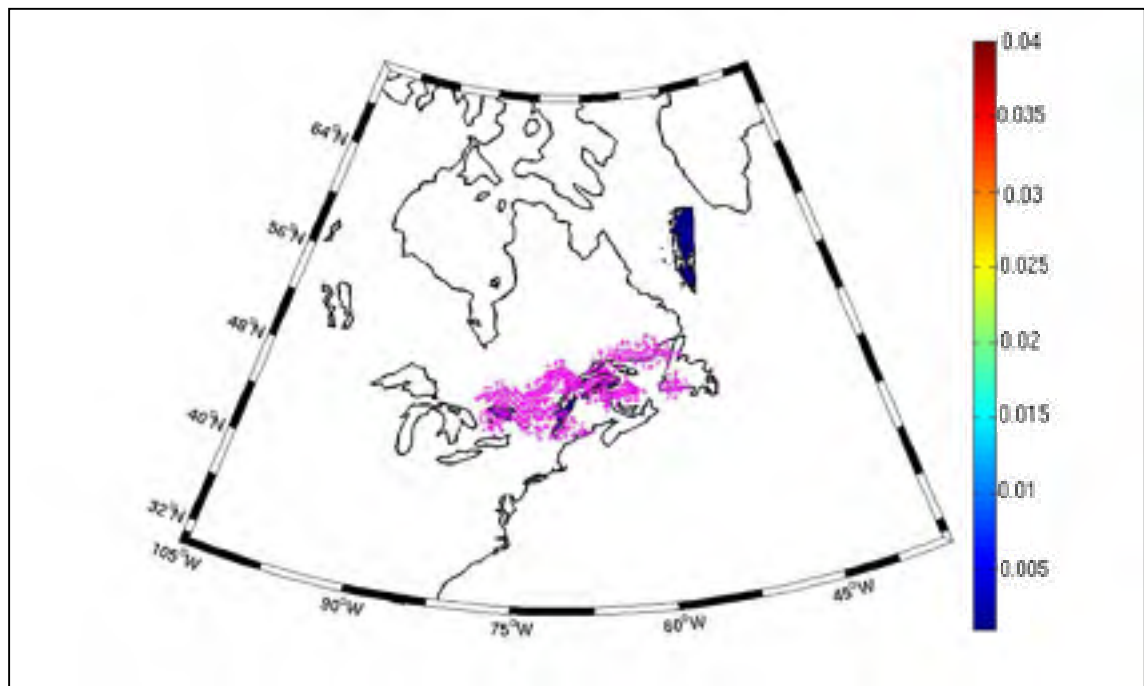


Figure 7.41 Accumulation de la pluie verglaçante [m d'eau] à 27 heures de GEM-5 (dégradé) superposée à la présence de pluie verglaçante dans la NARR (magenta)

Tout comme précédemment, une faible accumulation de ce type de précipitation est observée au Nord du Québec et pas dans les données de ré-analyses. Ce qui démontre une cohérence entre la prévision de pluie verglaçante entre GEM-32 et GEM-5. Il a été démontré que les précipitations de pluie verglaçante observées dans la NARR représentent moins bien la réalité que la neige ou la pluie (Manikin, 2005). Il est donc possible que les écarts soient plus grands pour ce paramètre. Toutefois, ces hypothèses ne sont pas conclusives quant à la performance de GEM-5.

Concernant l'accumulation totale [m] de pluie, dans les deux cas, elle est présente dans le Sud-Ouest du Québec. La Figure 7.42 montre la superposition de l'accumulation totale [m]

de la pluie à 9 heures de simulation GEM-5 avec les résultats de la NARR le 18 janvier 2006 à 9Z.

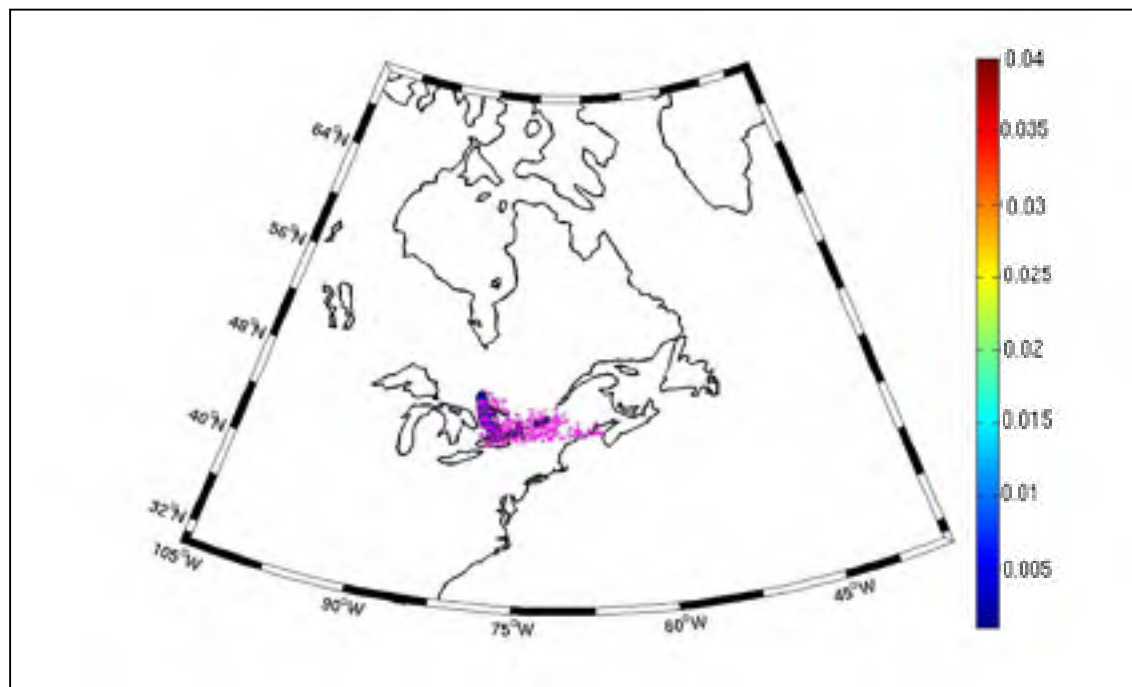


Figure 7.42 Accumulation de la pluie [m d'eau] à 9 heures de GEM-5 (dégradé) superposée à la présence de pluie dans la NARR (magenta)

À 18 heures de simulation, dans la région de Trois-Rivières et du Maine, l'apparition de pluie est constatée dans la modélisation et la ré-analyse, (Voir Figure A XXVI-1). À 27 heures de simulation, cette accumulation s'étend et atteint le Nouveau-Brunswick et la Gaspésie et longe la frontière entre le Québec et l'Ontario. Les données de la ré-analyse montrent que l'évènement est au-dessus du Golf du Saint-Laurent et de Saint-Pierre et Miquelon (Voir Figure A XXVI-2). Le 18 janvier 2006 à 18Z, la NARR démontre la présence de précipitation (Figure A XXIV-1) sur toute la province du Québec, toutefois, aucune accumulation de neige, de pluie verglaçante ou de pluie n'est observée dans le Nord-Est. Il pourrait donc exister une inconsistance entre la présence de précipitation et d'accumulation de précipitation dans la NARR. Pour GEM-5, il existe bien une corrélation entre la présence de précipitation et la prédiction du type d'accumulation.

Donc, les variables de précipitation, provenant de GEM-5 et de la NARR, ont une évolution temporelle semblable. En général les erreurs des variables d'accumulation (la neige, la pluie verglaçante et la pluie), peuvent provenir de la sensibilité des instruments météorologiques, des acquisitions de données ou encore du modèle. De plus, pour les deux résolutions spatiales des modélisations, les variables de précipitation ont tendance à couvrir un plus petit domaine que celle de la NARR.

7.4 La comparaison des simulations : GEM-5 et GEM-32

Cette partie de validation consiste à comparer GEM-5 et GEM-32. La Figure 7.43 montre le domaine entier représentant la cartographie de GEM-32 et le domaine limité par un trait bleu, la cartographie de la modélisation GEM-5.

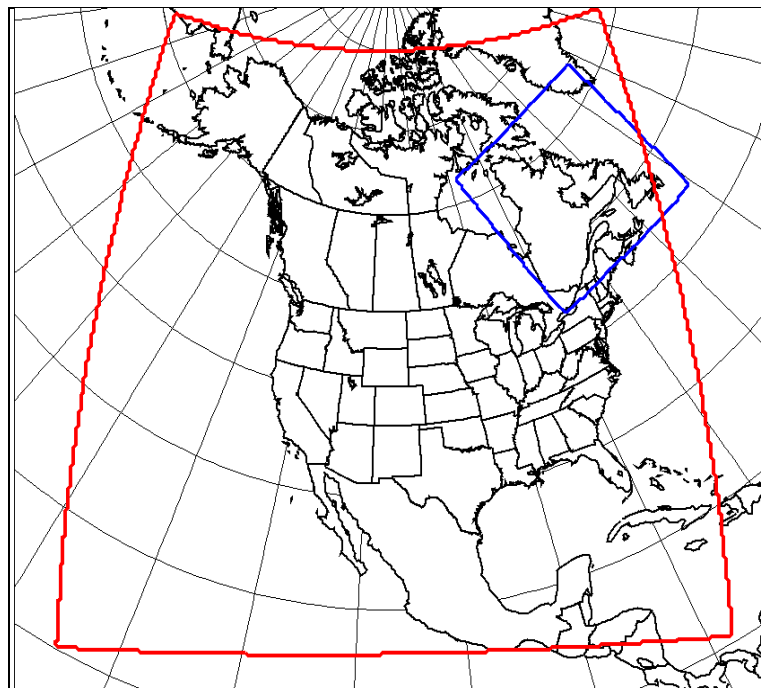


Figure 7.43 Domaine sphérique à pôle basculé de la modélisation de GEM-5 (bleu) superposé au domaine GEM-32

Pour ce faire, la grille GEM-32 a été redéfinie à l'aide de l'application «pgsm» d'Environnement Canada avec la même définition que GEM-5. La simulation de GEM-32 ne couvre pas tout le domaine GEM-5. Ainsi, les images utilisées pour GEM-32 possèdent une partie volontairement noircie dans le coin inférieur droit. Étant donné que cette partie consiste à comparer la modélisation GEM-5 avec celle de GEM-32 et qu'aucune valeur n'a été modélisée à l'aide de GEM-5 dans cette région, il n'est pas nécessaire de reproduire cette région.

Dans un premier temps le taux de précipitation [m.s^{-1}] de l'ordre de 10^{-8} m/s, est comparé à 9 heures, 18 heures et 27 heures de simulation. Pour ce faire, le logiciel «pgsm» est utilisé pour projeter par interpolation la simulation GEM-32 sur la grille de GEM-5. De ce fait, certaines différences peuvent être engendrées lors de cette manipulation. De ces images, les accumulations des différents types des précipitations sont visualisées et ainsi comparées aux mêmes heures.

7.4.1 La validation du taux de précipitation totale

La comparaison à 9 heures de simulation montre qu'autant pour les résultats de GEM-32 que de GEM-5, le taux de précipitation couvre la même région du Québec. La Figure 7.44 montre ce paramètre à 9 heures de simulation GEM-5 (haut) et GEM-32 (bas). Pour cette date simulée, les précipitations s'arrêtent à la hauteur de Presque Îles et s'étendent dans la Baie d'Hudson. De même que ce taux est inexistant sur le reste de la province. Pour les deux simulations, la région de La Malbaie (Charlevoix) est définie par une absence de précipitation. Toutefois dans cette région, l'absence de précipitations est délimitée par un cercle stratifié pour GEM-5, tandis que pour GEM-32, ce cercle des iso contours est lisse due à un manque de résolution. Ainsi, GEM-5 est plus conforme à la réalité et apporte de la précision. Il y a tout de même une consistance entre les deux simulations. À cette plus fine échelle, des taux de précipitations atteignent 58.10^{-8} m/s et apparaissent dans les régions de La Grande Rivière Réservoir, du lac Mistassini et du lac Ontario. Ce taux de précipitation couvre environ 25 km^2 , soit l'équivalent à la superficie d'une maille. Cette région est donc

difficilement détectable par une résolution plus grossière. En effet, pour GEM-32, dans ces régions, le taux est inférieur et homogène sur une plus grande surface.

L'évolution temporelle de la modélisation de GEM-5 reste en adéquation avec l'évolution temporelle à résolution plus grossière. À 18 heures de simulation, dans les deux cas, les précipitations s'étendent sur tout le Québec (Voir Figure A XXVII-1). En effet, un plus fort taux de précipitation allant jusqu'à 87.10^{-8} m/s est rencontré dans l'embouchure du fleuve St-Laurent et à la hauteur de Sept-Îles. De même qu'une meilleure définition est observée dans le Maine avec un taux de 58.10^{-8} m/s. De ces faits, cette résolution amène plus de précisions en démontrant plus de détails positionnés et définissant les intensités locales. La modélisation de GEM-32 surestime ce taux comparativement à la plus fine résolution, mais dans l'ensemble l'évènement suit la même tendance. À 27 heures de simulation, ce taux tend à s'estomper sur toute la province et pour les deux simulations (Voir Figure A XXVII-2). Tel que mentionné précédemment, deux systèmes sont observés pour la simulation de GEM-5. Le premier ayant pour centre Sept-Îles et le second le littoral du Labrador. Ces deux systèmes sont difficilement observables pour GEM-32. Ils sont moins bien définis et le premier système se trouve plus au Nord et le second au Sud. De la même manière que précédemment, la dissipation est mieux représentée dans la plus fine résolution. Donc, la plus fine résolution démontre mieux un évènement défini par des précipitations.

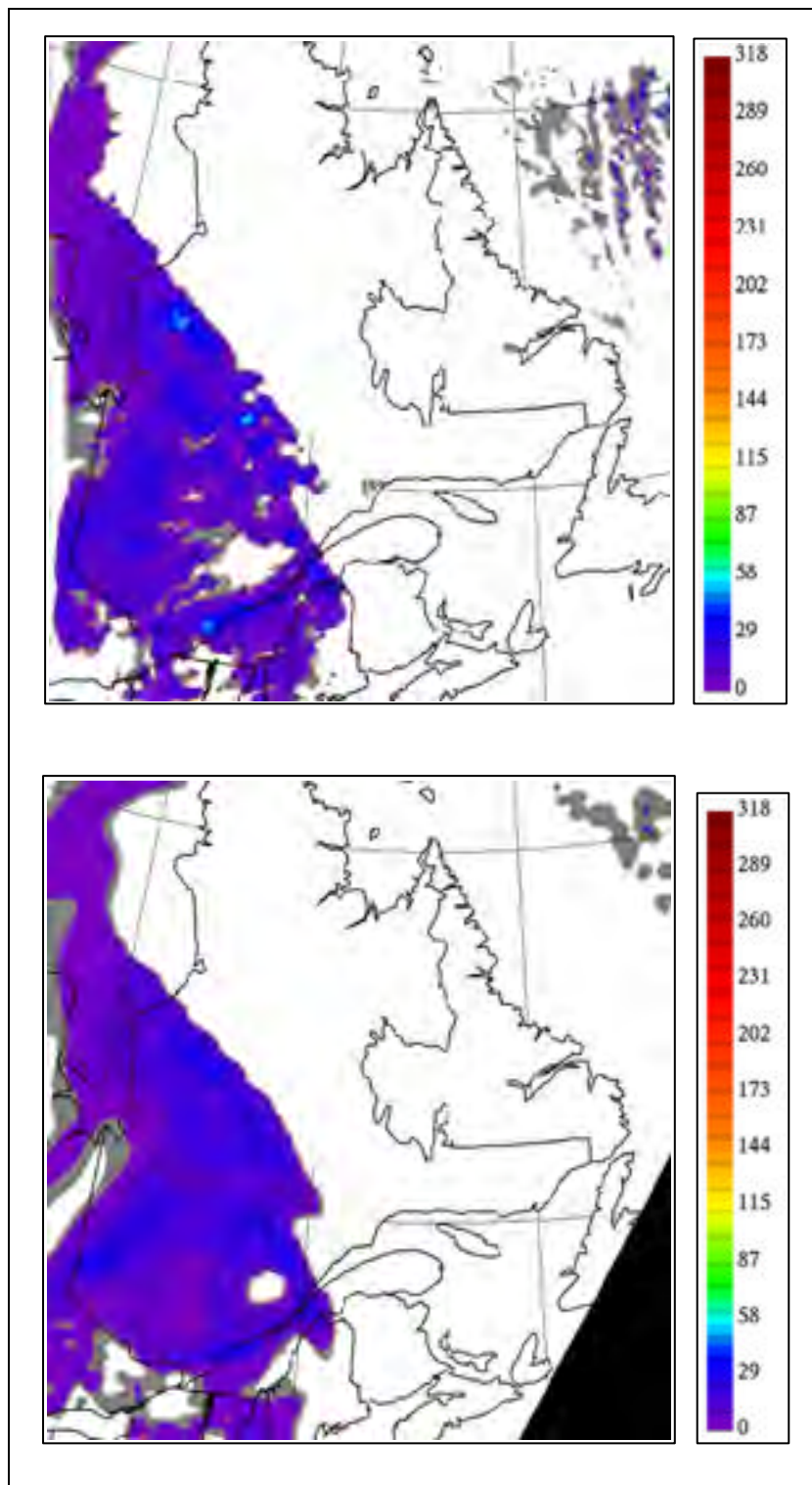


Figure 7.44 Taux de précipitation [10^{-8} m.s^{-1}] à 9 heures de simulation de GEM5 (haut) et de GEM-32 (bas)

7.4.2 La validation du type d'accumulation de glace

Les validations précédentes ont démontré que de la neige est présente sur la moitié Sud de la province à 9 heures de simulation. L'observation des résultats de GEM-32, relate également ces faits. La Figure 7.45 montre l'accumulation totale de neige [mm] de GEM-5 (haut) et GEM-32 (bas) à 9 heures de simulation. Dans les deux cas, des traces d'accumulation de neige sont observées dans la mer du Labrador ainsi que dans le Sud-Est de la province. De même que de l'accumulation de neige plus élevé, soit de 7 mm, est localisé dans la région du Mont Tremblant. Les calculs à 18 heures et à 27 heures de simulation montrent une même évolution (Voir ANNEXE XXVIII). Cette accumulation a tendance à augmenter le long du littoral à l'Est du Québec. Dans la région de Sept-Îles, une accumulation atteint des valeurs maximums et s'étend sur le littoral. Pour GEM-32, il est possible de voir qu'il existe un tel événement, toutefois il est moins bien défini. Les principales différences se situent dans le Nord de la province, sur la frontière de l'Ontario et du Québec.

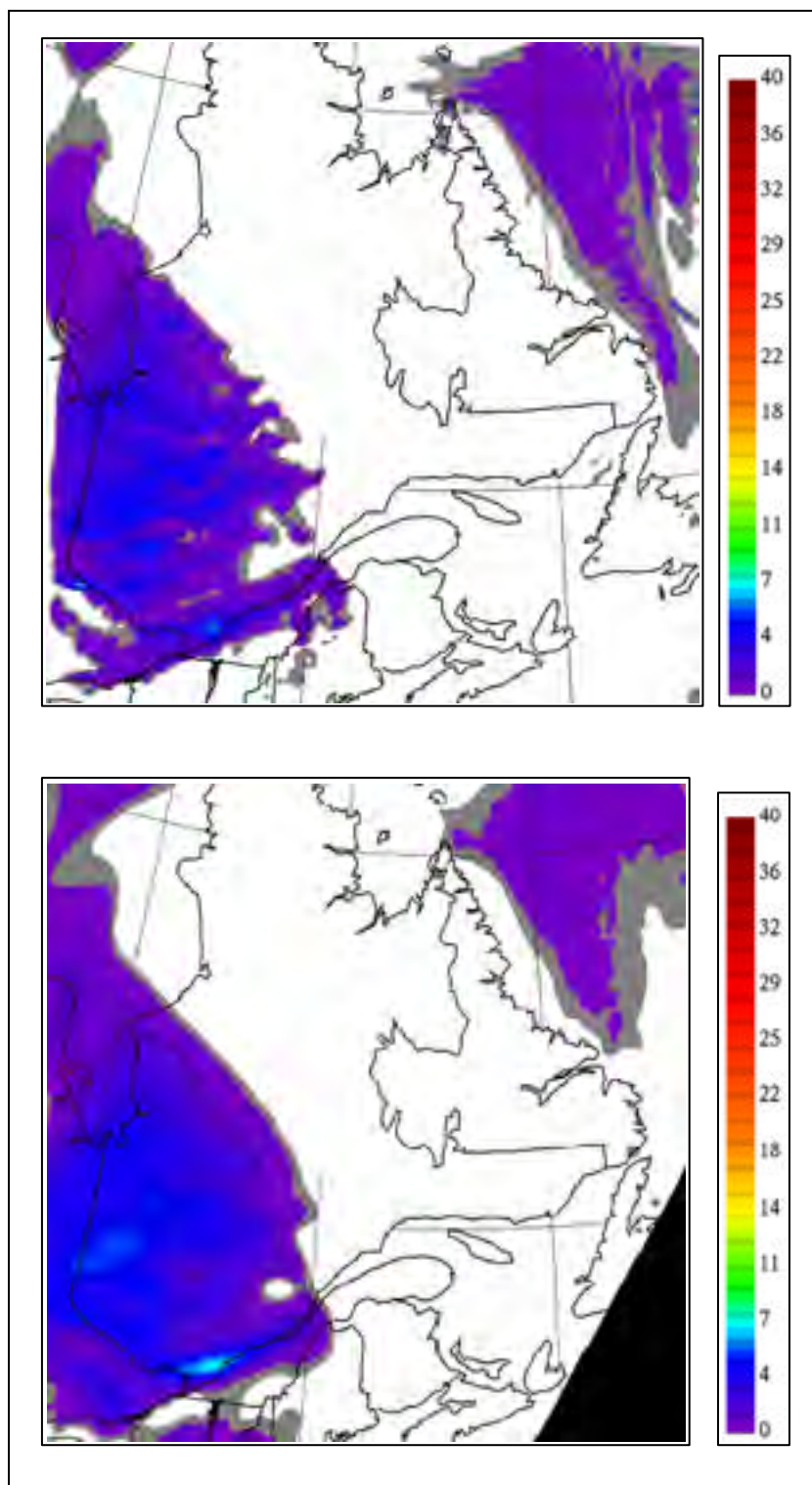


Figure 7.45 Accumulation de neige [mm d'eau] à 9 heures de GEM-5 (haut) et GEM-32 (bas)

La Figure 7.46 représente l'accumulation de pluie verglaçante à 27 heures pour GEM-5 (haut) et celle pour GEM-32 (bas). Tout comme la modélisation de l'accumulation totale de la neige, celle de l'accumulation de verglas, après 27 heures de simulation, démontre qu'il y a également une cohérence entre les deux simulations. Dans les deux cas, de l'accumulation apparaît la frontière Ontarienne, puis la frontière des États-Unis pour s'estomper sur le littoral au Nord-est de la province. De plus, autant pour GEM-5 que pour GEM-32, de la pluie verglaçante contribue au taux de précipitation dans le Nord du Québec. La résolution plus fine montre que cette accumulation épouse le littoral en face de Saint-Pierre et Miquelon ou encore au niveau de l'embouchure du Saint-Laurent et est absente sur les côtes limitrophes. De même qu'en Gaspésie de la pluie verglaçante est présente sur la Côte gaspésienne, la Baie Des Chaleurs et absente sur la Haute Gaspésie et la Pointe, démontrant une plus grande précision que GEM-32.

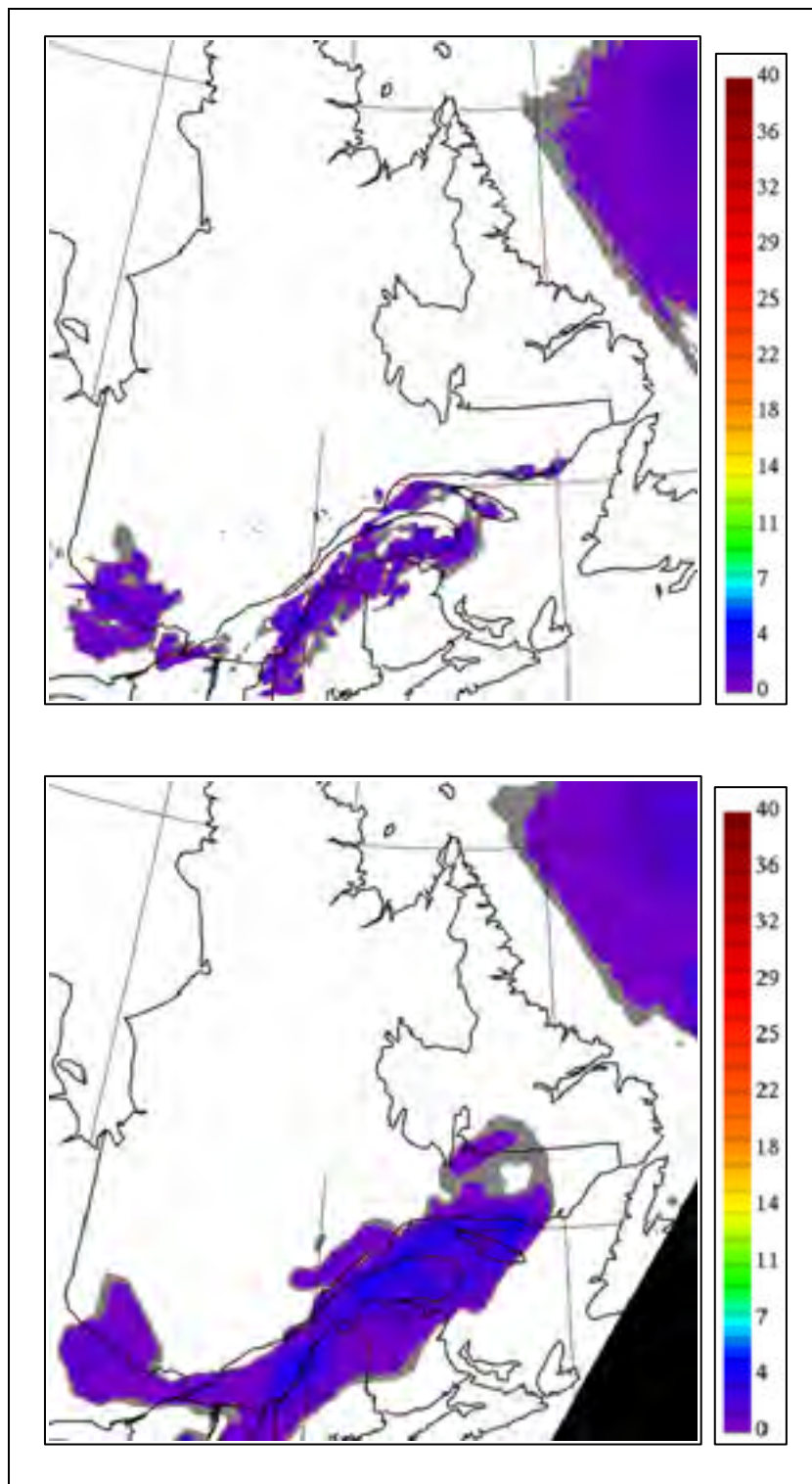


Figure 7.46 Accumulation de pluie verglaçante [mm d'eau] simulée à 27 heures pour GEM-5 (haut) et de GEM-32 (bas)

De la pluie, est observé dans le sud du Québec à 9 heures de simulation pour les deux simulations telles que le démontre la Figure 7.47. Puis, à 18 heures de simulation, l'accumulation s'intensifie sur l'Est de la province (Voir Figure A XXIX-1). De même pour la 27^{ième} heure de simulation (Voir Figure A XXIX-2). L'évolution temporelle à donc une bonne concordance entre les deux résolutions spatiales.

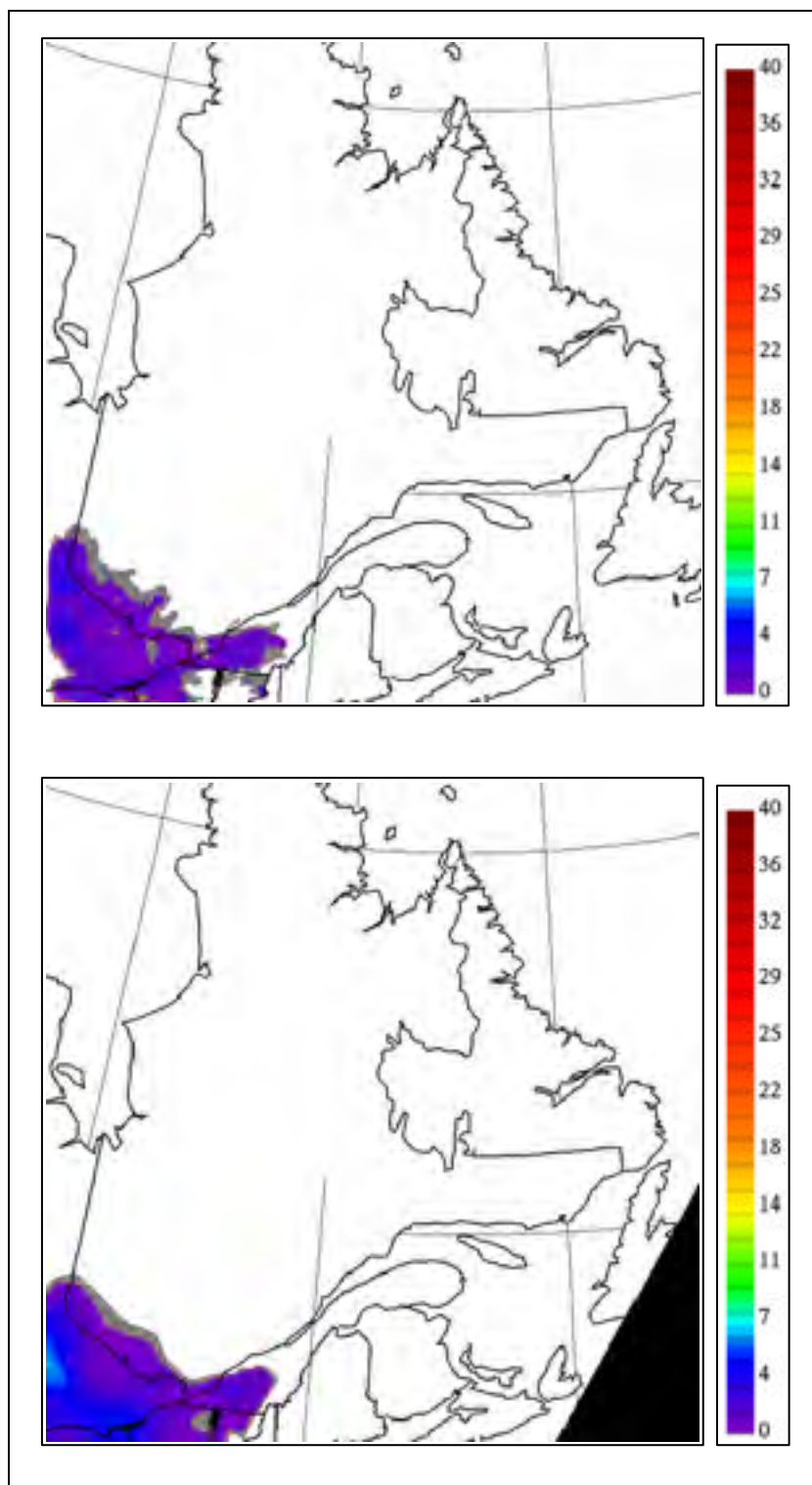


Figure 7.47 Accumulation de pluie [mm d'eau] simulée à 9 heures avec GEM-5 (haut) et GEM-32 (bas)

Donc, malgré les erreurs rencontrées lors de la modélisation de la hauteur géopotentielle, la température, l'humidité spécifique, la modélisation des variables de précipitations sont satisfaisantes et prometteuses. La comparaison entre les deux simulations, montre qu'il y a une cohérence dans le changement d'échelle. Par ailleurs, cette correspondance montre également une ressemblance entre les données d'entrée et la modélisation des précipitations givrantes à plus fines échelles. La modélisation GEM-5 montre davantage de détails concernant le taux de précipitation ainsi que la distinction des différentes accumulations totales et reste fidèle aux modélisations de GEM-32 et celles de la ré-analyse. De ces faits, l'utilisation de la modélisation à plus fine échelle est favorable pour la confection d'un atlas du givre. Toutefois, autant pour GEM-32 que pour GEM-5, l'évolution temporelle de la simulation du taux de précipitations montre un léger retard par rapport aux valeurs de la NARR.

7.5 Une cartographie du givre

Cette validation consiste à comparer le nombre d'heures du givre en considérant les valeurs de la NARR et les valeurs de la modélisation. Lorsque la température est inférieure à 0°C et que l'humidité relative est supérieure à 92 %, un événement de givre est relevé. Par la suite, le nombre d'heures de givre accumulé, sur une durée élémentaire de 3 heures, est détecté. Dans un premier temps, l'opération est effectuée avec les paramètres de la NARR à 30 m. Ces dernières valeurs sont sur une projection conique conforme de Lambert sur un domaine plus petit que celui utilisé dans cette étude. Ces dernières données sont sur une projection à pôle Nord basculé. Dans les deux cas, le nombre d'heures d'accumulation de givre est calculé, pour chaque heure de la simulation entre le 18 janvier 2006 à 0Z et le 19 janvier à 12 Z, pour une résolution de 32 km et une hauteur de 0,9950. La Figure 7.48 montre ce nombre d'heures utilisant les données de la NARR. La cartographie est effectuée sur une grille conique conforme de Lambert visualisée sur des axes des latitudes et des longitudes. Il est observé que de l'accumulation de givre longe la côte Ouest du Canada, s'étalant sur les États-Unis ainsi que la Colombie-Britannique et traversant la Saskatchewan et l'Alberta. À Est du

Canada, cet évènement s'étend sur l'Est de l'Ontario et sur le Sud ainsi que la côte est du Québec.

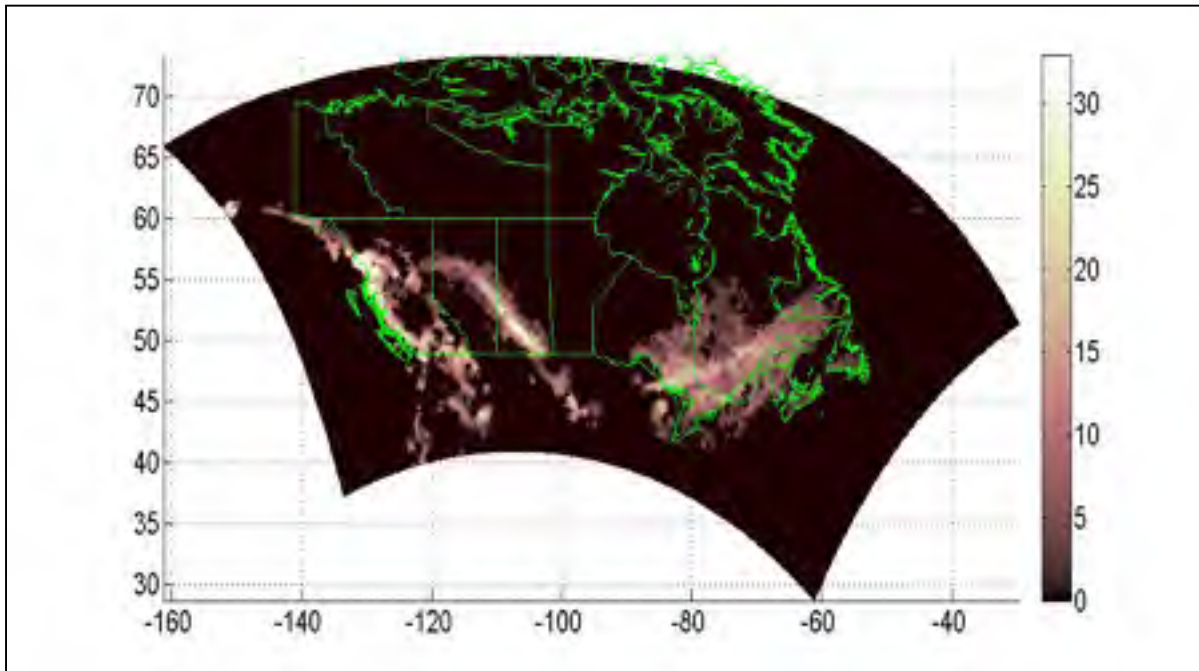


Figure 7.48 Accumulation du nombre d'heures de givre utilisant les données NARR comme valeurs d'entrée Tirée de Dupire (Dupire, en cours), effectué dans le cadre de son mémoire

La Figure 7.49 suivante représente la carte du nombre d'heures de givre avec comme donnée d'entrée la température et l'humidité spécifique du GEM-32 à 0,9950. Dans ce cas, l'humidité spécifique [kg/kg] est convertie en humidité relative [%]. Cette dernière image montre une accumulation de givre à une hauteur de 45 m. L'apparition de givre est également observée sur la côte Ouest du pays. Toutefois, elle est plus présente sur les États-Unis et moins présente sur la Saskatchewan et l'Alberta. De même que du givre est plus étalé sur la province du Québec et moins en Ontario.

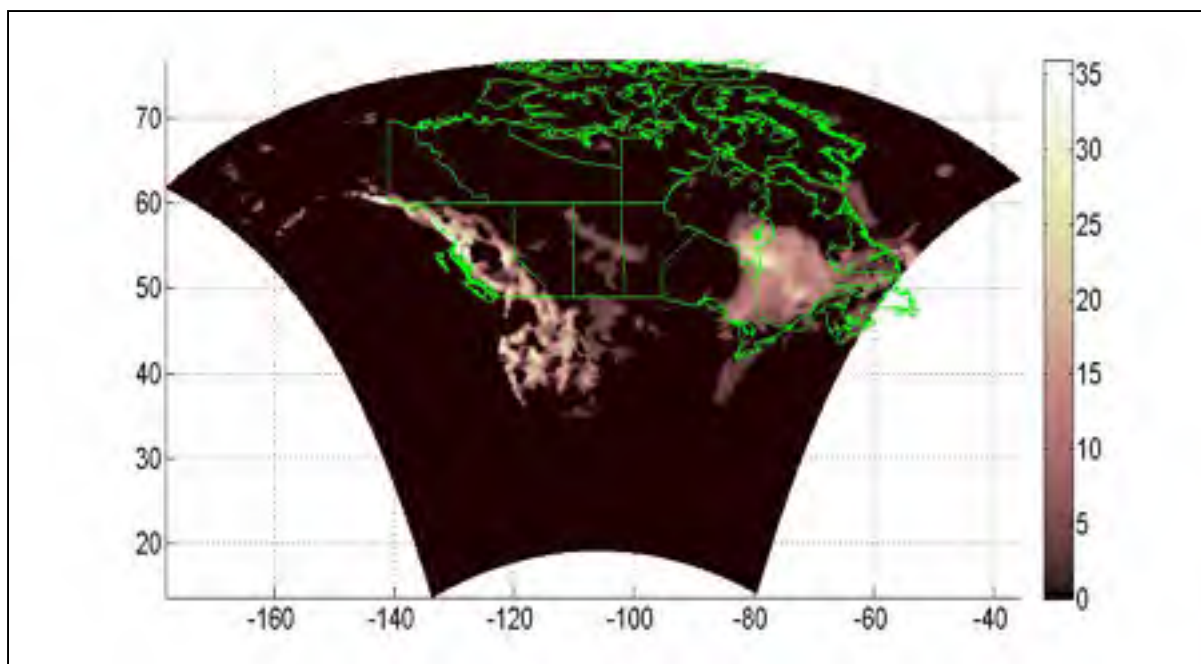


Figure 7.49 Accumulation du nombre d'heures de givre utilisant les données GEM comme valeurs d'entrée Tirée de Dupire (Dupire, en cours), effectué dans le cadre de son mémoire

Les deux cartes ci-dessus montrent une accumulation de givre sur les mêmes domaines. Ces accumulations sont calculées aux heures puis additionnées sur les 35 heures. De même que dans la majorité du Québec, cette durée s'élève à 15 heures. De plus, l'absence de givre est observée dans les mêmes régions, soit au centre et dans le Nord du Canadien. La ressemblance de ces deux atlas est à considérer pour la suite de la confection d'un atlas du givre.

CONCLUSION

Les climats nordiques sont favorables à la production de l'énergie éolienne, mais les occurrences de givre typiquement observées peuvent endommager les turbines, augmenter le risque pour les humains et réduire fortement l'efficacité des éoliennes. Il est donc important de comprendre et de répertorier ces événements afin d'améliorer les performances énergétiques et l'accès au site. Il est donc essentiel de développer une cartographie répertoriant la fréquence et l'intensité de ces événements au Canada. La plupart des atlas disponibles ont été obtenus à partir de modèles basés sur des équations empiriques ou à partir d'observations. Il est donc pertinent d'apporter un outil de détection du givre complémentaire basé sur le modèle de prévision atmosphérique GEM modélisant les précipitations givrantes tout en déterminant leur fréquence et leur intensité.

Une première contribution réalisée dans le cadre de ce mémoire à l'analyse des événements givrants est la mise en place d'une tour de mesure comportant un détecteur de givre et un pluviomètre. Les données de ces instruments permettront de déterminer la fréquence des événements givrants à un point donné et pourra aider à valider la modélisation à fine échelle dans cette région.

Le laboratoire numérique pour la simulation des événements de givre développé dans cette étude permet, entre autres, d'effectuer des modélisations pour les périodes hivernales du Québec et du Canada en se basant sur des données de ré-analyse Nord américaine (la NARR) pour la période de 1979 à 2008. L'interpolation des données de la projection conique conforme de Lambert en projection polaire stéréographique permet de couvrir un maximum du domaine de la NARR pour rendre ces fichiers compatibles avec GEM.

La validation de la modélisation des paramètres de précipitation pour une résolution spatiale de 32 km et 5 km est encourageante. Ces paramètres météorologiques donnent des résultats plausibles et en adéquation avec les conditions hivernales du Québec. De plus, la modélisation à plus fine échelle reflète mieux la réalité. Il est donc clair que le laboratoire

numérique pour la simulation des événements de givre développé dans le cadre de ce projet de maîtrise pourra aider grandement à la confection d'un atlas du givre à une résolution autour de 5 km.

RECOMMANDATIONS

Il serait souhaitable d'automatiser les simulations à plus fine échelle à partir de celles à échelle plus grossière («cascade»). Ainsi, lors de la simulation à une résolution spatiale de 32 km, le modèle prépare une grille qui pourra accueillir des données à résolution plus fine. Cette méthode permettra d'améliorer la continuité entre les deux types de modélisation. De plus, une nouvelle version de GEM et du schéma de microphysique de Milbrandt et Yau existe. C'est GEM 4.2.0 utilisé durant les jeux Olympiques de Vancouver en 2010. Cette version est disponible via le site internet : <http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/>. Afin d'améliorer les performances des simulations, il serait intéressant d'effectuer les prochains calculs avec cette version.

En ce qui concerne la validation, il serait pertinent d'approfondir l'étude concernant les écarts entre les données simulées à une hauteur de rapport des pressions de 0,9950 et celles observées dans la NARR à 30 m. Ces recherches permettront de mieux comprendre les différences et ainsi identifier des avenues pour améliorer la simulation sur des niveaux proches de la surface, en éliminant le recours à 1000 mb en tant que hauteur de surface. Par le fait même, un meilleur contrôle pourrait être établi concernant l'ajustement hydrostatique de la température à l'état initial des modélisations.

D'autres validations pourront être effectuées en simulant d'autres cas où il est connu qu'il existe des précipitations givrantes, telles que la neige ou la pluie verglaçante. Environnement Canada répertorie les événements les plus marquants, par année et les rends publiques sur le site : <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/>. Les événements hivernaux classés comme dangereux sont :

- La première semaine de janvier 1998 a marqué le Québec avec la tempête de verglas qui a causé 35 morts, abattu des millions d'arbres et des milliers de pylônes et de poteaux électriques. À certain endroit l'équivalent en eau liquide de pluie verglaçante et de grêle a dépassé le 100 mm;

- Janvier 2001, fut enregistrée des records de précipitation de neige depuis les 25 dernières années en atteignant un total annuel de 281 cm de neige à Montréal;
- L'hiver 2007-2008 passera à l'histoire concernant les fortes précipitations de neige atteignant le Sud de Toronto, du Québec et les provinces de l'Atlantique Nord. De fortes précipitations fut enregistrée le 3 décembre 2007. La deuxième toucha le Québec les 16 et 17 décembre 2007. La troisième tempête fut observée du 7 mars au 9 mars et était composée de précipitation de neige et de forts vents. Toute cette accumulation de neige a rendu le déneigement difficile, a créé des effondrements de toitures et des fissures au niveau des bâtiments. Dans certaine région du Québec, l'accumulation de neige a dépassé les 500 cm;
- La dernière semaine d'octobre 2010, de fortes chutes de neige, des orages violents et des vents de la force d'un ouragan de force trois à parcouru le Québec depuis le Pacifique Nord-Ouest. Cette « bombe météorologique » a entraîné la chute d'arbres, de réseaux électriques et des arrachages de toits.

Finalement, il serait pertinent d'estimer la persistance des événements et des accumulations des événements givrants distinguant l'accumulation de givre et de verglas. Ces deux types d'accrétion ont des répercussions différentes sur les pales des éoliennes telles que le changement aérodynamique des pales ou encore l'adhésion à celle-ci. Cette distinction permettrait la corrélation de ces deux types d'occurrence avec la sous-performance de la production éolienne. Grâce à la modélisation avec GEM 4.2.0, il sera possible de différencier ces deux types d'accumulation de glace.

ANNEXE I

ATLAS DU GIVRAGE ATMOSPHÉRIQUE PUBLICS POUR LE CANADA OU LE QUÉBEC

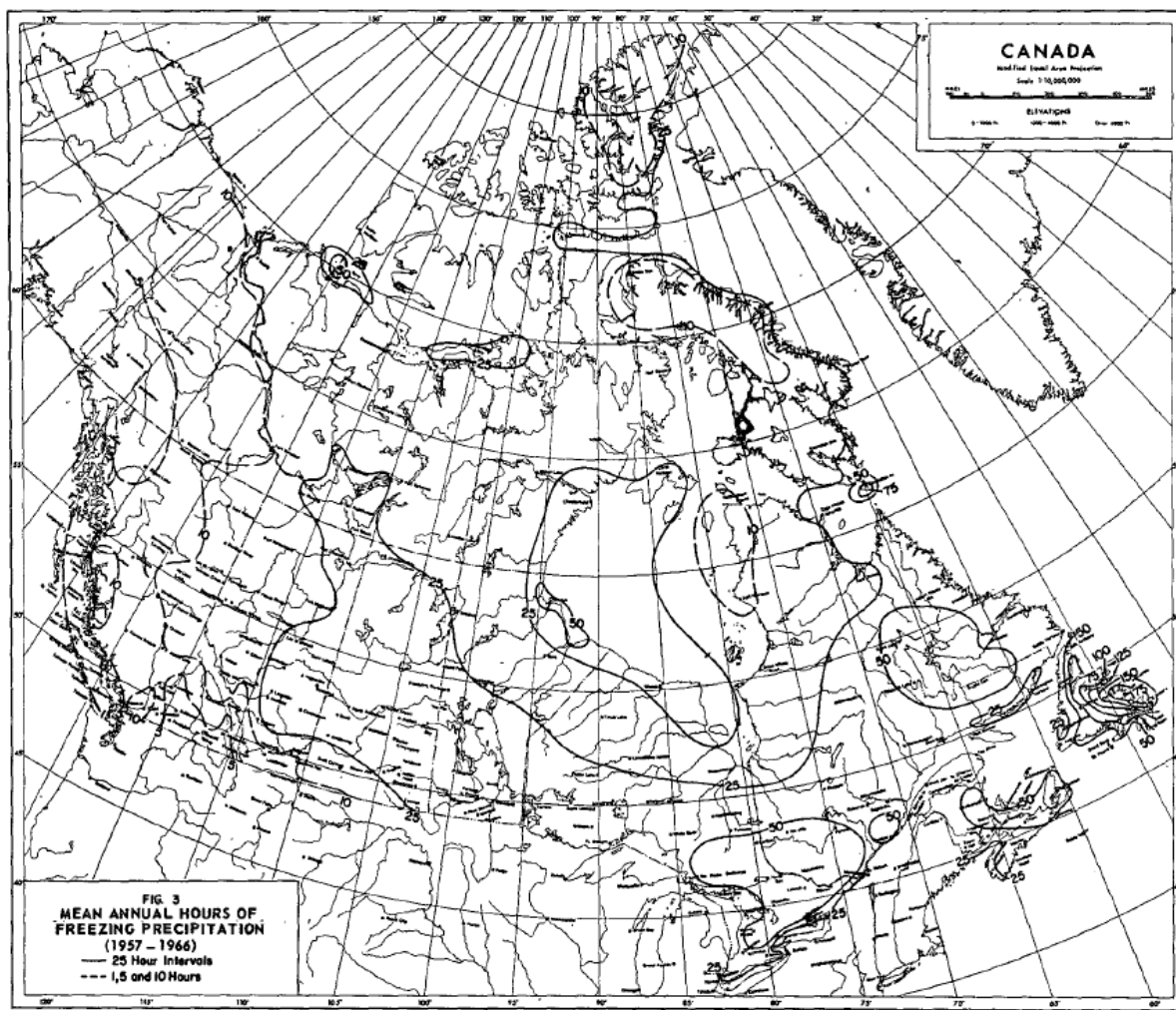


Figure A I-1 Atlas des heures moyennes annuelles de précipitations givrantes

Note : Les valeurs de l'échelle des iso lignes utilisées sont de 5 à 75 par incrément de 5 et l'unité est l'heure

Tirée de G.A. McKay et H.A. Thompson (1969, p.930)



Figure A I-2 Atlas du nombre de jours annuel moyen d'évènements de précipitations verglaçantes

Note : Les valeurs de l'échelle des iso lignes utilisées sont de 0 à 30 par incrément de 5 et l'unité est 1 jour.

Tirée d'Environnement Canada (1987)

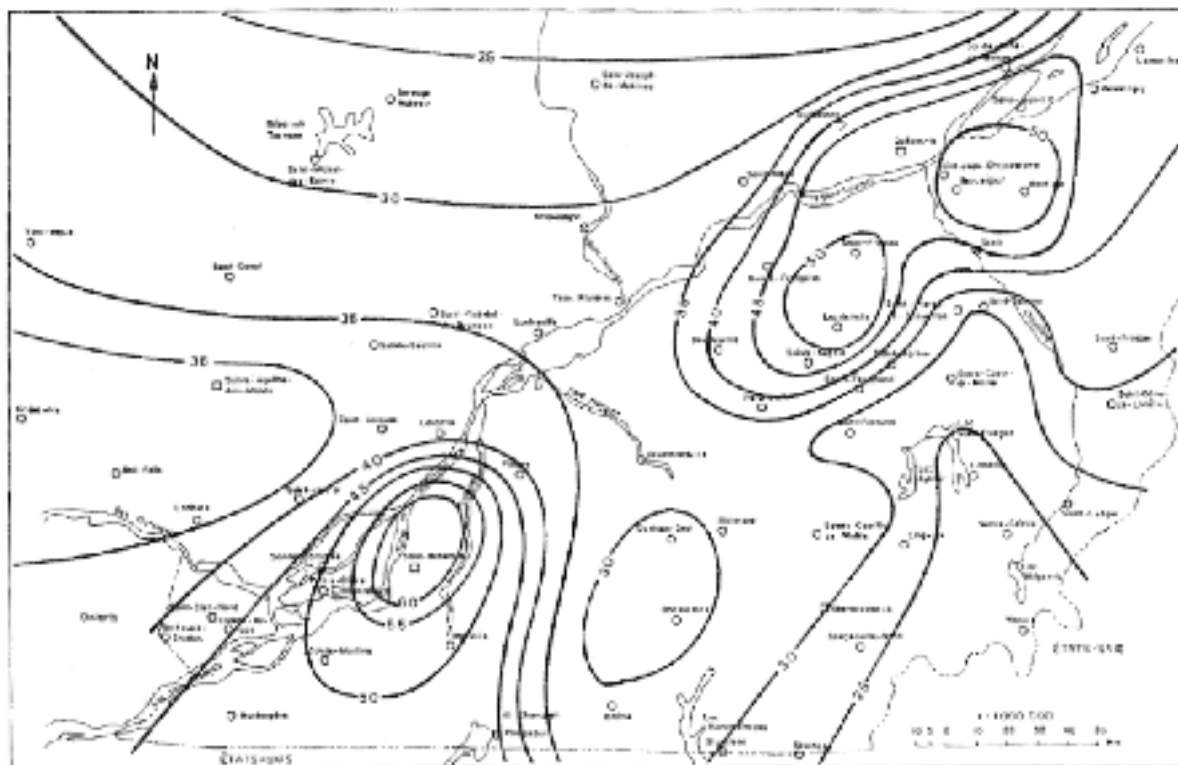


Figure A I-3 Atlas de la fréquence annuelle en nombre d'évènement de pluies verglaçantes pour la vallée du St-Laurent

Note : Les valeurs de l'échelle des iso lignes utilisées sont de 35 à 60 par incrément de 5 et l'unité est la fréquence des évènements annuels

Tirée de Laflamme et Périard (1996, p.32)

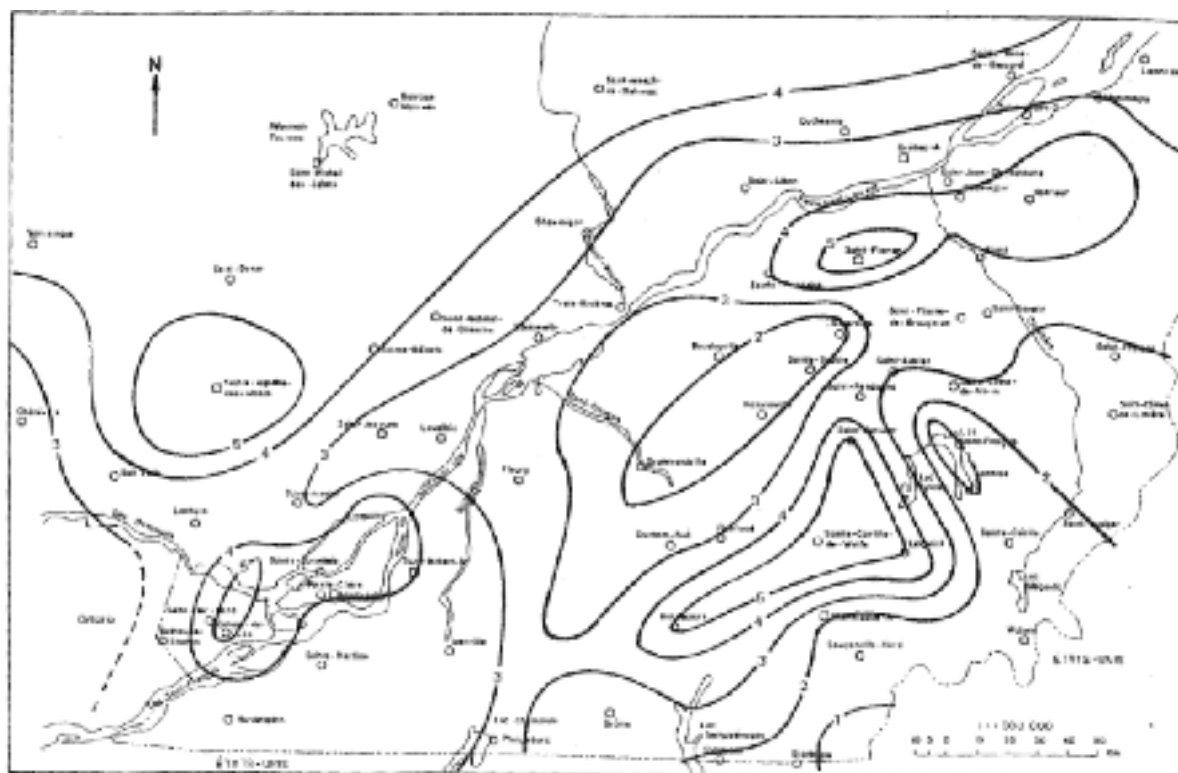


Figure A I-4 Atlas du nombre d'occurrences moyennes annuelles de verglas en jours pour la vallée du St-Laurent

Note : Les valeurs de l'échelle des iso lignes utilisées sont de 1 à 5 par incrément de 1 et l'unité est la fréquence moyenne annuelle d'apparition du verglas

Tirée de Laflamme et Périard (1996. P.22)

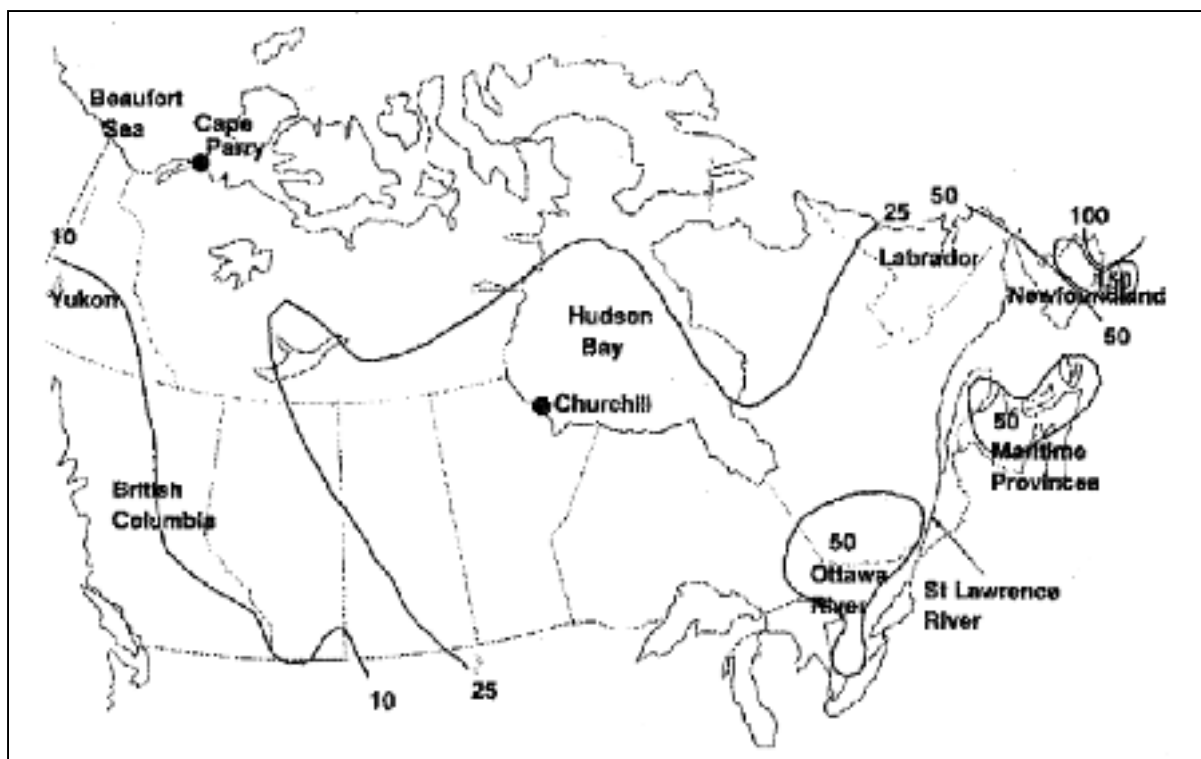


Figure A I-5 Atlas des heures moyennes annuelles de pluies et bruines verglaçantes
Tirée de Stuart et Isaac, (1999, p.60)

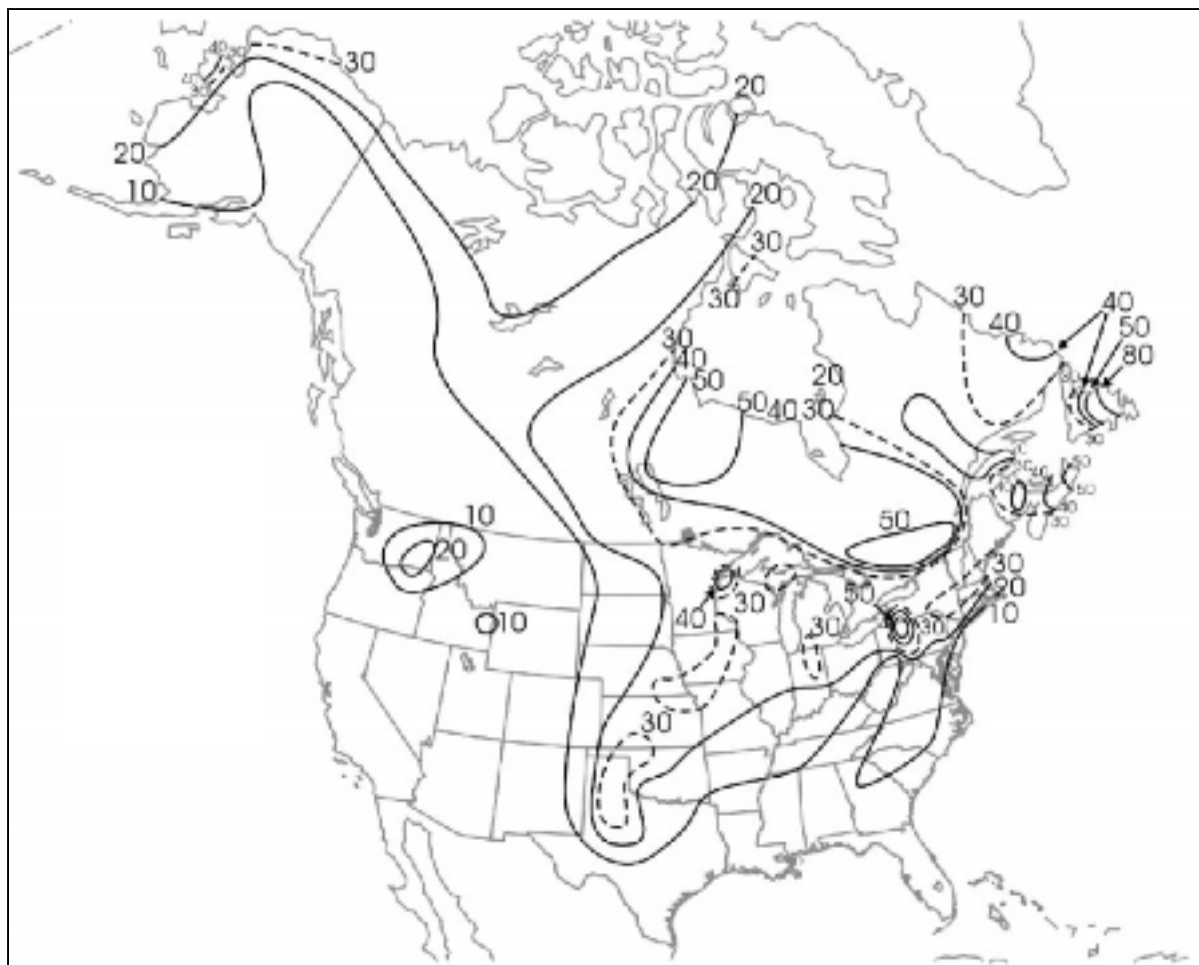


Figure A I-6 Atlas des heures moyennes annuelles de précipitation verglaçantes pour
l'Amérique du Nord
Tirée de Cortinas Jr et al. (2004, p.383)

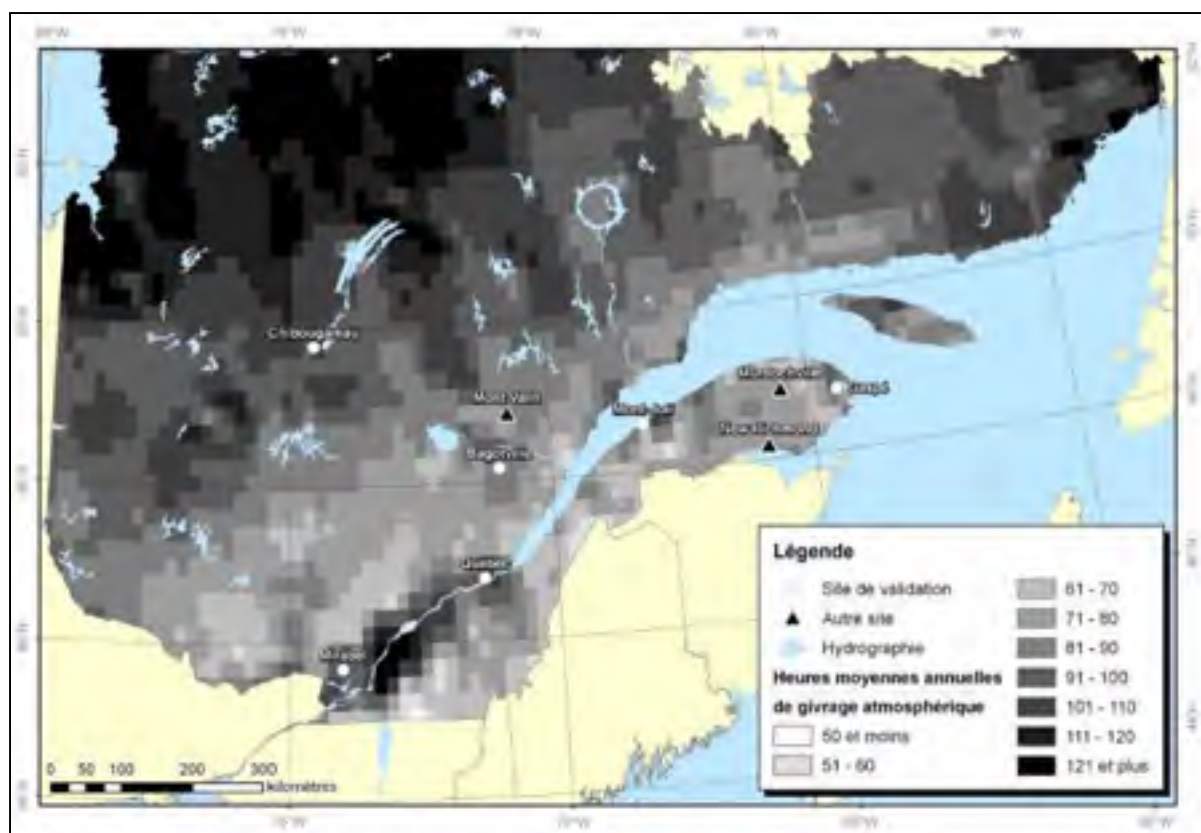


Figure A I-7 Carte des heures annuelles de givrage atmosphérique au Québec
Tirée de Comeau (2008, p.88)

ANNEXE II

VARIABLES DE SORTIES DU SCHÉMA M&Y

Tableau A II-1 Variables du rapport de mélange
Tiré de Milbandt et Yau (2005, p.1)

<i>Catégories des hydrométéoréores</i>	<i>Variables</i>	<i>Unités</i>	<i>Référence au texte Partie 4.3</i>
<i>Nuage</i>	QCT1	kg/kg	1
<i>Pluie</i>	QRT1	kg/kg	2
<i>Glace</i>	QIT1	kg/kg	3
<i>Neige</i>	QNT1	kg/kg	4
<i>Neige en boulette</i>	QGT1	kg/kg	5
<i>grêle</i>	QHT1	kg/kg	6

Tableau A II-2 Variables du taux de précipitation
Tiré de Milbandt et Yau (2005, p.4)

<i>Taux de précipitation</i>	<i>Variables</i>	<i>Unités</i>	<i>Référence au texte Partie 4.3</i>
<i>Bruine liquide</i>	RRN1	m/s	1
<i>Pluie</i>	RRN2	m/s	2
<i>Bruine givrante</i>	RFR1	m/s	1
<i>Pluie givrante</i>	RFR2	m/s	2
<i>Cristaux de glace</i>	RSN1	m/s	3
<i>Neige</i>	RSN2	m/s	4
<i>Neige en boulette</i>	RSN3	m/s	3 & 4
<i>Glace en boulette</i>	RPE1	m/s	5
<i>Grêle</i>	RPE2	m/s	6
<i>Grosse grêle</i>	RPEL	m/s	6
<i>Précipitation mixte</i>	RMX	m/s	2 & 3

Tableau A II-3 Variables de la quantité de précipitation
Tiré de Milbandt et Yau (2005, p.5)

<i>Quantité de précipitation de précipitation</i>	<i>Variables</i>	<i>Unités</i>	<i>Référence au texte Partie 4.3</i>
<i>Bruine liquide</i>	RN1	m	1
<i>Pluie</i>	RN2	m	2
<i>Bruine givrante</i>	FR1	m	1
<i>Pluie givrante</i>	FR2	m	2
<i>Cristaux de glace</i>	SN1	m	3
<i>Neige</i>	SN2	m	4
<i>Neige en boulette</i>	SN3	m	3 & 4
<i>Glace en boulette</i>	PE1	m	5
<i>Grêle</i>	PE2	m	6
<i>Grosse grêle</i>	PE2L	m	6
<i>Précipitation mixte</i>	AMX	m	2 & 3

ANNEXE III

VARIABLES DE SORTIES DU MODÈLE GEM

Tableau A III-1 Variables du modèle GEM et les variable du schémas microphysique de M&Y

Tiré de Milbrant et Yau (2009, p.5)

<i>Quantités de Précipitation</i>	<i>Variable</i>	<i>Variable M&Y</i>
<i>Pluie</i>	RN	RN1+RN2+schéma convectif
<i>Pluie givrante</i>	FR	FR1+FR2+schéma convectif
<i>Neige</i>	SN	SN1+SN2+SN3+schéma convectif
<i>Grêle</i>	PE	PE1+schéma convectif

Tableau A III-2 Variables du modèle GEM et les variable du schémas microphysique de M&Y

Tiré de Milbrant et Yau (2009, p.5)

<i>Taux et accumulation</i>	<i>Variable</i>	<i>Variables M&Y</i>
<i>Taux de précipitation liquide total</i>	PE2	RRN1+RRN2+RFR1+RFR2
<i>Taux de précipitation solide total</i>	PE4	RSN1+RSN2+RSN3+RPE1+RPE2
<i>Accumulation des précipitations liquide totales</i>	A2	RN1+RN2+FR1+FR2
<i>Accumulation des précipitations solide totales</i>	A4	SN1+SN2+SN3+PE1+PE2

ANNEXE IV

PROGRAMMATION POUR L'ACQUISITION DES DONNÉES DE LA NARR ET DES CAPTEURS AVHRR ET AMSR

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%  
%   TELECHARGEMENT DES FICHIERS METEOROLOGIQUES POUR UN INTERVALLE DE TEMPS %  
%  
%                               Amelie Camion mars 2011                               %  
%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
  
clear all  
  
cd interpolateur  
  
mkdir fichiers_NARR  
cd fichiers_NARR  
  
display('Vous avez donc fait le choix pour un intervalle de temps')  
  
date_debut = input('entrer la premiere date (aaaammjjHHMM): ');  
date_fin   = input('entrer la deuxieme date (aaaammjjHHMM): ');  
date1      = num2str(date_debut) ;  
date2      = num2str(date_fin)   ;  
date1_mat  = datenum([str2num(date1(1:4)) str2num(date1(5:6)) ...  
                     str2num(date1(7:8)) str2num(date1(9:10)) 00 00]) ;  
date2_mat  = datenum([str2num(date2(1:4)) str2num(date2(5:6)) ...  
                     str2num(date2(7:8)) str2num(date2(9:10)) 00 00]) ;  
  
inc        = datenum([0 0 0 3 0 0]) ;  
matrix     = [date1_mat : inc : date2_mat] ;  
matrix_date = datestr(matrix, 'yyyymmddHHMMSS') ;  
  
i = 1;  
  
inc = 0;  
  
while i<=size(matrix_date, 1)  
  
    long_date = size(matrix_date, 2) ;  
    tt = matrix_date(i, [1:long_date]) ;  
    t_annee = tt(1:4) ;  
    t1 = tt(1:6) ; %aaaamm  
    t2 = tt(1:8) ; %aaaammjj  
    t3 = tt(9:12) ; %hhmm  
    t4 = num2str('000') ; %sss  
    t5 = tt(1:12) ;  
  
    %%%% Telechargement automatique des fichiers NARR %%%%  
  
    urlwrite(['ftp://nomads.ncdc.noaa.gov/NARR/' t1 '/' t2 '/narr-a_221_' t2 '_' t3  
            '_' t4 '.grb'], ['NARR_' t5 '.grb'])  
  
    if i==1 | inc ~= str2num(t2)
```

```

        %%%% Telechargement des fichiers d`analyse de AVHR %%%%
        if t_annee < 200206

            urlwrite(['ftp://nomads.ncdc.noaa.gov/SST/OISSTv2/IEEE/' t_annee
'/AVHRR/avhrr-only-v2.' t2 '.gz'] , ['cste_mensuelles_' t2 '.gz'])

            %%%% Telechargement des fichiers d`analyse de AVHR et AMSR %%%%
            elseif t_anne >= 200206

                urlwrite(['ftp://nomads.ncdc.noaa.gov/SST/OISSTv2/IEEE/' t_annee
'/AVHRR-AMSR/amsr-avhrr-v2.' t2 '.gz'] , ['cste_mensuelles_' t2 '.gz'])

            end

            gunzip(['cste_mensuelles_' t2 '.gz'], './TM_LG')

        end

        inc = str2num(t2) ;
        i = i+1;
end

```

ANNEXE V

PROGRAMMATION POUR LA DEFINITION DES GRILLE GEOGRAPHIQUE SERVANT À L'ÉCRITURE DES FST

```
init
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%      Definition des variables d un fichier NARR
%      - Definition d une projection conique conforme de Lambert
%      - Definition d une projection orthonormee
%      - Retour a une projection polaire stereographique
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

my_inv = read_grib(GRB, -1) ; % Lecture du fichier des variables 3D
Nx      = my_inv(1).gds.Nx   ; % Nombre de point en x et y
Ny      = my_inv(1).gds.Ny   ;
La1     = my_inv(1).gds.La1   ; % Coord du point (0,0) de la grille
Lo1     = my_inv(1).gds.Lo1   ;
LOV     = my_inv(1).gds.LOV   ; % Meridien central
Dx      = my_inv(1).gds.Dx * 1000 ; % Variation en metre entre deux points
Dy      = my_inv(1).gds.Dy * 1000 ;
dlon    = Dx*360/40000000    ;
dlat    = Dy*360/40000000    ;
Latin1  = 50                  ; % Choix de un parallele standard donc
Latin2  = 50                  ;
STDPAR  = [Latin1 , Latin2]   ; % parallele standard
date_LC = my_inv(1).stime ;

R        = 6371.99999 * 10^3   ; % Rayon de la Terre [m]

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%      Projection conique conforme de Lambert
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

m_proj('Lambert Conform', 'clo', LOV, 'ell', 'sphere', 'par', STDPAR) ;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%      Definition des x y, LAT/LON      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

[xmin_LC, ymin_LC] = m_ll2xy(Lo1, La1, 'clip', 'off') ;
xmax_LC            = xmin_LC + (Nx-1)*Dx             ;
ymax_LC            = ymin_LC + (Ny-1)*Dy             ;
x_LC               = xmin_LC : Dx : xmax_LC          ;
y_LC               = ymin_LC : Dy : ymax_LC          ;

[x2D_LC, y2D_LC]   = meshgrid(x_LC, y_LC)            ;
[Lon2D_LC, Lat2D_LC] = m_xy2ll(x2D_LC, y2D_LC)       ;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Definition grille orthonormee Lat/Lon %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Optimisation grille orthonormee sur une grille NARR
lat_min = max(max(Lat2D_LC(1,:))) ;
lon_min = Lon2D_LC(max(find(Lat2D_LC(:,1) <= lat_min)), 1) ;
lon_max = Lon2D_LC(max(find(Lat2D_LC(:,1) <= lat_min)), Nx) ;
```

```

lat_max      = Lat2D_LC(Ny, min(find(Lon2D_LC(Ny, :)>=lon_max))) ;
dlon_LL      = 0.3 ;
dlat_LL      = dlon_LL ;

Lon_LL       = lon_min : dlon_LL : lon_max ;
Lat_LL       = lat_min : dlat_LL : lat_max ;

% Grille x et y et Lat/Lon en 2D
[Lon2D_LL Lat2D_LL] = meshgrid(Lon_LL, Lat_LL) ;
[x2D_LL y2D_LL]    = m_ll2xy(Lon2D_LL, Lat2D_LL, 'clip','off') ;
Nx_LL            = size(x2D_LL, 2) ;
Ny_LL            = size(x2D_LL, 1) ;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                               Projection Polaire Stereographique
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

m_proj('stereographic', 'latitude', 90, 'longitude', LOV, 'radius',90) ;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%      Definition des x y, LAT/LON      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

[x2D_LCbis, y2D_LCbis] = m_ll2xy(Lon2D_LC, Lat2D_LC) ;

[dx1,dx2]      = gradient(x2D_LCbis) ;
dx3            = sqrt(dx1.^2 + dx2.^2) ;
dx4            = mean(mean(dx3)) ;

[dy1,dy2]      = gradient(y2D_LCbis) ;
dy3            = sqrt(dy1.^2 + dy2.^2) ;
dy4            = mean(mean(dy3)) ;

dx            = min(dx4,dy4) ;
dy            = dx ;
dxPS90        = dx * R ;
dyPS90        = dy * R ;

ymax_PS       = min(min(y2D_LCbis(Ny,:))) ;
xmax_PS       = x2D_LCbis(max(find(y2D_LCbis(:,Nx)<=ymax_PS))+30,Nx) ;
xmin_PS       = x2D_LCbis(max(find(y2D_LCbis(:,1)<=ymax_PS))+30,1) ;
ymin_PS       = y2D_LCbis(1, max(find(x2D_LCbis(1,:)<=xmax_PS))+30) ;

x_PS          = xmin_PS : dx : xmax_PS ;
y_PS          = ymin_PS : dy : ymax_PS ;

[x2D_PS, y2D_PS] = meshgrid(x_PS, y_PS) ;
Nx_PS         = length(x_PS) ;
Ny_PS         = length(y_PS) ;

[Lon2D_PS, Lat2D_PS] = m_xy2ll(x2D_PS, y2D_PS) ;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                               Retour a une projection conique conforme de Lambert
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

m_proj('Lambert Conform', 'clo', LOV, 'ell', 'sphere', 'par', STDPAR) ;

[x2D_PSBis, y2D_PSBis] = m_ll2xy(Lon2D_PS, Lat2D_PS, 'clip', 'off') ;

```

```

Nx_PSbis          = size(x2D_PSbis, 2)          ;
Ny_PSbis          = size(y2D_PSbis, 1)          ;

[Lon2D_PSbis, Lat2D_PSbis] = m_xy2ll(x2D_PSbis, y2D_PSbis) ;

Dx_PSbis          = mean(mean(gradient(x2D_PSbis))) ;
Dy_PSbis          = mean(mean(gradient(y2D_PSbis))) ;

dlon_PS           = mean(mean(gradient(Lon2D_PSbis))) ;
dlat_PS           = mean(mean(gradient(Lat2D_PSbis))) ;

```


ANNEXE VI

PROGRAMMATION POUR L'ÉCRITURE DES FST

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%           Interpolation d un fichier .grb a un fichier .fst
%           Ecriture des variables meteorologiques
%           Doit fonctionner avec grille.m
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

delete *000 %si necessaire sinon MATLAB shutdown
FST = [t2 t t3 t4] ;
unit = fstouv(FST) ;% Creation du fichier

dt      = datestr(date_LC , 'yyyymmddHHMMss')
d       = dt(1:8) ;
h       = dt(9:14) ;
h(7:8)  = '0' ; % On pose les milisecondes = 0
my_date = str2num(d) ;
my_hour = str2num(h) ;
date    = newdate(my_date,my_hour,3) ;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%           Choix d une grille orthonormee ou Polaire Stereographique
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%      Grille Polaire stereographique      %%%%

x2D      = x2D_PSbis ; y2D      = y2D_PSbis ;
var_i    = size(Lon2D_PSbis, 2) ; var_j    = size (Lat2D_PSbis, 1) ;
x2D_ini  = x2D_LC ; y2D_ini  = y2D_LC ;
type     = 'N' ;

%%%%%      Definition des descripteurs geographiques FST xg      %%%%

scale90_60 = (1+sin(90*pi/180)) / (1+sin(60*pi/180)) ;
d60        = dxPS90 / scale90_60 ;
dgrw       = mod(270-LOV, 360) ;
PI         = R*(0-x_PS(1))/dxPS90 ;
PJ         = R*(0-y_PS(1))/dxPS90 ;
xg1 = PI ; xg2 = PJ ; xg3 = d60 ; xg4 = dgrw ;

%%%%%      Rotation des vents      %%%%

azimut      = zeros(Ny_PSbis,Nx_PSbis) ;
dist        = 1000.*ones(Ny_PSbis,Nx_PSbis) ;
[LonNord_360, LatNord, a21] = m_fdist(Lon2D_PSbis,Lat2D_PSbis,azimut,dist) ;
LonNord     = LonNord_360 - 360 ;
[xNord,yNord] = m_ll2xy(LonNord,LatNord, 'clip', 'off') ;
delxNord    = xNord - x2D_PSbis ;
delyNord    = yNord - y2D_PSbis ;
angleX2Nord = atan2(delxNord,delyNord)*180/pi ;
angleY2Nord = - angleX2Nord ;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%           Variables 3D essentielles au demarrage de GEM
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%   Nombre de niveaux   %%%%%%%%%
mat_niv = ();
comp_niv = 1;
for inc_niv = 1:length(my_inv) ;

    if sum(strcmp(mat_niv,my_inv(inc_niv).level))==0 && ...
        isequal(findstr('mb',my_inv(inc_niv).level)+1,
length(my_inv(inc_niv).level) ) && ...
        length(my_inv(inc_niv).level)<8 ;
        mat_niv(comp_niv) = my_inv(inc_niv).level;
        comp_niv = comp_niv + 1;
    end;

end;

%%%%%   Choix des variables sur plusieurs niveaux isobariques   %%%%%
noms_grb = cellstr (strvcat ('HGT', 'TMP', 'UGRD', 'VGRD', 'SPFH'));
noms_fst = cellstr (strvcat ('GZ' , 'TT' , 'UU' , 'VV' , 'HU' )) ;

for inc_niveau = 1:length(mat_niv) ;
    for inc_nom = 1:length(noms_grb) ;

        nom_grb = char(noms_grb(inc_nom));
        nom_fst = char(noms_fst(inc_nom));

        %%%%   Selection des variables dans un fichier NARR   %%%%
        inc_var = 1;
        quit_var = 0;

        while ~quit_var ;

            if ~strcmp(my_inv(inc_var).level,mat_niv(inc_niveau)) || ...
                ~strcmp(my_inv(inc_var).parameter,noms_grb(inc_nom)) ;

                inc_var = inc_var + 1 ;

            elseif strcmp(my_inv(inc_var).level,mat_niv(inc_niveau)) && ...
                strcmp(my_inv(inc_var).parameter,noms_grb(inc_nom)) ;

                lvl_mbar = -1;
                param = strtok(my_inv(inc_var).parameter);
                data_narr = my_inv(inc_var).fltarray ;

                deet = 0;   npas=0;           npak=-16;
                datyp=1;   typvar = 'P';   rewrite=0;

                %%%%   Changements d unitees   %%%%

                knot = 0.514791000000000 ;

                switch nom_grb
                case 'HGT' ; a = 0.1      ; b = 0      ;
                case 'TMP' ; a = 1        ; b = -273   ;
                case 'UGRD' ; a = 1/knot  ; b = 0      ;

```



```

case 'VGRD' ; a = 1/knot ; b = 0 ;
case 'SPFH' ; a = 1 ; b = 0 ;
otherwise ;
    display(['Unknown Units:' nom_grb]) ;
    y = nan ;
end

%%%% Condition des parametres %%%%

if strcmpi(nom_grb,param) ;

    lvl_mbar = str2num(strtok(my_inv(inc_var).level));
    p = lvl_mbar ;
    [ncode, nKind] = convip(p,2,2) ;
    ip1 = ncode; ip2 = 0; ip3 = 0;

    % Changement d unitees
    d = data_narr * a + b ;

    % Creation d une matrice pour interpoler
    shape = reshape(d, Nx, Ny)' ;

    % Interpolation
    valeur_int = interp2(x2D_ini, y2D_ini, shape, x2D, y2D,

'cubic') ;

    if ~strcmpi(param, 'UGRD') && ~strcmpi(param, 'VGRD')
        ni = var_i; nj = var_j; nk = 1 ;
        ZZ = valeur_int ;
        Z = single(ZZ) ;
        grtyp = type ;
        BUF = Z' ;

        [ig1,ig2,ig3,ig4] = cxgaig(grtyp, xg1, xg2, xg3, xg4) ;
        %
        nomvar = nom_fst ;
        err= fstecr(BUF,npak,unit,date,deet,npas,...
        ni,nj,nk,ip1,ip2,ip3,typvar,nomvar, 'data',grtyp,...
        ig1,ig2,ig3,ig4,datyp,rewrite);
    end

    %)

    if strcmpi(param, 'UGRD') ;

        u1 = valeur_int.*cosd(angleY2Nord) ;
        v1 = valeur_int.*sind(angleY2Nord) ;
        save u1.mat u1 ;
        save v1.mat v1 ;
        s_1 = struct('u1', u1, 'v1', v1) ;

    end

    if strcmpi(param, 'VGRD') ;

        u2 =-valeur_int.*sind(angleY2Nord) ;
        v2 = valeur_int.*cosd(angleY2Nord) ;
        save u2.mat u2 ;
        save v2.mat v2 ;
        s_2 = struct('u2', u2, 'v2', v2) ;

    end

end

```

```

        end

        quit_var = 1;

    end

end

end

ni = var_i; nj = var_j; nk = 1 ;

UU      = s_1.u1 + s_2.u2 ;
VV      = s_1.v1 + s_2.v2 ;
U1      = single(UU) ;
V1      = single(VV) ;
grtyp   = type ;
U2      = U1' ;
V2      = V1' ;

nomvar = 'UU';

[ig1, ig2, ig3, ig4] = cxgaig(grtyp, xg1, xg2, xg3, xg4) ;

err= fstecr(U2,npak,unit,date,deet,npas,...
ni,nj,nk,ip1,ip2,ip3,typvar,nomvar,'data',grtyp,...
ig1,ig2,ig3,ig4,datyp,rewrite);

nomvar = 'VV' ;
err= fstecr(V2,npak,unit,date,deet,npas,...
ni,nj,nk,ip1,ip2,ip3,typvar,nomvar,'data',grtyp,...
ig1,ig2,ig3,ig4,datyp,rewrite);

end

[err1, err2]=fstfrm(unit);

mkdir ./fichiers_interpoles
copyfile(FST, './fichiers_interpoles')
delete (FST)

```

ANNEXE VII

PARAMÈTRES DE LA NARR

Tableau A VII-1 Définition géographique de la N.A.R.R.
Tirée de N.C.E.P. : <http://www.ncep.noaa.gov/>

<i>Variables</i>	<i>Valeurs</i>
<i>Nx</i>	349
<i>Ny</i>	277
<i>La1</i>	1.000N
<i>Lo1</i>	214.500E = 145.500W
<i>Res. & Comp. Flag</i>	0 0 0 0 1 0 0 0
<i>Lov</i>	253.000E = 107.000W
<i>Dx</i>	32.46341 km
<i>Dy</i>	32.46341 km
<i>Projection Flag (bit 1)</i>	0
<i>Scanning Mode (bits 1 2 3)</i>	0 1 0
<i>Latin1</i>	50.000N
<i>Latin2</i>	50.000N
<i>Lat/Lon values of the corners of the grid</i>	
<i>(1,1)</i>	1.000N, 145.500W
<i>(1,277)</i>	46.635N, 148.639E
<i>(349,277)</i>	46.352N, 2.566W
<i>(349,1)</i>	0.897N, 68.318W
<i>Pole point</i>	
<i>(I,J)</i>	(174.507, 307.764)

ANNEXE VIII

ATTRIBUT DES FST

Search attributes

Data element	Suggested name
Variable name	NOMVAR
Type of field	TYPVAR
Label	ETIKET
Vertical level	IP1
Forecast hour	IP2
User defined index	IP3
Date of validity	DATEV=DATEO+ DEET * NPAS

Descriptive attributes

Data element	Suggested name
Length of time step	DEET
Time step number	NPAS
Date of original analysis	DATEO
Dimension of grid along the X-axis	NI
Dimension of grid along the Y-axis	NJ
Dimension of grid along the Z-axis	NK
Type of geographical projection	GRTYP
1st grid parameter	IG1
2nd grid parameter	IG2
3rd grid parameter	IG3
4th grid parameter	IG4
Numerical values data type	DATYP
Packing ratio	NPAK

Internal attributes

Data element	Suggested name
Erased field flag	DLTF
Key	KEY
Length of record in machine words	LNG
Starting address of record in machine words	SWA
Unused number of bits in the last word reserved for future use	UBC
reserved for future use	EXTRA1
reserved for future use	EXTRA2
reserved for future use	EXTRA3

ANNEXE IX

ÉPAISSEUR DE LA GLACE ET LA TEMPÉRATURE DE MER LE 18 JANVIER 2006 2006 P FICHIERS AVHRR ET AMSR

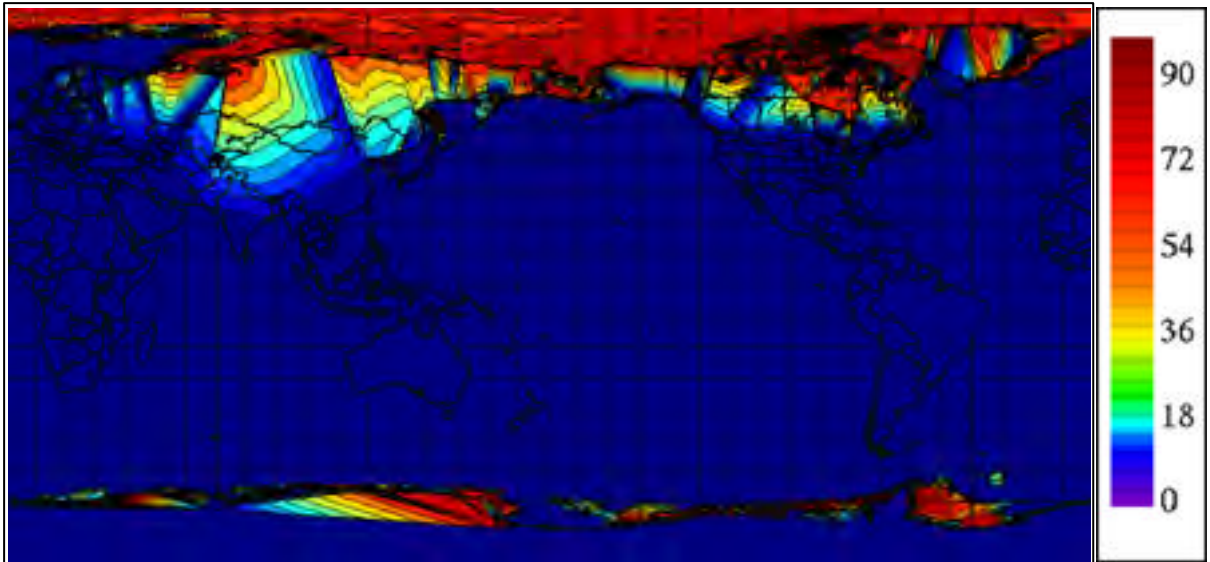


Figure A IX-1 Épaisseur de la glace de mer [cm] pour la journée du 18 janvier 2006

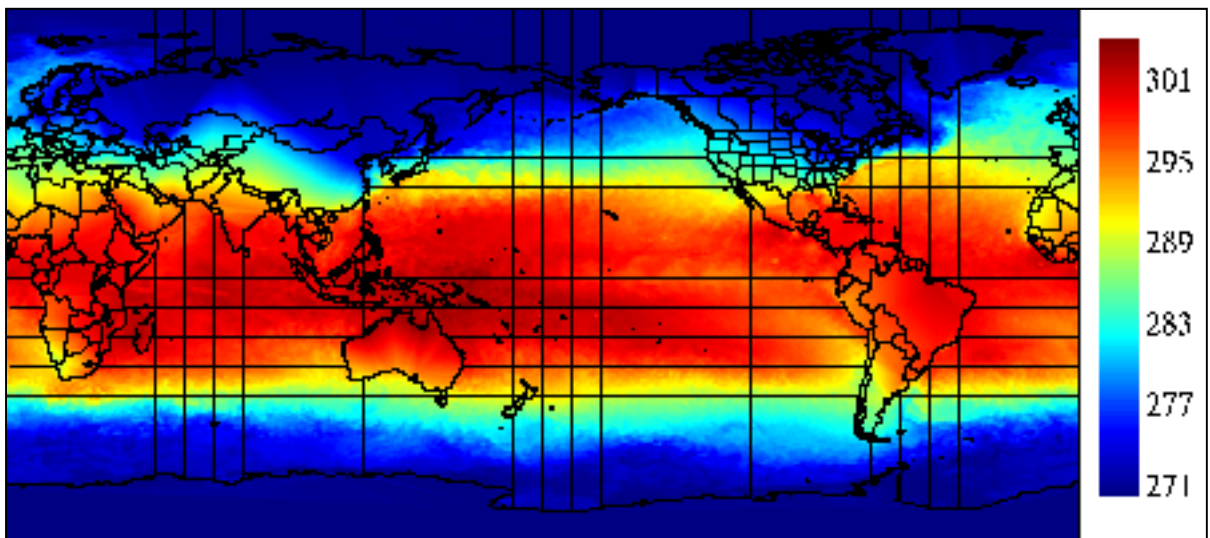


Figure A IX-2 Température de mer [K] pour la journée du 18 janvier 2006

ANNEXE X

FICHIERS DE CONFIGURATION «GEM_SETTING.NML» ET «OUTCFG.OUT» UTILISÉS POUR GEM-5 ET GEM-32

```
&grid
  Grd_typ_S      = 'LU'      ,
  Grd_ni         = 450      , Grd_nj      = 450      ,
  Grd_dx         = 0.045    , Grd_dy     = 0.045    ,
  Grd_xlon1      = -68.0    , Grd_xlat1 = 53.0    ,
  Grd_xlon2      = -60.0    , Grd_xlat2 = 53.0    ,
  Grd_iref       = 225      , Grd_jref  = 225      ,
  Grd_lonr       = 180.     , Grd_latr   = 0.0      ,
/

&ptopo
  Ptopo_npex     = 2 , Ptopo_npey  = 2      ,
  Ptopo_nblocx   = 2 , Ptopo_nblocy = 2      ,
  Ptopo_npeOpenMP = 2 , Ptopo_bind_L = .true. ,
  Ptopo_smtglb   = 0 , Ptopo_smtphy = 1      ,
/

&gement
  Pil_jobstrt_S = '20060118.0000000', Pil_jobend_S= '20060119.1200000',
  Mod_runstrt_S = '20060118.0000000',

  Pil_nesdt = 10800 , Pil_bcs_hollow_L = .true. ,
  Pil_pil   = 20    , Pil_hblen      = 20      ,

&physics_cfgs
  phy_pck_version = 'RPN-CMC_4.5',
  SCHMSOL        = 'FCREST'      ,
  RADIA          = 'newrad'       ,
  GWDRAG         = 'nil'         ,
  LONGMEL        = 'blac62'      ,
  FLUVERT        = 'moistke'     ,
  TDIAGLIM       = .true.        ,
```

Figure A X-1

Paramètre du fichier nommé gem_settings.nml pour GEM-5

```

grid   = 1 , model   ;
levels = 1 , eta, -1 ;
levels =2,pres,[1000.,975.,950.,925.,900.,875.,850.,800.,750.,700.,500.,300.,100.]
levels = 3 , eta,<35,58,1>;
steps  = 1 , hour,<0.,36.,1.>;
steps  = 2 , step,<0,600,10>;
steps  = 3 , hour,0.;

sortie([PN,PT,P0,TT,GZ,HR,UU,VV,WW,HU,ME] , grid, 1, levels, 2, steps, 1)
sortie([TT,GZ,HU,UU,VV,WW,HR,QC,QR] , grid, 1, levels, 3, steps, 1)
sortie([QCT1,QRT1,QIT1,QGT1,QNT1,QHT1,NCT1,NRT1,NNT1,NIT1,NGT1,NHT1] ,
grid, 1, levels, 3, steps, 1)

sortie_p([ME,LH,MF,MG,MN,SD,TM,GL] , grid, 1, levels, 1, steps, 1)
sortie_p([P2,P4,PC,PE,PR,PY,PZ,A1,A2,A3,A4,RT,RF] ,
grid, 1, levels, 3, steps, 1)

sortie_p([FR,RN,SN,N3,U1,RF,RT,SF,U3,P5] , grid, 1, levels, 3, steps, 1)
sortie_p([RQ1,RQ2,RQ3,RQ4,RQ5,RQ6,SLW] , grid, 1, levels, 3, steps, 1)
sortie_p([DMC,DMR,DMI,DMS,DMG,DMH] , grid, 1, levels, 3, steps, 1)
sortie([LA,LO] , grid, 1, levels, 1, steps, 1)

```

Figure A X-2 Paramètre du fichier nommé outcfg.out pour GEM-5

```

&grid
  Grd_typ_S      = 'LU' ,
  Grd_ni         = 230 , Grd_nj      = 220 ,
  Grd_dx         = 0.288 , Grd_dy    = 0.288 ,
  Grd_xlon1      = -73.0 , Grd_xlat1 = 50.0 ,
  Grd_xlon2      = -85.0 , Grd_xlat2 = 50.0 ,
  Grd_iref       = 60 , Grd_jref    = 60 ,
  Grd_lonr       = 180. , Grd_latr  = 0.0 ,
/

&topo
  Ptopo_npex     = 2 , Ptopo_npey   = 2 ,
  Ptopo_nblocx   = 2 , Ptopo_nblocy = 2 ,
  Ptopo_npeOpenMP = 1 , Ptopo_bind_L = .true. ,
  Ptopo_smtglb   = 0 , Ptopo_smtphy = 1 ,
/

&gement
  Pil_jobstrt_S = '20060118.0000000', Pil_jobend_S= '20060119.1200000',
  Mod_runstrt_S = '20060118.0000000',

  Pil_nesdt      = 10800 , Pil_bcs_hollow_L = .true. ,
  Pil_pil        = 10 , Pil_hblen   = 10 ,
  Pil_sfc2d_L    = .true. ,
  e_schm_stlag   = .true. , e_schm_ad cub = .true. ,

&physics_cfgs
  phy_pck_version = 'RPN-CMC_4.5',
  SCHMSOL        = 'FCREST' ,
  RADIA          = 'newrad' ,
  GWDRAG         = 'nil' ,
  LONGMEL        = 'blac62' ,
  FLUVERT        = 'moistke' ,
  TDIAGLIM       = .true. ,

```

Figure A X-3 Paramètre du fichier nommé gem_settings.nml pour GEM-32

```

grid    = 1,model;
levels  = 1 ,eta , -1;
levels  = 2 ,pres,[1000.,975.,950.,925.,900.,875.,850.,800.,750.,700.,500.,300.,100.] levels
= 3 ,eta,<35,58,1>;

steps   = 1,hour,<0.,36.,1.>;
steps   = 2,step,<0,600,10>;
steps   = 3,hour,0.;

sortie([PN,PT,P0,TT,GZ,HR,UU,VV,WW,HU] , grid, 1, levels, 2, steps, 1)
sortie([TT,GZ,HU,UU,VV,WW,HR,QC,QR] , grid, 1, levels, 3, steps, 1)
sortie([QCT1,QRT1,QIT1,QGT1,QNT1,QHT1,NCT1,NRT1,NNT1,NIT1,NGT1,NHT1]
      grid, 1, levels, 3, steps, 1)

sortie_p([ME,LH,MF,MG,MN,SD,TM,GL] , grid, 1, levels, 1, steps, 1)
sortie_p([P2,P4,PC,PE,PR,PY,PZ,A1,A2,A3,A4,RT,RF],
      grid, 1, levels, 3, steps, 1)

sortie_p([FR,RN,SN,N3,U1,RF,RT,SF,U3,P5] , grid, 1, levels, 3, steps, 1)
sortie_p([RQ1,RQ2,RQ3,RQ4,RQ5,RQ6,SLW] , grid, 1, levels, 3, steps, 1)
sortie_p([DMC,DMR,DMI,DMS,DMG,DMH] , grid, 1, levels, 3, steps, 1)
sortie([LA,LO] , grid, 1, levels, 1, steps, 1)

```

Figure A X-4

Paramètre du fichier nommé outcfg.out pour GEM-5

ANNEXE XI

SUPERPOSITION DES ISOHYPSES DE GEM-32 ET DE LA NARR

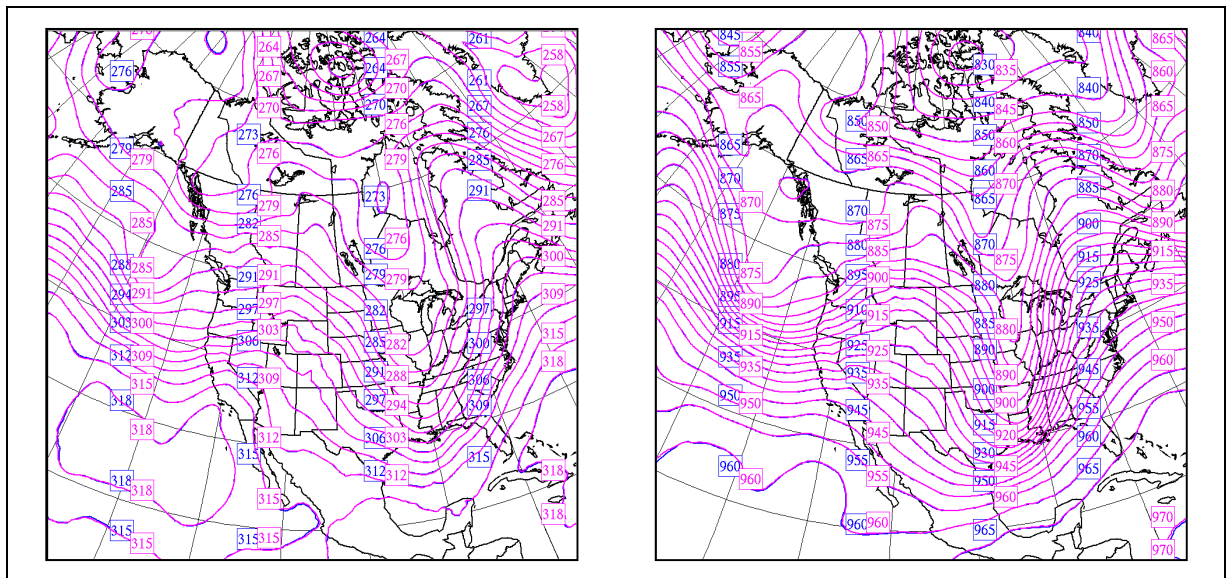


Figure A XI-1 Superposition des GZ [dam] à l'état initial de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 700 mb (gauche) et à 300 mb (droite)

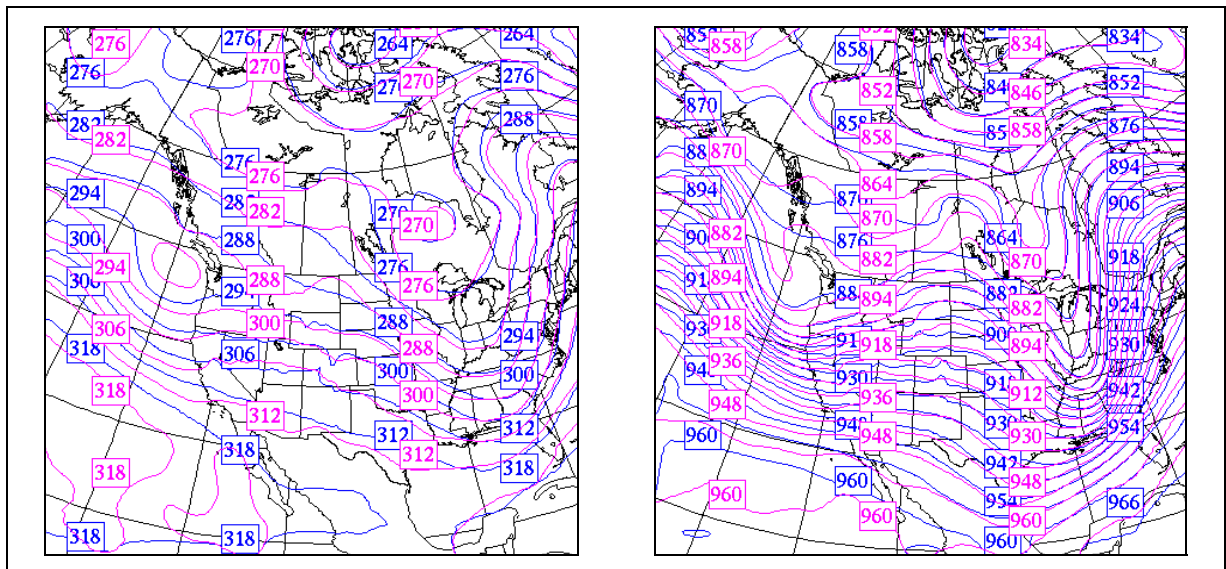


Figure A XI-2 Superposition des GZ [dam] à 9 heures de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 9Z (magenta), à 700 mb (gauche) et à 300 mb (droite)

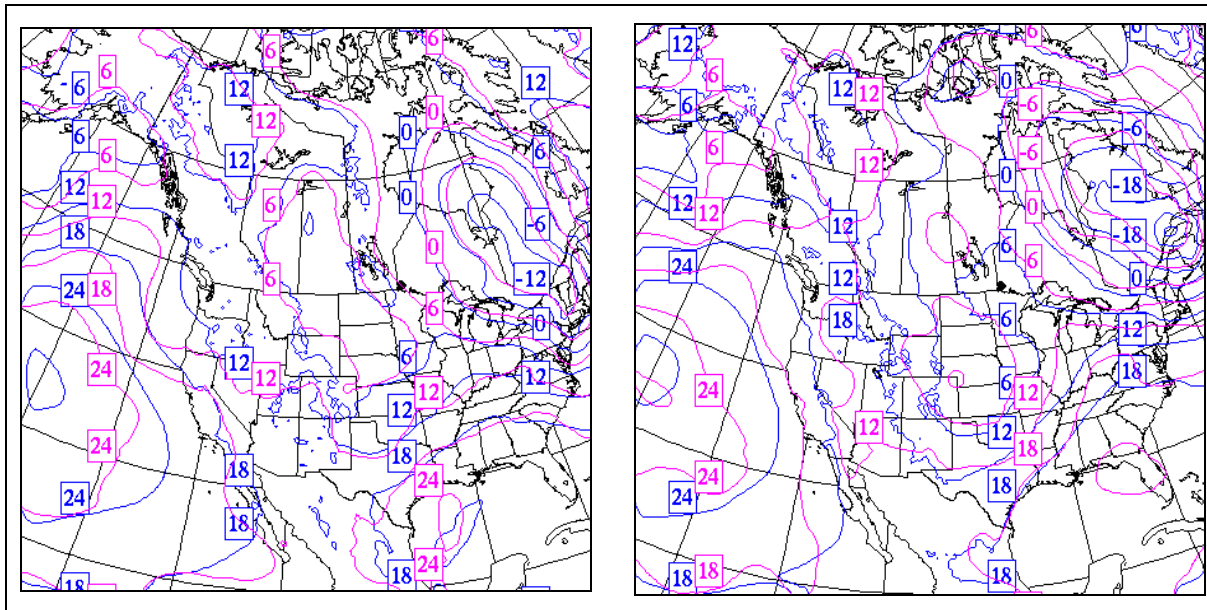


Figure A XI-3 Superposition des GZ [dam] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-32 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 1000 mb

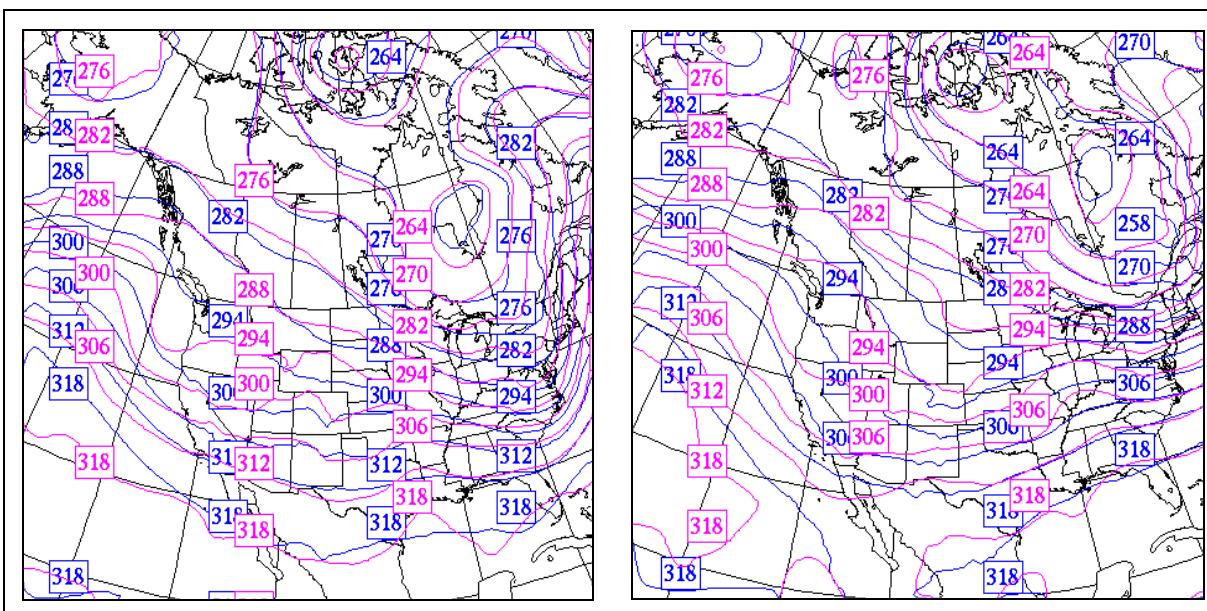


Figure A XI-4 Superposition des GZ [dam] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-32 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 700 mb

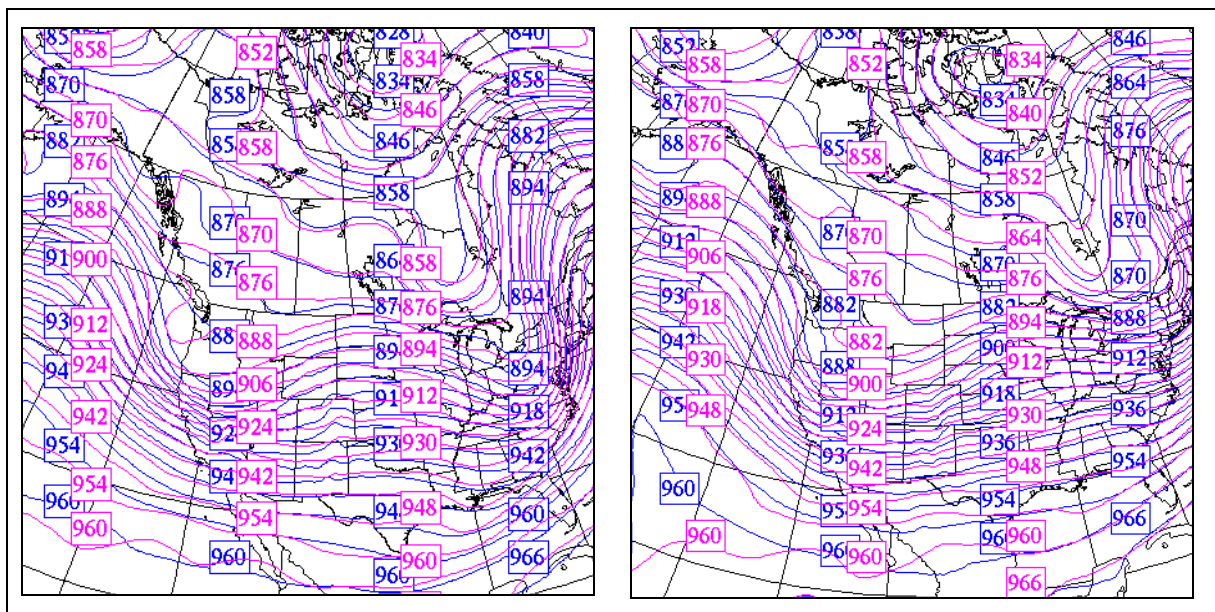


Figure A XI-5 Superposition des GZ [dam] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-32 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 300 mb

ANNEXE XII

SUPERPOSITION DES ISOTHERMES GEM-32 ET DE LA NARR

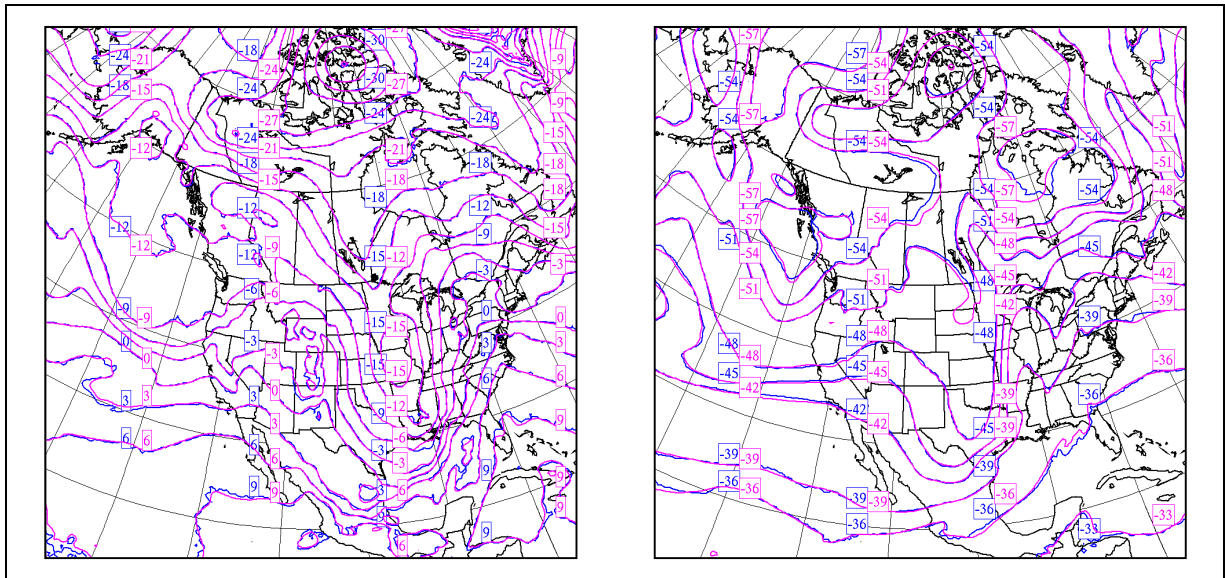


Figure A XII-1 Superposition des TT [°C] à l'état initial de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 700 mb (gauche) et à 300 mb (droite)

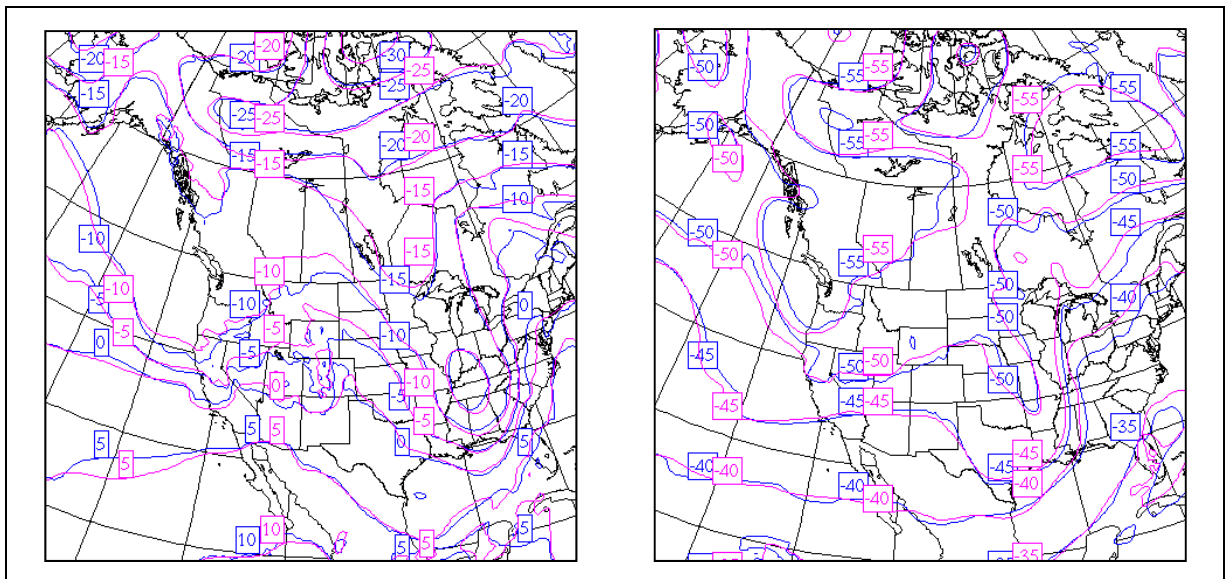


Figure A XII-2 Superposition des TT [°C] à 9 heures de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 9Z (magenta), à 700 mb et à 300 mb (droite)

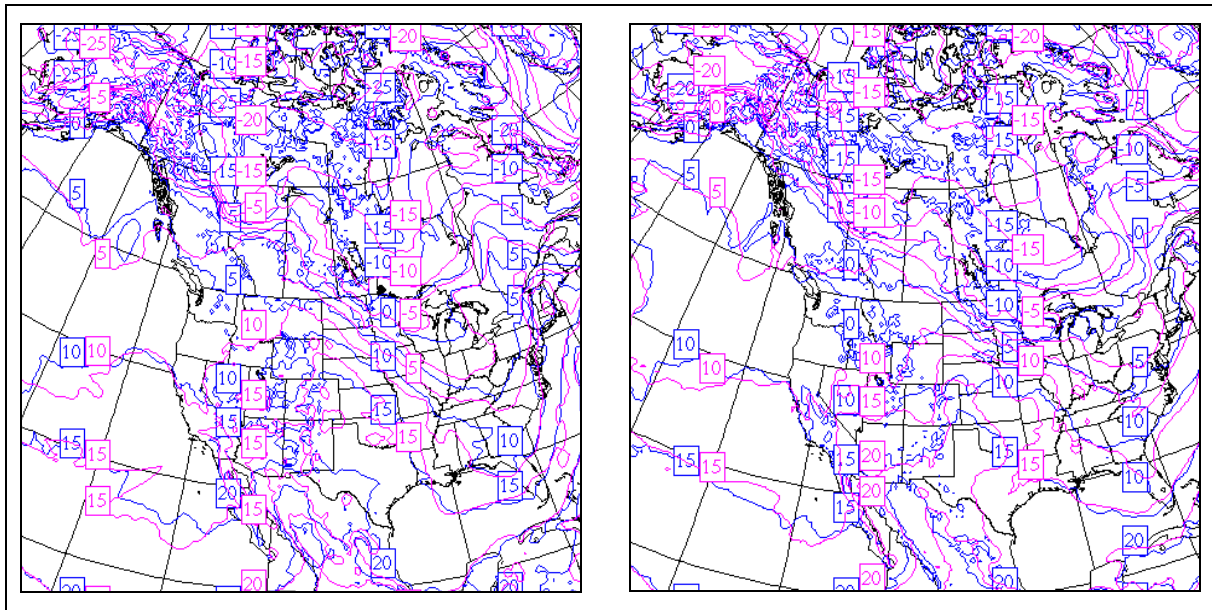


Figure A XII-3 Superposition des TT [$^{\circ}\text{C}$] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-32 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 1000 mb

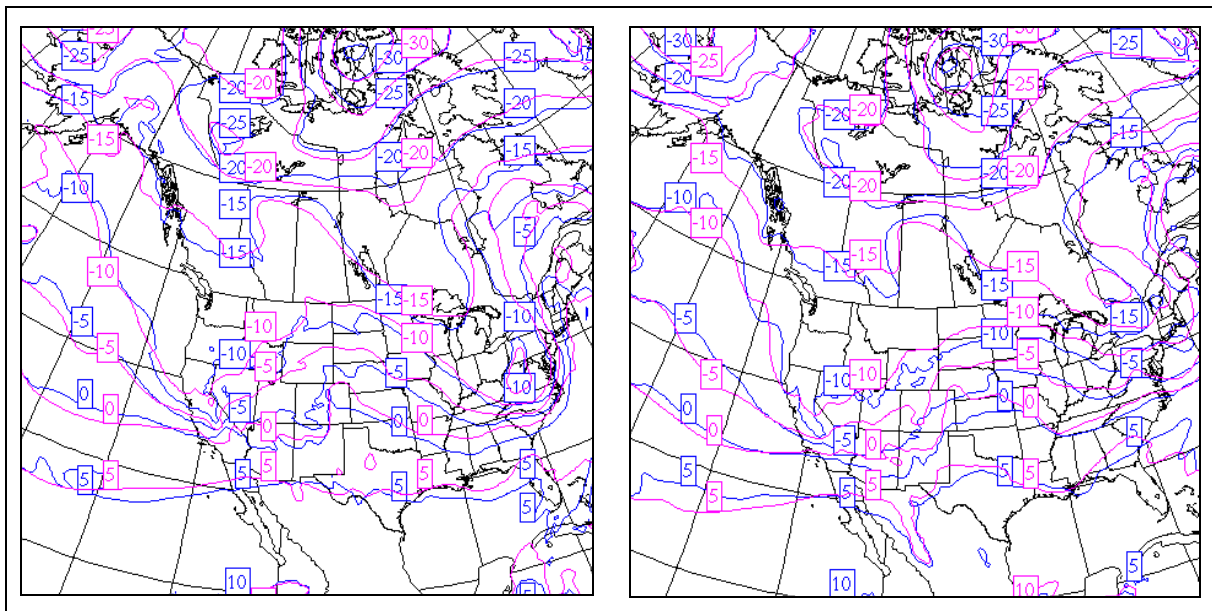


Figure A XII-4 Superposition des TT [$^{\circ}\text{C}$] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-32 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 700 mb

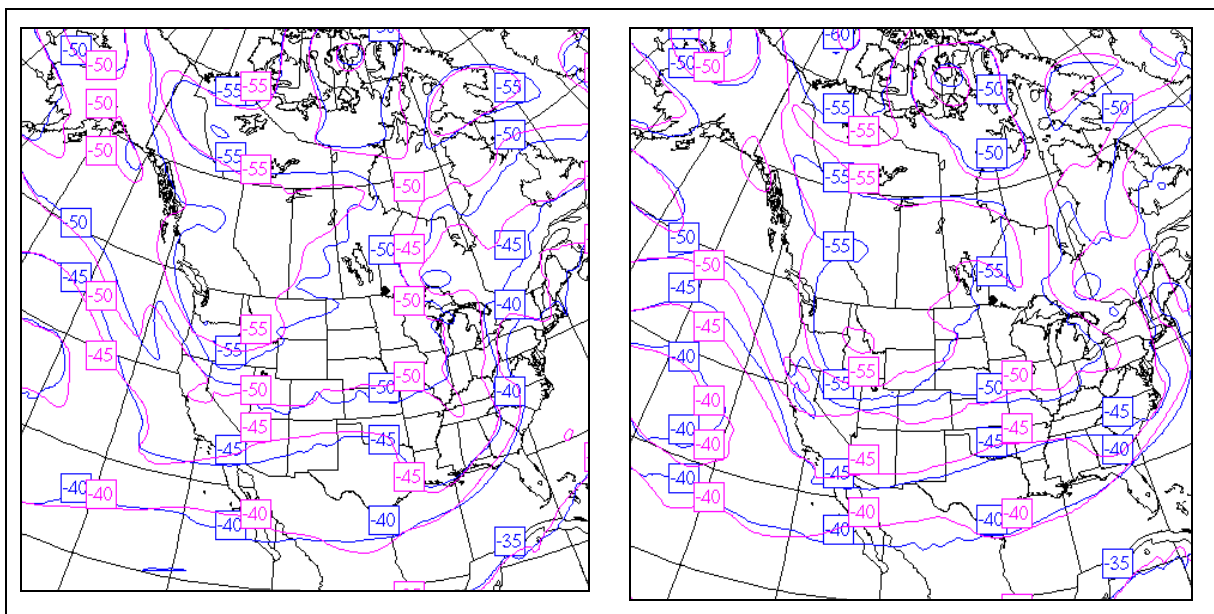


Figure A XII-5 Superposition des TT [$^{\circ}\text{C}$] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-32 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 300 mb

ANNEXE XIII

SUPERPOSITION DE L'HUMIDITÉ SPÉCIFIQUE DE GEM-32 ET DE LA NARR

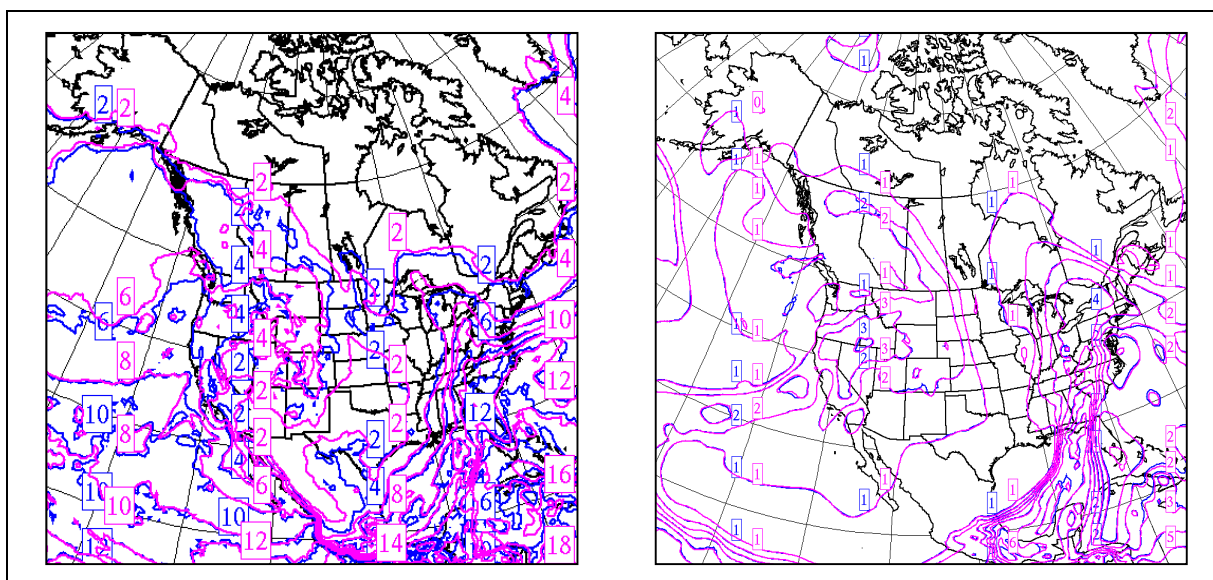


Figure A XIII-1 Superposition de HU [kg/kg] à l'état initial de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 1000 mb (gauche) et à 700 mb (droite)

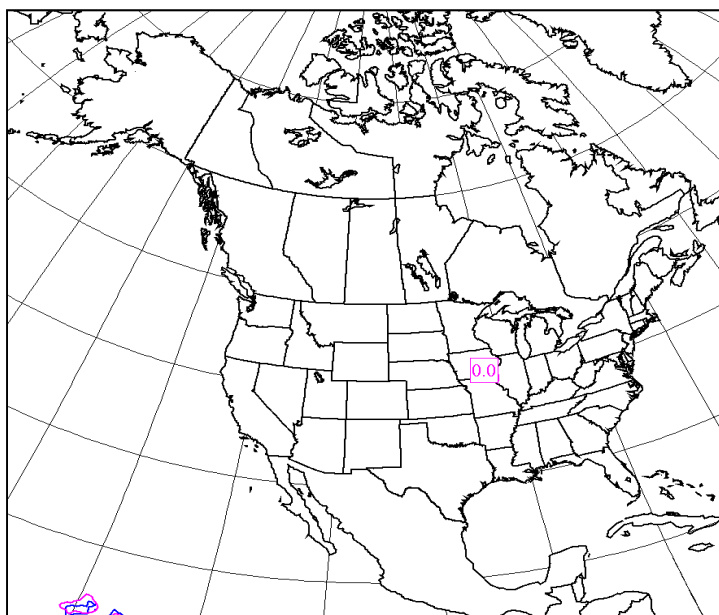


Figure A XIII-2 Superposition de HU [kg/kg] à l'état initial de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 300 mb

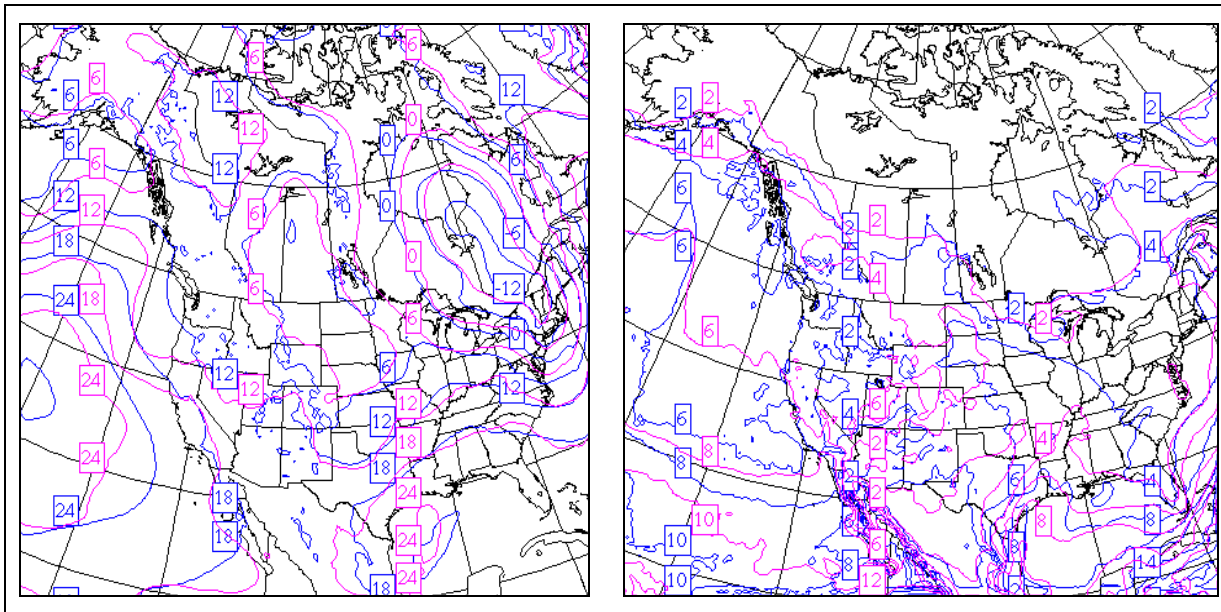


Figure A XIII-3 Superposition de HU [kg/kg] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-32 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 1000 mb

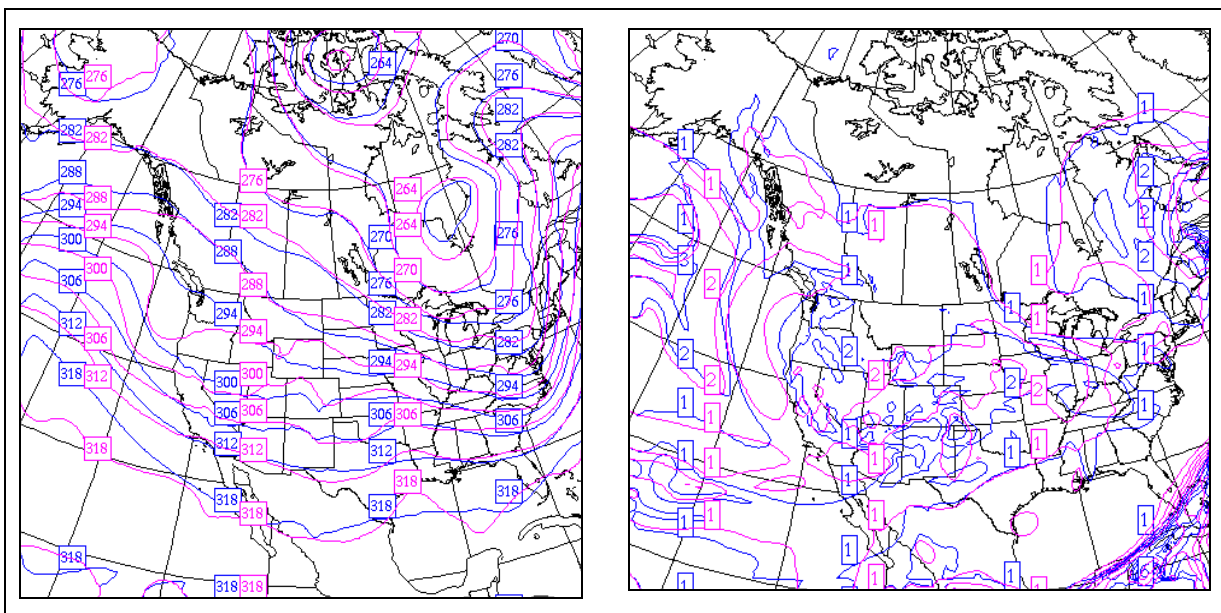


Figure A XIII-4 Superposition de HU [kg/kg] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-32 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 700 mb

ANNEXE XIV

SUPERPOSITION DU VENT DE GEM-32 ET DE LA NARR

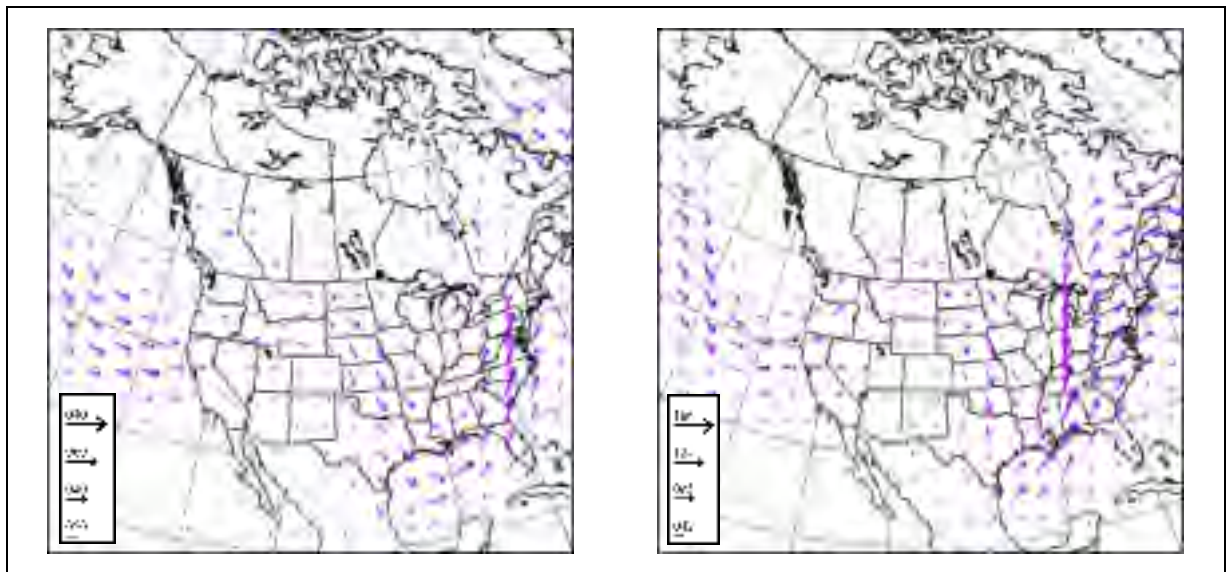


Figure A XIV-1 Superposition du vent [nœud] à l'état initial de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 700 mb (gauche) et à 300 mb (droite)

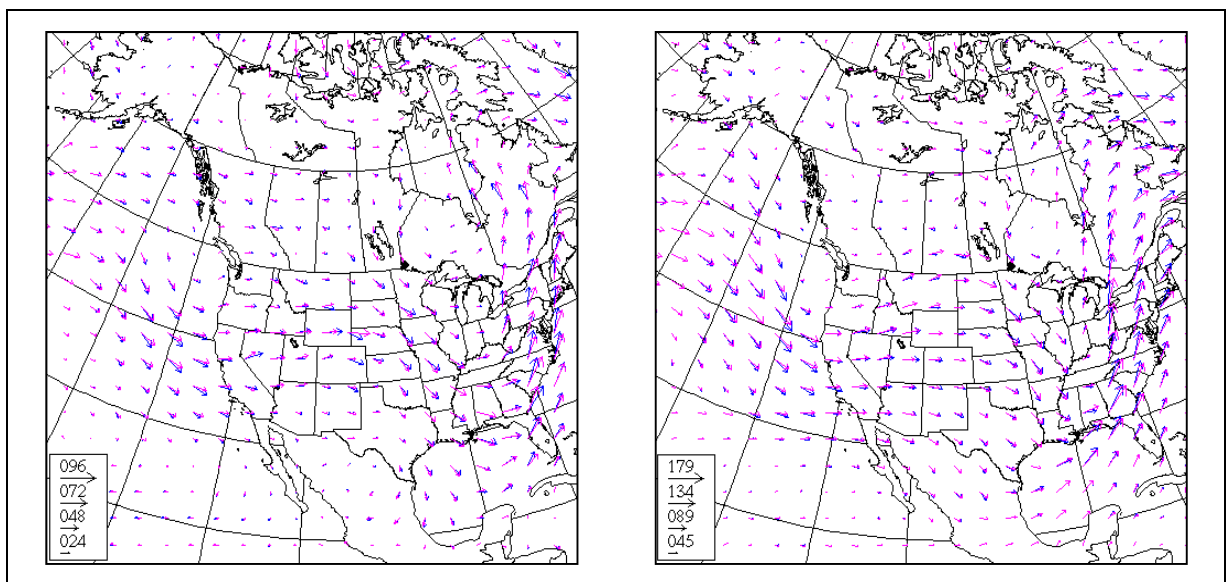


Figure A XIV-2 Superposition du vent [nœud] à 9 heures de GEM-32 (bleu) et de la NARR le 18 janvier à 9Z (magenta), à 700 mb (gauche) et à 300 mb (droite)

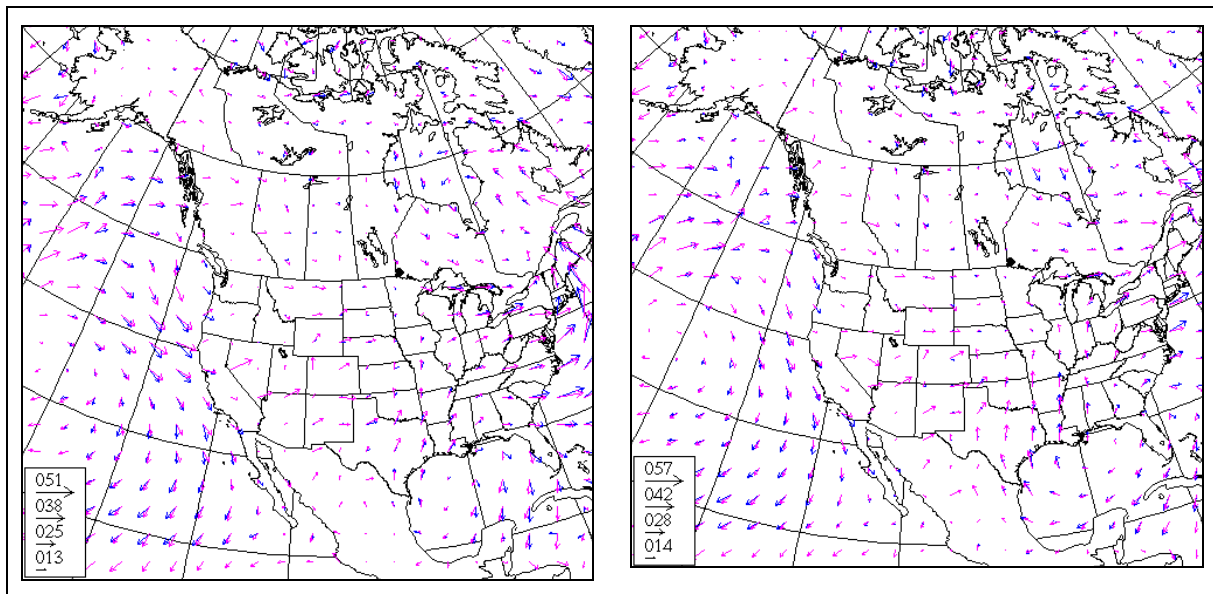


Figure A XIV-3 Superposition du vent [nœud] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-32 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 1000 mb

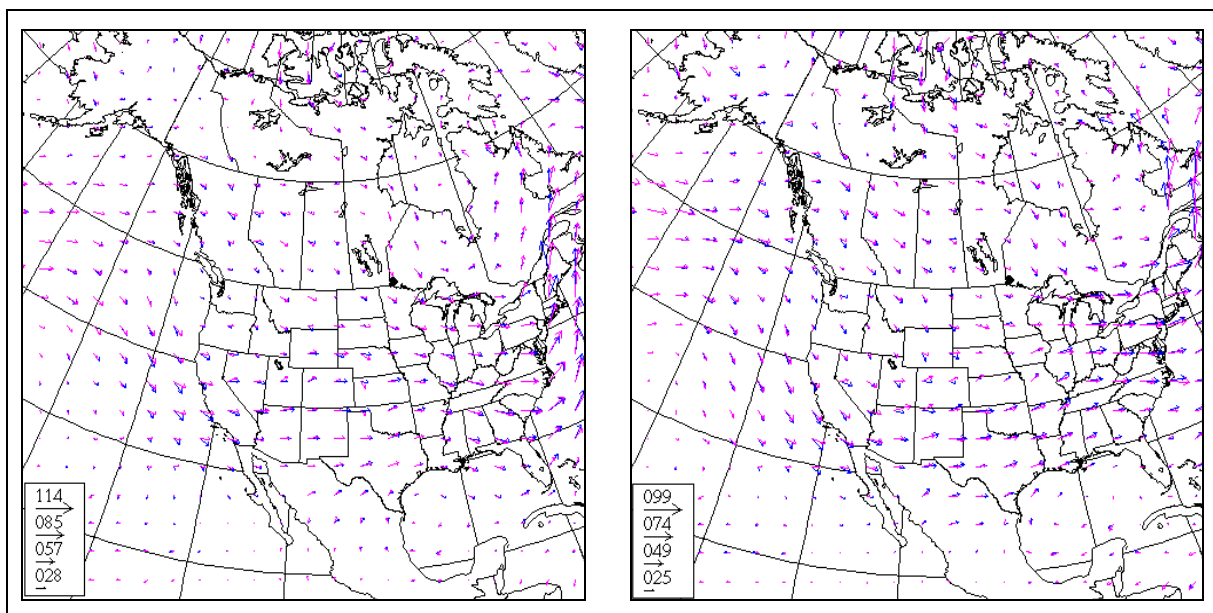


Figure A XIV-4 Superposition du vent [nœud] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-32 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 700 mb

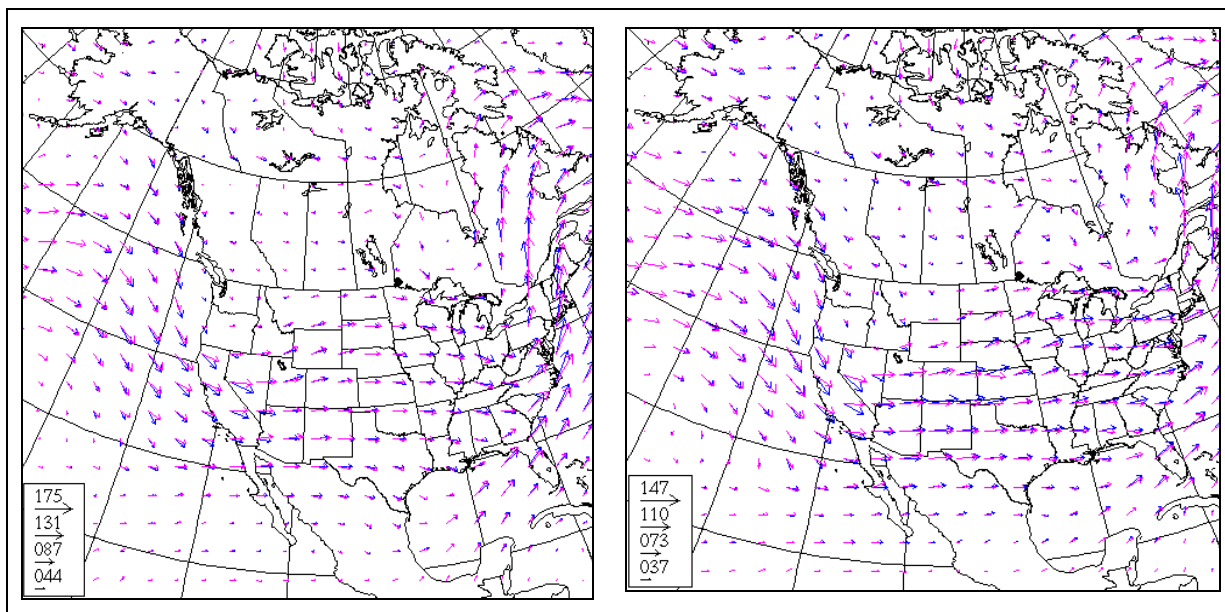


Figure A XIV-5 Superposition du vent [nœud] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-32 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 300 mb

ANNEXE XV

TAUX DE PRÉCIPITATIONS DE GEM-32 ET DE LA NARR

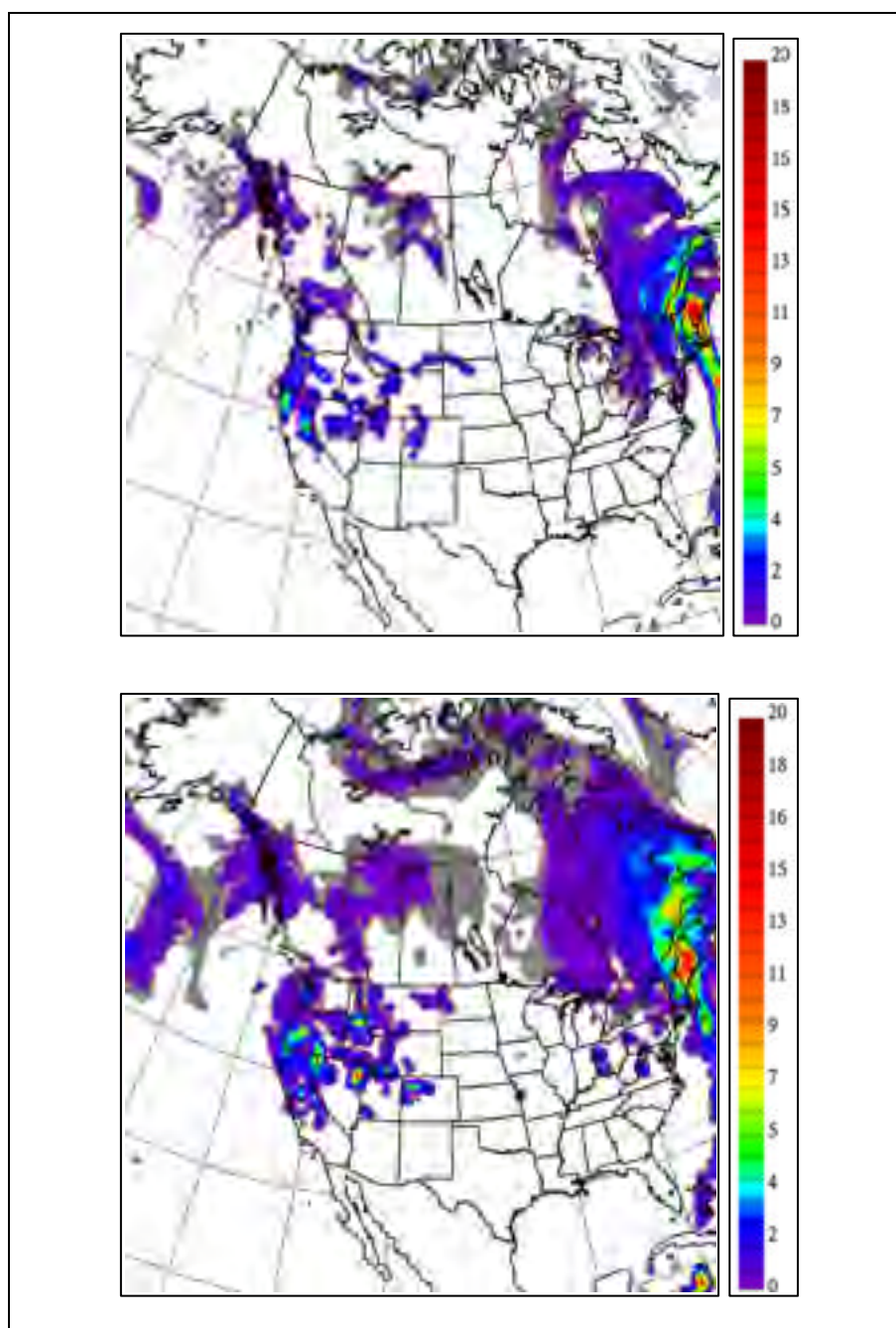


Figure A XV-1 Taux de précipitations [10^{-7} m.s^{-1}] à 18 heures
GEM-32 (haut) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 18Z (bas)

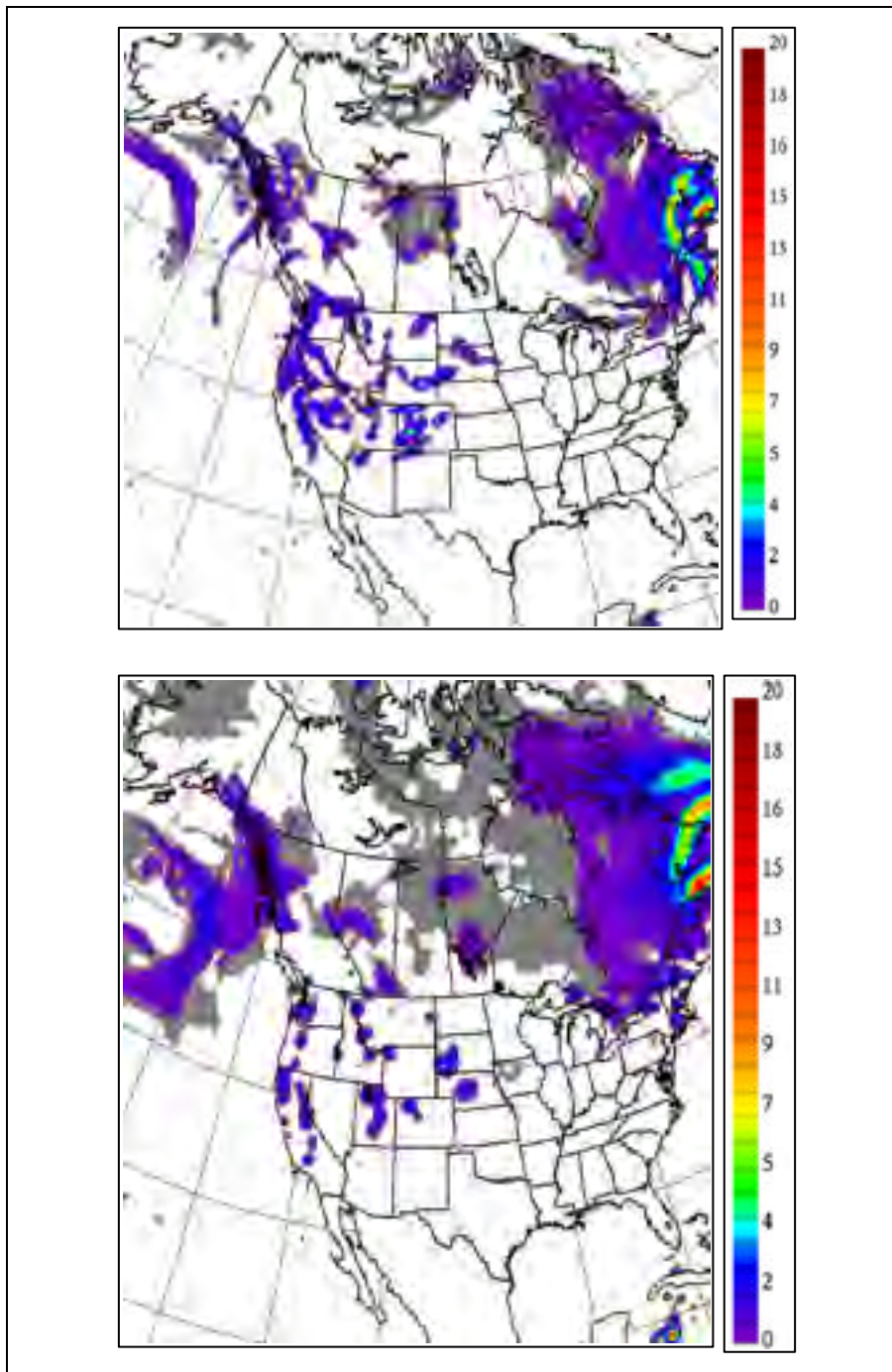


Figure A XV-2 Taux de précipitations [10^{-7} m.s^{-1}] à 27 heures
GEM-32 (haut) et de la NARR le 19 janvier 2006 à 3Z (bas)

ANNEXE XVI

SUPERPOSITION DE L'ACCUMULATION DE LA PLUIE DE GEM-32 ET DE LA NARR

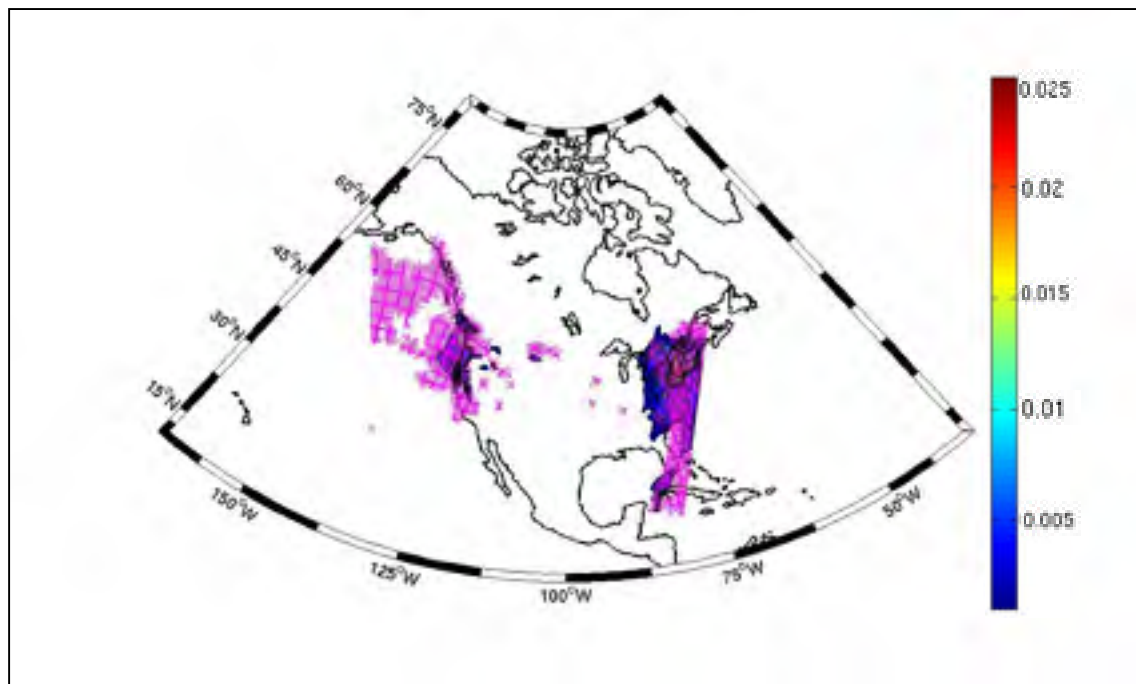


Figure A XVI-1 Superposition de l'accumulation de la pluie [m d'eau] à 18 heures de GEM-32 (dégradé) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 18Z (magenta)

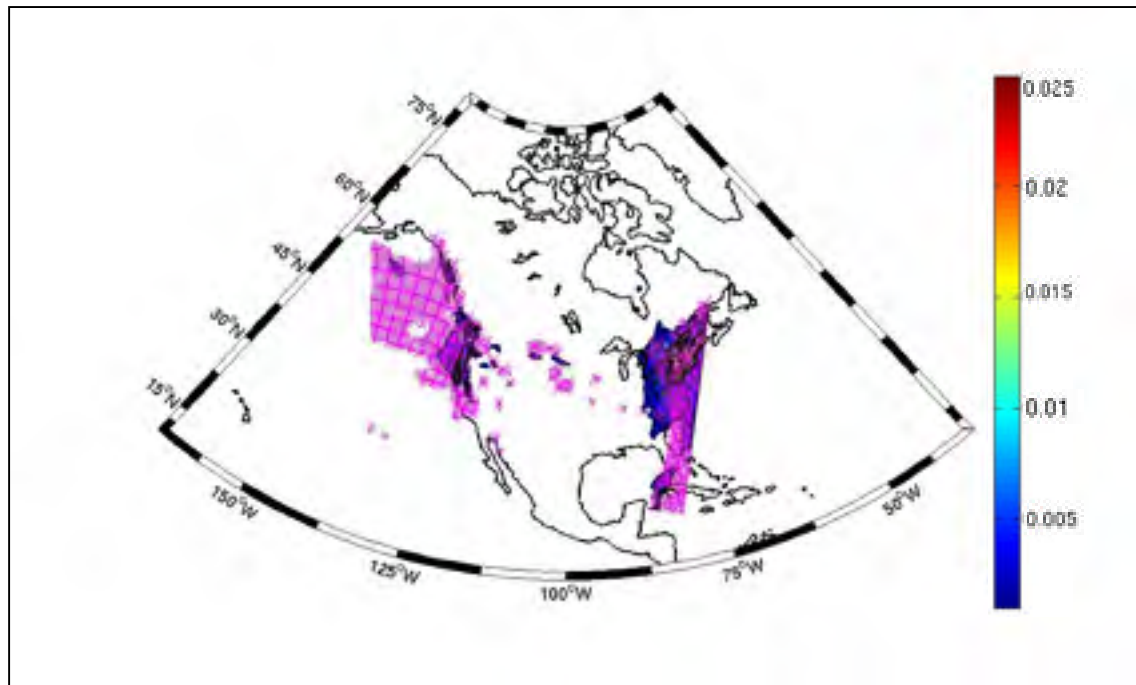


Figure A XVI-2 Superposition de l'accumulation de la pluie [m] à 27 heures de GEM-32 (dégradé) et de la NARR le 19 janvier 2006 à 3Z (magenta)

ANNEXE XVII

SUPERPOSITION DES ISOHYPSES DE GEM-5 ET DE LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION

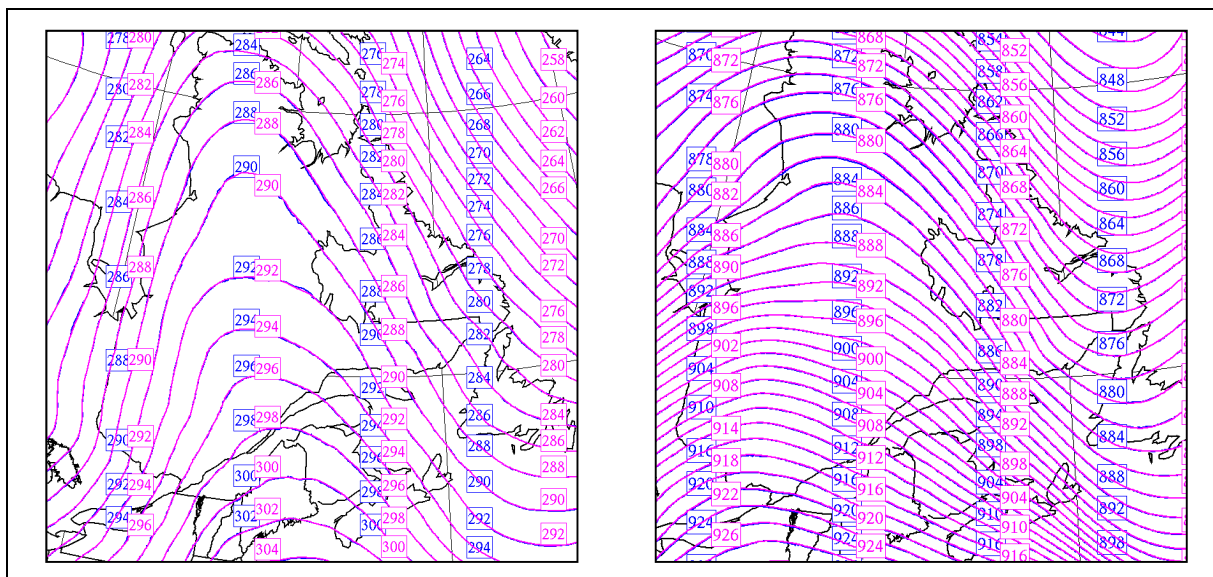


Figure A XVII-1 Superposition des GZ [dam] à l'état initial de GEM-5 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 700 mb (gauche) et à 300 mb (droite)

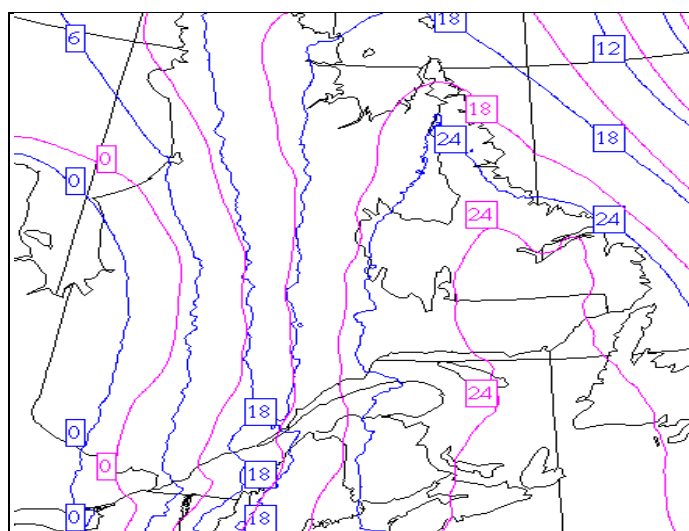
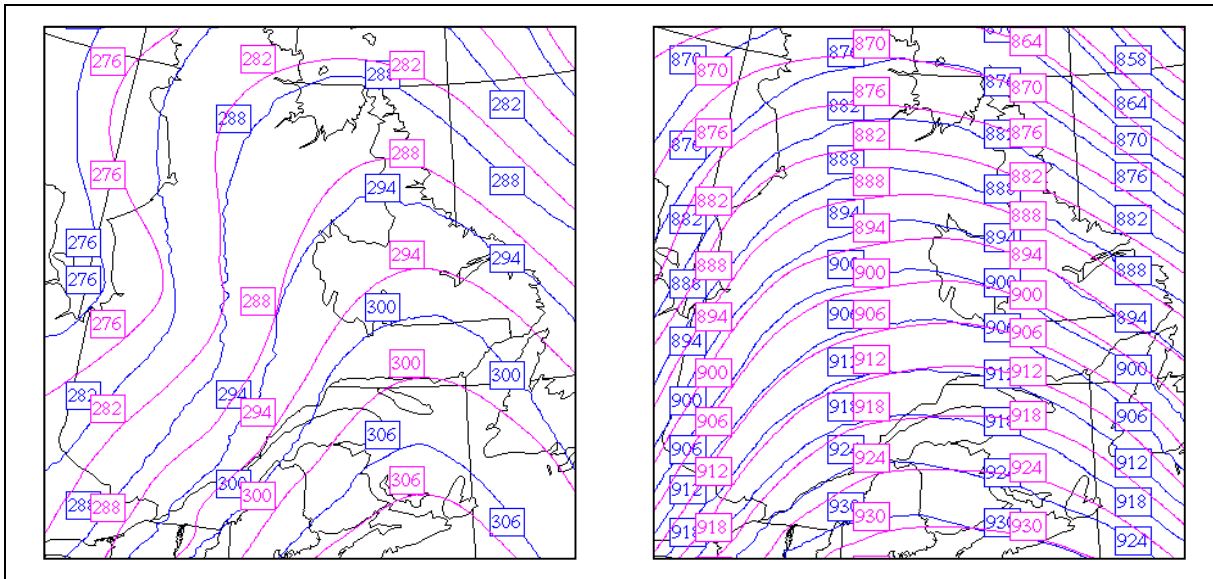


Figure A XVII-2 Superposition des GZ [dam] à 9 heures de GEM-5 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 9Z (magenta), à 1000 mb



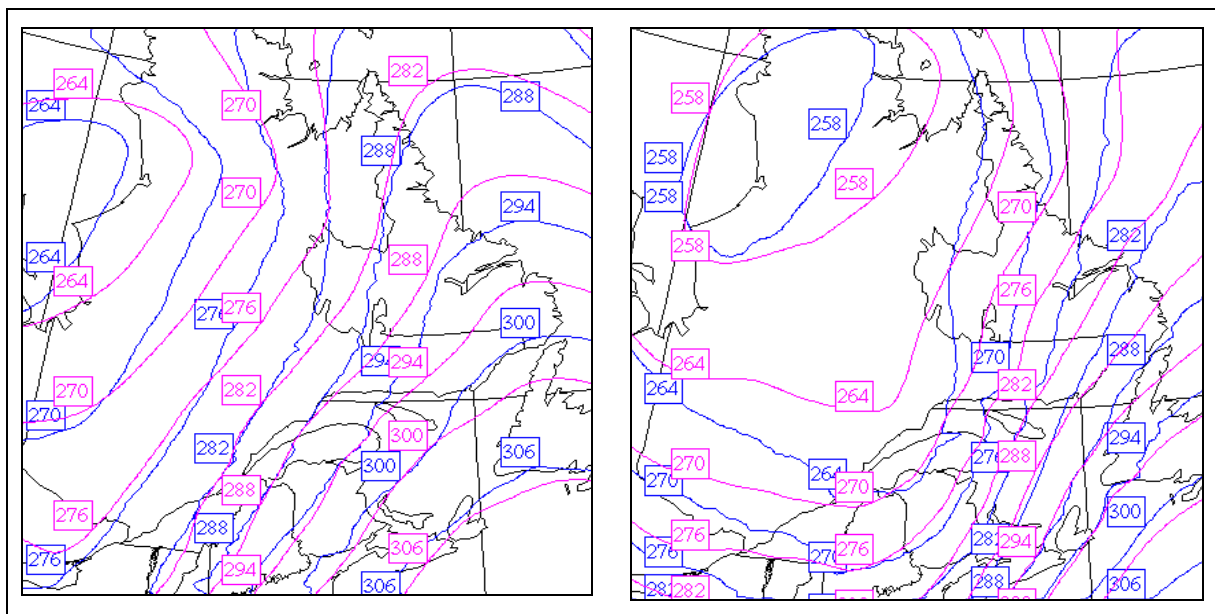


Figure A XVII-5 Superposition des GZ [dam] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-5 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 700 mb

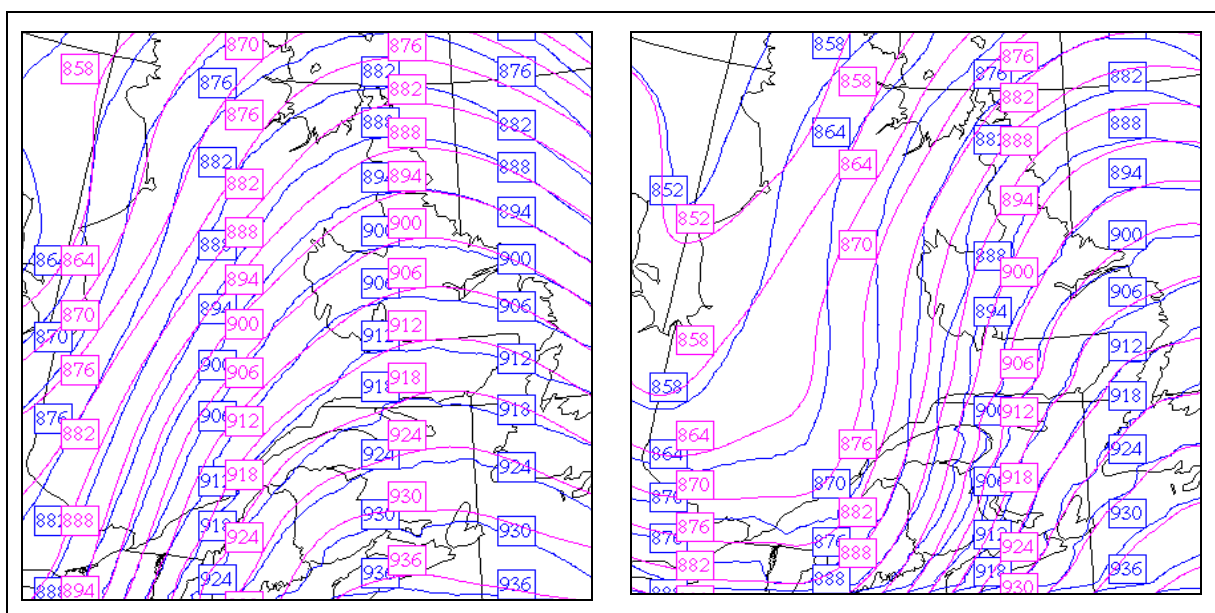


Figure A XVII-6 Superposition des GZ [dam] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-5 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 300 mb

ANNEXE XVIII

SUPERPOSITION DES ISOTHERMES DE GEM-5 ET DE LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION

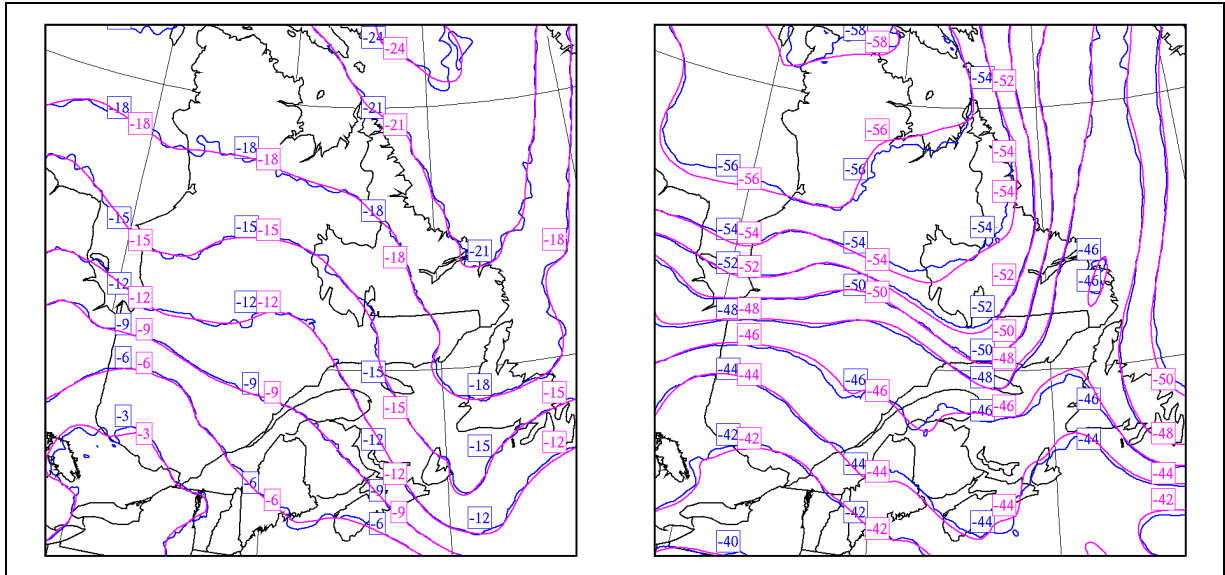


Figure A XVIII-1 Superposition des TT [°C] à l'état initial de GEM-5 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 0Z (magenta), à 700 mb (gauche) et à 300 mb (droite)

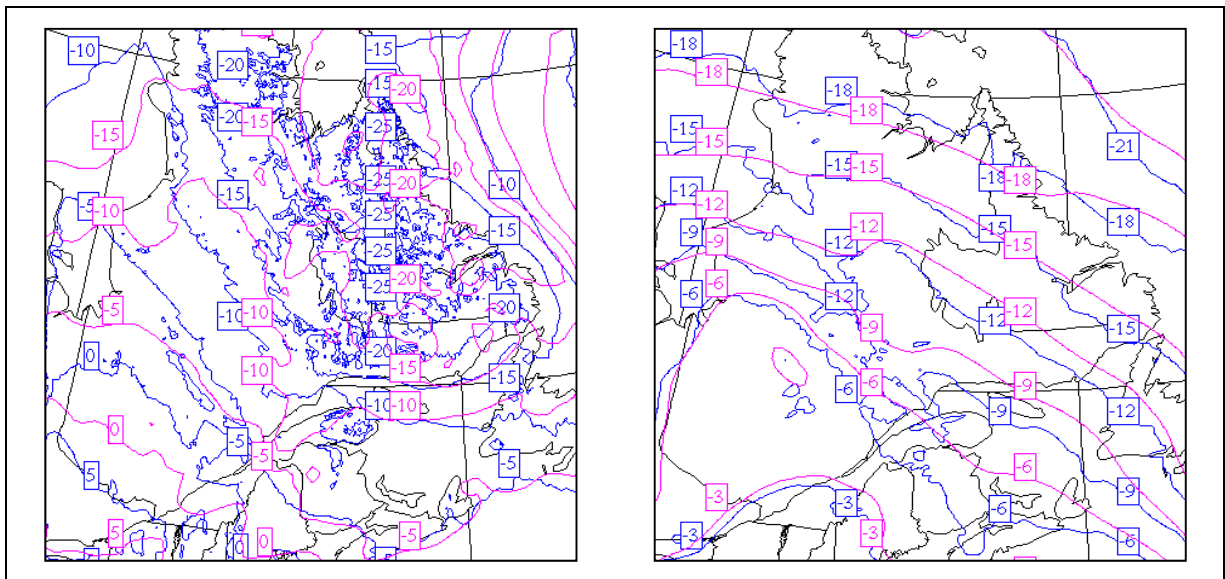


Figure A XVIII-2 Superposition des TT [°C] à 9 heures de GEM-5 (bleu) et de la NARR le 18 janvier 2006 9Z (magenta), à 1000 mb (gauche) et à 700 mb (droite)

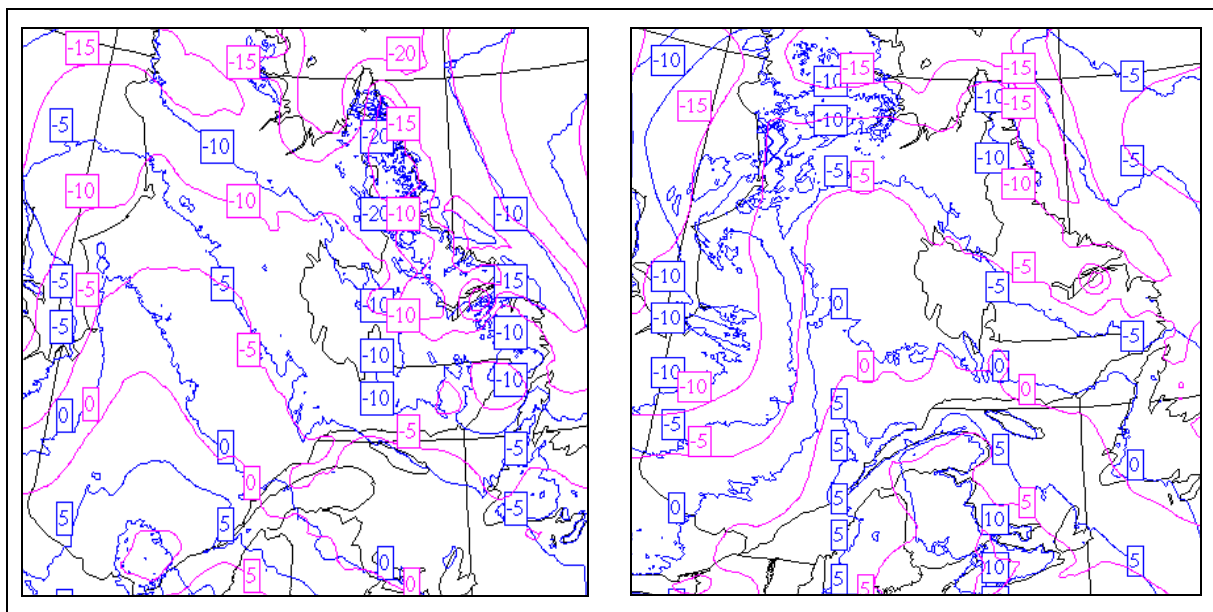


Figure A XVIII-3 Superposition des TT [$^{\circ}\text{C}$] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-5 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 1000 mb

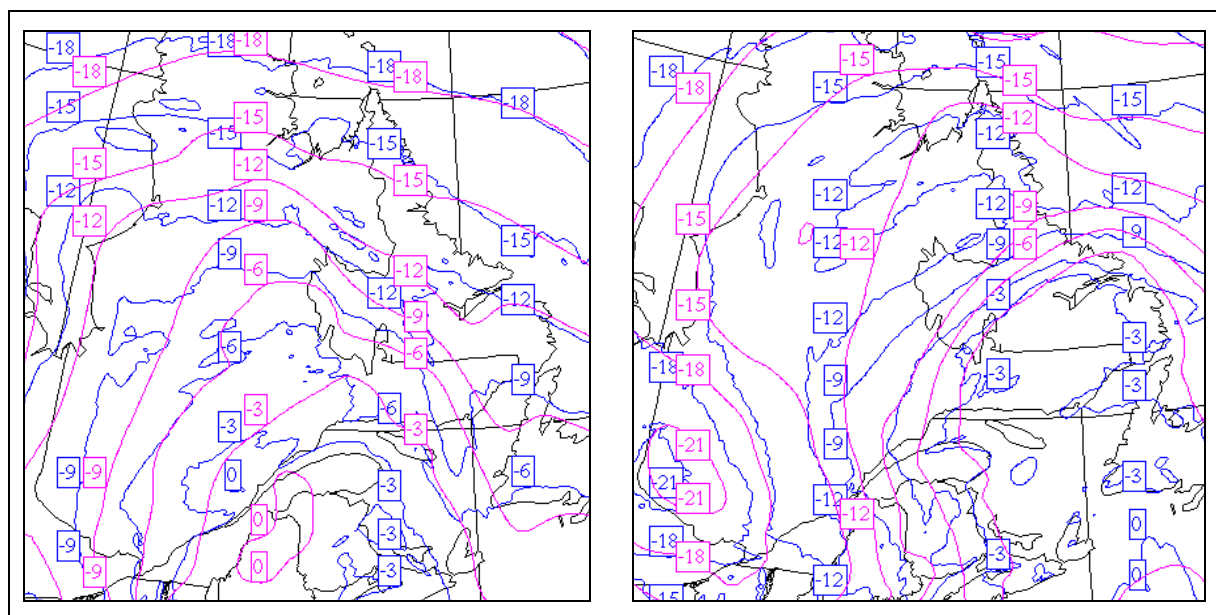


Figure A XVIII-4 Superposition des TT [$^{\circ}\text{C}$] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-5 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 700 mb

ANNEXE XIX

SUPERPOSITION DE L'HUMIDITÉ SPÉCIFIQUE DE GEM-5 ET DE LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION

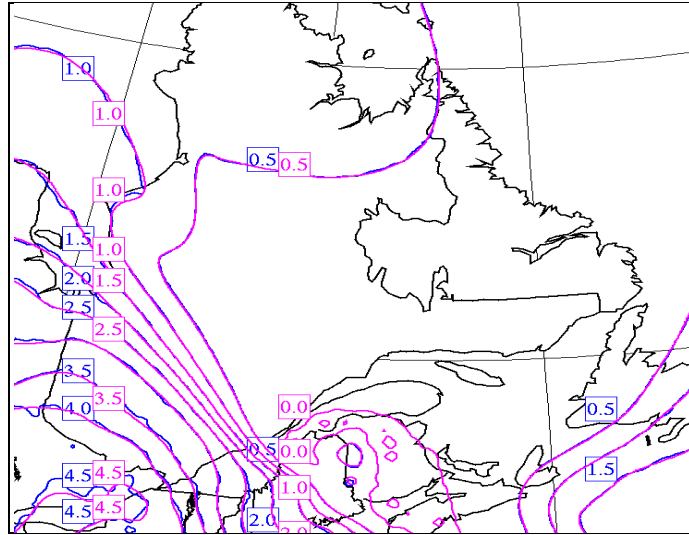


Figure A XIX-1 Superposition de HU [kg/kg]
à l'état initial de GEM-5 (bleu) et de la NARR
le 18 janvier 2006 0Z (magenta), à 700 mb

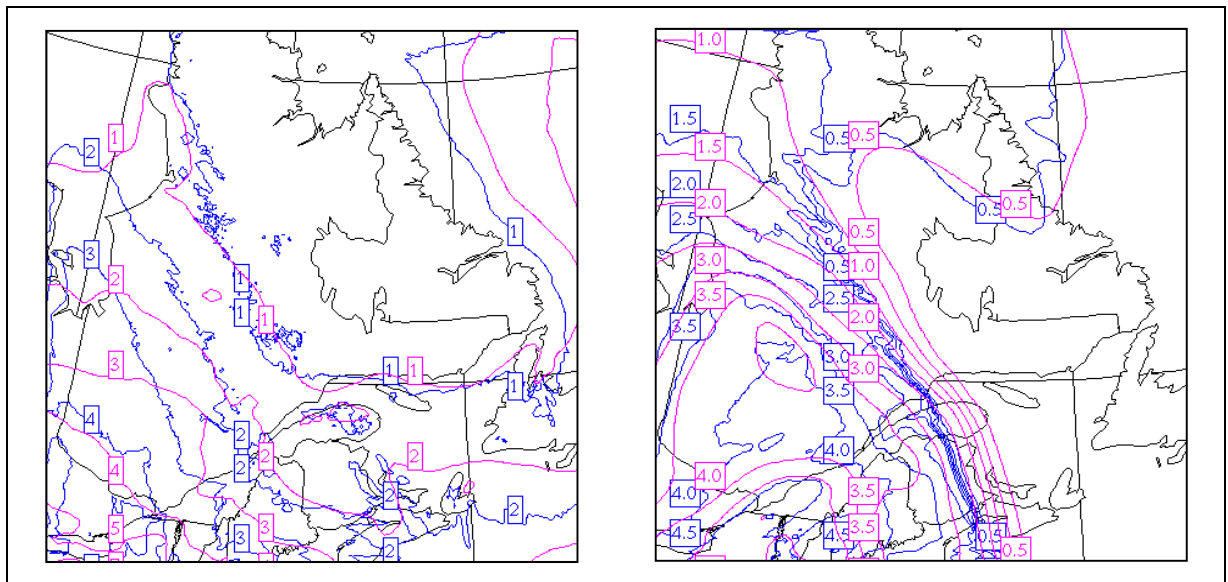


Figure A XIX-2 Superposition de HU [kg/kg] à 9 heures de GEM-5 (bleu) et de la
NARR (magenta) le 18 janvier 2006 9Z à 1000 mb (gauche) et à 700 mb (droite)

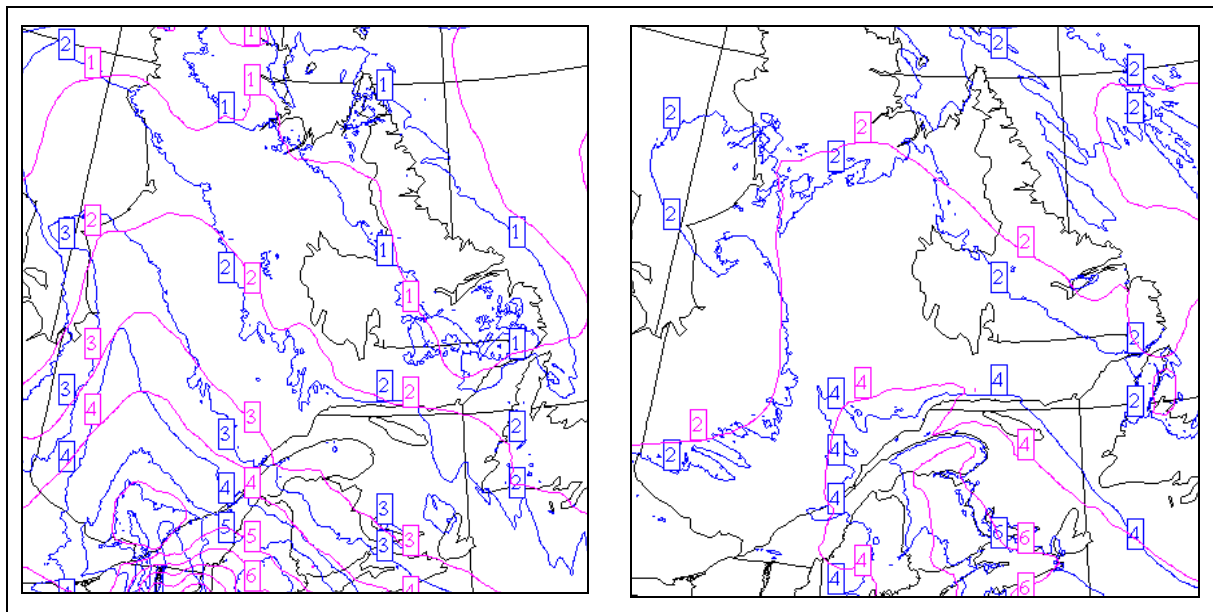


Figure A XIX-3 Superposition de HU [kg/kg] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-5 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 1000 mb

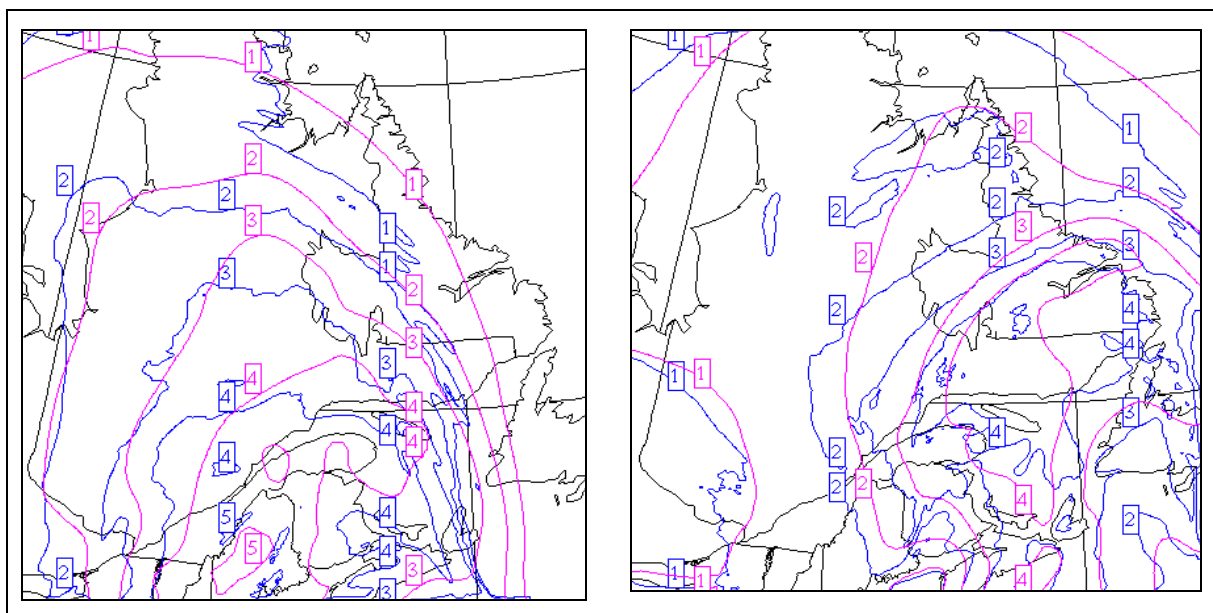


Figure A XIX-4 Superposition de HU [kg/kg] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-5 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 700 mb

ANNEXE XX

SUPERPOSITION DU VENT DE GEM-5 ET DE LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION

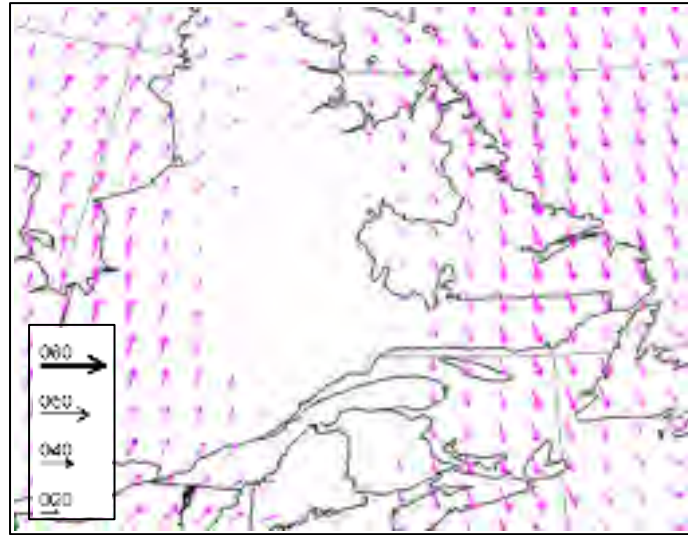


Figure A XX-1 Superposition du vent [nœud]
à l'état initiale de GEM-5 (bleu) et de la NARR
le 18 janvier 2006 (magenta), à 700 mb

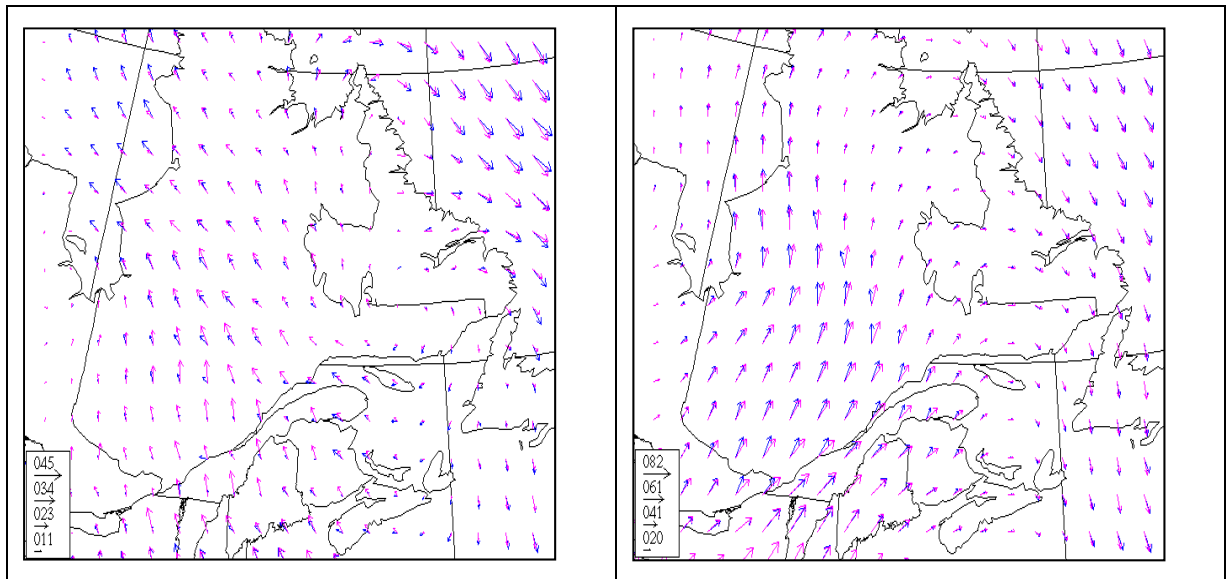


Figure A XX-2 Superposition du vent [nœud] à 9 heures de GEM-5 (bleu) et de la NARR
le 18 janvier à 9Z (magenta), à 1000 mb (gauche) et à 700 mb (droite)

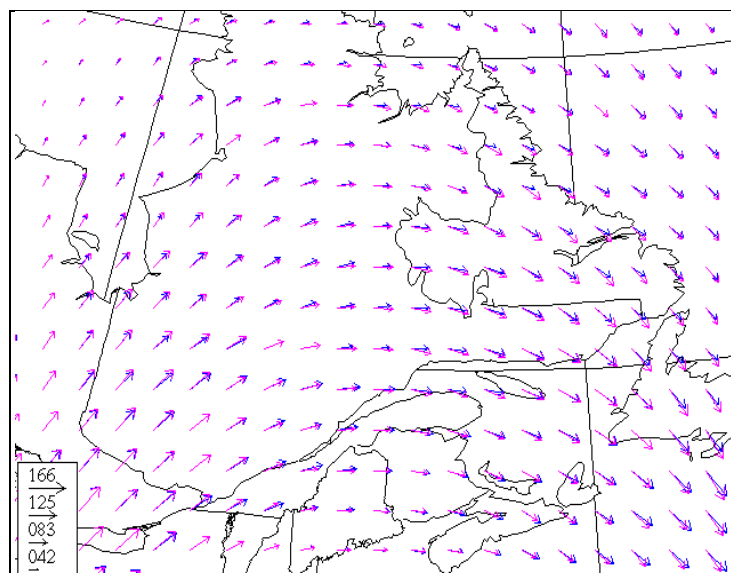


Figure A XX-3 Superposition du vent [nœud]
à 9 heures de GEM-5 (bleu) et de la NARR
le 18 janvier à 9Z (magenta), à 300 mb

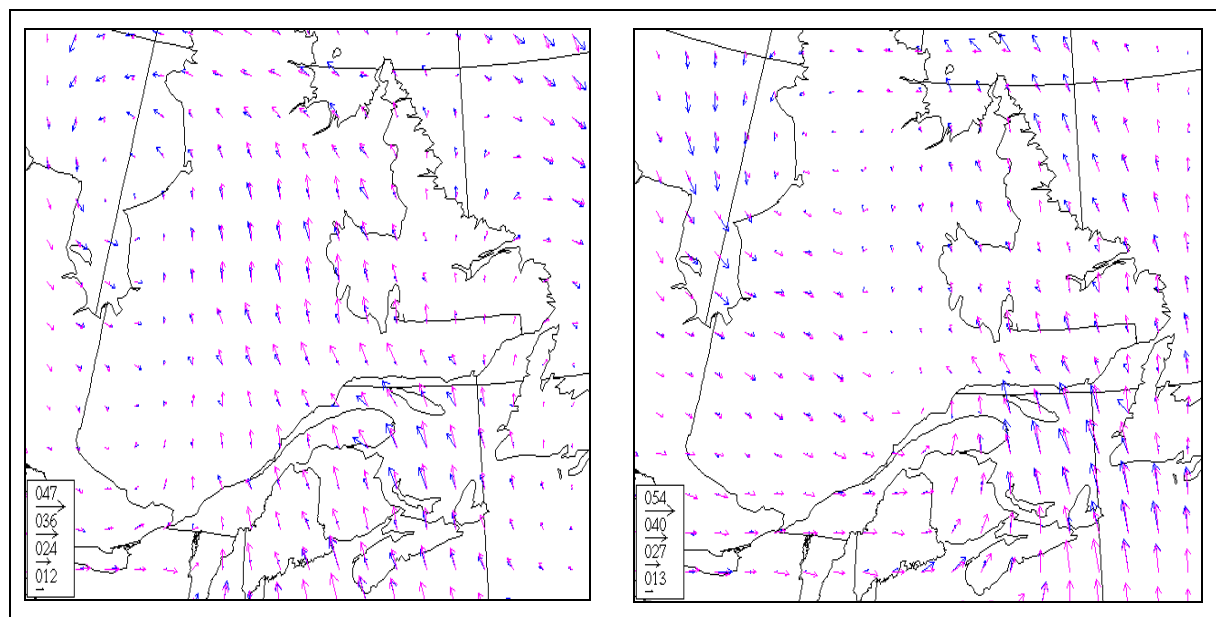


Figure A XX-4 Superposition du vent [nœud] à 18 heures (gauche) et à 27 heures
(droite) de GEM-5 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19
janvier 2006 3Z (droite), à 1000 mb

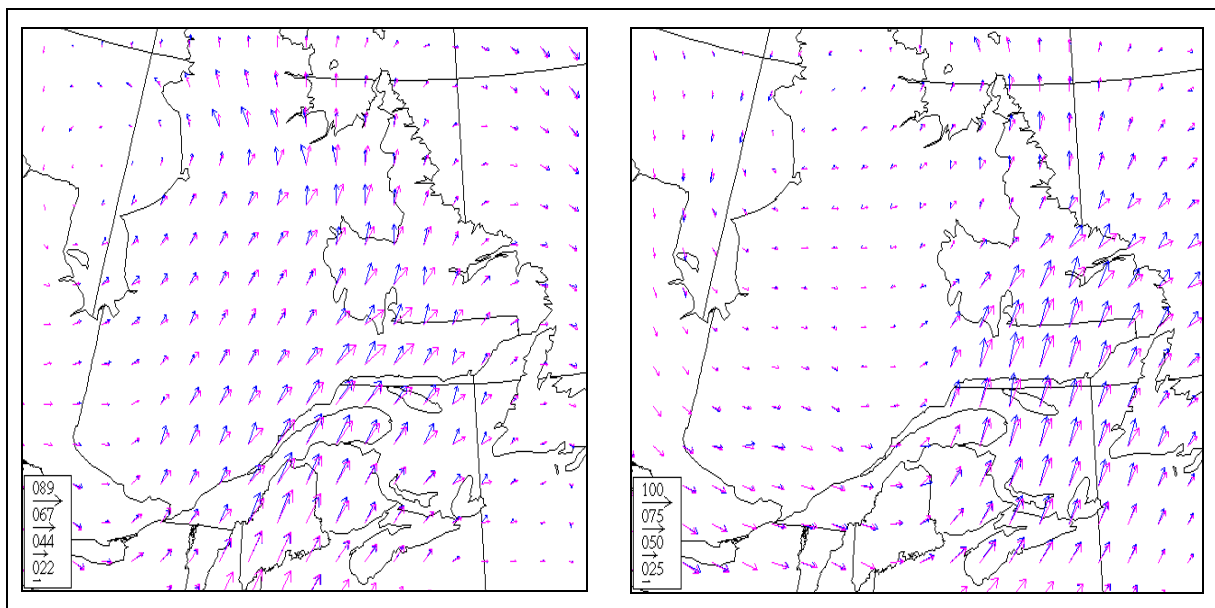


Figure A XX-5 Superposition du vent [nœud] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-5 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 700 mb

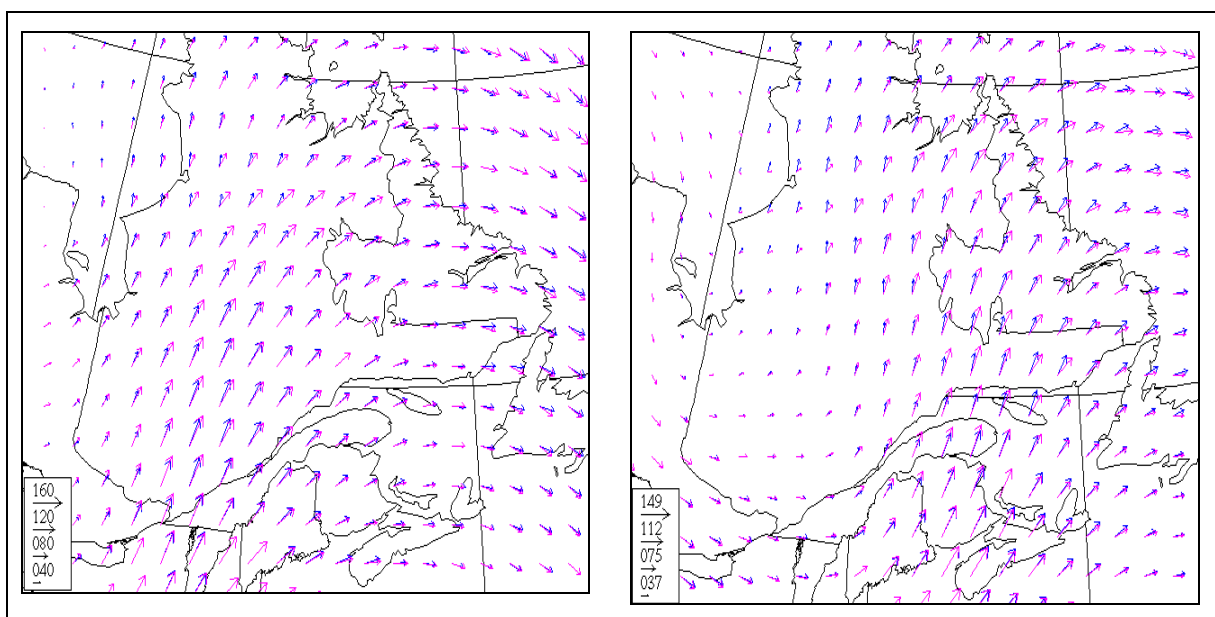


Figure A XX-6 Superposition du vent [nœud] à 18 heures (gauche) et à 27 heures (droite) de GEM-5 (bleu) et de la NARR (magenta) le 18 janvier 2006 18Z (gauche) et 19 janvier 2006 3Z (droite), à 300 mb

ANNEXE XXI

FRÉQUENCES DES ÉCARTS DE LA HAUTEUR GÉOPOTENTIELLE ENTRE GEM-5 ET LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉSOLUTION

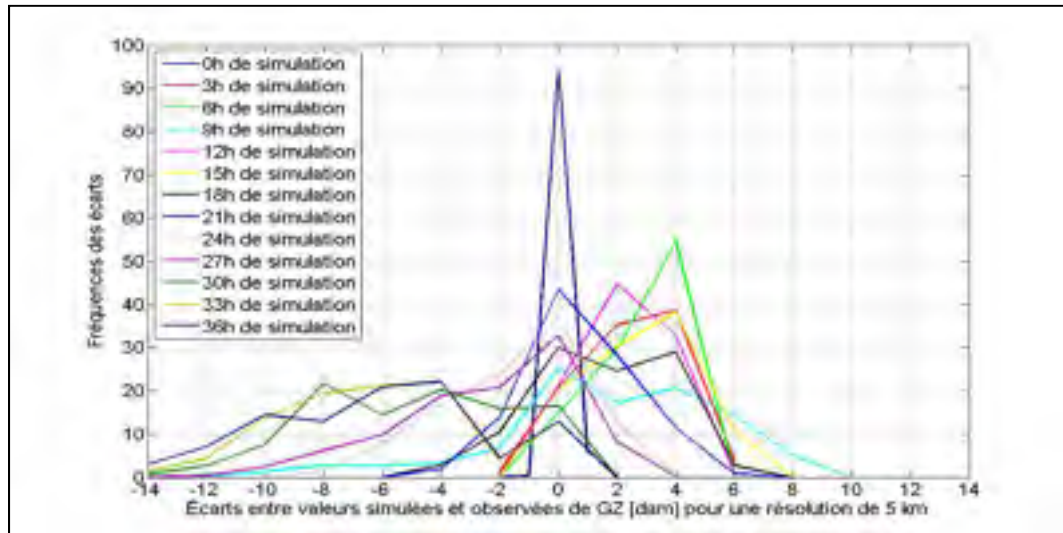


Figure A XXI-1 Variations temporelles des écarts entre les valeurs de la GZ [dam] de GEM-5 et de la NARR à une hauteur de 1000 mb

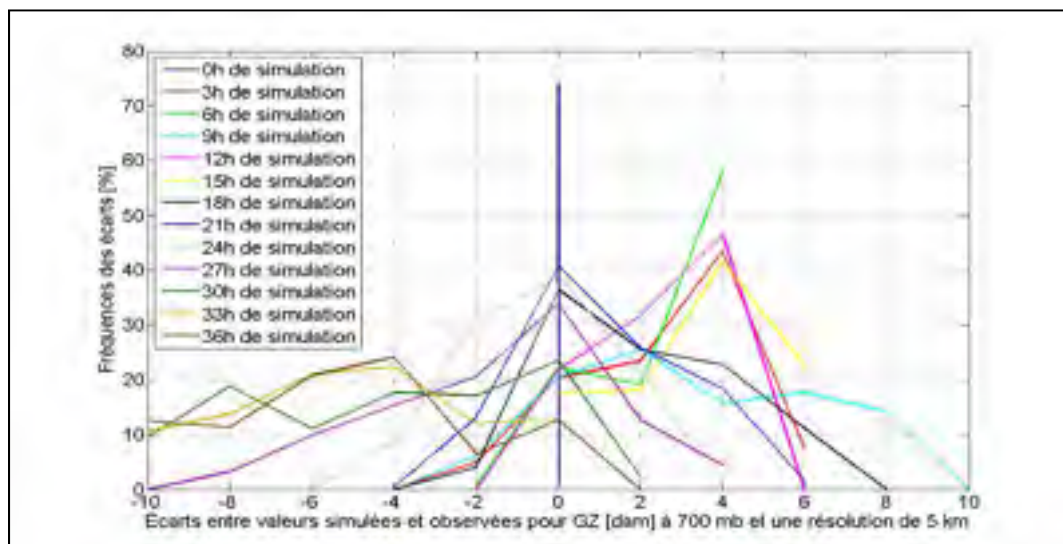


Figure A XXI-2 Variations temporelles des écarts entre les valeurs de la GZ [dam] de GEM-5 et de la NARR à une hauteur de 700 mb

ANNEXE XXII

FRÉQUENCES DES ÉCARTS DE LA TEMPÉRATURE ENTRE GEM-5 ET LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION

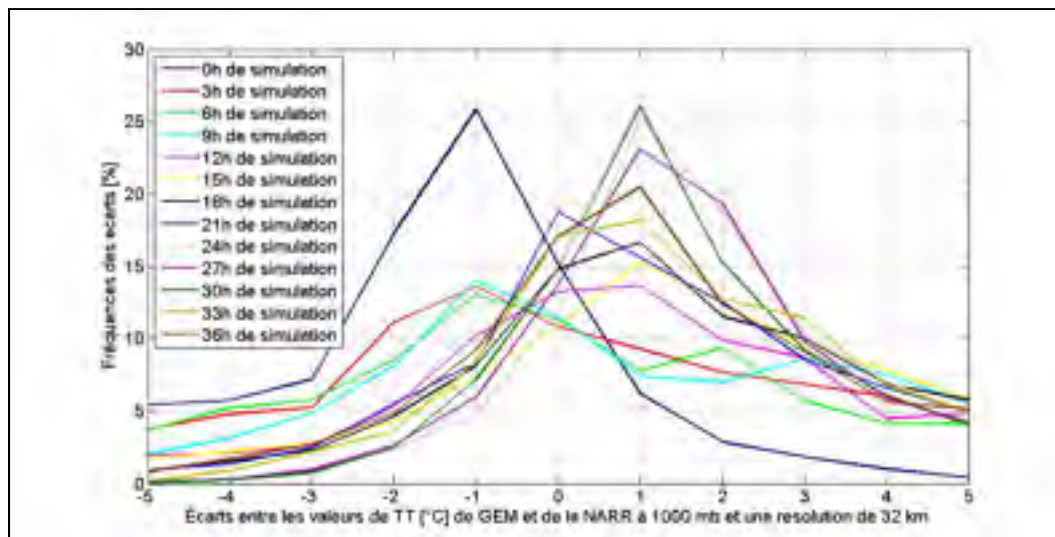


Figure A XXII-1 Variations temporelles des écarts entre les valeurs de la TT [°C] de GEM-5 et de la NARR à une hauteur de 1000 mb

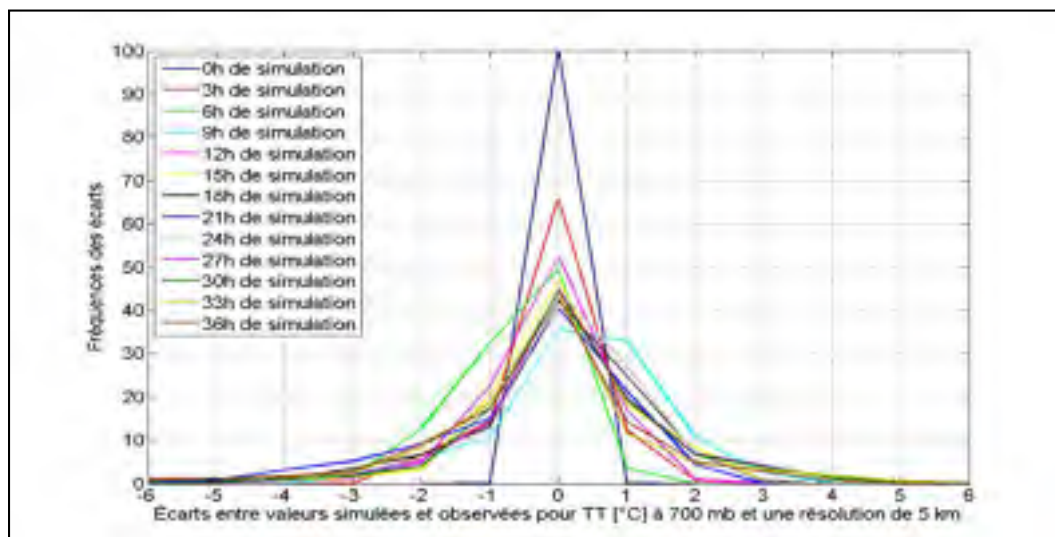


Figure A XXII-2 Variations temporelles des écarts entre les valeurs de la TT [°C] de GEM-5 et de la NARR à une hauteur de 700 mb

ANNEXE XXIII

FRÉQUENCES DES ÉCARTS DE L'HUMIDITÉ SPÉCIFIQUE ENTRE GEM-5 ET LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION

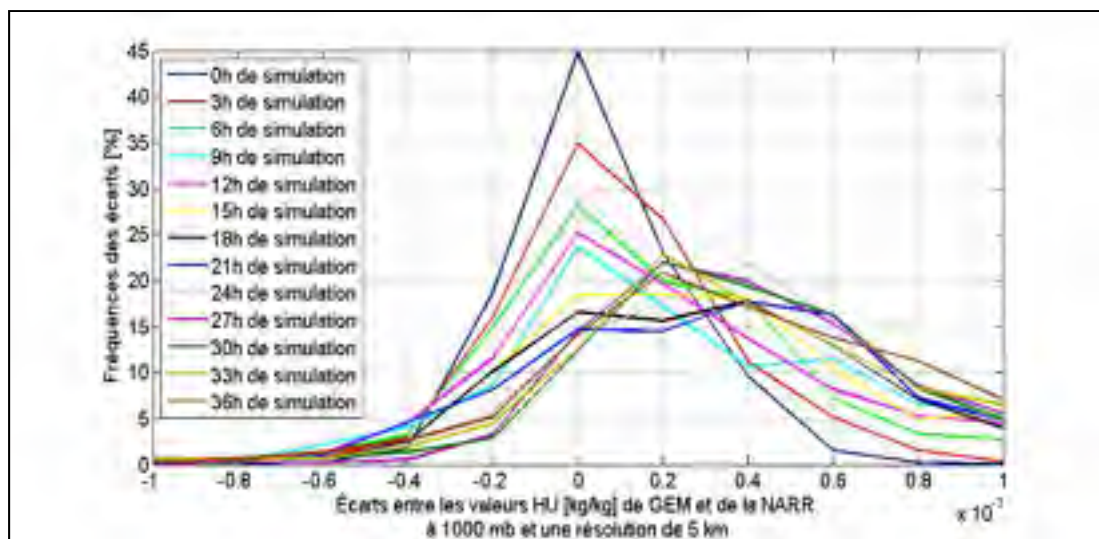


Figure A XXIII-1 Variations temporelles des écarts entre les valeurs de HU [kg/kg] de GEM-5 et de la NARR à une hauteur de 1000 mb

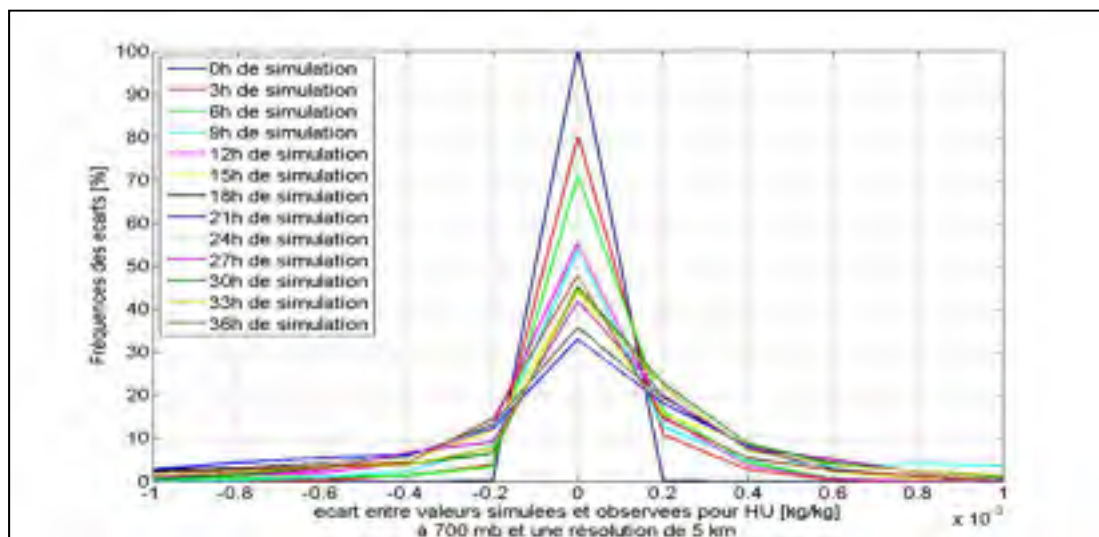


Figure A XXIII-2 Variations temporelles des écarts entre les valeurs de HU [kg/kg] de GEM-5 et de la NARR à une hauteur de 700 mb

ANNEXE XXIV

TAUX DE PRÉCIPITATIONS DE GEM-5 ET DE LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION

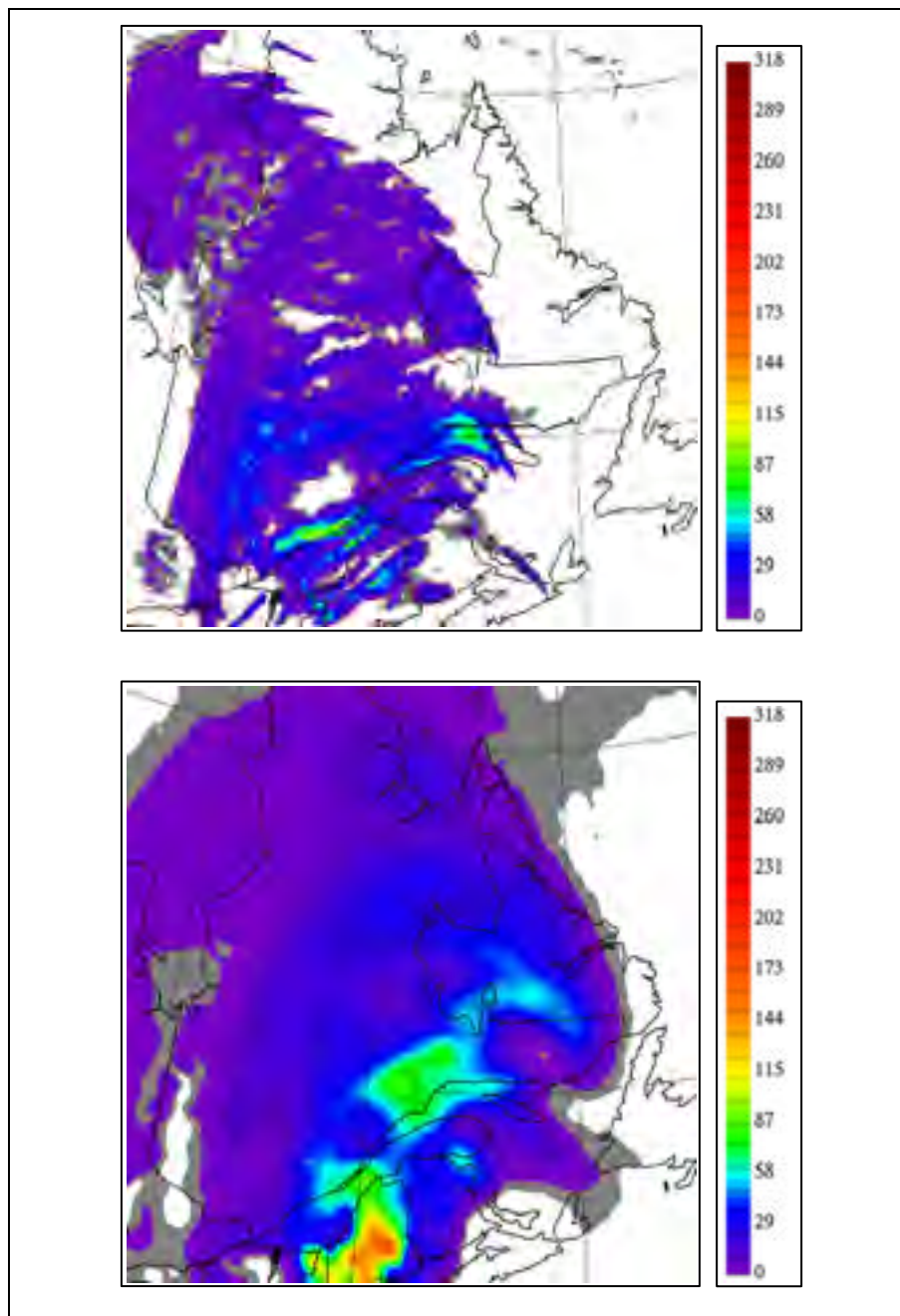


Figure A XXIV-1 Taux de précipitation [10^{-8} m.s^{-1}] à 18 heures de
GEM-5 (haut) et de la NARR le 18 janvier 2006 à 18Z (bas)

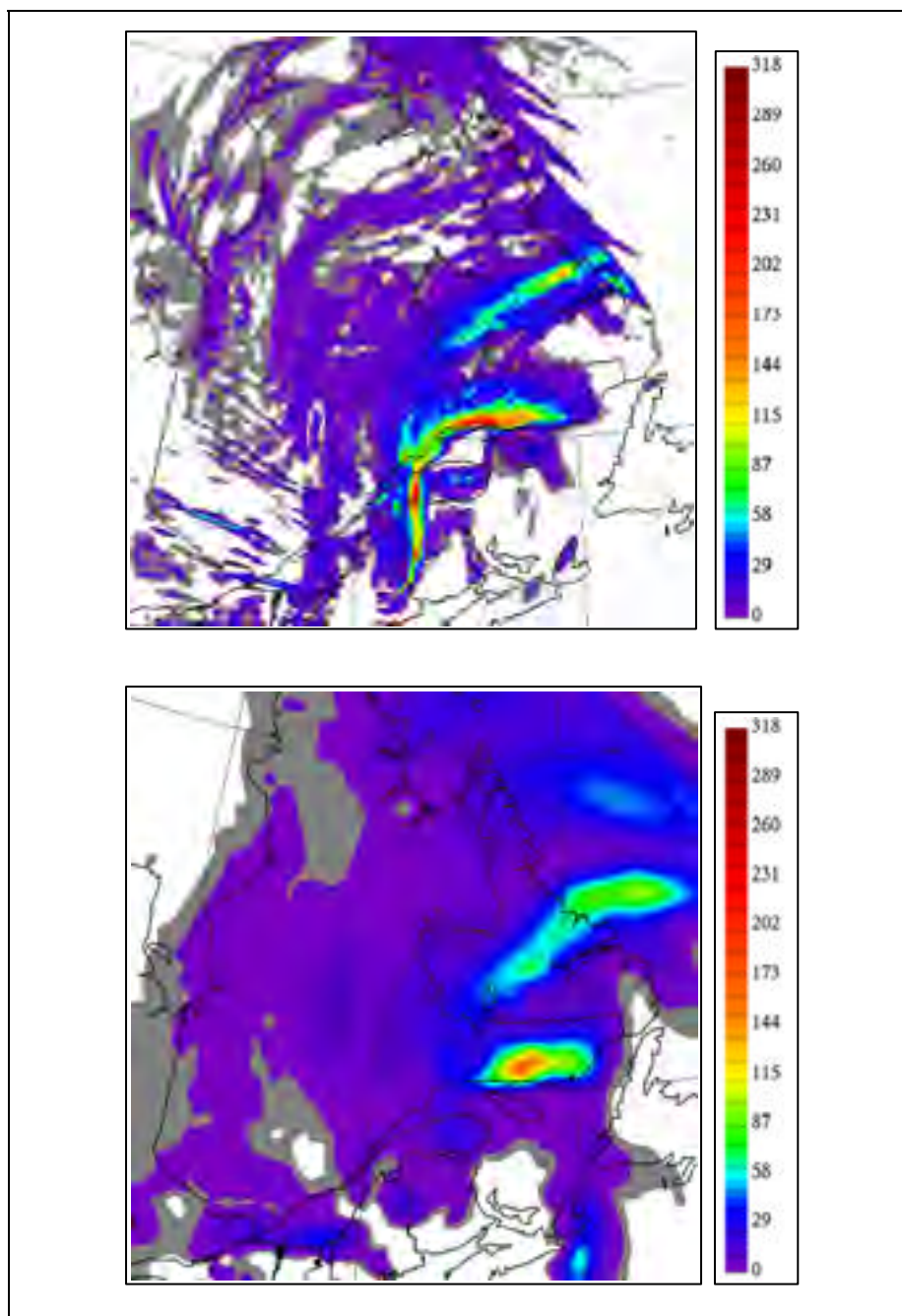


Figure A XXIV-2 Taux de précipitations [10^{-8} m.s^{-1}] à 27 heures de GEM-5 (haut) et de la NARR le 19 janvier 2006 à 3Z (bas)

ANNEXE XXV

SUPERPOSITION DE L'ACCUMUALTION DE LA NEIGE DE GEM-5 ET DE LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION

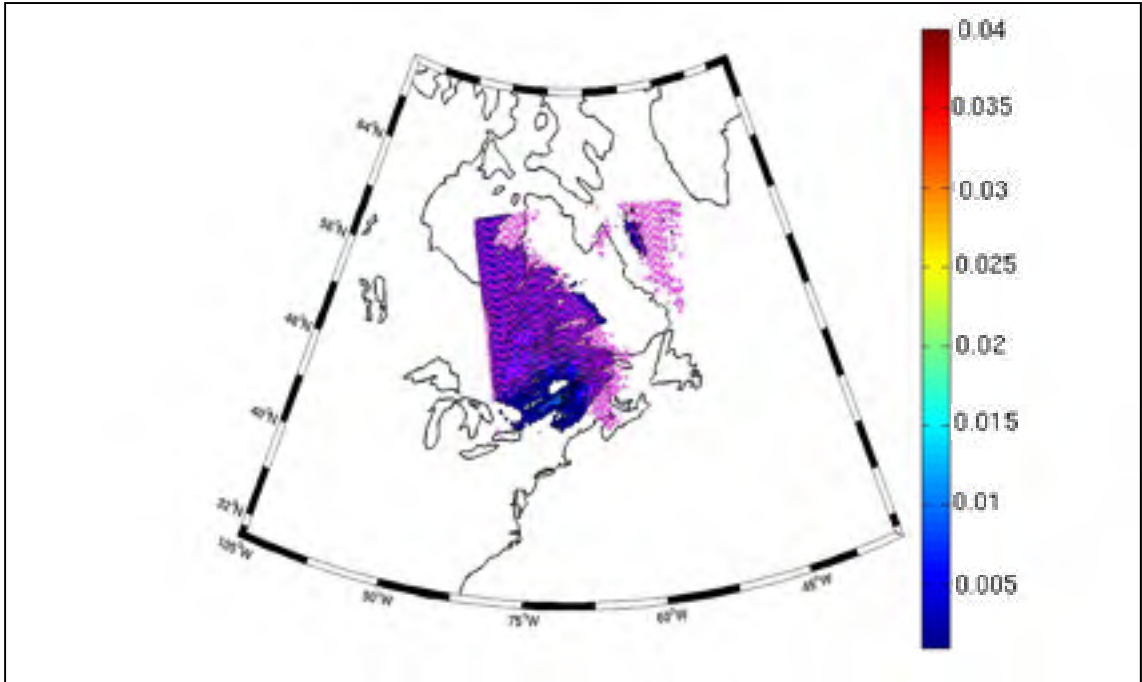


Figure A XXV-1 Superposition de l'accumulation de la neige [m d'eau] à 18 heures de GEM-5 (dégradé) et de la NARR le 18 janvier à 18 Z (magenta)

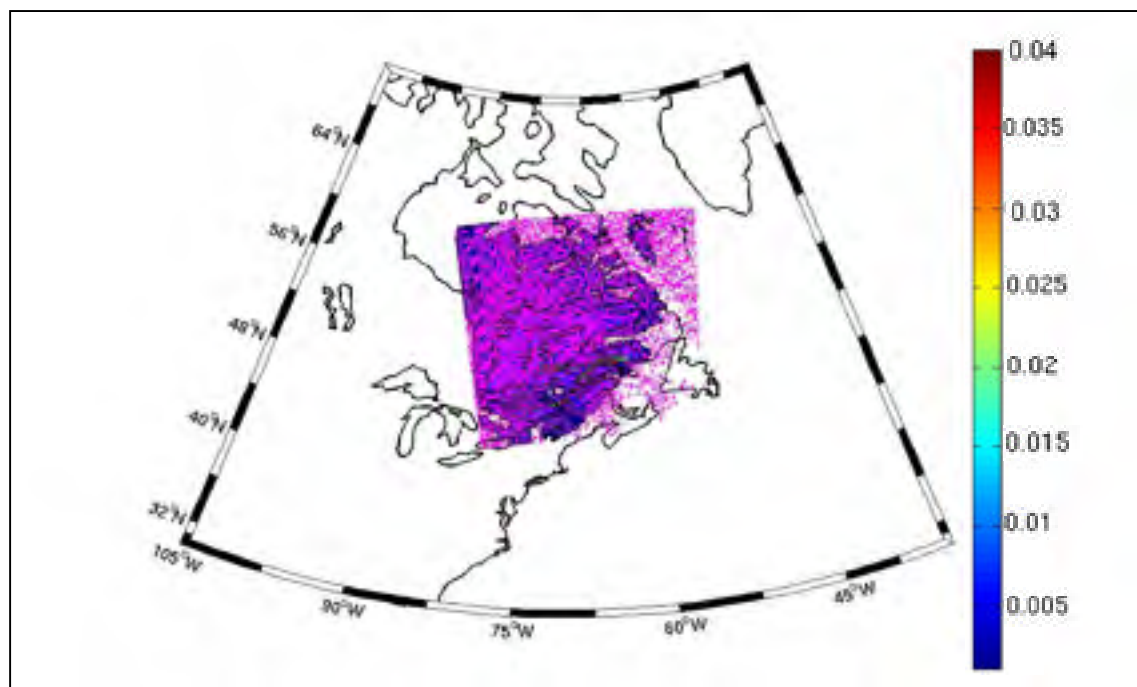


Figure A XXV-2 Superposition de l'accumulation [m d'eau] de la neige à 27 heures de GEM-5 (dégradé) et de la NARR le 19 janvier 2006 à 3Z (magenta)

ANNEXE XXVI

SUPERPOSITION DE L'ACCUMUALTION DE LA PLUIE DE GEM-5 ET DE LA NARR INTERPOLÉE SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION

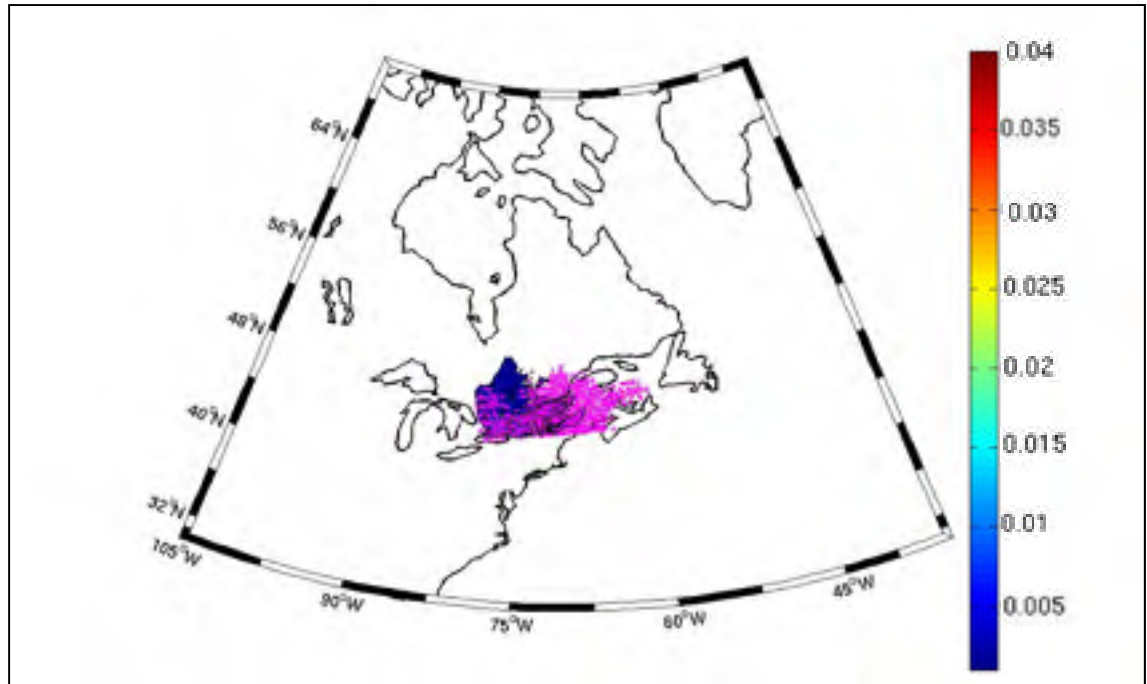


Figure A XXVI-1 Superposition de l'accumulation de la pluie [m d'eau] à 18 heures de GEM-5 (dégradé) et de la NARR le 18 janvier 2006 18Z (magenta)

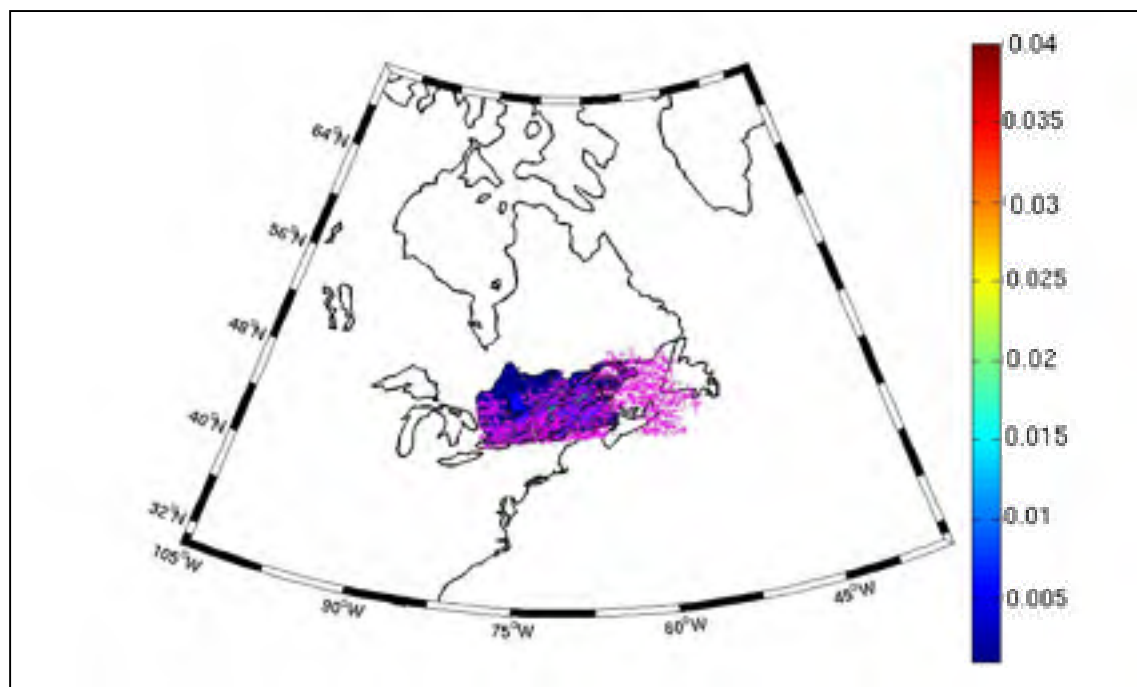


Figure A XXVI-2 Superposition de l'accumulation de la pluie [m d'eau] à 27 heures de GEM-5 (dégradé) et de la NARR le 19 janvier 2006 à 3Z (magenta)

ANNEXE XXVII

TAUX DE PRÉCIPITATIONS DE GEM-5 ET DE GEM-32 INTERPOLÉ SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION

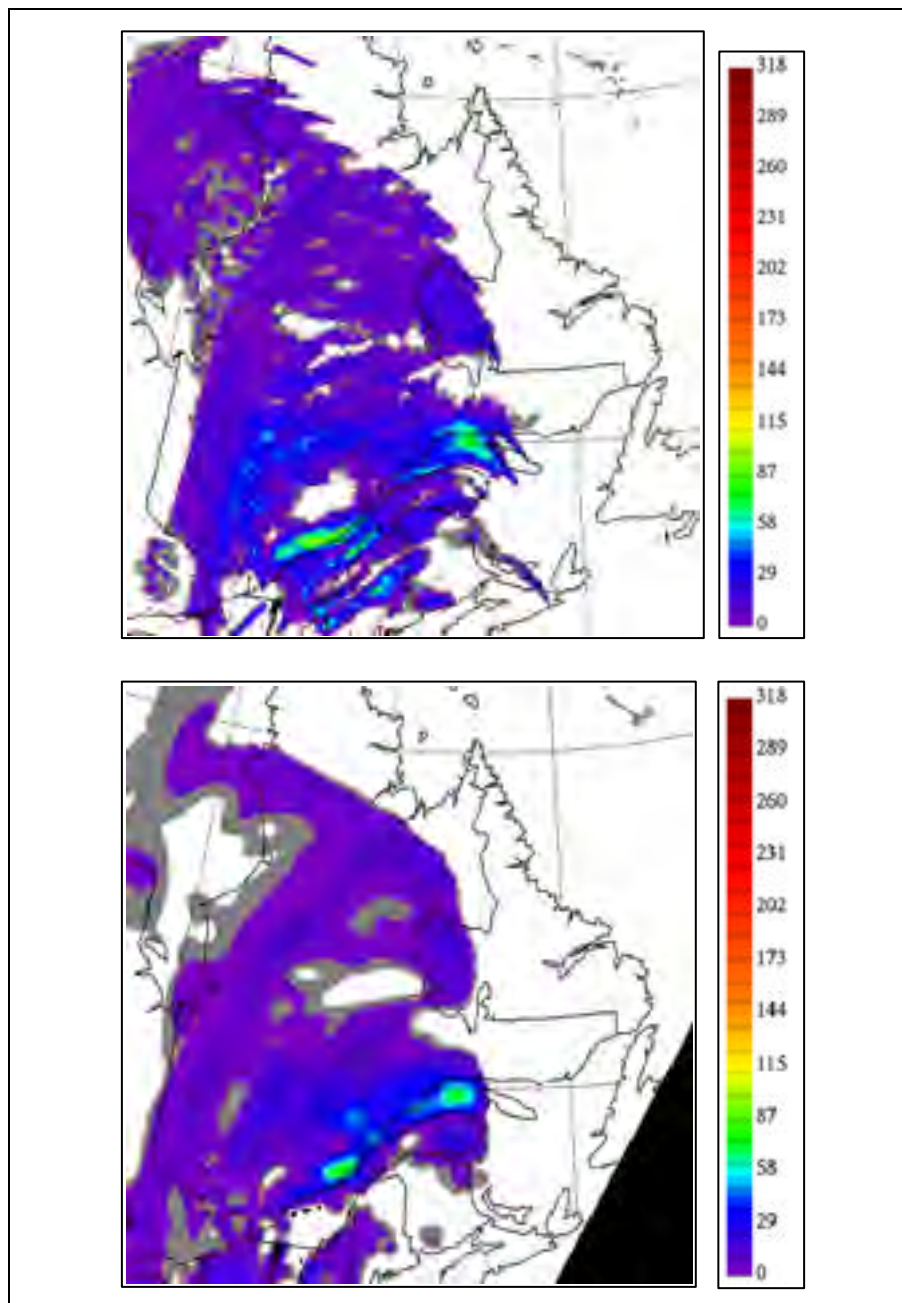


Figure A XXVII-1 Taux de précipitations [10^{-8} m.s^{-1}] à 18 heures de GEM-5 (haut) et de GEM-32 (bas)

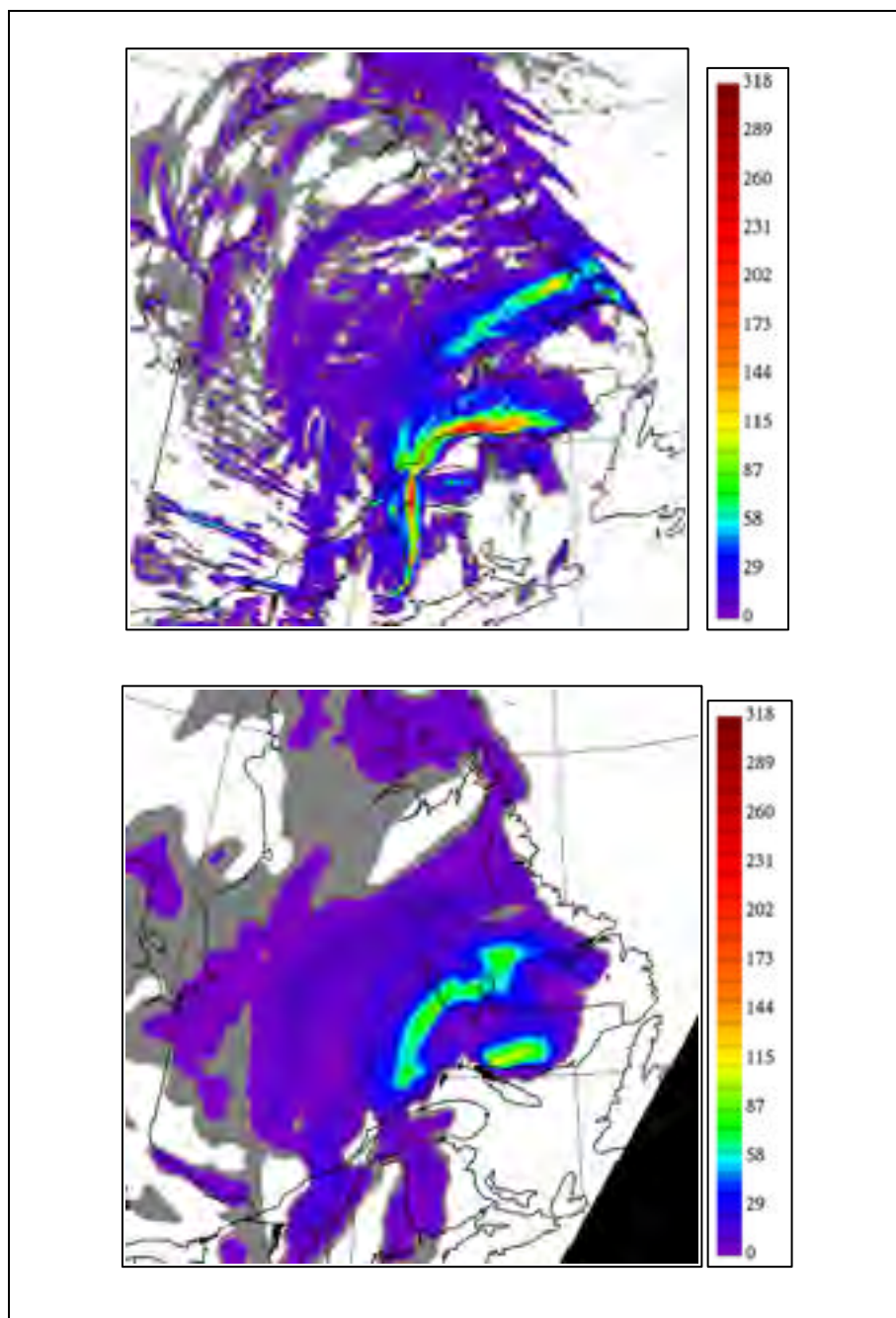


Figure A XXVII-2 Taux de précipitations [10^{-8} m.s^{-1}] à 27 heures
de GEM-5 (haut) et de GEM-32 (bas)

ANNEXE XXVIII

ACCUMULATIONS DE LA NEIGE À UNE RÉOLUTION DE 5 KM ET 32 KM INTERPOLÉ SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION

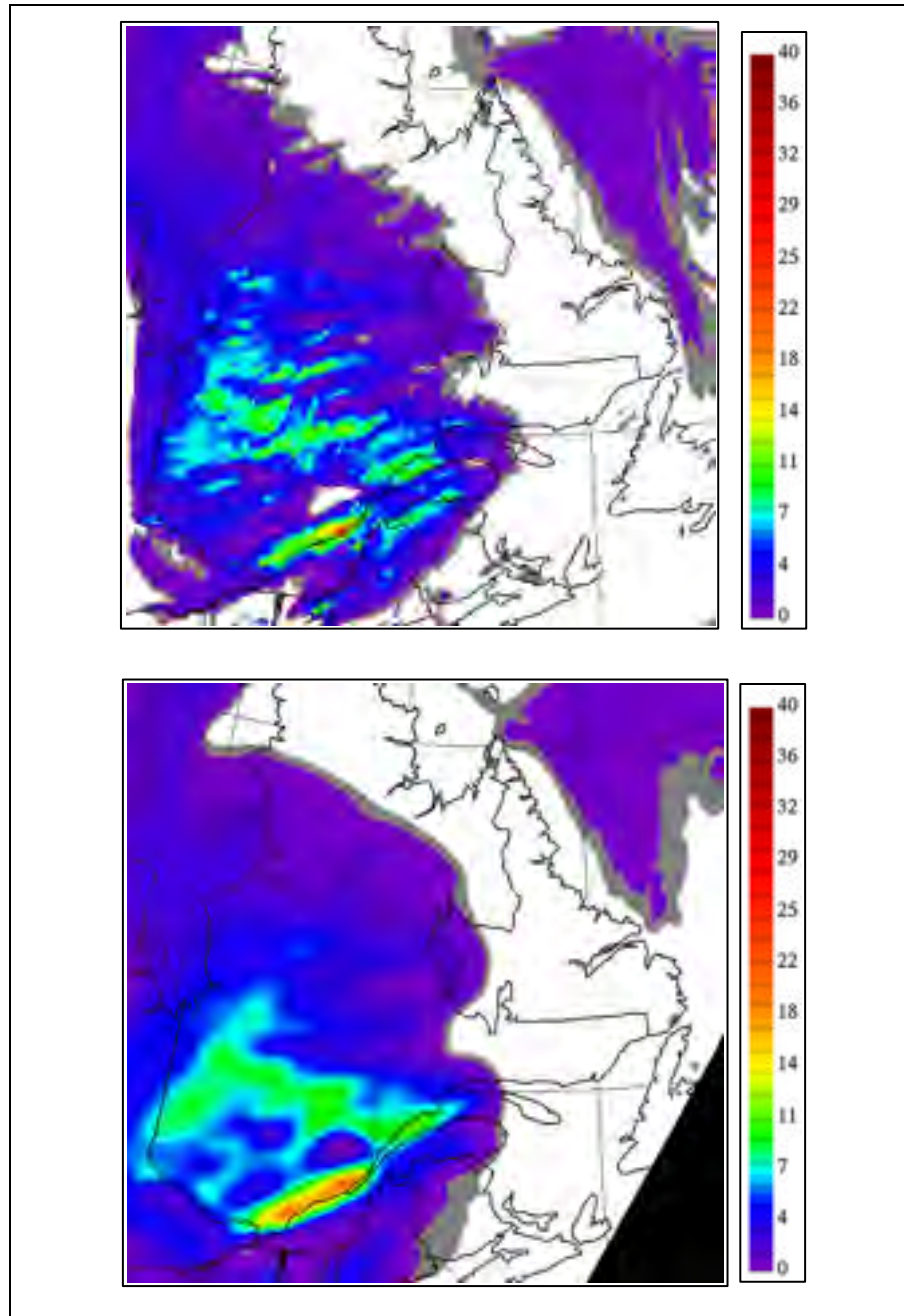


Figure A XXVIII-1 Accumulation de neige [mm d'eau] à 18 heures
de GEM-5 (haut) et GEM-32(bas)

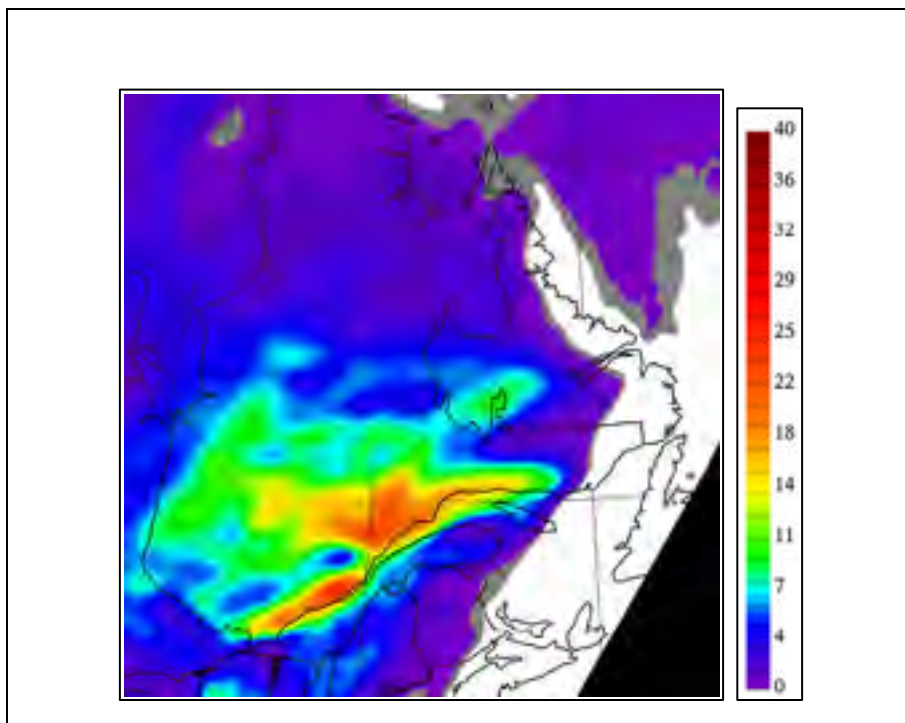


Figure A XXVIII-2 Accumulation de neige [mm d'eau] à 27 heures
de GEM-5 (haut) et GEM-32 (bas)

ANNEXE XXIX

ACCUMUALATIONS DE LA PLUIE À UNE RÉOLUTION DE 5 KM ET 32 KM INTERPOLÉ SUR UNE GRILLE DE 5 KM DE RÉOLUTION

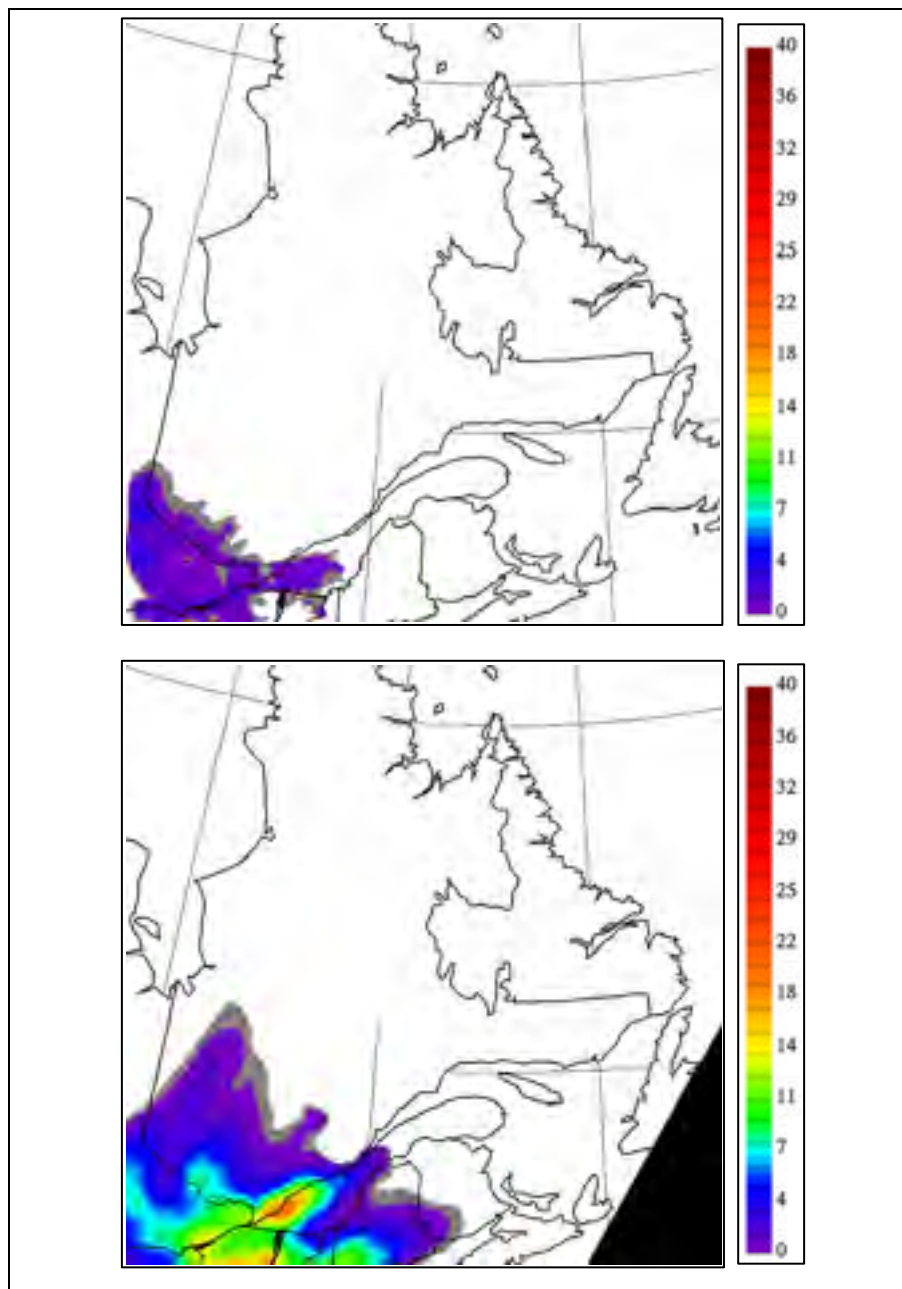


Figure A XXIX-1 Accumulation de pluie [mm d'eau] à 18 heures de simulation et pour GEM-5 (haut) et GEM-32 (bas)

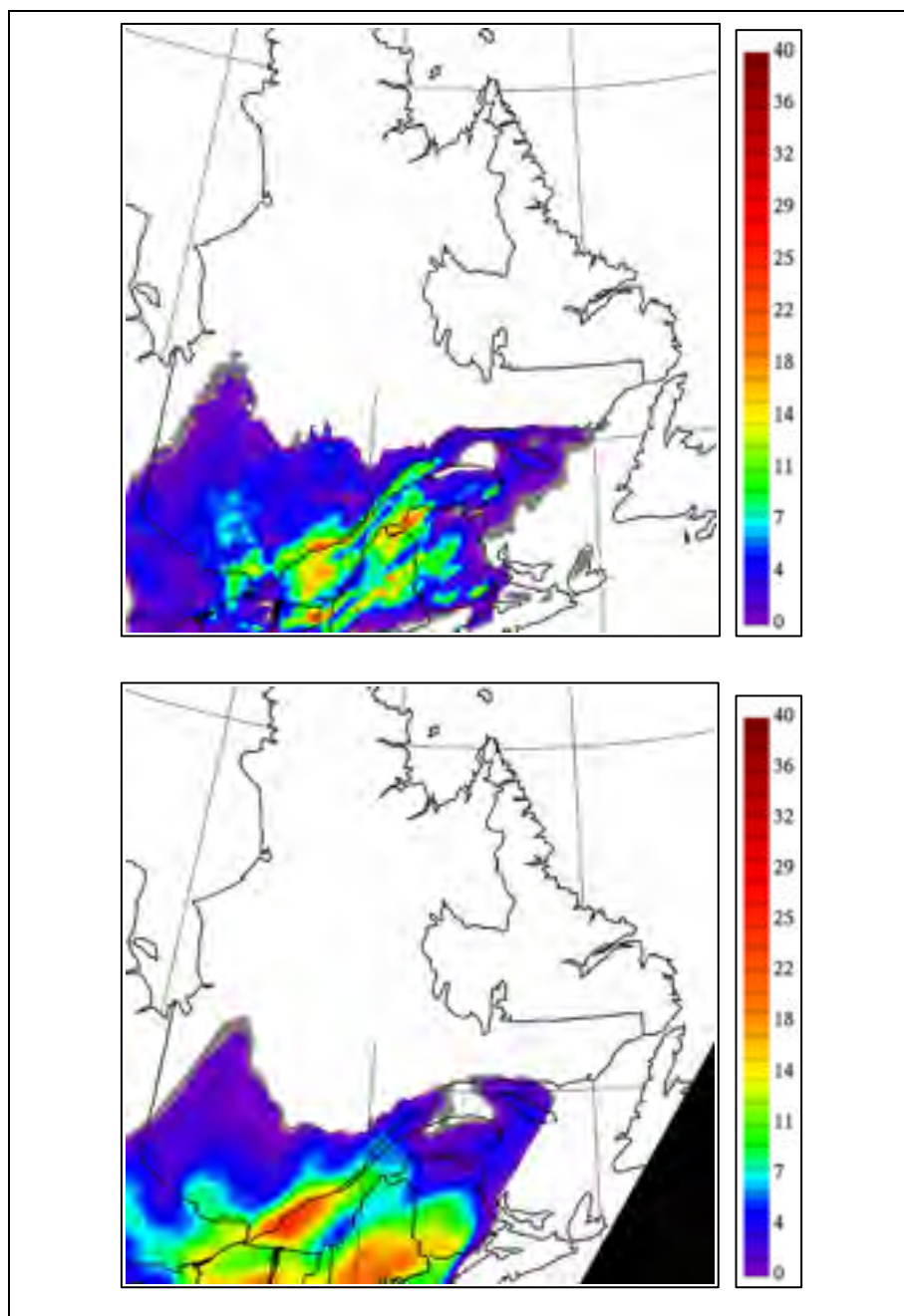


Figure A XXIX-2 Accumulation de pluie [mm d'eau] à 27 heures
de simulation de GEM-5 (haut) et GEM-32 (bas)

BIBLIOGRAPHIE

- Ahrens, C.D. 2007. *Meteorology to day : an introduction to weather, climate and the environment*, 8^e ed. augm d'une postf. Coll. « Earth Science ». Belmont (USA): West Publishing Company, 398 p.
- Barring-Gould I., Tallhaug L., Vindteknikk K., Ronsten G., Horbaty R., Cattin R., Laasko T., Durstewitz M., Lacroix A., Peltola E. et Wallenius T. 2010. *Recommendations for wind energy projects in cold climates*. Coll. « Technical Research Center of Finland ». Finland, 65 p.
- Caron, F., et R. Benoît. 2009. *M_FST*. Montréal
- Comeau, Monelle. 2008. « La caractérisation du climat givrant de sites éolien: mesure, analyse de modèles et cartographie du givrage atmosphérique ». Mémoire de maîtrise en génie mécanique, Montréal, Université du Québec à Montréal, 132 p.
- Comeau, Monelle. 2009. « Revue et choix des données météorologiques pour la modélisation du givrage atmosphérique ». Mémoire de maîtrise en génie mécanique, Montréal, École de Technologie Supérieure, 132 p.
- Cortinas, Jr., V. Bernstein, B.C. Robbins, C. Christopher et J.W. Strapp. 2004. « An analysis of Freezing Rain, Freezing Drizzle and Ice Pellets across the United States and Canada ». *Weather and Forecasting*, vol. 19, p. 377-390.
- DAI. 2010. « DAI : Données Accès d'Intégration ». <www.loki.qc.ec.gc.ca>.
- Dupire, Pierre-Émanuel. en cours. « Caractérisation du givrage atmosphérique au niveau du moyau des sites éolien du Canada ». Mémoire de maîtrise en génie mécanique, Montréal, École de Technologie Supérieure.
- Fortin, G., et J. Perron. 2008. « Cercles de créativité : Quelques enjeux relatifs à la production d'énergie éolienne au Québec ». In *Occupation des territoires nordiques du Québec: Forum Vision 2025* (14 mars 2008). p. 19. Saguenay, Québec: Université de Chicoutimi au Québec.
- Fortin, G., et J. Perron. 2009. *Cartographie du givrage atmosphérique : atlas du givre au Canada*. Coll. « Rapport technique de l'Université du Québec à Chicoutimi », CRDPJ 364706-07. Chicoutimi, Québec: Université du Québec à Chicoutimi, 50 p.
- Gayraud, Aurélie. 2009. « Préviation d'événements de givrage atmosphérique au Québec avec le schéma de condensation de Milbrandt & Yau couplé au modèle méso-échelle MC2 ». Mémoire de maîtrise en génie mécanique, Montréal, École de Technologies Supérieure, 105 p.

- Laflamme, J.L., et G. Periard. 1996. « The Climate of Freezing Rain Over the Province of Québec in Canada ; a primilary analysis. ». In *Proc of the 7th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*. Chicoutimi, Canada.
- Lamraoui, Fayçal. en cours. « Canadian Atlas of Atmospheric Icing ». Montréal École de Technologie de Montréal.
- Leblanc, M.P. 2007. *Recommendations for risk assessments of ice throw and blade failure in Ontario*. 38079/OR/01. 27 p.
- Maillot, J., S. Bélair, M. Charron, C. Doyle, P. Joe, M. Abrahamowicz, N.B. Bernier, B. Denis, A. Erfani, R. Frenette, A. Giguère, G.A. Isaac, N. McLennan, R. McTaggart-Cowan, J. Milbrandt et L. Tong. 2010. « Environnement Canada's experimentale numerical weather prediction systems for the Vancouver 2010 winter Olympic and paraolympic games ». p. 13.
- Manikin, G. 2005. « An overview of precipitation type forecasting ». In *In Proc of the 21st Conference in Weather Analysis and Forecasting*. Washington, USA.
- Manwell J.F., McGowan J.G. et Rogers A.L. 2002. *Wind energy explained: theory, design and application*, 4^e éd. augm. d'une postf. Coll. « British Library Cataloguing in Publication Data ». Amherst, USA: University of Massachussetts, 577 p.
- McKay, G.A., et H.A. Thompson. 1969. « Estimating the hazard of ice accretion in Canada from climatological data ».
- Messinger, F., Geoff D., Kalnay E., Mitchell K., Shafran P.C., Ebisuzaki W., Jovic D., Woollen J., Rogers E., Berbery E.H., Ek M.b., Fan Y., Grumbine R., Higgins W., Li H., Lin Y., Manikin G., Parrish D. et Shi W. 2006. « North American Regional Reanalysis ». *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 87, n° 3, p. 343-360.
- Milbrandt, J.A., et M.K. Yau. 2005. « A multimoment Bulk Microphysics Parametrisation. Parts I, II, III, IV ». *American Meteorological Society - Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 62-63, p. 3051-3159.
- NCEP. 1979. « NOAA: National Operational Model Archive and Distribution System ». <<http://www.ncep.noaa.gov/>>.
- Pawlowicz, Rich. 2005. « M_Map: A mapping package for Matlab ». En ligne. <<http://www.eos.ubc.ca/~rich/map.html>>.

- Peltola E., Laakso T., Rosten G., Tallhaug L.L., Horbaty R., Baring-Gould I. et Lacroix A. 2005. « Specific recommendations for the developpement of wind energy projects in could climates ». In *BOREAS VII Conference* (7-8 mars 2005). p. 1-10. Saariselkä, Finland.
- Richard W. Reynolds, Thomas M. Smith, Chunying Liu, Dudley B.Chelton, Kenneth Casey, Michel G. Schlax. 2007. « Daily High-Resolution Blended Analyses for Sea Surface Temperature ». *Journal of Climate in Press*, (27 avril), p. 67.
- RPN-COMM. 1979. « RPN-COMM : Community for Mesoscale Modeling ». <<http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn.comm/>>.
- Saulnier B., et Reid R. 2009. *L'éolien : Au coeur de l'incontournable révolution énergétique*, 1e ed. Coll. « Éditions MultiMondes ». Montréal (Qué): Bibliothèque et Archives nationales du Québec et Bibliothèque et Archives Canada, 396 p.
- Stuart, R.A., et G.A. Isaac. 1999. « Freezing precipitation in Canada ». *Atmosphere-Ocean*, p. 87-102.
- Tamelin B., Sääntti K., Dobesh H., Ganander H., Kury G., Laasko T., Peltola E. et Ronsten G. 2005. *Wind turbines in icing environnement : Improvement of tools for siting, certification and operation - NEW ICETOOLS*. Coll. « Rapport technique 2005 ». Helsinki, Finland, 127 p.
- Wallace, J.M., et V.H. Hobbs. 2006. *Atmospheric Science : an introductory survey*, 2^e ed. augm. d'une postf. Coll. « International Geophysics Series ». Oxford (UK): Elsevier's Science &Technology Rights Departement in Oxford, 483 p.