

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

UNE COMPARAISON DES
DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS DU MODÈLE CANADIEN GEM
AVEC LES DONNÉES DE RÉANALYSE NCEP ET ERA 40
DANS L'ARCTIQUE
POUR LA PÉRIODE 1978-2002

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'ATMOSPHÈRE

PAR
PASCAL DEHASSE

JUILLET 2011

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Jean-Pierre Blanchet, mon directeur de recherche, ainsi que le centre ESCER (Étude et la simulation de climat à l'échelle régionale) de l'UQAM pour leur soutien financier tout au long de ma maîtrise. Je tiens également à remercier Katja Winger, spécialiste en modélisation du climat à l'UQAM, et Nadjat Labassi, analyste en informatique à l'UQAM, pour leur soutien technique au niveau informatique et pour tout le temps qu'elles m'ont accordé ainsi que ma mère, ma sœur, mes amis et mes collègues de travail pour leurs encouragements et leur support moral.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
TABLE DES MATIÈRES.....	ii
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES TABLEAUX DE FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES.....	xii
RÉSUMÉ.....	xiv
INTRODUCTION.....	1
Objectifs	15
CHAPITRE I	
MODÈLE CANADIEN GEM ET ENSEMBLES D'OBSERVATIONS.....	19
1.1 Modèle canadien GEM.....	20
1.1.1 Les différentes configurations de grille de GEM : description, avantages et inconvenients (résumé de Côté et al., 1998).....	26
1.1.1.1 Modèle à aire limitée	26
1.1.1.2 Modèle à aire limitée vs modèle à résolution variable	32
1.1.2 Description du modèle canadien GEM 3.3.0	36
1.2 Réanalyses et données d'observations pour l'Arctique.....	38
1.2.1 Description des réanalyses utilisées pour la comparaison avec les différentes configurations de GEM 3.3.0	38
1.2.1.1 ERA 40 - European Center for Medium-Range Weather Forecasts.....	38
1.2.1.2 NCEP/NCAR - National Center for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research.....	42

1.2.2 Problèmes reliés aux observations de SAT dans l'Arctique	44
1.2.2.1 Manque de stations d'observations	44
1.2.2.2 Problèmes de mesure	46
CHAPITRE II	
COMPARAISON DU MODÈLE CANADIEN GEM AVEC LES DONNÉES DE RÉANALYSES	
NCEP ET ERA 40.....	48
2.1.1 Tendances de SAT	50
2.1.1.1 Tendances des moyennes saisonnières de SAT	50
Automne	50
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	50
Comparaison des configurations de GEM.....	54
Comparaison réanalyses-configurations.....	58
Hiver.....	61
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	61
Comparaison des configurations de GEM.....	64
Comparaison réanalyses-configurations.....	70
Printemps.....	75
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	75
Comparaison des configurations de GEM.....	77
Comparaison réanalyses-configurations.....	82
Été	87
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	87
Comparaison des configurations de GEM.....	89
Comparaison réanalyses-configurations.....	92

2.1.1.2 Tendances des moyennes annuelles de SAT	95
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP	95
Comparaison des configurations de GEM.....	97
Comparaison réanalyses-configurations.....	98
2.1.2 Variances de SAT.....	100
2.1.2.1 Variances des moyennes saisonnières de SAT.....	100
Automne	100
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	100
Comparaison des configurations de GEM.....	102
Comparaison réanalyses-configurations.....	104
Hiver	106
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	106
Comparaison des configurations de GEM.....	108
Comparaison réanalyses-configurations.....	113
Printemps.....	116
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	116
Comparaison des configurations de GEM.....	117
Comparaison réanalyses-configurations.....	119
Été	121
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	121
Comparaison des configurations de GEM.....	122
Comparaison réanalyses-configurations.....	123

2.1.2.2 Variances des moyennes annuelles de SAT	124
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP	124
Comparaison des configurations de GEM.....	126
Comparaison réanalyses-configurations.....	127
2.2.1 Tendances des pressions au niveau moyen de la mer (SLP).....	128
2.2.1.1 Tendances des moyennes saisonnières de SLP	128
Automne	128
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	128
Comparaison des configurations de GEM.....	130
Comparaison réanalyses-configurations.....	133
Hiver.....	136
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	136
Comparaison des configurations de GEM.....	137
Comparaison réanalyses-configurations.....	140
Printemps.....	142
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	142
Comparaison des configurations de GEM.....	143
Comparaison réanalyses-configurations.....	145
Été	147
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	147
Comparaison des configurations de GEM.....	148
Comparaison réanalyses-configurations.....	151

2.2.1.2 Tendances des moyennes annuelles de SLP	153
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	153
Comparaison des configurations de GEM.....	154
Comparaison réanalyses-configurations.....	157
2.2.2 Variances des pressions au niveau moyen de la mer (SLP)	159
2.2.2.1 Variances des moyennes saisonnières de SLP	159
Automne	159
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	159
Comparaison des configurations de GEM.....	160
Comparaison réanalyses-configurations.....	162
Hiver	163
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	163
Comparaison des configurations de GEM.....	164
Comparaison réanalyses-configurations.....	166
Printemps.....	168
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	168
Comparaison des configurations de GEM.....	169
Comparaison réanalyses-configurations.....	171
L'été.....	173
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	173
Comparaison des configurations de GEM.....	173
Comparaison réanalyses-configurations.....	174

2.2.2.2 Variance des moyennes annuelles de SLP	175
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP	175
Comparaison des configurations de GEM.....	175
Comparaison réanalyses-configurations.....	176
2.3.1 Tendances des hauteurs du géopotential à 500 hPa.....	177
2.3.1.1 Tendances des moyennes saisonnières des hauteurs du géopotential à 500 hPa	177
Automne	177
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	177
Comparaison des configurations de GEM.....	179
Comparaison réanalyses-configurations.....	183
Hiver	186
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	186
Comparaison des configurations de GEM.....	187
Comparaison réanalyses-configurations.....	190
Printemps.....	192
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	192
Comparaison des configurations de GEM.....	194
Comparaison réanalyses-configurations.....	198
Été	199
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	199
Comparaison des configurations de GEM.....	201
Comparaison réanalyses-configurations.....	204

2.3.1.2 Tendances des moyennes annuelles des hauteurs du géopotential à 500 hPa ...	205
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP	205
Comparaison des configurations de GEM.....	207
Comparaison réanalyses-configurations.....	210
2.3.2 Variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa	212
2.3.2.1 Variances des moyennes saisonnières des hauteurs du géopotential à 500 hPa	212
Automne	212
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	212
Comparaison des configurations de GEM.....	213
Comparaison réanalyses-configurations.....	215
Hiver	217
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	217
Comparaison des configurations de GEM.....	218
Comparaison réanalyses-configurations.....	221
Printemps.....	223
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	223
Comparaison des configurations de GEM.....	224
Comparaison réanalyses-configurations.....	226
Été	227
Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP.....	227
Comparaison des configurations de GEM.....	228
Comparaison réanalyses-configurations.....	231

2.3.2.2	Variations des moyennes annuelles des hauteurs du géopotential à 500 hPa.....	232
	Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP	232
	Comparaison des configurations de GEM.....	233
	Comparaison réanalyses-configurations.....	235
CHAPITRE III		
	ANALYSE ET DISCUSSION	237
	Patrons atmosphériques, tendances et variabilité.....	237
	Tendances et variabilité de la SAT et de la SLP sur le bassin arctique.....	263
	Les effets de l'AO sur la glace de mer et les SAT observées	273
	Circulation atmosphérique, AO et vortex polaire.....	278
	CONCLUSION.....	286
	ANNEXES, NOTES ET RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIES.....	296
	Les grilles de type Arakawa-C	297
	Le schéma ISBA	300
	Assimilation des données, système d'assimilation et cycle d'assimilation	301
	Information générale sur l'analyse	303
	Carte des régions de l'Arctique.....	305
	Grilles des configurations de GEM (version 3.3.0).....	306
	Organisation des figures	309
	NOTES ET RÉFÉRENCES	310
	RÉFÉRENCES.....	315

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Température de surface moyenne de l'air projetée par cinq modèles climatiques globaux (sélectionné par l'ACIA) dans le cas du scénario d'émission B2 pour la période 2000-2100. Les lignes foncées correspondent à l'augmentation de la température moyenne globale projetée tandis que les lignes fines correspondent à la température arctique moyenne projetée (ACIA 2004).	3
Figure 2: Changements moyens de la SAT annuelle (gauche) et durant l'hiver (droite) projetée par cinq modèles climatiques (sélectionné par l'ACIA) dans le cas du scénario d'émission B2 pour la période 1990-2090 (ACIA 2004).	4
Figure 3: Augmentation moyenne future du niveau de la mer (cm) projetée par une suite de modèles climatiques globaux utilisant six scénarios d'émission de l'IPCC. Les barres à droite montrent la variabilité inter-modèle projetée pour un scénario particulier d'émission (ACIA 2004).	6
Figure 4: Tendances saisonnières de SAT (°C/décennie) en Arctique à partir des données IABP/POLES pour la période 1979–1997 (Rigor, Colony et Martin, 2000)	9
Figure 5: Tendances saisonnière de SAT (°C/année) en Arctique à partir des données AVHRR pour la période 1981–2000 (Comiso, 2003)	9
Figure 6: Émission anthropogénique de SO ₂ pour 1985 au nord de 30°N (AMAP, 1998, tiré de Benkovitz et al., 1995).....	12
Figure 7: Patron de circulation atmosphérique moyen vers l'Arctique pour les régions industrialisées de l'est des USA, de l'Europe et du sud-est asiatique et la position du front arctique en été et en hiver (AMAP, 2006)	12
Figure 8: Tendances de température de surface pour l'hiver à partir des données AVHRR pour la période 1981–2000. http://svs.gsfc.nasa.gov/search/Keyword/Arctic.html	14
Figure 9: Exemple de grille pour les différentes configurations du modèle canadien GEM: GEM-global (à gauche), GEM-LAM (au centre) et GEM-VAR (à droite).....	21
Figure 10 : Exemple de grille LAM. De l'extérieur vers l'intérieur : 1. La zone frontière ; 2. La zone tampon ; 3. Le domaine d'étude ou la région d'intérêt.....	27
Figure 11-A1: Exemple d'une maille dans un modèle à grille (The COMET program)	297

Figure 12-A2: Schéma de grille décalée dans laquelle le cadre rouge représente la grille des u, le cadre vert, la grille de calcul de v décalée d'un demi-pas d'espace et le cadre bleu, la grille de calcul des scalaires, entrelacée entre la grille des u et des v.....	298
Figure 13-A2: Exemple de grille utilisée dans le modèle. Celle-ci est divisée en n colonnes et m lignes. La valeur ζ représente une moyenne dans la région limitée par le volume de la maille. Les valeurs de u et v représentent les flux entrants et sortants sur les côtés de la maille et les ϕ , les coordonnées de la maille (ϕ_{\min} et ϕ_{\max} étant les extrémités du domaine).....	299
Figure 14-A5: Carte des régions de l'Arctique	305
Figure 15-A6: Configuration GEM-global (version 3.3.0).....	306
Figure 16-A6: Configuration GEM-VAR (version 3.3.0).....	307
Figure 17-A6: Configuration GEM-LAM (version 3.3.0)	308
Figure 18-A7: Organisation des figures.....	309

LISTE DES TABLEAUX DE FIGURES

Figure 19-A8 : Tendence des températures de surface de l'air à 2m ($^{\circ}\text{C an}^{-1}$)
Figure 20-A8 : Variance des températures de surface de l'air à 2m ($^{\circ}\text{C}^2$)
Figure 21-A8 : Tendence des pressions au niveau moyen de la mer (hPa an^{-1})
Figure 22-A8 : Variance des pressions au niveau moyen de la mer (hPa^2)
Figure 23-A8 : Tendence des hauteurs du géopotential à 500 hPa (m an^{-1})
Figure 24-A8 : Variance des hauteurs du géopotential à 500 hPa (m^2)

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Ensembles de données d'observations disponibles dans l'Arctique	39
---	----

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

1. AARI: Arctic and Antarctic Research Institute
2. ACIA : Arctic Climate Impact Assessment
3. AMAP: Arctic Monitoring and Assessment Programme
4. API : Année Polaire Internationale
5. ARPEGE : Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle
6. AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer
7. CFL : Conditions aux frontières latérales
8. CMC : Centre Météorologique Canadien
9. CFC: Chlorofluorocarbure
10. COADS : Comprehensive Ocean–Atmosphere Data Set
11. CRU: Climate Research Unit of East Anglia University
12. DAAC: Distributed Active Archive Center
13. DJF/MAM/JJA/SON : Décembre, janvier, février; Mars, avril, mai; Juin juillet, août; Septembre, octobre, novembre
14. EC : Environnement Canada
15. ECMWF: European Center for Medium–Range Weather Forecasts
16. EOS: Earth Observing System
17. ERA 40: Données de réanalyse d’observations météorologiques entre septembre 1957 et août 2002 produite par le « European Centre for Medium–Range Weather Forecasts»
18. ESCER : Étude et la simulation de climat à l’échelle régionale
19. GAC : Global Area Coverage
20. GEM : Modèle Global Environnemental Multi–échelle (Global Environmental Multiscale)
21. GEM–VAR : Modèle à résolution variable
22. GEM–LAM : Modèle à Aire Limité (Limited Area Model)
23. GIEC : Groupe d’Experts Intergouvernemental sur l’Évolution du Climat
24. HadISST: Sea Surface Temperature climatology and Sea Ice coverage dataset from 1870
25. IABP/POLES: International Arctic Buoy Program/ dérivé de NASA Earth Observing System project Polar Exchange at the Sea Surface
26. IFS: Integrated Forecasting System

27. IOEB: International Ocean Environment Buoy
28. IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (GIEC)
29. IR : Infrarouge
30. ISBA : Interactions between Soil–Biosphere–Atmosphere
31. MCG : Modèles de circulation générale
32. MP : Modèle pilote
33. MRCC : Modèle Régional du Climat
34. NAM : Northern Annular Mode
35. NAO : Northern Atlantic Oscillation
36. NCDC: National Climatic Data Center
37. NCEP/NCAR: National Center for Environmental Prediction/for Atmospheric Research
38. NOAA/OAR/ESRL PSD: National Oceanic and Atmospheric Administration/ / Physical Sciences Division
39. NOAA/NMC: National Oceanic and Atmospheric Administration/National Meteorological Center
40. NOAA–CIRES: National Oceanic and Atmospheric Administration–Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences
41. NSIDC: National Snow and Ice Data Center
42. OI: Optimal Interpolation
43. PDO : Pacific Decadal Oscillation
44. PNA : Patron Pacific–North American
45. RDES : Rétroaction déshydratation–effet de serre (DGF : Deshydratation Greenhouse Feedback)
46. SAT : Température de surface de l’air à 2m (surface air temperature)
47. SST : Température de surface de la mer (sea surface temperature)
48. SBL : Couche de surface stable (surface boundary layer)
49. SLP : Pression au niveau moyen de la mer (mean sea level pressure)
50. SHEBA: Surface Heat Budget in the Arctic
51. UQAM : Université du Québec à Montréal
52. USGS: United States Geological Survey
53. WP: patron de l’Ouest–Pacifique (west Pacific Pattern)
54. 3D–VAR/4D–VAR: Système d’assimilation variationnelle 3D–VAR/4D–VAR

RÉSUMÉ

Afin de pouvoir évaluer les impacts futurs des changements climatiques en Arctique, il faut bien simuler les tendances de ces changements. La comparaison des résultats des modèles climatiques avec les observations est donc capitale pour le développement de modèles climatiques fiables et pour la compréhension de leurs limitations lors des projections futures. Le problème est que seulement quelques modèles couplés sont en mesure de reproduire les tendances majeures de température de surface du 20^e siècle (3^e Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC-2001). En fait, avec l'augmentation des gaz à effet de serre, tous les modèles climatiques anticipent un maximum de réchauffement en Arctique durant la saison froide. Par contre, même si les observations au cours de la deuxième moitié du dernier siècle suggèrent une tendance au réchauffement en Arctique au cours du printemps, de l'été et de l'automne (Rigor, Colony et Martin, 2000), la région du centre de l'arctique ne permet pas de déterminer une tendance de température durant l'hiver et ce, même si les autres régions près du cercle polaire montre un réchauffement durant cette période (Rigor, Colony et Martin, 2000; Kahl et al., 1993). De plus, certaines observations pour la période 1980-2000 vont même jusqu'à montrer des tendances systématiques de refroidissement durant l'automne et l'hiver, non seulement à l'intérieur du cercle polaire arctique, mais également dans certaines régions du nord de l'Europe, de la Russie et du Canada (Comiso, 2003; Wang et al., 2003; Rigor, Colony et Martin, 2000; Hansen et al., 1999; Chapman et Walsh, 1993; Kahl et al., 1993).

La comparaison des différentes configurations du modèle canadien GEM avec les réanalyses ERA 40 et NCEP/NCAR dans la région arctique pour la période 1978-2002 dans le cadre de l'année polaire internationale (API) permet ainsi de vérifier si le traitement de la physique et de la dynamique dans le modèle

est adéquat pour représenter les principales tendances et les patrons moyens de la variabilité atmosphérique observés. Elle permet également de vérifier que les principaux processus reliés à la diminution de la neige, de la glace de mer et de l'albédo, sont bien représentés par le modèle.

L'étude des différentes configurations de GEM montre que celles-ci sont généralement incapables de reproduire les principaux patrons de tendances et de variabilité atmosphérique sur l'Arctique, en particulier la PNA, la NAO/AO et l'anticyclone de Sibérie. Ceci se traduit notamment par des différences relativement importantes d'une configuration à l'autre. Le fait que certaines différences persistent également entre les réanalyses NCEP et ERA 40 rend également plus difficile la comparaison et l'identification des principaux patrons et processus. En fait, il ressort à première vue que certaines configurations de GEM éprouvent plus de difficultés par rapport à d'autres pour simuler les tendances négatives de SLP sur le bassin arctique, les fortes tendances positives de SAT le long des côtes continentales au printemps et à l'automne ainsi que les fortes tendances positives de SAT sur l'Europe et l'est de l'océan Arctique. Il apparaît de plus que les configurations GEM-LAM surestiment de manière relativement importante les tendances et les variabilités de SLP et de GZ à 500 hPa, en particulier à l'automne et à l'hiver. Par contre, l'ensemble des configurations semblent généralement bien simuler les tendances et la variabilité observées durant l'été. Les configurations de GEM sont de plus en accord avec le fait que les variances les plus fortes au lieu durant l'hiver.

Mots clés : Arctique, modèle canadien GEM, configurations, tendances et variabilité, patrons atmosphériques, vortex polaire, la rétroaction de la vapeur d'eau, la rétroaction glace-albédo-température, la rétroaction déshydratation-effet de serre (RDES)

INTRODUCTION

L'année 2008 a été une année importante pour les grands débats sur les changements climatiques. La publication du dernier rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), au printemps 2008, est venue confirmer l'ampleur du réchauffement à l'échelle globale et appuyer les projections quant à ses conséquences catastrophiques sur tous les continents.

L'une des principales causes des changements climatiques est l'accroissement des gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère¹. Les émissions anthropogéniques de polluants ont tellement augmenté au cours des dernières décennies que la communauté scientifique a émis l'hypothèse que le réchauffement global observé serait possiblement relié à ces augmentations. L'importance de cette hypothèse et les pressions du monde scientifique et de la population ont été telles qu'elles ont forcé les gouvernements à réagir pour contrer l'augmentation des gaz à effet de serre, notamment, par le biais de différents protocoles tels, le Protocole d'Helsinki (1985), le Protocole de Montréal (1989), le protocole d'Oslo (1994) et finalement le Protocole de Kyoto (2005).

¹ Même si la vapeur d'eau est de loin le plus grand gaz à effet de serre, d'autres gaz, comme le gaz carbonique (CO₂), l'ozone (O₃), le méthane (CH₄) et les CFC, jouent aussi un rôle important dans le processus d'absorption du rayonnement infrarouge. L'absorption du rayonnement infrarouge par les gaz à effet de serre entraîne un réchauffement de la basse troposphère. Ceci se traduit par une augmentation de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère et donc, par une amplification du réchauffement initial. C'est ce qu'on appelle l'effet de la rétroaction de la vapeur d'eau.

En fait, le problème d'augmentation de la pollution atmosphérique était déjà à l'étude durant les années 1950–1960. Néanmoins, c'est seulement à partir des années 1970, que le monde scientifique commence réellement à s'intéresser aux effets de la pollution sur le climat. Par contre, les modèles de circulation générale (MCG) développés au début des années 1980, afin de simuler le climat à l'échelle globale, n'utilisaient initialement que des scénarios avec un léger taux d'augmentation de la concentration de CO₂. Il fallu attendre la création du GIEC en 1988 pour que le taux d'augmentation de la concentration des gaz carbonique soit standardisé et fixé à 1%/année (IPCC, 2001). En utilisant ce standard, tous les MCG en sont arrivés à simuler un accroissement de la température globale au cours de la période 1870–2000 (Jones et al., 2001) et un réchauffement global moyen de 1 à 3°C, par rapport à la température moyenne de la période 1961–1990, pour la période allant de 2000 à 2100 (FIGURE 1, ACIA 2004).

Au cours des années qui ont suivi, les chercheurs en sont venus aussi à s'intéresser au phénomène du réchauffement dans l'Arctique. Ils avaient constaté que les modèles climatiques y anticipaient, pour la période 1990–2090, un maximum de réchauffement pouvant aller jusqu'à 6°C annuellement et jusqu'à 12°C durant l'hiver (par exemple comme dans le cas du scénario d'émission B2 - FIGURE 2, ACIA-2004).

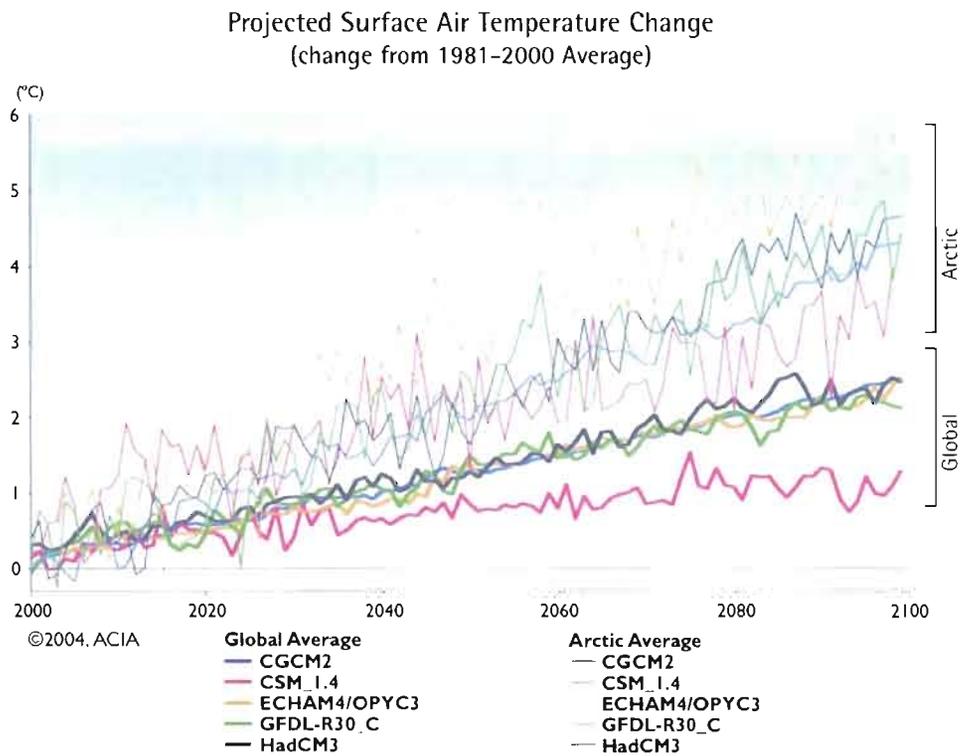


Figure 1 : Température de surface moyenne de l'air projetée par cinq modèles climatiques (sélectionné par l'ACIA) dans le cas du scénario d'émission B2 pour la période 2000-2100. Les lignes foncées correspondent à l'augmentation de la température moyenne globale projetée tandis que les lignes fines correspondent à la température arctique moyenne projetée (ACIA 2004).

Pour expliquer les variations de température dans l'Arctique, Overpeck et al. (1997) ont suggéré qu'avant 1920, les aérosols volcaniques et la radiation solaire étaient les principaux responsables des changements de température de surface de l'air (SAT). Par la suite, la forte et rapide augmentation de la concentration des gaz à effet de serre a fait en sorte que les polluants atmosphériques sont devenus les principaux responsables de la variabilité de la SAT en Arctique.

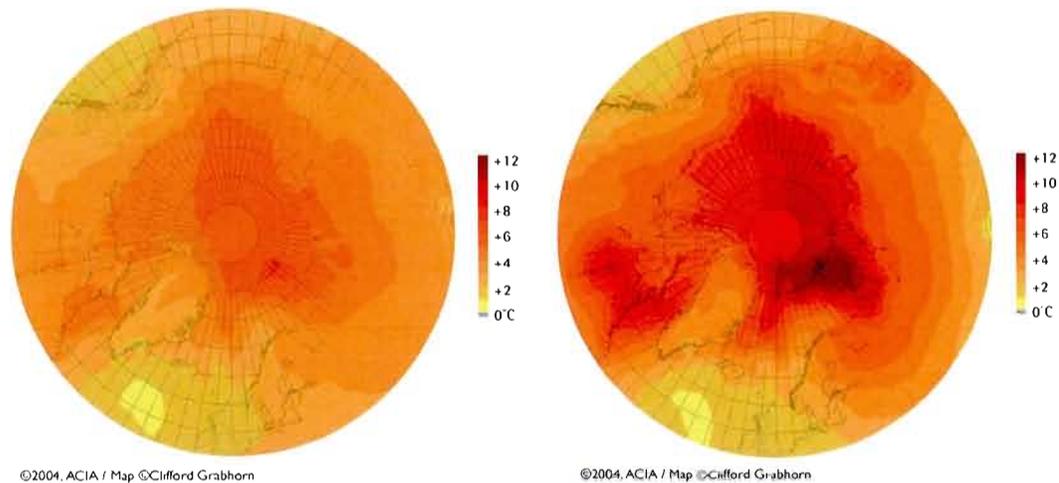


Figure 2 : Changements moyens de la SAT annuelle (gauche) et durant l'hiver (droite) projetée par cinq modèles climatiques globaux (sélectionné par l'ACIA) dans le cas du scénario d'émission B2 pour la période 1990-2090 (ACIA 2004).

Les changements de température créés par l'augmentation de la pollution atmosphérique ont plusieurs effets sur le climat arctique, comme par exemple sur la rétroaction glace-albédo-température au dessus de l'océan (Manabe et Stouffer, 1994; Cess et al., 1991). La fonte de la neige et de la glace produit une diminution de l'albédo de surface. Ceci a pour conséquence d'augmenter l'absorption du rayonnement solaire et donc de la température. Une fois la glace de mer fondue, ce processus agit en intensifiant les échanges de chaleur sensible entre l'océan et l'atmosphère. Autrement dit, la fonte des glaces contribue à augmenter la quantité de chaleur emmagasinée par l'océan durant l'été mais également celle qui est restituée à l'atmosphère à l'automne et au début de l'hiver. Ceci provoque alors une augmentation des températures en surface et donc une diminution encore plus importante de la couverture de neige et de glace.

Prochainement, la réduction de la couverture de glace de mer sera probablement le plus important effet direct des changements climatiques (ACIA-2004). À l'échelle planétaire, le niveau de la mer pourrait s'élever de 8 à 88 cm entre 1990 et 2100 (FIGURE 3, ACIA-2004). Selon différentes simulations, cette élévation pourrait se poursuivre et même s'accélérer au cours du siècle suivant (ACIA-2004). Dans les régions vulnérables, l'élévation du niveau de la mer forcera une migration des populations habitant en bordures des océans en plus d'avoir de nombreux effets biophysiques et socio-économiques.

Du point de vue atmosphérique, des changements spectaculaires se sont déjà produits en Arctique. Vers la fin des années 1980 et le début des années 1990, la pression au niveau moyen de la mer (SLP) a diminué et le tourbillon cyclonique des vents a augmenté jusqu'à des valeurs extrêmes jamais observées au cours des dernières décennies (Walsh, Chapman et Shy, 1996). Le nombre de cyclones pénétrant dans l'Arctique depuis le nord de l'Atlantique a aussi augmenté de manière importante (Serreze et al., 1997). En plus des changements atmosphériques, des changements au niveau de l'océan Arctique sont également observables. Parkinson et al. (1999) notent une réduction de l'extension de la glace de mer et une diminution de l'épaisseur de la glace dans le centre de l'Arctique (Rothrock et al., 1999). D'autres observations révèlent également une augmentation significative de la salinité de la surface de l'eau dans le bassin eurasien et une retraite de la

couche halocline froide arctique, résultant du réchauffement de l'océan (Steele et Boyd, 1998).

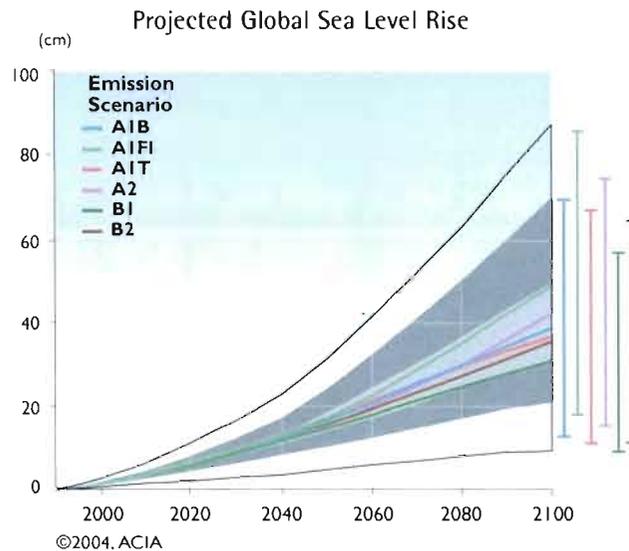


Figure 3 : Augmentation moyenne future du niveau de la mer (cm) projetée par une suite de modèles climatiques globaux utilisant six scénarios d'émission de l'IPCC. Les barres à droite montrent la variabilité inter-modèle projetée pour un scénario particulier d'émission (ACIA 2004).

Afin de pouvoir évaluer les impacts futurs des changements climatiques, il est donc important d'être en mesure de simuler avec précision les tendances de ces changements. La comparaison des résultats des modèles climatiques avec les observations est donc capitale pour le développement de modèles fiables et pour la compréhension de leurs limitations lors des projections vers le futur. Le problème est que seulement quelques modèles couplés sont en mesure de reproduire les tendances majeures de SAT du 20^e siècle (3^e Rapport du GIEC, IPCC-2001).

Pour l'Arctique, cette difficulté peut s'expliquer par un certain nombre de critères. L'Analyse et la validation des simulations sont difficiles à cause des incertitudes sur les observations. En effet, comme la quantité d'observations disponibles pour l'Arctique est assez faible et distribuées de manière non uniforme dans l'espace et le temps, les ensembles de données d'observation diffèrent souvent considérablement d'un à l'autre (ACIA, 2005; Liu et al., 2005; Wyser et Jones, 2005; Serreze et Hurst, 2000). La comparaison modèles-observations est donc particulièrement difficile. De plus, le climat arctique est caractérisé par des interactions non linéaires complexes entre l'atmosphère, les océans, les continents, la cryosphère et les écosystèmes, ce qui rend l'identification des phénomènes laborieuse (4^e Rapport du GIEC, IPCC-2007). La variabilité naturelle complique également de manière importante la détection et l'attribution des changements climatiques. En fait, c'est en Arctique que les modèles et les observations montrent le maximum de variabilité interannuelle (Raisanen, 2002). Finalement, les patrons naturels de variabilité atmosphérique, comme l'oscillation de l'Atlantique Nord (NAO), l'oscillation arctique (AO) (Thompson et Wallace, 1998; Hurrell, 1996), le Northern Annular Mode (NAM), (Thompson et Wallace, 2001, 2000, 1998) le patron Pacifique-Nord Amérique (PNA) (Semenov et Bengtsson, 2003; Wallace et Gutzler, 1981) et l'oscillation décennale du Pacifique (PDO) (Zhang et al., 1997), jouent aussi un rôle important sur le climat arctique en produisant des changements dans la vitesse et la direction des vents, les transports de chaleur et d'humidité, les températures, les précipitations,

l'intensité et le nombre de tempêtes (Hurrell et van Loon, 1997) et le transport des polluants. Par conséquent, malgré les recherches actuelles et la compréhension préliminaire des mécanismes responsables des récents changements observés, l'importance de ces critères conduit à un grand degré d'incertitude au niveau des tendances et de la variabilité observée.

Par exemple, alors que la grande majorité des modèles climatiques prédisent un maximum de réchauffement en Arctique au cours de la période froide (novembre à avril), des observations au sol et par satellite contredisent directement ces prédictions (Comiso, 2003; Wang et al., 2003; Rigor, Colony et Martin, 2000; Hansen et al., 1999; Chapman et Walsh, 1993; Kahl et al., 1993). Les tendances saisonnières de SAT obtenues par Rigor, Colony et Martin (2000) pour la période 1979–1997 à partir des données IABP/POLES ainsi que celles obtenues par Comiso (2003) pour la période 1981–2000 à partir des données AVHRR² montrent une tendance systématique de refroidissement à l'intérieur du cercle arctique durant l'hiver, plus particulièrement, du nord de la Russie jusque dans l'archipel canadien (FIGURES 4 et 5).

² Les tendances dont le niveau de confiance est de 95% se situent entre -0.21 and 1.21 pour l'automne, entre -1.57 et -0.21 pour l'hiver, entre -0.01 et 1.11 pour le printemps et entre 0.71 et 1.73°C décennie⁻¹ pour l'été. Les tendances qui sont significatives avec un niveau de confiance de 95% sont marquées avec de petits points blancs; les tendances qui sont significatives à 99% sont identifiées avec de petits points noirs.

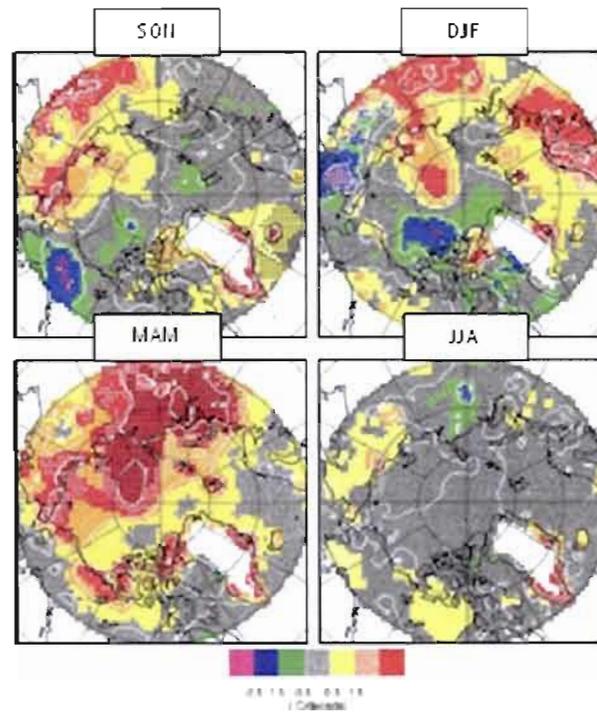


Figure 4 : Tendances saisonnières de SAT ($^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$) en Arctique à partir des données IABP/POLES pour la période 1979–1997 (Rigor, Colony et Martin, 2000)

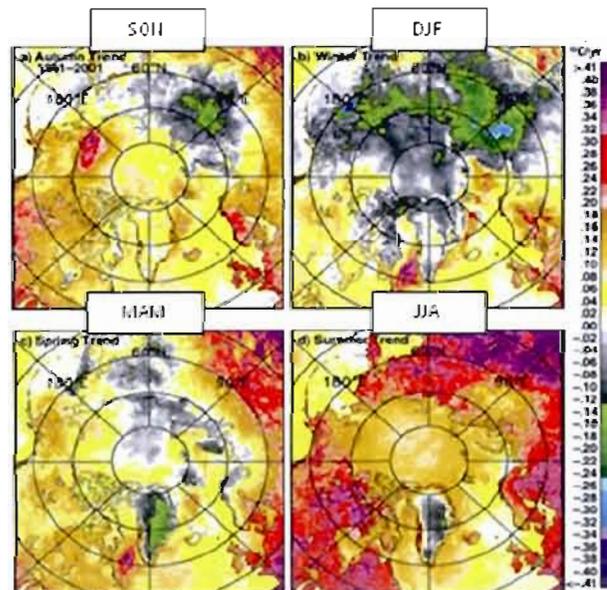


Figure 5 : Tendances saisonnière de SAT ($^{\circ}\text{C}/\text{année}$) en Arctique à partir des données AVHRR pour la période 1981–2000 (Comiso, 2003)

En fait, d'après les modèles climatiques, le réchauffement relié à la rétroaction glace-albédo-température et à l'augmentation des gaz à effet de serre doit se produire plus au nord durant l'été, notamment en bordure des continents et au dessus de l'océan arctique. Allant dans ce sens, les observations de AVHRR et de IABP/POLES montrent comme prévu une augmentation maximale de la température sur la côte continentale arctique et un réchauffement plus faible au dessus de l'Océan Arctique (FIGURE 5: JJA), ainsi qu'une réduction significative de la quantité de glace de mer associée au réchauffement de l'océan (Rigor et al., 2002). Inversement (toujours selon la rétroaction glace-albédo-température), le réchauffement durant l'hiver doit se produire dans les régions subarctiques puisque, plus au nord, la surface de la mer est recouverte de glace et le rayonnement solaire est absent (FIGURE 4: DJF). Pour les plus grandes latitudes, i.e. dans les régions où l'océan Arctique est recouvert de glace, les modèles climatiques suggèrent que le réchauffement provient plutôt des anomalies chaudes produites par la rétroaction du gradient thermique positif dans la verticale durant les périodes de fortes inversions de température. Cependant, selon Blanchet, Girard et Jones (2008), ce phénomène n'est pas observé. Par conséquent, les tendances de refroidissement observées durant l'hiver par AVHRR et de IABP/POLES (FIGURES 4 et 5: DJF) ne sont pas représentées par la majorité des modèles climatiques. Cette constatation permet donc de supposer que d'importants processus, absents des modèles climatiques, sont actifs en Arctique et dominants durant la période froide et

que l'omission de tels processus mène à des prévisions biaisées des tendances de SAT en Arctique durant l'hiver.

Une hypothèse, proposée par Blanchet et Girard (1994), permet d'expliquer la majeure partie des divergences entre les modèles climatiques et les observations pour les tendances de SAT. Blanchet et Girard (1994) supposent que l'un des processus absents est relié à l'acidification des aérosols par les sulfates et que celui-ci contribue à diminuer la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère. L'Arctique est en fait extrêmement sensible aux variations de la quantité de vapeur d'eau (à cause de ses très basses températures) parce que la diminution de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère arctique permet d'augmenter de manière importante la taille de la fenêtre atmosphérique, notamment dans l'infrarouge (IR). L'Arctique se retrouve ainsi dans des conditions de ciel clair, conditions favorables au refroidissement radiatif de la surface (particulièrement lorsque la $SAT < -50^{\circ}C$). Cet effet rétroactif entre le refroidissement radiatif et le taux de déshydratation porte le nom de Rétroaction Déshydratation-Effet de Serre (RDES - Deshydratation Greenhouse Feedback - DGF).

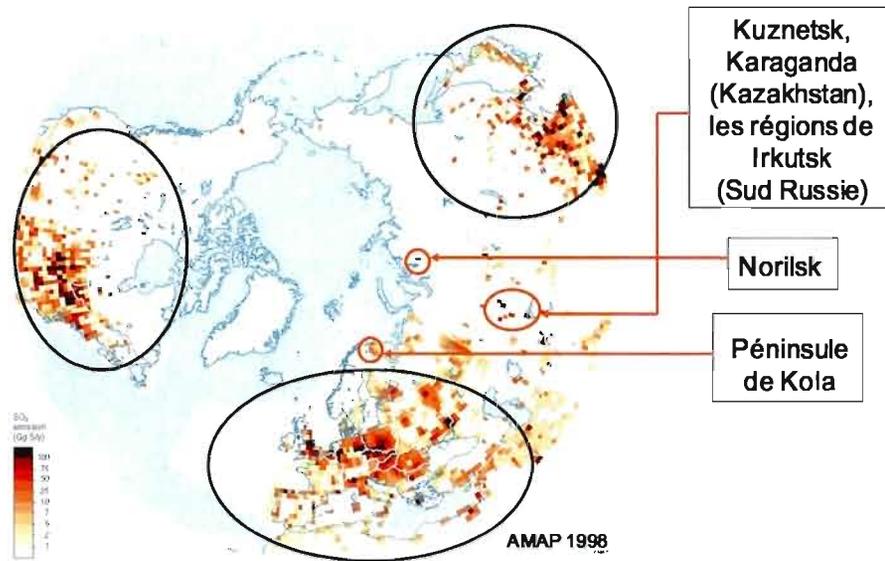


Figure 6 : Émission anthropogénique de SO_2 pour 1985 au nord de 30°N (AMAP, 1998, tiré de Benkovitz et al., 1995)

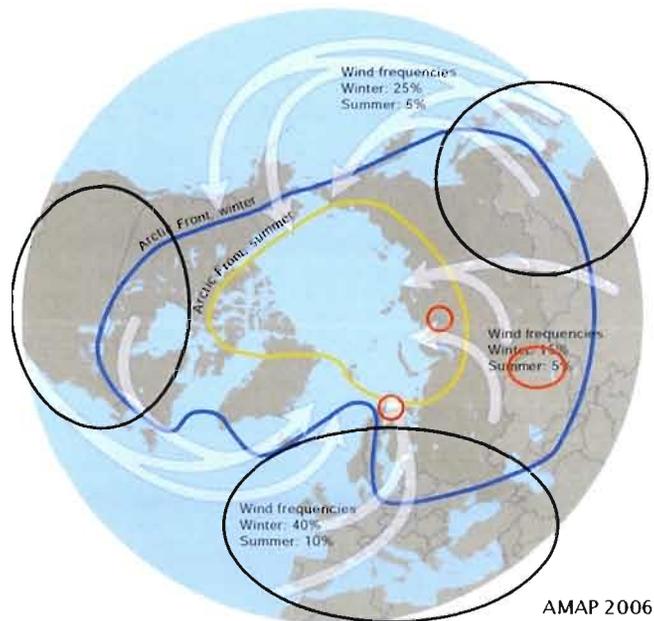


Figure 7 : Patron de circulation atmosphérique moyen vers l'Arctique pour les régions industrialisées de l'est des USA, de l'Europe et du sud-est asiatique et la position du front arctique en été et en hiver (AMAP, 2006)

En fait, toujours selon Blanchet et Girard (1994), ce processus peut s'étendre à tout l'Arctique et avoir un effet potentiellement important sur le climat arctique, la génération de tempêtes aux latitudes moyennes et la circulation atmosphérique globale. Selon leur hypothèse, les aérosols acides produits principalement dans les régions urbaines et industrielles d'Asie, de Russie et d'Europe (FIGURE 6, AMAP 1998) sont emprisonnés dans la couche de surface stable (SBL) et transportés vers le centre de l'Arctique avant d'atteindre l'archipel canadien et l'Alaska (FIGURE 7, AMAP 1998). Lorsqu'ils se retrouvent sous des conditions polaires, les aérosols acides contribuent à la production de masses d'air arctiques très froides de sorte que celles-ci peuvent facilement recouvrir d'immenses régions de l'Arctique.

Selon Blanchet et al. (2008), l'effet de ce patron de circulation apparaît tellement persistant qu'il est possible de l'identifier dans l'image des tendances de température produite pour l'hiver à partir des observations satellitaires AVHRR pour la période 1981-2000 (FIGURE 8). Dans cet image, cet effet apparaît entre autre plus fort au dessus des surfaces terrestres (du au manque de sources de chaleur et de l'effet d'isolant de la neige) contrairement aux régions marines, où la surface est recouverte par la glace de mer et où de petites quantités de chaleur provenant de l'océan diminuent l'effet de refroidissement.

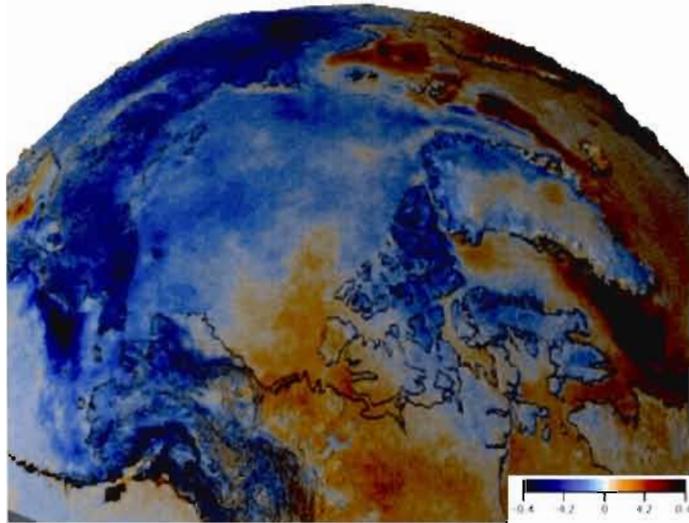


Figure 8 : Tendances de température de surface pour l'hiver à partir des données AVHRR pour la période 1981–2000.
<http://svs.gsfc.nasa.gov/search/Keyword/Arctic.html>

OBJECTIFS

Compte tenu du fait que les modèles climatiques éprouvent de la difficulté à représenter les principaux patrons de tendances et de variabilité, l'objectif principal de ce projet, dans le cadre de l'Année Polaire Internationale (API), est donc de vérifier si les différentes configurations de GEM sont en mesure de représenter les patrons moyens de tendances et de variabilité atmosphérique en Arctique tels que ceux observés dans les réanalyses NCEP et ERA 40.

Pour atteindre cet objectif dans le cadre du projet de recherche, nous avons donc comparé les simulations des différentes configurations du modèle GEM avec les réanalyses ERA 40 et NCEP/NCAR pour la période 1978–2002 dans la région arctique. Pour la comparaison, nous nous sommes concentrés principalement sur la température de surface de l'air à 2m (SAT), la pression au niveau moyen de la mer (SLP) et les hauteurs du géopotential à 500 hPa (GZ). Ceci nous permet entre autre :

- de tester le modèle GEM à différente résolution et selon différentes configurations
- d'analyser sur une base saisonnière et annuelle la structure des tendances et des anomalies
- d'évaluer les biais systématiques du model GEM

- d'extraire les informations existantes, particulièrement à propos des différents patrons de circulation
- de vérifier si le traitement de la physique dans le modèle est adéquat pour représenter les principales tendances et les patrons moyens de la variabilité atmosphérique observée
- d'identifier les variations du climat en fonction de la configuration de la grille

Dans la première partie, nous présenterons les différentes configurations du modèle GEM et traiterons de leurs principales différences. Nous parlerons ensuite des différents ensembles de données d'observation, notamment des réanalyses utilisées pour la comparaison. Nous aborderons notamment le problème du manque de stations d'observations dans l'Arctique et les problèmes de mesures.

Dans la deuxième partie, nous nous concentrerons sur la comparaison du modèle GEM et des réanalyses ERA 40 et NCEP/NCAR dans la région arctique pour la période 1978–2002. Nous analyserons les tendances et la variabilité des moyennes saisonnières et annuelles de la température de surface de l'air à 2m, de la pression au niveau moyen de la mer et des hauteurs du géopotential à 500 hPa. Ainsi, nous débuterons par une comparaison des réanalyses. Nous poursuivrons avec une analyse des différences entre les

configurations de GEM et finalement, nous évaluerons les biais systématiques du modèle GEM par rapport aux réanalyses.

Dans la troisième et dernière partie, nous discuterons des différents patrons atmosphériques présents sur le bassin arctique et tenterons de vérifier si les configurations de GEM sont en mesure de représenter de tels patrons. Nous parlerons ensuite des tendances de SAT, des tendances de SLP ainsi que des processus qui en sont responsables. De plus, tout au long de la discussion, nous tenterons d'évaluer si le traitement de la physique dans les différentes configurations du modèle est efficace pour représenter les principales tendances et les patrons moyens de la variabilité atmosphérique observés. Nous discuterons aussi des effets de l'oscillation arctique (AO) sur la glace de mer et les températures de surface de l'air (SAT). Finalement, nous terminerons la discussion en parlant du lien entre les tendances de pression au niveau moyen de la mer (SLP), de l'AO et du vortex polaire.

En conclusion, nous présenterons un bref résumé des résultats et traiterons des objectifs futurs du modèle GEM

CHAPITRE I

CHAPITRE I

MODÈLE CANADIEN GEM ET ENSEMBLES D'OBSERVATIONS

Dans cette section, nous présenterons les configurations de GEM (Global Environmental Multi-échelle) (Côté et al., 1998a) utilisées dans cette étude et leurs principales différences³. Nous donnerons également des détails sur les ensembles de données d'observations disponibles actuellement pour l'Arctique et les réanalyses utilisées pour la comparaison. Pour terminer, nous discuterons de divers problèmes liés au manque de stations d'observation et des problèmes de mesure.

³ La théorie présentée ici se veut plus ou moins une synthèse des connaissances du modèle GEM, des différents schémas physiques/micro-physiques pouvant être utilisé et des observations rapportées à propos des différentes configurations. Le modèle GEM étant en constant développement, il est difficile de maintenir cette synthèse à jour.

1.1 Modèle canadien GEM

Pour l'étude des phénomènes d'échelle globale tels, la modélisation des changements climatiques, le transport des polluants sur de grandes distances et les prévisions météorologiques à longs termes (mensuelles, saisonnières et plus), le choix d'une grille globale de résolution uniforme est le plus approprié (Côté et al., 1998). Par contre, pour des phénomènes de plus petites échelles et de plus courte durée, il est préférable d'utiliser une grille horizontale à résolution variable (VAR) ou une grille régionale (LAM) (Côté et al., 1998) parce que la résolution y est supérieure.

Pour pouvoir s'adapter à toutes ces situations, les chercheurs du Centre Météorologique du Canada (CMC) ont comme objectif principal le développement d'un modèle global simple, efficace et pouvant être reconfiguré à chaque simulation pour fonctionner à une résolution constante ou à une résolution variable. L'acronyme bilingue GEM représente ainsi l'ensemble des modèles construit autour de ce système. En anglais, le modèle GEM est désigné comme « the Global Environmental Multiscale model » tandis qu'en français, il réfère au « modèle Global Environnemental Multi-échelle » (Côté et al., 1998a). Le modèle canadien GEM est donc un modèle à points de grille variables - multi-échelle - dont des versions globales et régionales sont déjà utilisées par Environnement Canada (EC) dans le cadre des prévisions à courts et moyens termes (Zadra et al., 2008).

Ainsi, pour pouvoir fonctionner aux différentes échelles et étudier les phénomènes atmosphériques qui leur sont reliés, plusieurs configurations de grille sont actuellement offertes avec le modèle canadien GEM. Celui-ci comprend notamment une version globale à résolution uniforme, GEM-global, une version à résolution variable, GEM-VAR (une grille globale comportant une fenêtre haute résolution divisée uniformément au dessus de la région d'intérêt et un maillage dont la résolution diminue graduellement à mesure qu'il s'éloigne de la fenêtre) et une version régionale à aire limitée, GEM-LAM (Limited Area Model – Modèle à Aire Limitée). La version GEM-LAM est essentiellement un sous-ensemble de GEM de sorte que son noyau d'équations est identique à celui de la configuration GEM-global. La seule différence vient du fait que l'étendue et la résolution du domaine horizontal sont définies par l'utilisateur, selon l'application envisagée (Côté et al., 1998). Les différentes configurations de grille utilisées par GEM sont présentées à la **FIGURE 9**.

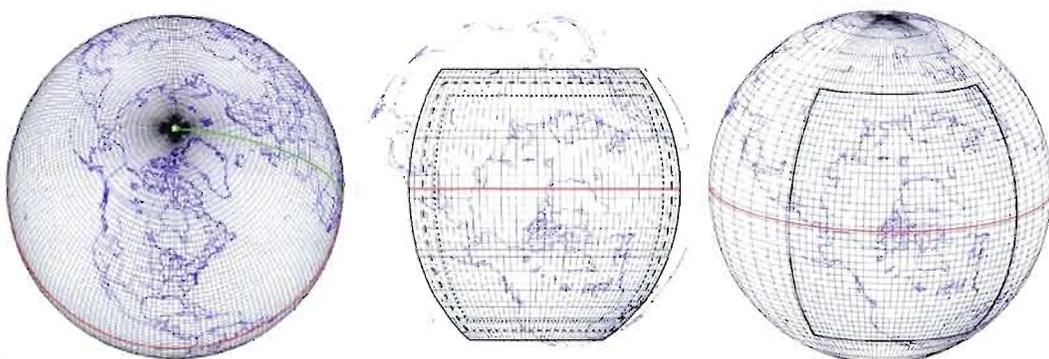


Figure 9 : Exemple de grille pour les différentes configurations de grille du modèle canadien GEM : GEM-global (à gauche), GEM-LAM (au centre) et GEM-VAR (à droite)

Le modèle GEM est un modèle à éléments finis, utilisant un traitement semi-lagrangien pour l'advection (afin de tenir compte des limites de stabilité rencontrées dans le schéma eulérien du à la convergence des méridiens et des forts courants jets), un traitement temporel implicite/semi-implicite pour les termes non-advectifs (responsables des oscillations gravitationnelles et acoustiques les plus rapides), une grille Arakawa-C⁴ à l'horizontal (latitudinale/longitudinale) basée sur la formulation de point de grille des méthodes de Galerkin⁵, et une grille verticale non-décalée. Pour la configuration GEM-global (GEM-LAM) version 3.3.0, cette grille verticale comprend 60 (53) niveaux espacés irrégulièrement de la surface à 2 hPa (10 hPa) avec une plus grande résolution dans la couche de surface. De plus, la grille horizontale (de résolution uniforme ou variable) peut être tournée selon l'angle désiré et le maillage vertical ajusté de manière variable.

La dynamique⁶ du modèle GEM est formulée en termes des équations hydrostatiques primitives⁷ où les coordonnées verticales de pression suivent

⁴ Voir ANNEXE I : Les grilles de type Arakawa

⁵ En mathématiques, dans le domaine de l'analyse numérique, les méthodes de Galerkin sont une classe de méthodes permettant de transformer un problème continu (par exemple une équation différentielle) en un problème discret.

⁶ La partie dynamique du modèle décrit l'état général d'un fluide : l'atmosphère. Les calculs de la partie dynamique dépendent :

- des caractéristiques de la géométrie horizontale choisie pour le modèle (globale, variable, limité)
- des coordonnées verticales choisies
- des caractéristiques du relief résolues par la grille du modèle
- des méthodes numériques (points de grille ou spectral, explicite ou semi-implicite, eulérien ou semi-lagrangien)
- des variables retenues pour décrire l'état du modèle (variables d'état)

la topographie. Par contre, le modèle a la possibilité de fonctionner aussi en mode non-hydrostatique (58 niveaux verticaux – allant jusqu'à 10 hPa – représentant les différents niveaux hybrides de pression sigma). Une description plus complète du mode hydrostatique est disponible dans Côté et al. (1998a/b) et dans Yeh et al. (2002) pour la version non-hydrostatique.

Le modèle GEM utilise aussi au besoin un système de modélisation de la surface basé sur une approche mosaïque et contenant quatre types de surfaces : les surfaces couvertes de végétation (modèle avec un schéma ISBA⁸ représentant les interactions Terre-Biosphère-Atmosphère (Bélair et al., 2003a, 2003b) et qui contient notamment des données climatologiques de température de surface de la mer (SST), de températures et d'humidité du sol, d'épaisseur et de fraction de glace, d'épaisseur de neige et d'albédo de surface), les surfaces de glace de mer, les surfaces d'eaux libres et les surfaces couvertes par les glaciers et la banquise (incluant au besoin un modèle dynamique/thermodynamique pour la glace de mer et la couverture de neige) (Mailhot et al, 2005).

⁷ Les équations prognostiques sont résolues pour les composantes horizontales du vent, la température, l'humidité spécifique, le contenu en eau liquide et la pression de surface. Les modèles hydrostatiques, lesquels supposent un équilibre entre le poids de l'atmosphère et la force du gradient vertical de pression (sans accélération verticale – valable seulement pour les systèmes d'échelle synoptique et pour certains phénomènes de méso-échelle), utilisent l'équation de continuité pour calculer le mouvement vertical. Ils se servent de paramétrisations statiques pour exprimer les changements causés par les processus non-hydrostatique. Les modèles non-hydrostatiques utilisent plutôt une combinaison de divergence horizontale et de poussée pour déterminer les mouvements verticaux et les accélérations verticales.

⁸ Développé originellement par Noilhan et Planton (1989); voir ANNEXE 2: Le schéma ISBA

Le modèle GEM comprend aussi un système d'assimilation de données 4D-VAR et une analyse objective continue en 3D-VAR (Gauthier et al., 1996). Pour compléter le tout, le modèle GEM est muni d'une paramétrisation physique⁹ complète qui peut être ajustée selon la configuration et qui inclue notamment:

- un schéma de radiation solaire et terrestre¹⁰, qui comprend l'interaction de la radiation solaire et infrarouge avec la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, l'ozone et les nuages (Li et Barker, 2005)
- le calcul prognostique de la température de surface terrestre avec la méthode forçage-restitution (Deardorff, 1978)

⁹ La physique d'un modèle cherche à évaluer l'effet des processus qui jouent un rôle significatif dans l'évolution du fluide atmosphérique mais qui ne sont pas pris en compte dans la partie dynamique. Autrement dit, l'ensemble des équations doit essayer de tenir compte des effets des processus qui ne peuvent être directement prévus par le modèle, soit à cause de la complexité des processus à simuler, soit parce qu'ils interviennent à une échelle trop petite pour pouvoir être inclus directement dans le modèle. Les effets des processus de la physique sur les variables d'état de la dynamique du modèle sont calculés dans des paramétrisations physiques (petit modèle souvent très simplifiés qui permettent d'évaluer l'effet moyen sur une maille des processus non résolu explicitement par la dynamique). L'ensemble des processus à paramétrer varie en fonction des objectifs de la prévision numérique (prévision climatique, modélisation de processus de fine échelle, prévision opérationnelle) et des choix faits dans la dynamique du modèle. La physique traite les échanges entre l'atmosphère et les autres composantes du système climatique (sol, océan, biosphère cryosphère). C'est aussi dans la physique que sont calculées les modifications des champs atmosphériques dues au bilan radiatif et qu'est évaluée l'influence des changements d'état de l'eau sur les particules du fluide atmosphérique. La physique du modèle permet ainsi de tenir compte de l'effet moyen sur une maille des processus (d'une échelle inférieure- sous maille – ou non) non résolus par la dynamique. La physique du modèle permet en particulier de calculer :

- les termes d'échange de chaleur
- la chaleur latente libérée ou utilisée dans les changements de phase de l'eau
- l'effet moyen des flux turbulents associés aux processus non décrit à l'échelle de la maille

¹⁰ Des schémas de radiation aux courtes longueurs d'onde de Fouquart et Bonnel (1980) et aux longues longueurs d'onde de Garand et Mailhot (1990) sont utilisés pour la troposphère et la basse stratosphère (en dessous de 30 hPa) tandis qu'un schéma de radiation aux longues longueurs d'onde de Fomichev et Blanchet (1995) est utilisé pour la stratosphère au dessus de 30 hPa.

- la turbulence dans la couche limite planétaire, basée sur la stabilité et l'énergie cinétique turbulente via la diffusion verticale et les coefficients de diffusion (soit un processus de surface, de couche limite et de diffusion verticale) (Benoit, Côté et Mailhot, 1989)
- une couche de surface, basée sur la théorie de similitude Monin-Obukov (Monin et Obukov, 1954)
- un schéma de convection peu profonde (sans précipitation)
- un schéma de convection profonde¹¹ de type Kuo (système global de prévision) (Bélair et al., 2005; Kong et Yau, 1997; Kuo, 1974), de type Fritsch-Chappell (système régional de prévision) ou de type Kain-Kritsch (Kain et Fritsch, 1990) selon le cas
- un schéma de convection sèche de Manabe (Manabe et al., 1965)
- un schéma de condensation grande échelle de type Sundqvist pour la précipitation stratiforme (Sundqvist, Berge et Kristjansson, 1989)
- un schéma orographique d'échelle sous grille contenant les coefficients d'entraînement des ondes gravitationnelles¹² (McFarlane, 1987)
- un schéma de blocage orographique de bas niveaux¹³ (Zadra et al., 2003 ; Lott et Miller, 1997)

¹¹ En anglais «deep and shallow moist convective processes»

¹² En anglais «subgrid-scale orographic gravity-wave drag»

¹³ En anglais «low-level orographic blocking»

1.1.1 Les différentes configurations de grille de GEM : description, avantages et inconvénients (résumé de Côté et al., 1998)

1.1.1.1 Modèle à aire limitée

Les modèles à aire limitée (LAM) sont composés de trois régions : une zone frontière, une zone tampon et un domaine d'étude (FIGURE 10). Lorsqu'un modèle à aire limitée comme GEM-LAM est intégré au dessus d'une région spécifique, une prévision de résolution inférieure, produite par un modèle pilote (MP), est utilisée pour spécifier les conditions dans la zone frontière (la majorité des modèle à aire limitée définissent généralement ces conditions en fonction de l'ensemble d'équations employées : primitive hydrostatique, Euler non-hydrostatique ou anélastique). La principale difficulté de cette approche provient de la spécification des conditions aux frontières latérales (CFL). Cette difficulté est essentiellement reliée au problème mathématique fondamental de la « well-posedness » (problème bien posé¹⁴) (Oligier et Sundström, 1978, cités par Côté et al., 1998). En fait, il est théoriquement possible d'obtenir un problème bien défini pour les équations d'Euler (avec une spécification ponctuelle des conditions frontières aux différents points de grille) mais pas pour les équations hydrostatiques primitives. En l'absence de mécanismes de contrôle, un problème mathématique qui n'est pas bien posé (mal défini) produit un bruit, au niveau de la plus petite échelle résolue,

¹⁴ Un problème mathématique bien posé devrait avoir les propriétés suivantes :

1. Une solution existe
2. La solution est unique
3. La solution dépend de façon continue des données

pouvant mener à de l'instabilité numérique (Baumhefner et Perkey, 1982, cités par Côté et al., 1998). Cette instabilité apparaît souvent dans les écoulements, près des frontières, avant de se propager vers le centre du domaine (Vichnevetsky, 1987; Robert et Yakimiw, 1986; Arakawa, 1984; Miyakoda et Rosati, 1977, cités par Côté et al., 1998).

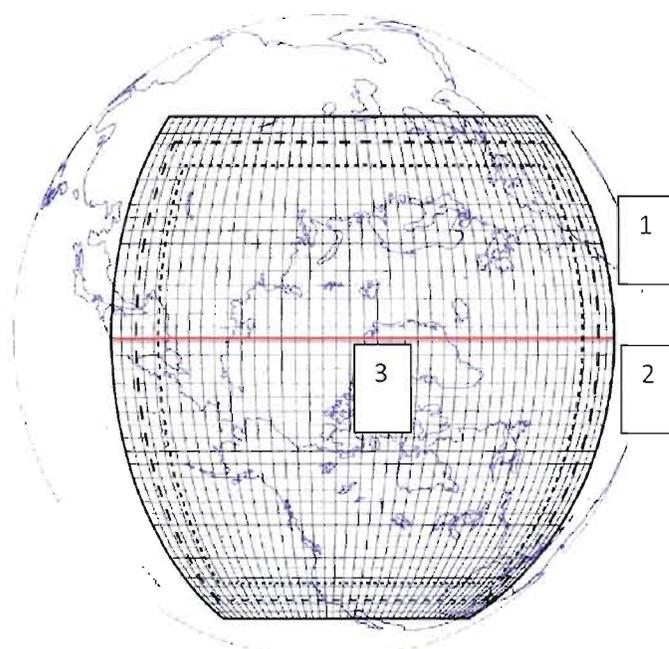


Figure 10 : Exemple de grille LAM. De l'extérieur vers l'intérieur : 1. La zone frontière ; 2. La zone tampon ; 3. Le domaine d'étude ou la région d'intérêt

Pour contrer cette instabilité et protéger l'intégrité des prévisions à l'intérieur du domaine d'intérêt, il est donc nécessaire d'intégrer le LAM sur une région de résolution uniforme et de dimension supérieure au domaine d'intérêt fixé. Autrement dit, il faut introduire une région d'ajustement, appelée zone tampon, entre le domaine d'étude et la zone frontière

(Yakimiw et Robert, 1990; Robert et Yakimiw, 1986, Davis, 1976, cités par Côté et al., 1998). L'utilisation d'une région tampon autour de la région d'intérêt empêche les erreurs (solutions d'équations partiellement résolues dans la zone frontière) provenant du MP de se propager à la région d'intérêt au cours de la période d'intégration et de diminuer ainsi la taille du domaine où les prévisions sont fiables. L'hypothèse sous-jacente est que plus l'on s'éloigne des frontières latérales, plus les perturbations générées par le MP deviennent réalistes et précises. La taille du domaine d'intégration utilisée, soit la zone frontière, la zone tampon et la région d'intérêt, dépend par conséquent de la période d'intégration, de la taille de la région d'intérêt et des conditions météorologiques (Staniforth, 1997, cité par Côté et al., 1998).

À l'intérieur de la zone tampon, des techniques de mélange et de diffusion (explicite ou implicite) sont appliquées afin d'améliorer la continuité des conditions entre la zone frontière et la région d'intérêt. La technique de mélange est une moyenne pondérée des données provenant du modèle de plus basse résolution (le MP) et des données provenant du modèle de prévision à haute résolution (le LAM) à l'intérieure de la zone frontière et qui n'affecte pas la question du problème bien posé (Oligier et Sundström, 1978, cités par Côté et al., 1998). Malheureusement, cette technique peut parfois déstabiliser l'écoulement dynamique entrant dans le domaine (Staniforth, 1997, cité par Côté et al., 1998). Il a cependant été démontré que cette technique est acceptable et minimise le problème des CFL (Robert et

Yakimiw, 1986, cité par Côté et al., 1998). La technique de diffusion peut, quant à elle, donner naissance à de fausses conditions frontières qui peuvent, à leur tour, se propager et interagir avec les écoulements d'une autre région (Oliger et Sundström, 1978, cités par Côté et al., 1998). Par contre, la technique de diffusion permet de réduire les problèmes de bruit, à condition d'effectuer davantage de lissage dans l'écoulement entrant dans le domaine et donc en réduisant la précision de celui-ci.

Il existe également un autre type de problème relié à la zone frontière. Si le MP produit de mauvaises prévisions dans la zone frontière (par exemple en représentant de manière inadéquate les événements précurseurs d'un développement explosif), suite à une déficience du MP ou à de mauvaises conditions initiales utilisées pour la simulation, alors le LAM utilisera ces mauvaises conditions frontières et produira donc (par hypothèse) des erreurs systématiques à l'intérieur du domaine d'intérêt (Vukicevic et Errico 1990, cités par Côté et al., 1998). Par conséquent, le système d'acquisition de données¹⁵ du LAM peut être aussi significativement affecté (même jusqu'au centre de la région) lorsque les conditions frontières utilisées dans le cycle d'assimilation sont imprécises. En fait, selon Alpert et al. (1996), dépendamment de la situation météorologique qui prévôt, l'erreur engendré par les CFL peut avoir un impact potentiellement important sur l'erreur totale de la simulation, en particulier à la méso-échelle.

¹⁵ Voir ANNEXE 3: Assimilation des données, système d'assimilation, cycle d'assimilation

De plus, dans la majorité des LAM, le pilotage s'effectue de manière unidirectionnelle. Cela implique que les champs qui se développent à l'intérieur du LAM ne viendront en aucun temps influencer le comportement des CFL dictée par le MP. Il n'existe donc aucune rétroaction entre l'information régionale et globale. Cette approche est donc considérée comme non interactive.

En ce sens, dans leur études, Jones et al., (1997 et 1995) ont décelé certaines incohérences entre le MP et le LAM. Plus spécifiquement, ils montrèrent que, pour certaines simulations réalisées sur un domaine relativement grand, l'écoulement moyen et la variabilité peuvent diverger entre les deux types de modèle. Pour remédier à ces problèmes, ils suggérèrent brièvement trois solutions : (i) utiliser des LAM de plus petites dimensions de manière à mieux contrôler la circulation à grande échelle à l'intérieur du LAM et ainsi, disposer d'une meilleure connexion entre le MP (modèle global) et le LAM; (ii) introduire une technique de pilotage bidirectionnelle qui se discerne par une dépendance du MP vis-à-vis du LAM et inversement (Lorentz et Jacob, 2005); et (iii) utiliser un modèle global avec une résolution variable.

Pour compenser les problèmes potentiels d'interactions entre le MP et le LAM, Von Storch, Langenberg et Feser (2000) ont développé une technique de pilotage des grandes échelles, appelée aussi pilotage spectral. Cette

technique est utilisée dans les LAM dans le but de forcer ces derniers à suivre le plus fidèlement possible le MP. Cette méthode ne s'applique cependant que lorsque la taille du modèle est assez grande.

Il est à mentionner que tous les LAM ne bénéficient pas d'une zone de pilotage. Le Modèle Régional du Climat (MRCC; Caya et Laprise, 1999), par exemple, utilise un seul point pilote sur la frontière du domaine. Ce modèle emploie un algorithme numérique semi-lagrangien particulier pour résoudre les équations de transport sur la totalité de la grille, incluant la zone de pilotage (Côté et al., 1998).

Malgré les différents problèmes reliés à la configuration de grille et à la question du problème bien posé, les LAM offrent plusieurs avantages quand la résolution est plus élevée: une meilleure représentation des conditions locales (orographie, végétation, etc.), une meilleure représentation des processus physiques (microphysique des nuages, rayonnement, etc.) et une meilleure organisation dynamique des structures dans les systèmes météorologiques et ce, pour toutes les échelles de grandeur (de synoptique à la méso-échelle) (Côté et al., 1998).

1.1.1.2 Modèle à aire limitée vs modèle à résolution variable

Mais, est-il préférable d'utiliser un LAM (en termes de coûts) plutôt qu'un modèle à résolution variable ? Il est difficile de répondre à cette question de manière générale puisque selon Côté et al. (1998), la réponse dépend de plusieurs facteurs tels, la taille et la localisation géographique de la région d'intérêt, la période d'intégration et la durée de la simulation, la résolution, les conditions météorologiques initiales, la différence de résolution entre le LAM et le MP, la précision du MP et les techniques d'ajustement utilisées pour calculer les paramètres sur les points de la grille situés entre le MP et le LAM (Côté et al., 1998).

En fait, si on suppose que les méthodes de calculs utilisées dans le LAM et dans le modèle à résolution variable sont similaires, les coûts en termes de temps de calculs sont pratiquement identiques. Le problème est que les grilles variables deviennent rapidement coûteuses en termes de temps lorsque la résolution est augmentée au dessus d'une région donnée (Fox-Rabinovitz et al., 2006). Néanmoins, les grilles à résolution variable ont l'avantage de permettre l'interaction des écoulements entre l'intérieur et l'extérieur de la région d'intérêt de sorte que le système se comporte comme un seul système (Fox-Rabinovitz et al., 2006; Côté et al., 1998). Dans les LAM, les coûts en termes de temps de calcul proviennent de la région utilisée comme zone tampon. La taille de la zone tampon dépend fortement de la précision des informations fournies par le MP à la frontière de cette

région et des méthodes numériques d'ajustement utilisées. Si les informations fournies par le MP sont justes et cohérentes avec celles du LAM et que les méthodes numériques d'ajustement respectent bien cette cohérence, alors la région tampon sera relativement petite et les coûts de calculs relativement faibles. Par contre, en cas contraire, la région tampon devra être plus grande et donc les coûts plus importants (Côté et al., 1998).

Il pourrait donc être préférable d'utiliser le modèle à résolution variable plutôt que le LAM. Premièrement parce que l'approche utilisée par le modèle global à résolution variable est mathématiquement bien posé. Autrement dit, le modèle étant global, le problème des CFL du domaine, nécessaire à la résolution des équations, ne se pose pas de sorte que le système est mathématiquement bien défini pour tous les types d'écoulement (Fox-Rabinovitz et al., 2006). En plus d'être mathématiquement bien défini, la méthode globale possède aussi l'avantage de requérir uniquement une analyse au temps initial¹⁶ puisque qu'aucune condition latérale n'est requise (Fox-Rabinovitz et al., 2006). Elle produit donc des résultats plus robustes pour un spectre plus large de situations que le modèle à aire limitée (Côté et al., 1998). En deuxième lieu, parce que la méthode de résolution variable

¹⁶ L'état initial de l'atmosphère est calculé à partir de l'ensemble des observations disponibles et d'une prévision précédente valable pour cet instant (l'ébauche – apporte des informations dans les zones où il n'y a pas d'observations) dans un processus appelé assimilation des données. Dans un système d'assimilation variationnelle 3D-VAR, l'analyse est déterminée comme la solution d'un problème de minimisation entre l'analyse et l'ébauche et l'ébauche et l'observation sélectionnée. Le principe de base de l'assimilation variationnelle 4D-VAR est le même que celui du 3D-VAR mais en ajoutant le temps comme dimension de sorte que le processus de minimalisation se fait sur une fenêtre temporelle de quelques heures qui permet ainsi d'assimiler les observations asynchrones.

n'est pas affectée par la dégradation des prévisions aux conditions frontières comme pourrait l'être le LAM (Côté et al., 1998). Finalement, parce qu'il n'existe pas de taille préétablie pour la zone tampon (Côté et al., 1998).

La difficulté avec le modèle à résolution variable est qu'il existe aussi des problèmes potentiellement importants. Premièrement, il est possible que le modèle à résolution variable produise une dérive climatique (Côté et al., 1998). Cette dérive climatique n'est cependant pas possible dans les LAM puisqu'ils sont fortement contraints par les conditions frontières (à conditions bien sur que le système d'assimilation de données ne présente pas de dérive et que le domaine ne soit pas trop grand). Deuxièmement, même s'il n'y a pas de dérive climatique, la précision peut être dégradée dans la région de haute résolution suite à l'advection de données faiblement représentées provenant de la région de basse résolution du domaine. Ce problème dépend toutefois de comment la résolution à l'extérieur de la région de haute résolution est pauvre, de quelle densité et de quelle qualité de données sont suffisantes pour représenter une analyse suffisamment précise sur cette région et de comment celles-ci influence la précision des prévisions dans la région d'intérêt (Côté et al., 1998). Finalement, la dégradation locale de la précision résulte en des distorsions locales de l'écoulement. Ces distorsions sont par contre relativement petites dans les régions où la résolution n'est pas significativement dégradée (Côté et al., 1998).

Dans les modèles à résolution variable, la résolution varie graduellement entre la région de fine résolution (située dans le domaine d'intérêt) et la région de faible résolution (située autour du domaine d'intérêt). La diminution graduelle de la résolution à l'extérieur de la région d'intérêt à l'avantage d'éviter les impacts négatifs d'un changement abrupte de résolution sur la précision de la solution (Fox-Rabinovitz et al., 1997; Vichnevetsky et Turner, 1991; Zhang et al., 1986; Arakawa, 1984, cités par Côté et al., 1998)¹⁷. De plus, le fait de varier lentement la résolution de la grille permet de conserver les erreurs locales de troncations raisonnablement petites et de réduire fortement les fausses dispersions (Fox-Rabinovitz et al., 1997; Vichnevetsky, 1987, cités par Côté et al., 1998).

Dans la configuration du modèle canadien GEM-VAR, la formulation adoptée permet aussi de varier simultanément la résolution dans les deux directions. De plus, par le biais de la géométrie sphérique, la grille latitude-longitude, de résolution variable, peut être orientée arbitrairement. Ceci permet donc de placer la région de fine résolution au dessus de n'importe quelle région sur terre.

¹⁷ La technique des modèles à résolutions variables a été originalement proposée en 1977 par Schmidt (1977) pour les modèles spectraux. L'année suivante, Staniforth et Mitchell (1978) ont introduit cette idée aux modèles globaux à points de grille. Ce n'est officiellement qu'au milieu des années 1990 que cette méthode a officiellement pris son envol (sous la forme de configuration spectrale) via le modèle ARPEGE (Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle) de Météo-France.

1.1.2 Description du modèle canadien GEM 3.3.0

Dans cette étude, la version 3.3.0 du modèle GEM a été utilisée pour les différentes simulations¹⁸. Les types de configurations analysées sont la configuration globale, la configuration à résolution variable et la configuration à aire limitée selon le cas. Une grille à 2 degré de résolution à été utilisée avec la configuration GEM-global. Pour les simulations avec la configuration GEM-LAM (modèle à aire limitée), une grille de 216 x 208 points, centrée sur le pôle à 60°E - 90°N, à été utilisée avec une résolution de 0,5 degré. Pour la simulation avec la configuration GEM-VAR, une grille haute résolution de 172 x 188 points, centrée à 72°E - 85°N, à aussi été utilisée avec une résolution de 0,5 degré. Les différentes configurations de grille utilisées avec le modèle GEM pour cette analyse sont présentées à la **FIGURE 2-1** tandis que les paramètres des grilles utilisées pour les configurations GEM-VAR et GEM-LAM sont présentés dans l'**ANNEXE 6**. Ceux-ci sont également disponibles à l'adresse web du CMC¹⁹.

Pour la partie dynamique, le modèle GEM à utilisé la « RPN dynamic » version 3.3.0 et la version 4.5 de la « RPN physics » pour la partie physique. Pour chacune des configurations, la période d'intégration a été de 6 mois. Les

¹⁸ http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn/gem/gem-climate/Version_3.3.0/GEM_in_climate_mode.html

¹⁹ http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn/gem/gem-climate/Version_3.3.0/Recent_runs_grids.html#arctic_lam_v330_org

données de surface (la température de surface de la mer (SST) et la glace de mer) ont été interpolées à partir des moyennes mensuelles de l'analyse climatologique de PCMDI2/AMIP II à $1^\circ \times 1^\circ$ (des ajustements ont été faits afin de s'assurer que lorsque les données journalières sont linéairement interpolées à partir des valeurs mensuelles, les valeurs mensuelles moyennes sont conservées). Tel que recommandé par Liang et Wang (1995), les valeurs climatologiques mensuelles d'ozone de AMIP II ont également été utilisées. La valeur de la constante solaire a été fixée à 1367 Wm^{-2} et la valeur de concentration de CO_2 de référence, à 380ppm.

Pour les différentes configurations GEM-LAM, les variables prognostiques de la zone de pilotage, d'une largeur de 12 points de grille, ont été forcées par celle du modèle GEM-global ou de la réanalyse ERA 40 selon le cas. La largeur de zone de mélange à quant à elle été fixée à une largeur de 10 points de grille.

1.2 Réanalyses et données d'observations pour l'Arctique

Au cours des 20 dernières années plusieurs ensembles d'observations sur l'Arctique se sont rajoutées à ceux existants. Les principaux ensembles de données d'observations disponibles actuellement pour l'Arctique, la provenance des observations et la période couverte par ces ensembles, sont présenté dans le [TABLEAU 1](#). Par contre, au cours de notre étude, nous nous concentrerons plutôt sur les réanalyses ERA 40 (ECMWF) et NCEP/NCAR.

1.2.1 Description des réanalyses utilisées pour la comparaison avec les différentes configurations de GEM 3.3.0

1.2.1.1 ERA 40 – European Center for Medium–Range Weather Forecasts

ERA 40 est une réanalyse d'observations météorologiques entre septembre 1957 et juillet 2008 produite par le « European Centre for Medium–Range Weather Forecasts (ECMWF) » en collaboration avec plusieurs autres institutions. Les observations utilisées pour la réanalyse ERA 40 incluent principalement les données d'archives du ECMWF mais également celles provenant de différents pays et organisations²⁰. Les données mensuelles ERA 40 sont disponibles sur le WEB à l'adresse http://data.ecmwf.int/data/d/era40_mnth/.

²⁰ La liste des données d'observation utilisée pour ERA 40 sont disponible dans la publication du ECMWF, The ERA-40 Archive, ERA-40 Project Report Series No. 17, pp. 3 ainsi que dans l'annexe B de Uppala et al. (2005), partie B

Tableau 1 : Ensembles de données d'observations disponibles dans l'Arctique

Ensembles de données d'observations disponibles dans l'Arctique	
ENSEMBLES DE DONNÉES D'OBSERVATIONS	PROVENANCE DES DONNÉES
International Arctic Buoy Program (IABP) http://iabp.apl.washington.edu	<ul style="list-style-type: none"> • Stations terrestres • Stations polaires russes (NSIDC) • Bouées à la dérive (depuis 1979)
POLES (dérivé de NASA Earth Observing System project Polar Exchange at the Sea Surface)	<ul style="list-style-type: none"> • Stations terrestres, côtières et dans les glaces • COADS • Bouées à la dérive (IABP) • Stations russes au Pôle Nord
International Ocean Environment Buoy (IOEB) Program	<ul style="list-style-type: none"> • Bouées (de 1992 à 1998)
Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) http://www.aari.nw.ru/index_en.html	<ul style="list-style-type: none"> • Stations terrestres russes • Stations russes au Pôle Nord (de 1937(54) à 1991)
Earth Observing system (EOS) Distributed Active Archive Center (DAAC) au National Snow and Ice Data Center (NSIDC) http://nsidc.org/data/collections.html	
Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS) http://dss.ucar.edu/pub/COADS_intro.html	<ul style="list-style-type: none"> • NCDC (depuis 1854)
National Climatic Data Center (NCDC) dataset http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html	
National Oceanic and Atmospheric Administration-Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (NOAA-CIRES) Climate Diagnostic Center	
Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) onboard National Oceanic and Atmospheric Administration satellites http://nsidc.org/data/avhrr/data_summaries.html	(depuis 1981)
University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) http://dss.ucar.edu/datasets/	
National Center for Environmental Prediction/for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.derived.html	<ul style="list-style-type: none"> • Données de réanalyse Distribuée par NOAA-CIRES (depuis 1957)
Surface Heat Budget in the Arctic (SHEBA)	(septembre 1997 - octobre 1998)
European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) http://data.ecmwf.int/data/d/era40_mnth/	<ul style="list-style-type: none"> • ERA 40 (depuis 1957)
Climate Research Unit de l'Université East Anglia www.cru.uea.ac.uk/data/temperature	<ul style="list-style-type: none"> • Stations terrestres • COADS

La réanalyse ERA 40 utilise une grille gaussienne de résolution spectrale T159 (environ 125 km) de 1.121 degrés latitude x 1.125 degrés longitude (aux tropiques) basée sur la version « Integrated Forecasting System (IFS) » avec une représentation des principaux champs dynamiques sous forme d'harmoniques sphériques. Elle comprend une période d'assimilation de 6 heures basées sur les fréquences synoptiques d'observations à 00Z, 06Z, 12Z et 18Z. Sa structure verticale compte 60 niveaux et s'étend de 10m jusqu'à 0.1 hPa (5 niveaux dans la couche de surface stable, 7 niveaux entre 100 hPa et 10 ha et 13 niveaux entre 10 hPa et 0.1 hPa). Par contre, les données disponibles sont généralement de 2.5 degrés latitude x 2.5 degrés longitude et disponible pour les principaux niveaux de pression entre 1000 hPa et 10 hPa.

Le modèle de réanalyse ERA 40 utilise un schéma semi-Lagrangien à deux pas de temps pour l'advection, un schéma d'éléments finis pour la discrétisation verticale ainsi qu'un système d'assimilation 3D-VAR et 4D-VAR. Le modèle inclut une paramétrisation complète des principaux processus physiques. Il comprend notamment des paramétrisations pour: la radiation, la convection profonde, les nuages et la précipitation de grande échelle, la diffusion turbulente et les interactions avec la surface, la couche de surface stable (avec un schéma pour la température et l'humidité du sol tenant compte du gel de l'humidité contenu dans le sol, de la variation de l'albédo de surface, des zones recouvertes par la neige et de la glace de

mer), l'oxydation du méthane et l'ozone (introduit comme variables pronostiques (3D) et advectées selon le même schéma que pour l'humidité)²¹. De plus, la concentration des aérosols et du CO₂ est prescrite et varie géographiquement et verticalement. Cependant, la concentration des aérosols est fixe dans le temps tandis que les tendances pour le CO₂ ainsi que pour d'autres gaz actifs radiativement sont spécifiés selon les valeurs de l'IPCC.

Pour terminer, le modèle atmosphérique utilisé pour traiter les données a été couplé avec un modèle océan-vagues de 1.5 degrés de résolution. La température de surface et la couverture de glace de l'océan, utilisée dans le couplage, proviennent des moyennes mensuelles du HadISST pour la période avant novembre 1981 et des moyennes hebdomadaires de l'analyse 2D-VAR du NCEP. Elles sont ensuite interpolées sur une base journalière²². Une description plus complète du processus d'assimilation des données, de la dynamique et des processus physique utilisés pour générer les données de réanalyse ERA 40 est disponible sur le WEB à l'adresse <http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY28r1/index.html> ainsi que dans Uppala et al. (2005).

²¹ Pour plus de détails, voir ERA-40 Report Series No. 4

²² Pour plus de détails voir ERA-40 Report Series No. 12

1.2.1.2 NCEP/NCAR –National Center for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research

Les données NCEP/NCAR sont une réanalyse d'observations météorologiques depuis janvier 1948 produite par NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, et disponible sur le WEB à l'adresse <http://www.cdc.noaa.gov/>.

Les données entre 1948 et 1957 sont définies selon une grille régulière (non gaussienne). Ces données sont disponibles 8 fois par jours à 3Z, 9Z, 15Z et 21Z en plus des périodes d'assimilation de 6 heures basées sur les fréquences synoptiques d'observations (00Z, 06Z, 12Z, 18Z). Le reste de la période est définie sur une grille gaussienne globale de résolution spectrale T62 (210 km) de 2.5 degrés latitude x 2.5 degrés longitude avec une période basée sur les fréquences synoptiques²³. Sa structure verticale compte 28 niveaux de pression de 1000 hPa à 3 hPa (5 niveaux dans la couche de surface stable et 7 niveaux au dessus de 100 hPa). Cependant, les données disponibles comptent seulement 17 niveaux de pression allant de 1000 hPa à 10 hPa²⁴.

Le modèle de réanalyse NCEP/NCAR utilise un décodeur de données, un système de contrôle de la qualité, un système global d'assimilation de données 3D-VAR et une base de données aussi complète que possible

²³ Des moyennes journalières et mensuelles sont également disponibles.

²⁴ Pour plus de détails sur les sorties disponibles, voir Kalnay et al., 2001 et Kalnay et al., 1996, section 6 ainsi que les appendices A-B-C

utilisant des ensembles de données d'observations provenant de différents pays et organisations²⁵. Le modèle inclut une paramétrisation complète des principaux processus physiques. Il comprend notamment des paramétrisations pour : la radiation (avec un cycle diurne et les interactions avec les nuages), la convection (selon la paramétrisation Arakawa-Schubert), la précipitation de grande échelle, la convection profonde, les coefficients d'entraînement des ondes gravitationnelles, la physique de la couche limite ainsi qu'une surface interactive pour l'hydrologie (sous forme d'un modèle de sol avec des processus de diffusion horizontaux et verticaux). Les détails de la dynamique et de la physique du modèle sont décrits dans la « NOAA/NMC Development Division » (1988) et par Kanamitsu (1989) et Kanamitsu et al. (1991).

²⁵ La liste des données d'observation utilisée NCEP/NCAR sont disponible dans la publication de Kalnay et al., 1996 pp. 438.

1.2.2 Problèmes reliés aux observations de SAT dans l'Arctique

1.2.2.1 Manque de stations d'observations

Les mesures de SAT sont essentielles pour l'étude des changements climatiques et le forçage des modèles numériques car elles permettent la validation des modèles. Cependant, pour effectuer des analyses de tendances de température à partir des observations, il faut pouvoir obtenir des données sur une certaine période de temps et avoir une couverture adéquate de la zone d'intérêt. Or, à cause du manque de stations d'observations dans l'Arctique, peu de données d'observation sont actuellement disponibles. Il est donc difficile de déterminer quantitativement comment la SAT a évolué depuis les dernières décennies (Comiso, 2003).

Le manque de données au nord du 60^e parallèle est dû principalement à l'inaccessibilité de l'Arctique, spécialement durant l'hiver (Rigor et al., 2000). Cette inaccessibilité est telle que Chapman et Walsh (1993) réfèrent l'intérieur de l'océan Arctique à un « *temperature data void* ». De manière générale, le réseau de stations qui mesure la température et la pression de surface s'est étendu considérablement depuis le début du 19^e siècle. Avant 1900, seule la région des latitudes moyennes (35–60N) était couverte. Entre 1900 et 1950, des parties significatives de l'Hémisphère Nord n'étaient toujours pas représentées.

Cependant, depuis 1950, la majorité de la surface terrestre de l'Hémisphère Nord est adéquatement couverte (Jones et al., 1986). Przybylak (2000) note en effet qu'il y a une bonne couverture en Arctique à partir de 1950. De plus, à cause de la forte corrélation spatiale avec les régions subarctiques, Przybylak (2003) mentionne que la couverture spatiale dans l'Arctique est suffisante à partir de 1930. En fait, les seules séries de mesures continues prises sur une longue période de temps dans l'Arctique consistent en des observations météorologiques de SAT prises entre 1951 et 1991 à partir des stations polaires russes.

Un certain nombre d'investigateurs ont tenté, depuis la fin des années 1970, de remédier au problème de couverture spatiale en Arctique en faisant usage des données provenant des bouées, des stations météorologiques russes, des rapports maritimes ainsi qu'à l'interpolation spatiale pour combler les zones sans données d'observations (Rigor, Colony et Martin, 2000). Ils ont également utilisé la climatologie mensuelle de la SAT obtenue à partir des stations d'observations dans les glaces, les températures moyennes mensuelles calculées à partir des stations d'observations terrestres ou encore, une combinaison de ces deux approches. Les ensembles de données qui ont été obtenus par interpolation ont grandement contribué à l'amélioration de la couverture spatiale. Par contre, un certain nombre de limitations sont toujours apparentes dans les données interpolées (Comiso, 2003).

1.2.2.2 Problèmes de mesure

En analysant les différentes données d'observations, Jones et al. (1986) se sont rendu compte que les archives de température de surface contenaient des mesures qui n'étaient pas homogènes, i.e. qu'elles contenaient des changements qui résultaient de facteurs non-climatiques. Par exemple, les valeurs pour un certain mois pouvaient avoir été mal transcrites ou étaient simplement incorrectes. Ainsi, des mesures erronées ont pu être utilisées pour calculer des moyennes hémisphériques ou mensuelles.

Quatre facteurs majeurs affectant l'homogénéité des mesures de température de surface ont ainsi été identifiées (Jones et al., 1986; Bradley et Jones, 1985; Mitchell, 1953). Soit des changements

- de l'instrumentation, de l'exposition et des techniques de mesures
- dans la localisation des stations (en position et altitude)
- du temps d'observations et des méthodes utilisées pour calculer les moyennes mensuelles
- de l'environnement autour de la station, particulièrement avec la croissance urbaine

Les changements au niveau des instruments et de leur exposition se sont produits dans la plupart des régions où des mesures ont été faites. Cependant, comme le degré du changement varie d'un pays à l'autre, il n'existe pas de manière simple pour quantifier l'amplitude de chaque effet (Jones et al., 1986).

CHAPITRE II

CHAPITRE II

COMPARAISON DU MODÈLE CANADIEN GEM AVEC LES DONNÉES DE RÉANALYSES NCEP ET ERA 40

RÉSULTATS

La comparaison des simulations, réalisées à partir des différentes configurations du modèle canadien GEM, avec les données des réanalyses NCEP et ERA 40 est effectuée pour deux types de statistiques particulières: la tendance (les tendances sur tout le domaine au nord du 55°N) et la variabilité (temporelle). Chacune de ces statistiques est divisée en deux parties. La première partie correspond aux moyennes saisonnières pour les mois de SON, DJF, MAM et JJA (soit respectivement l'automne, l'hiver, le printemps et l'été) pour la période allant de janvier 1978 à août 2002. La deuxième partie traite des moyennes annuelles de 1978 à 2001 inclusivement. Dans chacune de ces parties, les réanalyses sont comparées entre elles en premier lieu. Ensuite, les différentes configurations de GEM sont à leur tour comparées entre elles. Finalement, les configurations et les réanalyses sont comparées.

Les principaux champs qui sont analysés sont la température, la pression au niveau moyen de la mer et la hauteur du géopotential à 500 hPa.

Une carte des différentes régions de l'Arctique est disponible dans l'[ANNEXE 5](#). L'organisation des différentes figures est également disponible dans l'[ANNEXE 7](#) tandis que les figures représentant les tendances et variances sont représentées dans l'[ANNEXE 8](#).

2.1.1 Tendances de SAT

2.1.1.1 Tendances des moyennes saisonnières de SAT

Automne

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

De manière générale, durant l'automne (SON), la distribution géographique des tendances positives et négatives de température de surface de l'air (SAT) apparaît assez similaire entre les réanalyses ERA 40 et NCEP. Les régions qui montrent un réchauffement sont situées sur l'est de la Sibérie (le plateau de Sibérie centrale, le plateau de l'Anadyr, les Hauteurs de la Kolyma et les monts de Verkhoïansk), le Kamtchatka, les pays scandinaves, l'Atlantique Nord, l'Islande, la mer de Norvège, la mer du Groenland, le Groenland, l'archipel canadien, la baie de Baffin, les Territoires du Nord-Ouest, l'océan Arctique, la mer de Beaufort, la mer des Tchouktches et la mer de Sibérie orientale.

La première des deux zones de refroidissement est localisée sur la mer et le détroit de Béring, l'Alaska et le Yukon et la seconde, sur la partie ouest de la Russie et de la Sibérie (les plaines de Sibérie occidentale et septentrionale, les régions à l'ouest de l'Oural) et sur la mer de Kara. Les deux réanalyses ne s'accordent cependant pas pour la partie plus à l'ouest, particulièrement l'Europe de l'Est. Dans la réanalyse ERA 40, les tendances de SAT sont négatives alors qu'avec la réanalyse NCEP, elles sont plutôt positives. Les

deux réanalyses ne s'entendent pas non plus pour la mer de Barents et la mer des Laptev. Dans la réanalyse ERA 40, les tendances de SAT sont positives alors qu'avec la réanalyse NCEP, elles sont plutôt négatives. Finalement, les réanalyses ERA 40 et NCEP ne s'entendent pas sur la position de certaines tendances négatives. En effet, la réanalyse NCEP montre une petite zone de refroidissement sur le sud de la mer de Beaufort tandis que la réanalyse ERA 40 montre plutôt une zone de refroidissement juste à l'ouest de l'archipel canadien.

Analysons maintenant la distribution géographique et l'étendue des valeurs extrêmes des tendances de SAT (supérieures ou inférieures à $0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$). Les deux réanalyses présentent des différences relativement importantes, principalement pour les tendances positives. La région qui subit le plus fort réchauffement²⁶ ($>.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) est beaucoup plus grande avec la réanalyse NCEP qu'avec la réanalyse ERA 40. Le réchauffement produit par la réanalyse NCEP s'étend sur tout l'archipel canadien, la partie est du Groenland, l'ouest de la mer du Groenland, les archipels de Svalbard (Spitzberg) et François-Joseph, l'est de la Sibérie (plateau de l'Anadyr et Hauteurs de la Kolyma), la mer de Sibérie orientale, la mer des Tchouktches et la majeure partie de l'océan Arctique alors qu'il touche seulement la partie sud-est de l'archipel canadien, le nord-est des Territoires du Nord-Ouest, l'extrême nord du

²⁶ Les couleurs rouge et plus chaudes correspondent à des valeurs $> 0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$ tandis que la couleur bleu foncé et plus froides correspondent à des valeurs $< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Ces valeurs serviront de références pour la description des maximums de tendances de SAT.

Québec, le Groenland, l'archipel de Svalbard et la mer des Tchouktches avec la réanalyse ERA 40. Le fort réchauffement présent sur l'océan Arctique ainsi que le long de la côte ouest de l'archipel canadien et du Yukon n'est donc pas représenté avec la réanalyse ERA 40. De plus, les régions qui subissent les plus forts refroidissements sont pratiquement toutes différentes pour les deux réanalyses. Les régions avec des valeurs $< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$ sont situées en Russie, à l'est de l'Oural, le long des plaines de Sibérie occidentale (NCEP et ERA 40), sur la partie côtière de l'est des plaines de la Sibérie septentrionale, la mer des Laptev – entre Norilsk, Khatanga et Tiksi – (NCEP seulement) et sur le centre de l'Alaska et du Yukon (plus fort avec la réanalyse ERA 40).

Les maximums positifs sont pratiquement tous supérieurs à la limite de l'échelle, soit $> 0.178^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Dans les deux réanalyses, ils se retrouvent sur le Groenland et le sud de l'archipel canadien. Cette dernière région est particulièrement plus étendue avec la réanalyse NCEP. Par contre, avec la réanalyse NCEP, d'autres maximums $> 0.178^{\circ}\text{C an}^{-1}$ sont également présents sur l'archipel de Svalbard, entre le Groenland et le pôle, sur la mer de Sibérie orientale, sur la mer des Tchouktches et sur l'est de la Sibérie. Dans la réanalyse ERA 40, ces deux derniers maximums sont de plus faible intensité avec une valeur d'environ $0.112^{\circ}\text{C an}^{-1}$ et de $0.178^{\circ}\text{C an}^{-1}$ respectivement. Pour terminer, la réanalyse NCEP montre également un maximum positif de tendances de SAT sur les pays scandinaves avec une valeur d'environ

0.128°C an⁻¹. Pour les maximums de tendances négatives de SAT, la réanalyse ERA 40 possède deux maximums plus importants sur l'Alaska et les plaines de Sibérie occidentale (d'environ -0.112°C an⁻¹) et deux maximums négatifs, moins importants, sur la Nouvelle Zemble et le centre des plaines de Sibérie septentrionale (de -0.064°C an⁻¹). Avec la réanalyse NCEP, les maximums de tendances négatives de SAT sont situés sur l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale, la mer des Laptev le centre du Yukon et une petite région du nord de l'Alaska. Leurs valeurs sont respectivement de -0.112°C an⁻¹, < -0.176, °C an⁻¹, -0.096°C an⁻¹ et -0.112°C an⁻¹.

Comparaison des configurations de GEM

Le point qui frappe le plus, en comparant la distribution géographique des tendances positives et négatives de SAT des différentes configurations du GEM pour l'automne (SON), est la très grande variabilité d'une configuration à l'autre. Par exemple, la configuration GEM-VAR simule un réchauffement sur l'Europe de l'est, la partie de la Russie à l'ouest de l'Oural, les pays scandinaves, la mer de Norvège, l'Islande, le Groenland, le détroit de Davis, le nord du Québec, l'archipel canadien, l'ouest de la mer de Beaufort, les mers de Russie (à l'exception du nord de la mer de Barents et de l'ouest de la mer de Kara), l'océan Arctique ainsi que sur tout l'est de la Sibérie (plateau de l'Anadyr, Hauteurs de la Kolyma et les monts de Verkhoïansk), le Kamtchatka et la partie ouest de la mer de Béring. Elle ne montre cependant aucune tendance négative sur l'océan Arctique comparativement aux autres configurations. En fait, le refroidissement affecte seulement les Territoires du Nord-Ouest, le Yukon, l'Alaska, le golfe de l'Alaska, la partie est de la mer de Béring et tout le centre de la Russie (entre l'Oural et les Monts de Verkhoïansk).

Pour la configuration GEM-global, le réchauffement touche aussi les Territoires du Nord-Ouest, l'Alaska, le plateau de Sibérie centrale et toute la mer de Barents. Par contre, contrairement à la configuration GEM-VAR, le refroidissement touche toute la partie ouest du Groenland, le nord de l'archipel canadien, la majeure partie de l'océan Arctique ainsi que l'est de la

Sibérie (Plateau de l'Anadyr, Hauteurs de la Kolyma et les Monts de Verkhoïansk), les plaines de Sibérie septentrionale ainsi que la majeure partie de la mer de Béring et du golfe de l'Alaska. Les tendances de SAT sont donc maintenant majoritairement positives sur le Canada sauf le long de la côte ouest.

Les zones de refroidissement de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 ressemblent en majeure partie à celles du GEM-global, à l'exception de la zone de refroidissement située sur les plaines de Sibérie occidentale et septentrionale (GEM-global). Le refroidissement affecte de plus la partie ouest de l'archipel canadien, la mer de Beaufort, le Yukon, l'Alaska, l'extrême est de la Sibérie, la mer du Groenland et pratiquement la totalité du Groenland. Une grande région de refroidissement est également présente sur le sud de la Russie.

La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montre deux zones de refroidissement distinctes. La première et la moins étendue des deux est située sur le sud de l'Alaska et du Yukon, le golfe de l'Alaska ainsi que sur la partie est de la mer de Béring. La deuxième zone se trouve sur les plaines de Sibérie occidentale et septentrionale ainsi que sur la partie de la Russie à l'ouest de l'Oural. Le refroidissement affecte également la mer de Barents, la mer de Kara, la mer des Laptev, la mer du Groenland, les archipels de Svalbard et François-Joseph, la Nouvelle Zemble et toute la région située

entre ceux-ci et le pôle. La figure montre également, tout comme avec la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, une zone de refroidissement s'étendant vers le sud le long de la côte est du Groenland.

Analysons maintenant la distribution géographique et l'étendue des valeurs extrêmes de tendances de SAT (supérieures ou inférieures à $0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) pour chacune des configurations. Dans toutes les configurations, la mer de Tchouktches est affectée par un réchauffement d'environ la même intensité ($0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$). L'intensité de ce réchauffement apparaît cependant plus forte avec la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global avec des valeurs de tendances de température maximale de $0.144^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Les configurations GEM-LAM pilotée par GEM-global et GEM-global montrent respectivement une zone de fort maximum positif de tendances de SAT ($> 0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) au dessus de l'archipel canadien et des Territoires du Nord-Ouest avec une valeur maximale d'environ $0.160^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Pour la configuration GEM-global, les maximums négatifs de tendances de SAT se retrouvent sur le nord du Groenland, le nord-ouest de l'archipel canadien, le nord de la mer de Sibérie orientale, la région montagneuse de l'est de la Sibérie, l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale et le sud des plaines de Sibérie occidentale, avec des valeurs d'environ $-0.064^{\circ}\text{C an}^{-1}$. La configuration GEM-LAM pilotée GEM-global montre aussi deux zones de maximums négatifs: une près de l'archipel François-Joseph et l'autre sur la partie est des plaines de Sibérie septentrionale (au sud de Norilsk et Khatanga). Les deux ont une valeur

d'environ $-0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$. La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est la seule à montrer un maximum positif de tendances de SAT de $0.160^{\circ}\text{C an}^{-1}$ sur les plaines de Sibérie septentrionale. Elle montre également un maximum négatif de $-0.112^{\circ}\text{C an}^{-1}$ sur l'ouest de l'Alaska. La configuration GEM-VAR montre quant à elle de petits maximums négatifs d'environ $-0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$ en Alaska et au Yukon. De plus, elle simule un maximum négatif au dessus des plaines de Sibérie orientale d'environ $-0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Pour terminer, la configuration GEM-VAR montre de forts maximums positifs ($> 0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) sur l'ouest de la Russie et l'Europe de l'est ainsi que sur l'est de la Sibérie. Leurs valeurs maximales sont respectivement de $0.144^{\circ}\text{C an}^{-1}$ et de $0.128^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Ces zones de maximums ne sont représentées par aucune autre configuration.

Comparaison réanalyses–configurations

En comparant maintenant les réanalyses NCEP et ERA 40 avec les différentes configurations de GEM pour l'automne (SON), il est possible d'observer que presque aucune des configurations n'est en mesure de reproduire de manière générale les régions d'augmentation ou de diminution de SAT des réanalyses. La seule configuration qui reproduit assez bien la distribution géographique des tendances positives (notamment sur l'océan Arctique) et négatives de SAT est la configuration GEM–VAR. Par contre, les régions de refroidissement sont soit trop grandes soit trop petites par rapport aux réanalyses. Par exemple, les régions de tendances négatives sur l'Alaska et le Canada sont trop grandes comparées aux réanalyses tandis que celles sur le centre de la Russie sont trop petites. En fait, la région de tendances positives située sur la partie ouest de la Russie devrait plutôt être négatives pour être similaire aux données de la réanalyse ERA 40. Les tendances sur l'est des Territoires du Nord–Ouest devraient également être inversées.

Quoique les distributions de tendances de SAT de GEM–global et GEM–LAM pilotée par ERA 40 apparaissent assez similaires entre elles, elles n'arrivent pas à simuler correctement la distribution géographique des tendances de SAT, en particulier le réchauffement sur le Groenland, l'océan Arctique, l'est de la Russie et les régions situées à l'ouest de l'archipel canadien. En fait, la zone de refroidissement représentée au nord de l'Alaska et de l'est de la Sibérie correspond à une zone de maximum de tendances positives dans la

réanalyse NCEP. La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 montre de plus une absence totale de refroidissement sur le centre et l'ouest de la Russie tandis que la configuration GEM-global ne reproduit pas les tendances négatives sur l'ouest de la Russie ainsi que l'Alaska et le Yukon.

La distribution géographique des tendances de SAT de la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global apparaît relativement similaire à celle de la configuration GEM-VAR avec des tendances négatives sur le centre de la Russie, l'Alaska et le Yukon. Cependant, la région de refroidissement sur le centre de la Russie n'est pas suffisamment étendue comparativement aux réanalyses. De plus, alors que les réanalyses ne montrent que du réchauffement sur la région maritime arctique, la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montre une importante zone de refroidissement s'étendant du nord de la Nouvelle Zemble jusqu'au centre de l'Arctique avec des valeurs maximales au nord de l'archipel de François-Joseph.

Après avoir analysé la distribution géographique et l'étendue des valeurs extrêmes des tendances de SAT (supérieures ou inférieures à $0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) pour l'automne, il apparaît évident que les configurations de GEM ne sont pas en mesure de reproduire l'étendue et l'intensité des tendances de SAT des réanalyses ERA 40 et NCEP. La seule configuration qui s'en approche le plus est la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global. Celle-ci possède des maximums positifs ($> 0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) dans les régions de l'archipel

canadien et la mer des Tchouktches similaires à la réanalyse NCEP mais beaucoup moins étendus que pour la réanalyse ERA 40. La configuration GEM-global reproduit aussi ce maximum positif mais pas exactement au bon endroit. Celui-ci se retrouve en fait sur le sud de l'archipel canadien et les Territoires du Nord-Ouest. De plus, la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global est la seule à simuler un maximum négatif ($< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) le long de l'Oural similaire aux réanalyses.

Les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par ERA 40 sont incapables de reproduire la zone de maximum positif ($> 0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) sur l'archipel canadien. Par contre, elles possèdent, tout comme la réanalyse ERA 40, des régions de maximums négatifs ($< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) en Alaska. De plus, la configuration GEM-VAR présente, tout comme la réanalyse NCEP, une région de maximum positif sur l'est de la Sibérie. Pour terminer, aucune des configurations de GEM n'est en mesure de générer le maximum de tendances positives sur le Groenland tel que simulé par les réanalyses. Les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global y montrent des tendances positives mais beaucoup trop faibles. Enfin, les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par ERA 40 simulent respectivement des régions de maximums positifs non représentées par les réanalyses sur les régions de la Russie à l'ouest de l'Oural et sur les plaines de Sibérie septentrionale.

Hiver

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

Pour l'hiver (DJF), les distributions géographiques des tendances positives et négatives de SAT représentées par les réanalyses NCEP et ERA 40 apparaissent relativement similaires avec une grande région de tendances négatives sur l'est de la Sibérie (le plateau de Sibérie centrale, le plateau de l'Anadyr, les Hauteurs de la Kolyma, les monts de Verkhoïansk et le Kamtchatka) et s'étendant vers l'est en direction de la mer et du détroit de Béring, la mer des Tchouktches, l'ouest de l'Alaska, le golfe de l'Alaska, la mer de Beaufort et l'ouest de l'archipel canadien (la région de tendances négatives étant plutôt continue pour la réanalyse ERA 40 comparativement à la réanalyse NCEP ou des zones de tendances positives et négatives se succèdent en alternance d'ouest en est entre la mer des Laptev et l'archipel canadien). Deux plus petites régions de tendances négatives sont également observables pour les deux réanalyses: une sur l'ouest et le sud du Groenland, la baie de Baffin et le détroit de Davis et l'autre sur le nord de la Russie, le long de l'Oural, l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale, la mer de Kara et la mer des Laptev. Les tendances positives de SAT touchent principalement les Territoires du Nord-Ouest et les provinces canadiennes ainsi que les pays scandinaves, l'Europe de l'Est, la Russie à l'ouest de l'Oural, le plateau de Sibérie centrale et une partie des plaines de Sibérie occidentale. Le réchauffement touche également l'Atlantique Nord, la mer de

Norvège, la mer de Barents, les archipels de Svalbard et François-Joseph, l'océan Arctique près du pôle et pratiquement toute la mer du Groenland.

Analysons maintenant la distribution géographique et l'étendue des valeurs extrêmes des tendances de SAT (supérieures ou inférieures à $0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$). La région avec un maximum de refroidissement (valeur $< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$), apparaît beaucoup plus grande et continue pour la réanalyse ERA 40 que pour la réanalyse NCEP. Pour la réanalyse ERA 40, cette région est principalement centrée sur le détroit de Béring, la mer de Beaufort, la mer des Tchouktches, la mer de Sibérie Orientale, l'est de la Sibérie (Plateau de l'Anadyr et Hauteurs de la Kolyma) et une partie de l'océan Arctique alors que dans le cas de la réanalyse NCEP, elle affecte seulement le nord du Kamchatka, la mer de Béring, l'ouest de l'Alaska, ainsi qu'une partie de la mer de Beaufort et de la mer des Tchouktches. Bien que les réanalyses présentent des zones de tendances négatives différentes, celles-ci montrent des maximums d'intensité relativement semblables. Pour les réanalyses NCEP et ERA 40, le maximum situé au nord du Kamtchatka est $< -0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Celui situé au nord de l'Alaska (pour la réanalyse NCEP) et sur la mer de Tchouktches (pour la réanalyse ERA 40) est également $< -0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$. La réanalyse NCEP montre aussi plusieurs autres zones de maximums négatifs ($< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) dont les deux plus importantes sont situées à l'est de l'Oural, le long des plaines de Sibérie occidentale (environ $-0.112^{\circ}\text{C an}^{-1}$ - il apparaît beaucoup plus faible dans la réanalyse ERA 40) et sur la partie

côtière de l'est des plaines de la Sibérie septentrionale et de la mer des Laptev – entre Norilsk, Khatanga et Tiksi ($< -0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$).

Les régions avec le maximum de réchauffement ($> 0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) sont aussi relativement similaires pour les réanalyses ERA 40 et NCEP et consistent en trois régions principales. La première touche les pays scandinaves et l'Europe de l'Est. La deuxième est située entre les archipels de Svalbard et François-Joseph et la Nouvelle Zemble tandis que la dernière se retrouve dans le sud de l'archipel canadien et sur les prairies canadiennes. Leur valeur est $> 0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Il existe cependant certaines différences entre la réanalyse NCEP et la réanalyse ERA 40. Dans le cas de la réanalyse NCEP, les zones de réchauffements des deux dernières régions sont beaucoup plus grandes tandis que l'étendue de la première région apparaît légèrement plus faible. De plus, la dernière zone de réchauffement touche pratiquement tout l'archipel canadien dans le cas de la réanalyse NCEP. Pour la réanalyse ERA 40, cette zone affecte plutôt l'est des Territoires du Nord-Ouest. Sa valeur maximale, d'environ $0.144^{\circ}\text{C an}^{-1}$ est également plus faible. Pour terminer, il est également possible d'observer de forts maximums positifs ($> 0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$) avec la réanalyse NCEP à l'est et à l'ouest de la mer de Sibérie orientale ainsi que sur les Terres du Nord. Ces petites zones de maximum ne sont pas présentes dans la réanalyse ERA 40.

Comparaison des configurations de GEM

Le point qui frappe le plus en comparant la distribution géographique des tendances de température des différentes configurations du GEM pour l'hiver (DJF) est la très grande variabilité d'une configuration à l'autre (tout comme à l'automne). Par exemple, la configuration GEM-global et la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 montrent une grande zone de refroidissement sur l'océan Arctique comparativement aux configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global. Ces deux configurations (GEM-global et GEM-LAM pilotée par ERA 40) montrent un refroidissement sur l'océan Arctique, la mer de Kara, la mer des Laptev, la mer de Sibérie orientale, le détroit et la mer de Béring, l'Alaska, le golfe de l'Alaska, la mer de Beaufort, l'archipel canadien, la baie de Baffin, le nord du Groenland, la mer du Groenland et l'archipel de François-Joseph. Pour la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, la zone de refroidissement touche également toute la Sibérie à l'est du plateau de Sibérie centrale (plateau de l'Anadyr, Hauteurs de la Kolyma, les monts de Verkhoïansk et le Kamtchatka), les Territoires du Nord-Ouest, le nord du Québec et le sud du Groenland. La configuration GEM-global montre aussi une grande zone de refroidissement sur les régions situées à l'ouest de l'Oural, notamment l'Europe de l'est et les pays scandinaves. La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 ne montre pas de grande zone de refroidissement dans ces secteurs mais seulement une petite région du côté est de l'Oural, dans les plaines de Sibérie occidentale.

La configuration GEM-VAR montre un refroidissement sur les pays scandinaves (GEM-global et GEM-LAM piloté par GEM-global également), la mer de Groenland, l'Islande, les archipels de Svalbard et François-Joseph et une petite partie de l'océan Arctique juste au nord ainsi que sur l'est de la mer de Kara, la partie côtière de l'est des plaines de la Sibérie septentrionale, la mer des Laptev, la mer de Béring, l'est de l'Alaska, le Yukon, les Territoires du Nord-Ouest, la Colombie-Britannique, les plaines canadiennes ainsi qu'une grande partie de l'archipel canadien.

La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montre, quant à elle, une plus grande zone de refroidissement sur les continents que les autres configurations. Celle-ci touche les pays scandinaves, la mer de Norvège, l'Islande, la mer du Groenland, la partie de la Russie à l'est de l'Oural, les plaines de Sibérie occidentale, le plateau de Sibérie centrale, l'est de la mer de Kara, la mer des Laptev, la mer de Sibérie orientale, la mer des Tchouktches, la mer de Beaufort, la mer et le détroit de Béring, l'Alaska, le golfe de l'Alaska, le Yukon, l'ouest des Territoires du Nord-Ouest, la Colombie-Britannique et les plaines canadiennes.

Fait particulier, toutes les configurations montrent un refroidissement le long de la côte est du Groenland. L'ensemble des configurations montrent également un réchauffement d'étendue relativement similaire sur la mer de Barents et entre les archipels de Svalbard et François-Joseph et la Nouvelle

Zemble. Il est cependant moins marqué avec la configuration GEM-VAR. Par contre, avec la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, le réchauffement s'étend vers le sud de manière plus marquée jusqu'à la mer de Norvège, la mer du Groenland et l'Islande.

Les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global montrent un réchauffement relativement semblable sur l'océan Arctique, la partie est de l'archipel canadien, la baie d'Hudson, le nord du Québec, la majeure partie du Groenland et la baie de Baffin. Par contre, la configuration GEM-VAR est la seule à montrer un réchauffement sur l'ouest de l'Alaska et le détroit de Béring.

De plus, la configuration GEM-VAR est la seule à montrer un réchauffement généralisé sur le continent Eurasien (à l'exception des plaines de Sibérie septentrionale, entre l'est de la mer de Kara et la mer des Laptev). La configuration GEM-global montre, quand à elle, un réchauffement sur toute la Russie à l'est de l'Oural, tandis que la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montre un réchauffement seulement sur les régions montagneuses de l'est de la Sibérie (depuis l'est du plateau de la Sibérie centrale), l'est des plaines de Sibérie septentrionale ainsi que sur l'Europe de l'est. La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est la seule à ne pas montrer de réchauffement sur l'est de la Sibérie. En effet, la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 montre un réchauffement sur l'Europe, les pays

scandinaves, la mer de Norvège, l'Islande, la mer du Groenland, la mer de Barents, les archipels de Svalbard et François-Joseph ainsi que sur la mer de Kara, la Nouvelle Zemble, la mer des Laptev, la majeure partie du plateau de Sibérie centrale et les plaines de Sibérie occidentale.

La configuration GEM-global, de même que les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global, montrent également un réchauffement sur le sud du Groenland, l'Atlantique Nord, l'île de Baffin et la baie d'Hudson. Le réchauffement important sur les Territoires du Nord-Ouest et les provinces canadiennes n'est cependant représenté que par les configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par ERA 40.

Analysons maintenant la distribution géographique et l'étendue des valeurs extrêmes des tendances de SAT (supérieures ou inférieures à 0.096 an^{-1}) pour les différentes configurations. Seule la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 montre un maximum de tendances de température ($> 0.176^\circ\text{C an}^{-1}$) au dessus des pays scandinaves. Les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global montrent par contre un maximum ($> 0.096^\circ\text{C an}^{-1}$) sur l'ouest du Groenland, l'île de Baffin, le nord du Québec et la baie d'Hudson et un autre (d'environ $0.176^\circ\text{C an}^{-1}$) centré sur les Hauteurs de la Kolyma et le plateau de l'Anadyr (le détroit de Béring et l'ouest de l'Alaska pour GEM-VAR seulement avec une valeur aussi d'environ $0.176^\circ\text{C an}^{-1}$). Le maximum sur le nord du Québec et l'île de Baffin apparaît toutefois de façon

beaucoup plus marquée avec la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global avec une immense zone dont la valeur est $> 0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Trois des configurations montrent aussi une petite zone de maximum de tendances de température ($> 0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$) juste au nord de la Nouvelle Zemble. Il s'agit des configurations GEM-LAM pilotée par ERA 40, GEM-LAM pilotée par GEM-global et GEM-global. Pour terminer, toutes les configurations, sauf le GEM-LAM pilotée par GEM-global montrent un maximum de tendances ($> 0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) sur les plaines de Sibérie occidentale et le plateau de Sibérie centrale. L'étendue et l'intensité du réchauffement étant les plus grands pour la configuration GEM-VAR ($> 0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$) et les plus petits pour la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 (environ $0.144^{\circ}\text{C an}^{-1}$).

Comme il a été mentionné, toutes les configurations de GEM prévoient un maximum de refroidissement ($< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) le long de la côte est du Groenland. Par contre, avec la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, celui-ci est situé plus au sud. Les configurations GEM-VAR et GEM-global sont les seules à montrer un maximum de refroidissement ($< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) près de l'archipel François-Joseph tandis que la configuration GEM-VAR est la seule à produire un fort refroidissement sur les prairies canadiennes et la Colombie-Britannique (environ $-0.178^{\circ}\text{C an}^{-1}$).

Les configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par ERA 40 montrent les plus fortes tendances de refroidissement ($< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) au dessus de

l'océan Arctique, notamment près de la mer de Beaufort, avec des valeurs $< -0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$ par endroit. La région de maximum de refroidissement ($< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) de ces deux configurations s'étend aussi au détroit de Béring, l'ouest de l'Alaska, l'archipel canadien (l'ouest seulement pour le GEM-global) en plus, dans le cas de GEM-LAM pilotée par ERA 40, de la mer des Laptev, la mer de Sibérie orientale, la mer des Tchouktches, l'est de la Sibérie (les Monts de Verkhoïansk, plateau de l'Anadyr et Hauteurs de la Kolyma), le Kamtchatka et la baie de Baffin. La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montre aussi un maximum le long de la côte de l'Alaska et de l'ouest de l'archipel canadien d'environ $-0.080^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Par contre celle-ci est beaucoup moins étendue que les deux autres configurations précédentes.

Pour terminer, les deux configurations GEM-LAM reproduisent un maximum de tendances négatives ($< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) très peu étendu sur les plaines de Sibérie occidentale, près de l'Oural. La configuration GEM-global est aussi la seule à générer un maximum de tendances négatives au sud-est de l'Europe de l'Est avec une valeur $< 0.080^{\circ}\text{C an}^{-1}$.

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison des réanalyses NCEP et ERA 40 avec les différentes configurations de GEM pour l'hiver (DJF) révèle un certain nombre de différences notables. Bien que les réanalyses montrent des tendances négatives de SAT sur l'ouest de l'Alaska et le nord du Québec, elles ne s'entendent pas pour les régions du nord des Territoires du Nord-Ouest, de la baie d'Hudson et de l'archipel canadien. Néanmoins, la configuration GEM–global est celle qui représente le mieux ce patron. Par contre, les tendances négatives sont trop étendues sur l'Alaska et l'archipel canadien ne montre aucune zone tendances positives comme c'est le cas avec les réanalyses. Pour les configurations GEM–VAR et GEM–LAM pilotée par GEM–global, les tendances sont complètement inversées par rapport aux réanalyses. La configuration GEM–VAR montre même un maximum de tendances positives sur l'Alaska qui n'est pas du tout représenté par les réanalyses NCEP et ERA 40. De plus, la configuration GEM–VAR et plus particulièrement la configuration GEM–LAM pilotée par GEM–global montrent de fortes tendances positives sur le nord du Québec. Celles-ci ne sont pas non plus représentées dans les réanalyses. Le maximum de tendances positives sur le nord de l'archipel canadien correspond par contre relativement bien avec celui de la réanalyse NCEP. Pour terminer, la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40 est celle qui montre la plus grande étendue de tendances négatives sur le Canada. Celle-ci est trop étendue comparativement à la réanalyse NCEP, la plus froide des deux

réanalyses. En effet, tout comme la configuration GEM-global, la zone des tendances négatives est tellement étendue qu'aucune tendance positive n'est observable sur l'archipel canadien, les Territoires du Nord-Ouest, le Yukon et l'est de l'Alaska.

Sur le Groenland, les réanalyses s'entendent avec un refroidissement sur les secteurs nord et sud. Les configurations de GEM, sauf la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, montrent également un refroidissement sur le nord du Groenland. Par contre, seule la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 montre des tendances négatives sur le secteur sud. Les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global génèrent même un fort maximum positif $> 0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$ sur cette région.

Bien que les réanalyses s'entendent avec une zone de tendances positives sur le pôle, seules les configurations GEM-LAM pilotée par GEM-global et GEM-VAR sont en mesure de reproduire ces tendances. Par contre, dans la configuration GEM-VAR, cette zone ne s'étend pas suffisamment vers le sud en direction des archipels de Svalbard et François-Joseph.

Toutes les configurations de GEM et les réanalyses s'entendent aussi pour générer un maximum de tendances positives sur la région comprise entre la mer de Barents, la Nouvelle Zemble et les archipels de Svalbard et François-Joseph. Par contre, les configurations de GEM ont de la difficulté à bien

reproduire l'étendue de la zone de maximum ($> 0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$), en particulier la configuration GEM-VAR avec un maximum d'environ $0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$.

En opposition, toutes les configurations, à l'exception de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, ont de la difficulté à reproduire le maximum de tendances positives ($> 0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$) sur les pays scandinaves et l'Europe de l'Est produit par les réanalyses. En fait celles-ci montrent mêmes des tendances négatives de SAT sur le nord des pays scandinaves.

De manière générale, les réanalyses et les configurations de GEM s'entendent relativement bien pour générer les tendances positives et les plus petites zones de tendances négatives sur le secteur maritime de l'Atlantique Nord, de la mer de Norvège et de la mer du Groenland. Par contre, toutes les configurations de GEM ont tendance à surestimer les tendances négatives le long de la côte est du Groenland.

En négligeant les petites zones de tendances positives le long de la côte de Sibérie présente dans la réanalyse NCEP, la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global est celle qui représente le mieux la zone de tendances négatives sur la mer de Beaufort, la mer des Tchouktches, la mer de Sibérie orientale, la mer des Laptev, le détroit et la mer de Béring et le golfe de l'Alaska représentée par la réanalyse ERA 40. Par contre, elle n'arrive pas à générer la même intensité pour les maximums négatifs, situés sur la mer

des Tchouktches, le détroit de Béring et le nord de la mer de Béring, que les réanalyses ERA 40 et NCEP. Les configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par ERA 40 montrent, quant à elle, une zone de tendances négatives beaucoup trop vaste qui s'étend à tout l'océan Arctique alors que la configuration GEM-VAR montre, dans son cas, des tendances positives sur ce secteur. De plus, bien que la configuration GEM-global montre un certain maximum de tendances négatives sur le nord de la mer de Béring et la mer des Tchouktches, elle positionne mal le maximum principal en le situant sur la mer de Beaufort. Enfin, le maximum de tendances négatives de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 correspond relativement bien avec celui de la réanalyse ERA 40 mais seulement pour le secteur de l'extrême est de la Sibérie et de la mer des Tchouktches. Par contre, les tendances négatives plus fortes sur la mer de Beaufort, l'archipel canadien et la baie de Baffin sont beaucoup trop surestimées.

La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est en fait la seule à représenter les mêmes tendances négatives sur l'est de la Sibérie. Les autres configurations vont même jusqu'à montrer un fort maximum positif, en particulier les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global avec une valeur d'environ $0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Pour le reste de la Sibérie et de la Russie, les différences entre les configurations et les réanalyses NCEP et ERA 40 sont également relativement importantes. Les configurations GEM-VAR et GEM-global ont tendance à surestimer l'intensité des tendances positives de

SAT par rapport aux réanalyses NCEP et ERA 40. La configuration GEM-LAM pilotée par GEM montre par contre des tendances opposées aux réanalyses sur tout le secteur de la Russie et de l'ouest de la Sibérie. Enfin, pour terminer, la zone de tendances négatives sur les plaines de Sibérie septentrionale, représentée par la réanalyse NCEP et en partie par la réanalyse ERA 40, correspond relativement bien avec celle de la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global. Par contre elle ne s'étend pas suffisamment vers l'est ou l'ouest selon le cas pour les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par ERA 40. Pour la configuration GEM-global, cette zone ne s'étend pas assez vers l'est mais beaucoup trop au sud et à l'ouest au point de toucher la Russie à l'ouest de l'Oural et l'Europe de l'Est. En fait, les tendances sur ces secteurs sont clairement positives avec les réanalyses NCEP et ERA 40.

Printemps

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

Pour le printemps (MAM), les différentes régions reliées au refroidissement et au réchauffement apparaissent relativement semblable pour les réanalyses NCEP et ERA 40. Le réchauffement se retrouve sur pratiquement tout le domaine à l'exception du Sud de l'Alaska, de la Colombie-Britannique, des plaines canadiennes, de la mer de Béring, du golfe de l'Alaska, du plateau de Sibérie centrale et de la région comprise entre les pays scandinaves, l'Islande, la côte est du Groenland et l'archipel de Svalbard (soit la région de la mer du Groenland et de la mer de Norvège), où le refroidissement domine. Les données de réanalyse NCEP ont également deux régions de refroidissement supplémentaires : le nord du Groenland et la Russie, à l'ouest de l'Oural.

Il est possible d'observer, pour la distribution géographique des tendances maximales de SAT, trois zones de maximum de réchauffement ($> 0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$) communes aux réanalyse NCEP et ERA 40. La première se trouve sur la mer de Sibérie orientale, le plateau de l'Anadyr et les Hauteurs de la Kolyma, la deuxième sur la mer de Beaufort et l'archipel canadien et la dernière sur la mer de Kara, la partie est de la mer de Barents et les plaines de Sibérie occidentale. La deuxième région a cependant des tendances plus faibles avec la réanalyse ERA 40 avec une valeur maximale d'environ $0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$. La dernière région est également plus étendue vers le sud de la Russie avec la

réanalyses ERA 40. Il faut également remarquer l'absence de fortes tendances négatives de SAT ($< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) au cours des mois de MAM (printemps) pour la réanalyse ERA 40. Les tendances négatives de SAT apparaissent plus fortes et plus étendues pour la réanalyse NCEP que pour la réanalyse ERA 40, notamment sur le Yukon et les prairies canadiennes avec un maximum d'environ $-0.112^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Le maximum sur le plateau de Sibérie centrale est également plus important avec une valeur d'environ $-0.086^{\circ}\text{C an}^{-1}$ comparé à $-0.032^{\circ}\text{C an}^{-1}$ avec la réanalyse ERA 40. Enfin, le maximum près de l'Islande est pratiquement le même pour les deux configurations avec une valeur d'environ $-0.048^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Les deux maximums supplémentaires de la réanalyse NCEP, situé sur le nord du Groenland et au sud-est de l'Europe de l'Est ont tout deux une valeur d'environ $-0.080^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Pour terminer, la réanalyse NCEP semble positionner un maximum de tendances négatives de SAT sur le sud de l'Alaska avec une valeur d'environ $-0.086^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Celui-ci ne semble pas très bien représenté sur la réanalyse ERA 40.

Comparaison des configurations de GEM

Ici encore, la distribution géographique des tendances positives et négatives de SAT varie considérablement d'une configuration de GEM à l'autre. Par exemple, la configuration GEM-VAR ne simule aucun refroidissement sur l'Europe de l'est, la Russie et la Sibérie (à l'exception d'une petite zone juste au sud de la mer des Laptev – aussi représentée avec la configuration GEM-global). De plus, la configuration GEM-VAR est la seule à représenter des tendances positives sur l'Alaska et le Yukon. L'archipel canadien, la baie d'Hudson, la baie de Baffin, le Détroit de Davis et la majeure partie des Territoires du Nord-Ouest sont par contre affectés par un refroidissement.

La zone de refroidissement sur l'Amérique du Nord simulée par la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global ressemble beaucoup à celle du GEM-VAR à l'exception de la zone de réchauffement sur le Nord du Québec et la baie d'Hudson et de la zone de refroidissement sur l'ouest des plaines canadiennes, le Yukon et l'Alaska. Ce patron de refroidissement sur l'Amérique du Nord ressemble en fait beaucoup plus à celui de la configuration GEM-global, à l'exception bien sur, du refroidissement sur le Groenland. La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 montre également le même réchauffement sur le Groenland que la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, cependant, les tendances de température du reste du continent américain sont complètement inversées par rapport à la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global mais également par rapport

aux autres configurations. En fait, la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 simule un réchauffement sur tout le continent américain sauf pour l'Alaska et le nord du Yukon.

Parmi les configurations qui simulent un refroidissement en Russie, la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global est celle qui simule la zone la moins étendue. Celui-ci affecte seulement la partie de la Russie située du côté ouest de l'Oural. Les zones de refroidissement des configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par ERA 40 sont plus similaire au dessus de la l'Eurasie qu'au dessus de l'Amérique du Nord alors qu'elles affectent la Russie à l'ouest de l'Oural, les plaines de Sibérie occidentale et septentrionale et une partie de la région montagneuse des Monts de Verkhoïansk et des Hauteurs de la Kolyma (GEM-global seulement). La limite de séparation entre les tendances positives et négatives apparait cependant beaucoup plus zonale pour la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40.

Il existe également de grandes différences dans la distribution des tendances de température au dessus des zones maritimes. Par contre toutes les configurations s'entendent pour simuler un refroidissement sur le golfe de l'Alaska, la mer de Tchouktches, la mer de Beaufort, la partie côtière située à l'ouest de l'archipel canadien et du Groenland ainsi que sur la région située immédiatement au nord de l'Islande.

La configuration GEM-global est la seule à simuler un refroidissement sur la majorité de l'océan Arctique (à l'exception d'une petite région située directement au pôle) alors que la zone de refroidissement est située du côté américain dans le cas des configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global.

La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global ne montre aucun refroidissement au dessus des mers de Russie comparativement aux autres configurations. Cependant, là aussi les différences sont importantes. Les configurations GEM-VAR et GEM-global montrent un refroidissement au-dessus de la mer des Laptev et de la mer de Sibérie occidentale. La configuration GEM-global montre de plus un refroidissement au dessus de la mer de Kara. La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 montre quant à elle un refroidissement seulement sur la mer de Kara et la mer des Laptev.

Pour terminer, la configuration GEM-global est la seule à montrer un refroidissement sur la mer du Groenland alors que la configuration GEM-VAR est la seule à montrer un refroidissement plus marqué sur l'Atlantique Nord et la mer de Béring.

Il y a aussi des différences importantes au niveau de la distribution géographique et de l'étendue des valeurs extrêmes des tendances de SAT (supérieures ou inférieures à $0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$). La plus importante est celle

associée à la configuration GEM-VAR. Celle-ci est la seule à simuler un fort maximum positif ($> 0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) sur l'Europe de l'Est, l'est des pays scandinaves, la partie de la Russie à l'ouest de l'Oural, les plaines de Sibérie septentrionale et la mer de Kara. De plus, la région de la mer de Barents, des archipels de Svalbard et François-Joseph ainsi que la Nouvelle Zemble se retrouve avec des valeurs de tendance de température $> 0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Cette région de fort maximum ($> 0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$) est également représentée dans les configurations GEM-LAM et GEM-global. L'intensité de cette dernière est cependant un peu plus faible et l'étendue plus petite. Un autre maximum positif, avec des valeurs $> 0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$, est également présent sur la mer de Groenland dans toutes les configurations de GEM. L'intensité de ce maximum est cependant légèrement plus fort pour les configurations GEM-VAR et GEM-global. Pour terminer, la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est la seule à montrer plusieurs autres petits maximums ($> 0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$), notamment sur le centre des Territoires du Nord-Ouest, sur la baie de Baffin et sur le détroit de Davis.

Pour les maximums négatifs de tendances de température ($< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$), seules les configurations GEM-VAR et GEM-global présentent une région de dimension significative. Pour la configuration GEM-VAR, cette région est située sur le détroit de Davis, le nord du Québec, l'île de Baffin et la partie est de la baie d'Hudson et de l'archipel canadien avec une valeur maximale $< -0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$ située sur le nord du Québec. Pour la configuration GEM-

global, la région de fort refroidissement se situe sur la partie nord des Territoires du Nord-Ouest et du Yukon ainsi que sur la mer de Beaufort avec une valeur négative maximale d'environ $-0.128^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Pour terminer, la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est la seule à montrer deux petites régions de maximum négatif de tendances de température (environ $-0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$), la première étant située sur les plaines de Sibérie septentrionale, aux environs de Katanga et la seconde aux environs de Norilsk.

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison des tendances de SAT durant le printemps (MAM) des différentes configurations de GEM avec les réanalyses montre, tout comme à l'hiver, des différences relativement importantes et ce dans plusieurs régions. Sur l'archipel canadien par exemple, les réanalyses présentent une zone de maximum de tendances positives de SAT. Pour les configurations de GEM, seule la configuration GEM–LAM piloté par ERA 40 montre de faibles tendances positives. Pour les autres configurations, les tendances sont négatives, en particulier avec les configurations GEM–VAR et GEM–global. En fait, la zone de tendances négatives de ces deux configurations est beaucoup trop étendue en comparaison des réanalyses. Les configurations de GEM éprouvent également de la difficulté à reproduire les tendances négatives sur l'Alaska, le Yukon et l'ouest des Territoires du Nord–Ouest. Aucune n'est en fait en mesure de représenter les deux maximums de tendances négatives de la réanalyses NCEP. Par contre, la configuration GEM–global est celle la plus proche des réanalyses. Dans le cas de la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40, la zone de refroidissement touche seulement l'Alaska. Enfin, avec la configuration GEM–VAR, les tendances sont complètement inversées par rapport aux réanalyses sur le secteur de l'archipel canadien et des Territoires du Nord–Ouest. Cette dernière montre par contre un fort maximum négatif, de même amplitude que la réanalyse NCEP, mais cependant positionné le long de la côte de l'Alaska et du Yukon.

Sur le Groenland, les différences entre les réanalyses et les configurations de GEM sont aussi marquées. Les configurations GEM-global, GEM-LAM pilotée par ERA 40 et la réanalyse ERA 40 montrent des tendances positives sur l'ensemble du Groenland. La réanalyse NCEP montre une zone de refroidissement seulement sur le secteur nord tandis que les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global montrent clairement des tendances négatives sur tout le secteur.

La réanalyse ERA 40 et les configurations sont par contre en assez bon accord pour la région maritime de la mer de Norvège, la mer du Groenland et l'Atlantique Nord avec des tendances généralement positives sauf dans le secteur de l'Islande. Par contre, dans le cas de la réanalyses NCEP, la zone de tendances négatives est plus étendue et touche aussi la majeure partie de la mer de Norvège. La configuration GEM-VAR est également la seule à montrer des tendances négatives sur l'ouest de l'Atlantique Nord. Ce refroidissement n'est cependant pas présent dans les réanalyses. Par contre, toutes les configurations et les réanalyses s'entendent pour simuler des tendances positives d'amplitude similaire sur la région maritime entre la Nouvelle Zemble et les archipels de Svalbard et François-Joseph.

Pour les pays scandinaves, les configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par ERA 40 sont en assez bon accord avec des tendances relativement nulles. Par contre, les tendances sont positives avec la

configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global. Dans les cas de la configuration GEM-VAR, les tendances sont beaucoup trop positives avec des valeurs d'environ $0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$ sur le secteur est de la Scandinavie. Enfin, la réanalyse NCEP est la seule à montrer des tendances négatives sur la partie nord de cette région.

Pour la région de la Russie à l'ouest de l'Oural, la réanalyse NCEP et les configurations GEM-global, GEM-LAM pilotée par GEM-global et GEM-LAM pilotée par ERA 40 sont en assez bon accord avec des tendances négatives de SAT. Par contre, avec la réanalyse ERA 40, les tendances sont positives. Par conséquent, seule la configuration GEM-VAR correspond à un tel patron. Cependant, l'intensité des tendances positives est beaucoup trop forte en comparaison de la réanalyse.

Pour le reste de la Russie, la Sibérie et les différentes mers de Russie, les configurations éprouvent relativement de difficulté à représenter les fortes tendances positives des réanalyses NCEP et ERA 40. Bien que la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montrent des tendances positives sur tout ce secteur, celles-ci sont beaucoup trop faibles comparées aux réanalyses. La configuration GEM-VAR fait mieux en représentant des tendances positives du même ordre de grandeur sur l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale. Par contre, les tendances sont encore trop faibles sur la partie est des plaines de Sibérie septentrionale et l'extrême est de la Sibérie.

La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 montre des tendances opposées sur l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale, le nord des plaines de Sibérie occidentale et le nord du plateau de Sibérie centrale. Par contre bien que les tendances soient encore trop faibles sur l'est de la Sibérie, elles sont tout de même en accord avec les réanalyses. Enfin, pour la configuration GEM-global, les tendances négatives occupent une superficie encore plus grande de sorte que seulement les régions du sud du plateau de Sibérie centrale et des plaines de Sibérie occidentale montrent des tendances positives de SAT. Elle est donc celle qui correspond le moins au patron des réanalyses.

La région de tendances négatives, située sur l'est du plateau de Sibérie centrale par les réanalyses NCEP et ERA 40, est aussi partiellement résolue par les configurations de GEM, en particulier les configurations GEM-VAR et GEM-global (bien que l'amplitude des tendances semble sensiblement la même). Pour la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, la conclusion est moins évidente du fait de la grande zone de tendances négatives juste à l'ouest. Enfin, il n'y a aucune trace de tendances négatives dans cette région avec la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global. Conclusion, les configurations de GEM sont relativement incapable de générer les valeurs des tendances positives des réanalyses NCEP et ERA 40 le long de la côte de la Russie, de la Sibérie, de l'Alaska et de l'archipel canadien.

Enfin, pour le secteur maritime de l'océan Arctique, aucune des configurations de GEM n'arrive à représenter des tendances positives sur tout le secteur (mer de Beaufort, mer des Tchouktche, détroit de Béring, mer de Sibérie orientale, mer des Laptev, mer de Kara et mer de Barents inclus). En fait, toutes les configurations montrent des tendances négatives sur la mer de Beaufort et la mer des Tchouktche. La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 montre même des tendances négatives sur la mer des Laptev, la mer de Kara et la région entre le pôle, l'archipel de François-Joseph et le Groenland. Pour la configuration GEM-VAR, les tendances négatives touchent aussi la mer de Sibérie orientale et la mer de Kara. La pire configuration est sans nul doute la configuration GEM-global qui ne montre pratiquement aucune tendance positive sur le secteur maritime de l'océan Arctique (sauf au pôle). Le printemps est par conséquent la saison la moins bien représentée par les différentes configurations de GEM.

Été

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

Analysons maintenant les distributions géographiques des tendances positives et négatives de SAT, représentées par les données des réanalyses NCEP et ERA 40, pour l'été (JJA). De manière générale, les tendances sont légèrement plus froides avec la réanalyse NCEP. La région de réchauffement en été est surtout située sur les continents (excepté pour les données de réanalyse NCEP qui montrent clairement un refroidissement sur les plaines de Sibérie occidentale et septentrionale ainsi que sur l'extrême est de la Sibérie). Les zones maritimes affectées par le réchauffement se trouvent sur les régions de l'Atlantique Nord, la mer de Norvège, la mer de Barents (ERA 40 seulement), la mer de Kara, l'océan Arctique au nord de la mer des Laptev (NCEP seulement) et la mer de Sibérie orientale alors que les zones de refroidissement sont plutôt situées sur la mer de Beaufort, la mer et le détroit de Béring et la région comprise entre la Nouvelle Zemble, l'archipel de Svalbard et le Groenland. Il y a cependant une inversion des tendances au dessus du nord du Groenland et de la Mer de Kara entre la réanalyse ERA 40 (réchauffement) et la réanalyse NCEP (refroidissement). De plus, la région de Fairbanks en Alaska montre une tendance négative avec ERA 40 alors qu'elle est fortement positive avec NCEP. Il faut également souligner l'importance des zones où les tendances sont pratiquement nulles (représentées en blanc et par le premier niveau de bleu). Celles-ci touchent principalement le centre de l'océan Arctique et la mer des Laptev dans le cas de la réanalyse ERA 40

tandis qu'elles affectent plus particulièrement la mer de Norvège et la mer du Groenland dans le cas de la réanalyse NCEP.

Pour l'été (JJJ), il n'y a plus qu'une seule zone principale de maximum de réchauffement (d'environ $0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$) commune aux deux réanalyses. Elle est centrée sur le sud de l'archipel canadien et s'étend plus vers le sud dans le cas de la réanalyse ERA 40. De petites régions de maximum de réchauffement sont également présentes avec les données de la réanalyse ERA 40 sur la côte de la Sibérie avec des valeurs d'environ $0.098^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Un autre maximum $> 0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$ est aussi observable près de Fairbanks avec les données NCEP. La plus forte tendance négative de SAT est représentée sur la mer de Beaufort par la réanalyse ERA 40 avec une valeur d'environ $-0.032^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Pour la réanalyse NCEP, plusieurs minimums de tendances sont présents en différentes régions, notamment sur le nord du Groenland, la mer de Barents, l'est des plaines de Sibérie septentrionale, la mer des Laptev et les plaines de Sibérie occidentale. Leur valeur est d'environ $-0.084^{\circ}\text{C an}^{-1}$ sauf environ $-0.032^{\circ}\text{C an}^{-1}$ pour la dernière région.

Comparaison des configurations de GEM

Comparons la distribution géographique des tendances de température des différentes configurations du GEM pour l'été (JJA). Les configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par GEM-global apparaissent relativement semblables. Dans les deux cas, un refroidissement est observé sur l'Alaska, le Yukon, le Kamtchatka, l'est de la Sibérie (le plateau de l'Anadyr, les Hauteurs de la Kolyma et les Monts de Verkhoïansk) et l'est des plaines de Sibérie septentrionale ainsi que sur la Russie à l'ouest de l'Oural. Contrairement à la configuration GEM-global, la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montre aussi un refroidissement sur le nord du plateau de Sibérie centrale. Par contre, la configuration GEM-global est la seule de toutes les configurations à montrer un refroidissement sur l'archipel canadien et les Territoires du Nord-Ouest.

Une autre particularité, commune aux deux configurations ainsi qu'à la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est l'absence de tendances sur tout l'océan Arctique. La configuration GEM-VAR montre également une telle absence de tendances sauf pour la partie de l'océan Arctique située entre l'ouest de la Russie et le Groenland où les tendances sont positives. Finalement, toutes les configurations montrent une zone de tendances négatives sur la mer de Béring.

Les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par ERA 40 montrent aussi un refroidissement sur l'Alaska (l'est de l'Alaska pour GEM-LAM pilotée par ERA 40) et le Yukon, sauf que dans le cas de la configuration GEM-VAR, le refroidissement s'étend aussi à la Colombie-Britannique et aux plaines canadiennes. Par contre, les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par ERA 40 sont les seules à montrer un refroidissement sur le sud du Groenland. Pour terminer, la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est la seule à simuler une zone de refroidissement sur les pays scandinaves alors que la configuration GEM-VAR est la seule à montrer une grande zone de refroidissement sur les plaines de Sibérie occidentale, l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale et la majorité du plateau de Sibérie centrale.

Les quatre configurations simulent également des zones de tendances positives sur la région maritime s'étendant de l'Atlantique Nord jusqu'à la mer de Kara en passant par la mer de Norvège, la mer du Groenland, l'Islande, la mer de Barents, les archipels de Svalbard et François-Joseph et la Nouvelle Zemble, ainsi que sur la baie d'Hudson, le nord du Québec, la baie de Baffin et le détroit de Davis. Les configurations montrent également une zone de tendances positives sur la partie ouest de la mer de Béring. Enfin, toutes les configurations, à l'exception de la configuration GEM-VAR, simulent une zone de tendances positives le long de la côte de l'Alaska et sur la mer des Tchouktches.

En analysant la distribution géographique et l'étendue des valeurs extrêmes des tendances de SAT (supérieures ou inférieures à $0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$), il est facile de constater que la configuration GEM-global est la seule à simuler une grande région de maximum de tendances positives de SAT ($> 0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) sur la partie centrale de la Russie, plus particulièrement sur les plaines de Sibérie occidentale. Un maximum positif de plus petite dimension est également visible dans la région de Khatanga avec la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40. Le seul maximum de tendances négatives ($< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) est observé avec les configurations GEM-LAM pilotée par GEM-global et GEM-global dans la région montagneuse du plateau de l'Anadyr, des Hauteurs de la Kolyma et des Monts de Verkhoïansk. Pour la configuration GEM-VAR, un maximum de moindre intensité est présent sur le sud du plateau de Sibérie centrale avec une valeur d'environ $-0.080^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Les configurations GEM-global et GEM-LAM piloté par GEM-global montrent aussi un plus faible maximum sur l'est de l'Alaska avec une valeur respective d'environ $-0.080^{\circ}\text{C an}^{-1}$ et $-0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$.

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison des tendances de SAT pour l'été (JJA) entre les configurations de GEM et les réanalyses NCEP et ERA 40 montre des différences relativement importantes. D'autant plus que les différences entre les réanalyses elles mêmes sont également significatives en certains endroits. Néanmoins, les configurations sont presque toutes en accord avec les réanalyses pour produire des tendances pratiquement nulles au dessus de l'océan Arctique. La seule à s'en écarter un peu dans la région située directement au nord du Groenland est la configuration GEM–VAR avec des tendances positives. De plus, les faibles tendances négatives présentées par la réanalyse ERA 40 sur la région de la mer de Beaufort n'est aucunement présente dans les configurations de GEM.

La zone maritime comprenant la mer de Kara, la mer de Barents, la mer de Norvège, la mer du Groenland et l'Atlantique Nord présente aussi des tendances positives de SAT similaires à celles de la réanalyse ERA 40. Par contre, la zone de fortes tendances négatives entre le nord du Groenland, la mer de Barents et la mer de Kara présentée par la réanalyse NCEP est absente des configurations de GEM. Au mieux, seules les configurations GEM–LAM arrivent à générer (un peu à la manière de la réanalyse ERA 40) de petites régions de tendances relativement nulles sur ce secteur. Les configurations de GEM arrivent aussi à relativement bien représenter la zone de tendances nulles du secteur de la mer de Béring et du golfe de l'Alaska.

Bien que les réanalyses et les configurations de GEM ne s'entendent pas entre-elles pour les tendances de SAT au dessus de l'extrême est de la Sibérie, du détroit de Béring, de l'Alaska et de la côte ouest américaine, les configurations de GEM et la réanalyse ERA 40 proposent une zone de faibles tendances positives sur la zone maritime juste au nord de l'Alaska et du Yukon. Cette zone de tendances positives est absente dans la réanalyse NCEP. En fait, les configurations de GEM montrent de fortes tendances négatives sur l'Alaska et le Yukon alors qu'avec la réanalyse NCEP, les tendances sont positives (avec un fort maximum positif sur l'est de l'Alaska) tandis qu'avec la réanalyse ERA 40, elles sont relativement nulles. Avec la configuration GEM-VAR, ces tendances négatives s'étendent aussi à toute la côte ouest et même à l'intérieur du Canada. La configuration GEM-VAR pilotée par GEM-global est la seule des configurations à montrer des tendances positives sur l'ouest de l'Alaska.

Pour l'extrême est de la Sibérie, les configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par GEM-global montrent des tendances négatives beaucoup trop fortes et étendues vers l'ouest comparativement aux tendances négatives de la réanalyse NCEP. La configuration GEM-VAR est par contre en meilleur accord avec cette réanalyse pour ce secteur. De l'autre côté, la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est aussi en accord avec la réanalyse ERA 40 pour cette région et les secteurs plus à l'ouest avec des tendances positives

de SAT. Ceci vient du fait que les réanalyses NCEP et ERA 40 présentent des tendances opposées de SAT pour l'est de la Sibérie.

La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est celle qui représente le mieux la zone de tendances négatives sur les plaines de Sibérie occidentale présentée par les réanalyses NCEP et ERA 40. Par contre, la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montre une grande zone de tendances négatives sur le plateau de Sibérie centrale qui n'est pas représentée par les réanalyses. En fait, pour les configurations GEM-LAM pilotée par GEM-global et GEM-global, cette zone de tendances négatives est située trop à l'ouest, notamment jusque sur l'Europe de l'Est. Par conséquent, les tendances de SAT sont majoritairement positives sur les plaines de Sibérie occidentale avec ces deux configurations. Néanmoins, la configuration GEM-global présente un fort maximum de tendances positives sur les plaines de Sibérie occidentale et le sud du plateau de Sibérie centrale. Ce maximum, situé sur le plateau de Sibérie centrale, est par contre aussi représenté par les réanalyses NCEP et ERA 40. Enfin, pour terminer, toutes les réanalyses et les configurations, sauf les configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par GEM-global présentent des tendances positives sur l'Europe de l'Est et la Russie à l'ouest de l'Oural. Les tendances positives de SAT sur les pays scandinaves sont également bien représentées par les configurations de GEM à l'exception de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40.

2.1.1.2 Tendances des moyennes annuelles de SAT

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

Les réanalyses NCEP et ERA 40 sont généralement similaires pour la distribution géographique des tendances positives et négatives des moyennes annuelles de SAT. Les deux réanalyses montrent un refroidissement sur l'ouest de l'Alaska, la mer et le détroit de Béring et un réchauffement presque partout ailleurs. Cependant, il existe certaines petites différences notables. La réanalyse ERA 40 montre des tendances négatives juste au nord de la mer de Beaufort alors qu'elles sont positives dans le cas de la réanalyse NCEP. De plus, la réanalyse NCEP montre une zone beaucoup plus étendue de tendances presque nulles au dessus de la Russie (de part et d'autre de l'Oural) alors qu'elle ne touche qu'une partie des plaines de Sibérie occidentale dans le cas de la réanalyse ERA 40. Pour terminer, la réanalyse NCEP montre une zone de refroidissement sur la mer des Laptev ainsi qu'en différent endroits comme l'ouest de la baie d'Hudson, le détroit de Davis et le nord du Groenland. Pour la réanalyse ERA 40, il s'agit plutôt de régions de réchauffement.

La position des maximums positifs de tendances de SAT correspond assez bien géographiquement pour les deux réanalyses. Le premier est centré entre la Nouvelle Zemble et les archipels de Svalbard et François-Joseph et le deuxième sur l'archipel canadien. Les zones de tendances positives sont néanmoins plus étendues dans le cas de la réanalyse NCEP. De plus,

l'intensité des maximums y est également plus forte avec des valeurs $> 0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Qui plus est, deux autres forts maximums positifs sont également présents de part et d'autre de la mer de Sibérie occidentale dans le cas de la réanalyse NCEP. Ceux-ci ont des valeurs maximales $> 0.176^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Pour terminer, la réanalyse ERA 40 ne présente aucun maximum de tendances négatives, avec des valeurs $< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$. La réanalyse NCEP ne présente, quant à elle, qu'un seul maximum de tendances négatives avec des valeurs $< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Celui-ci est situé sur la mer de Laptev et à une valeur d'environ $-0.112^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Les deux réanalyses placent également un plus faible minimum sur l'ouest de l'Alaska avec une valeur d'environ $-0.084^{\circ}\text{C an}^{-1}$.

Comparaison des configurations de GEM

Les configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par ERA 40 sont pratiquement similaire au niveau de la distribution géographique des tendances positives et négatives des moyennes annuelles de SAT sauf pour quelques régions. Dans la configuration GEM-global, le réchauffement sur le sud du Groenland est plus prononcé tandis que le refroidissement en Russie touche une plus grande zone vers l'ouest. En fait, ce dernier affecte complètement la mer des Laptev, l'est de la mer de Kara et les plaines de Sibérie septentrionale. Le refroidissement situé à l'ouest de l'Oural est cependant plus marqué avec la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40.

Fait particulier, les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global montrent des tendances de température opposée pour les régions de la Russie à l'ouest de l'Oural et de l'archipel canadien. En fait, la configuration GEM-VAR montre un fort réchauffement ($> 0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) sur la partie ouest de la Russie et pratiquement une absence de tendances sur l'archipel canadien et la baie d'Hudson alors que la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montre respectivement un refroidissement et un réchauffement ($> 0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$) pour ces mêmes régions. Deux différences plus petites sont également observées sur le plateau de Sibérie centrale ainsi que sur la région entre la Terre du Nord et le Groenland. La configuration GEM-VAR y montre respectivement un refroidissement et un réchauffement et l'inverse pour la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global.

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison entre les réanalyses NCEP et ERA 40 et les différentes configurations de GEM montrent des différences relativement importantes aux niveaux des tendances des moyennes annuelles de SAT, en particulier avec les configurations GEM–global et GEM–LAM pilotée par ERA 40. En effet, celles–ci montrent de fortes tendances négatives de SAT sur tout l’océan Arctique et l’ouest de l’archipel canadien alors que les tendances sont positives avec les réanalyses (à l’exception près de la zone de tendances négatives sur la mer de Beaufort et la mer de Tchouktches de la réanalyse ERA 40, qui correspond à la plus forte zone de tendances négatives des deux configurations). Par contre, les configurations de GEM représentent relativement bien les tendances négatives sur la mer de Béring, le golfe de l’Alaska et l’Alaska. Néanmoins, la configuration GEM–VAR est la seule à montrer des tendances positives sur l’est de l’Alaska, des tendances négatives sur le Yukon, la Colombie–Britannique et les prairies canadiennes et des tendances relativement nulles sur l’archipel canadien et le nord du Québec. Bien que les autres configurations représentent des tendances positives de SAT sur les Territoires du Nord–Ouest, le nord du Québec et le sud–est de l’archipel canadien, la configuration GEM–LAM pilotée par GEM–global est la seule à représenter un maximum d’intensité comparable aux réanalyses. Par contre, celui–ci est situé un peu trop au sud–est. Les tendances sur le Groenland de la configuration GEM–LAM pilotée par GEM–global sont aussi relativement similaires à la réanalyse ERA 40. La

configuration GEM-global est aussi en accord sur le nord du Groenland avec la réanalyse NCEP pour des tendances négatives. Enfin, toutes les configurations, sauf peut-être un peu moins la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, réussissent à représenter les petites zones de tendances négatives sur le pourtour du Groenland.

Du côté de l'Eurasie, les tendances des configurations de GEM sont en grande partie similaires aux réanalyses. La configuration GEM-VAR montre par contre un fort maximum positif sur l'Europe de l'Est et l'ouest de la Russie qui n'est pas du tout présent avec les réanalyses. Les deux configurations GEM-LAM montrent, tout comme les réanalyses, une zone de tendances négatives dans la région de l'Oural. Par contre avec la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, celle-ci s'étend vers le nord-ouest jusqu'au Groenland. Enfin pour terminer, les forts maximums positifs et négatifs présentés par la réanalyse NCEP sur les mers de Russie et de Sibérie ne sont pas visibles avec dans les configurations de GEM.

2.1.2 Variances de SAT

2.1.2.1 Variances des moyennes saisonnières de SAT

Automne

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

La comparaison des variances de SAT des réanalyses ERA 40 et NCEP pour l'automne (SON) montrent généralement le même patron de distribution au dessus des continents et de l'océan Arctique. Par contre l'intensité, la distribution géographique et l'étendue des valeurs extrêmes des variances de SAT ($> 6^{\circ}\text{C}^2$)²⁷ varient de manière plus ou moins marquée entre les deux réanalyses. Les variances de SAT sont en effet plus fortes dans le cas de la réanalyse NCEP. Par exemple, un maximum de variance est observé pour les deux réanalyses entre les archipels de Svalbard et François-Joseph, la Nouvelle Zemble et la mer de Kara. Néanmoins, l'étendue et l'intensité sont moins importantes dans le cas de la réanalyses ERA 40. Pour la réanalyse NCEP, cette zone de maximum de variance touche toute la mer de Kara alors que pour la réanalyse ERA 40, elle ne touche que la partie est. Le maximum de variance, situé entre les archipels de Svalbard et François-Joseph, est d'environ 11°C^2 pour la réanalyse ERA 40 et $> 16^{\circ}\text{C}^2$ pour la réanalyse NCEP.

La réanalyse ERA 40 montre aussi un maximum de variance de SAT sur le nord des plaines de Sibérie occidentale et les plaines de Sibérie

²⁷ Les couleurs bleu foncé et plus chaudes correspondent à des valeurs $> 6^{\circ}\text{C}$. Cette valeur servira pour la description des zones de maximum de variances de SAT.

septentrionale avec une valeur maximale d'environ 10°C^2 . L'intensité et l'étendue de cette zone de maximum ($> 6^{\circ}\text{C}^2$) n'est pas aussi bien représentée par la réanalyse NCEP.

Plusieurs régions de maximums de variances de SAT ($> 6^{\circ}\text{C}^2$), non représentés par ERA 40 en termes d'intensité et d'étendue, se retrouvent également dans la réanalyse NCEP. La première et la plus importante se trouve sur la mer de Beaufort et la mer des Tchouktches avec un maximum, d'environ 16°C^2 . La réanalyse ERA 40 ne montre qu'une petite région de maximum sur la mer des Tchouktches avec une valeur d'environ 8°C^2 . La deuxième zone de maximum se trouve sur la partie ouest de l'archipel canadien, plus particulièrement sur les îles de la Reine-Élisabeth, avec une valeur d'environ 16°C^2 . La dernière région de maximum se trouve aussi sur l'archipel canadien mais du côté est, sur l'île de Baffin, avec une valeur maximale d'environ 8°C^2 .

Pour terminer, les régions de l'Atlantique Nord, de la mer de Norvège et du détroit de Davis ne présentent aucune variance de SAT. Les variances de SAT sur l'océan Arctique, le plateau de Sibérie centrale, l'Europe de l'Est et le centre du Canada apparaissent également relativement faibles dans les deux réanalyses.

Comparaison des configurations de GEM

Analysons maintenant la distribution géographique et l'étendue des valeurs extrêmes des variances de SAT des différentes configurations de GEM pour l'automne (SON). De manière générale, la distribution géographique des variances de SAT apparaît relativement similaire pour les différentes configurations de GEM. La configuration GEM-VAR est celle qui possède les plus faibles variances de SAT alors que la configuration GEM-LAM piloté par GEM est celle qui possède les plus fortes. Néanmoins, toutes les configurations s'entendent pour générer un minimum de variances sur le détroit de Davis, l'Atlantique Nord, l'Islande, la mer du Groenland et la mer de Norvège. Les configurations de GEM s'entendent également pour générer un minimum de variances sur l'océan Arctique. Par contre, la configuration GEM-VAR montre des variances de SAT pratiquement nulle sur ce secteur.

Seule la configuration GEM-VAR ne présente pas de maximum de variance $> 6^{\circ}\text{C}^2$. Son plus fort maximum, situé sur l'Europe de l'Est, à une valeur d'environ 4°C^2 . Elle présente par contre, tout comme les autres configurations, un maximum d'environ 3°C^2 sur la mer de Kara (4°C^2 pour les configurations GEM-global et GEM-LAM piloté par GEM-global). La configuration GEM-global présente quant à elle un maximum relativement important sur tout l'Alaska avec une valeur d'environ 10°C^2 . Seules les configurations GEM-LAM présentent un maximum d'environ la même intensité cependant, celui-ci est moins étendu. La configuration GEM-global

montre également des maximums secondaires moins importants sur le centre des Territoires du Nord-Ouest ainsi que sur l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale. Le premier maximum, d'une valeur d'environ 6°C^2 , est également présent dans la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global (avec par contre une valeur d'environ 7°C^2). Le second, d'une valeur d'environ 5°C^2 , est aussi apparent dans la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 mais avec une valeur d'environ 7°C^2 .

Dans la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, le maximum le plus étendu, d'une valeur d'environ 7°C^2 , se trouve sur les plaines de Sibérie occidentale. Celui-ci n'est par contre pas présent dans les autres configurations de GEM. Enfin, la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global est celle qui présente le plus fort maximum de variance sur l'ouest de Groenland avec une valeur également d'environ 7°C^2 . Viennent ensuite, en termes d'intensité, les configurations GEM-LAM pilotée par ERA 40, GEM-global et GEM-VAR avec des valeurs respectives d'environ 4°C^2 , 3°C^2 et 1°C^2 .

Comparaison réanalyses–configurations

De manière générale, la comparaison de la distribution géographique des variances de SAT des configurations de GEM avec celles des réanalyses NCEP et ERA 40 montrent de faibles différences. Il est facile de remarquer que les variances de SAT sont légèrement trop faibles dans la configuration GEM–VAR et GEM–global par rapport aux réanalyses, en particulier la réanalyse NCEP. Par contre, les configurations de GEM sont en accord avec les réanalyses pour les zones de plus faibles variances sur le détroit de Davis, l'Atlantique Nord, la mer du Groenland, la mer de Norvège et l'océan Arctique.

Les différences les plus importantes se retrouvent aux niveaux des maximums de variances de SAT. La zone de fortes variances située entre les archipels de Svalbard et François–Joseph et la mer de Kara, n'est pas très bien représentée en termes d'intensité par les configurations de GEM. La zone de maximum située sur la mer des Tchouktches est aussi trop faiblement représentée par les configurations de GEM. De plus l'extension de cette zone vers l'est, telle que le montre la réanalyse NCEP n'est pas du tout visible. En fait, les configurations de GEM, en particulier GEM–global et GEM–LAM pilotée par ERA 40, génèrent plutôt un fort maximum sur l'Alaska. Ce maximum est complètement inexistant dans les réanalyses. Enfin, la réanalyse NCEP montre aussi un maximum sur l'ouest et un autre sur l'est de l'archipel canadien. Ceux-ci ne sont pas non plus représentés dans les

configurations de GEM. Inversement, le maximum situé sur l'Europe de l'Est dans la configuration GEM-VAR n'est pas visible dans les réanalyses NCEP et ERA 40.

Pour terminer, les configurations GEM-LAM montrent aussi un maximum sur les plaines de Sibérie occidentale. Celui-ci correspond assez bien avec les réanalyses. Dans la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global par contre, la zone de maximum ne s'étend pas autant vers l'est que les réanalyses.

Hiver

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

L'hiver (DJF) est la saison qui présente le plus de variance de SAT pour les réanalyses ERA 40 et NCEP. La comparaison des distributions géographiques des variances des deux réanalyses montre que les patrons les plus importants apparaissent généralement semblables. Par contre, certaines différences sont également observées. Ici encore, l'Atlantique Nord, l'Islande et la mer de Norvège ne présentent aucune variance de SAT. Les variances de SAT sur l'océan Arctique, l'est des plaines de Sibérie septentrionale, l'est du plateau de Sibérie centrale ainsi que sur l'est des Territoires du Nord-Ouest apparaissent également relativement faibles pour les deux réanalyses.

La première région de maximum de variances de SAT se trouve sur la baie de Baffin, le détroit de Davis, l'île de Baffin et la partie ouest du Groenland avec une valeur maximale supérieure à 16°C^2 . La réanalyse ERA 40 n'arrive cependant pas à représenter les autres maximums de plus faibles étendues mais de forte intensité ($>16^{\circ}\text{C}^2$) sur la baie d'Hudson, le nord de l'île de Baffin, les îles de la Reine-Élisabeth, la mer de Beaufort, le nord de l'Alaska et la mer de Sibérie présentés par la réanalyse NCEP. Par contre, les réanalyses s'accordent relativement bien sur le maximum de variance de SAT ($\sim 10^{\circ}\text{C}^2$) centré sur les Rocheuses et les plaines canadiennes.

Un autre maximum de variances est également présent sur le sud du détroit de Béring, le nord de la mer de Béring et l'ouest de l'Alaska pour les deux réanalyses. Cependant, l'intensité est relativement plus forte pour la réanalyse NCEP avec une valeur d'environ 16°C^2 contrairement à une valeur d'environ 9°C^2 pour la réanalyse ERA 40.

La dernière région de maximum de variance de SAT ($> 6^{\circ}\text{C}^2$) et la plus étendue de toute se trouve sur les plaines de Sibérie orientale, l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale, la Russie à l'ouest de l'Oural, le sud des pays scandinaves, l'Europe de l'est, la mer de Kara, l'est de la mer de Barents, la nouvelle Zemble, les archipels de Svalbard et François-Joseph et la mer du Groenland. La réanalyse NCEP montre aussi une extension de la zone de maximum vers la mer des Laptev. Par contre, la position du maximum varie légèrement entre les deux réanalyses. La réanalyse NCEP présente un maximum ($>16^{\circ}\text{C}^2$) entre la Nouvelle Zemble et les archipels de Svalbard et François-Joseph plus étendu que pour la réanalyse ERA 40. Celui-ci s'étend jusqu'à la pointe nord du Groenland. Avec la réanalyse ERA 40, le maximum s'étend par contre vers le sud de la Sibérie soit, jusque sur les plaines de Sibérie occidentale. La réanalyse ERA 40 présente de plus deux autres maximums de variances supérieurs à 16°C^2 . Le premier est situé sur la partie ouest des plaines de Sibérie septentrionale et l'autre, juste au sud-est de celle-ci. Pour terminer, la réanalyse NCEP montre également un maximum de variance de SAT sur la mer des Laptev avec une valeur d'environ 16°C^2 .

Comparaison des configurations de GEM

La comparaison des variances de SAT des différentes configurations de GEM permet aisément de constater que l'hiver (DJF) est la saison avec les plus fortes variances de SAT. Les configurations s'entendent aussi pour simuler un minimum de variance sur l'Atlantique nord, l'Islande, la mer de Norvège ainsi que sur l'océan Arctique. Des variances plus faibles sont également présentes sur le plateau de Sibérie centrale, l'est des plaines de Sibérie septentrionale, la mer des Laptev et la mer de Sibérie orientale. Les configurations de GEM sont cependant moins en accord avec un minimum de variance sur la mer de Kara. En fait, toutes les configurations sauf la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 montrent une zone de plus fortes variances de SAT sur le sud de la mer de Kara.

Les deux configurations GEM-LAM sont aussi en accord pour simuler une zone de plus fortes variances de SAT sur les Territoires du Nord-Ouest, l'archipel canadien, la baie d'Hudson, le nord du Québec, l'est de la baie de Baffin et le détroit de Davis. Pour la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, les variances sont légèrement plus faibles sur l'ouest de l'archipel canadien. Le maximum de la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global est situé sur le nord du Québec et à une valeur $> 16^{\circ}\text{C}^2$. Le maximum de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, situé sur le sud de l'île de Baffin est moins étendue que dans la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global mais de la même intensité avec une valeur d'environ

16°C². Enfin, les deux configurations GEM-LAM montrent aussi un maximum d'environ 16°C² sur le nord du détroit de Davis.

La configuration GEM-global montre, tout comme les configurations GEM-LAM, un patron de fortes variances de SAT similaire. Par contre, cette zone de maximum ne touche pas l'archipel canadien et le nord du Québec. En fait, elle touche seulement les Territoires du Nord-Ouest, la baie d'Hudson, l'est de la baie de Baffin et le détroit de Davis. La configuration GEM-global est la seule à générer un maximum de variance sur le sud du Groenland. Celui-ci à une valeur d'environ 9°C². La configuration GEM-VAR est la plus différente avec seulement une petite zone de maximum de variances sur l'île de Baffin et l'est de la baie de Baffin. Les valeurs de ces maximums sont respectivement d'environ 8°C² et 10°C². Ce dernier maximum est cependant plus fort avec la configuration GEM-global. Sa valeur est d'environ 16°C².

Une autre zone de maximum de variances est aussi présente sur le sud de la région montagneuse de l'est de la Sibérie, le sud de l'Alaska et la côte est américaine pour la configuration GEM-VAR. Dans cette configuration, trois maximum, de valeur d'environ 16°C², > 16°C² et encore d'environ 16°C² sont présent sur le sud de l'Alaska, le sud du Yukon et au sud-est de cette dernière. Dans la configuration GEM-global, cette même zone de maximum touche tout l'Alaska et le Yukon et la pointe est de la Sibérie. Un important maximum, > 16°C², est situé sur le sud de l'Alaska et du Yukon. Un autre

maximum d'environ 16°C^2 , mais de plus petite dimension, se trouve juste au nord du Kamtchatka. Avec la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global par contre, cette zone touche l'Alaska, le nord du Yukon, la mer des Tchouktches, le détroit de Béring et la région montagneuse de l'est de la Sibérie. Cette fois ci, les maximums, $> 16^{\circ}\text{C}^2$, se trouvent sur l'ouest de l'Alaska et la région juste au nord du Kamtchatka. Enfin, avec la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, cette zone touche l'ouest de l'Alaska, le détroit de Béring, la région montagneuse de l'est de la Sibérie et l'est des plaines de Sibérie septentrionale. Les maximums, situés sur le sud de l'Alaska et au nord du Kamtchatka, sont plus faibles que les autres configurations avec des valeurs d'environ 13°C^2 et 15°C^2 respectivement. Les différentes configurations s'entendent donc pour simuler un maximum sur l'Alaska et la région juste au nord du Kamtchatka. Cependant, elles ne s'entendent pas sur l'étendue et l'intensité des maximums, en particulier celui de l'Alaska.

La dernière zone de plus fortes variances de SAT ($> 6^{\circ}\text{C}^2$), située entre les archipels de Svalbard et François-Joseph, la Nouvelle Zemble et le Groenland ainsi que sur une partie de l'Europe de la Russie et de la Sibérie, varie légèrement entre les différentes configurations de GEM. Elle apparait moins étendue et plus faible avec les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global. Par exemple, dans les deux configurations mentionnées précédemment, une partie de cette région apparait discontinue entre la mer

du Groenland, l'archipel de Svalbard et la nouvelle Zemble alors qu'elle est continue dans les configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par ERA 40. Néanmoins, toutes les configurations s'entendent pour positionner un maximum en ces trois endroits. Le maximum juste au nord de la Nouvelle Zemble est $> 16^{\circ}\text{C}^2$ pour toutes les configurations sauf la configuration GEM-VAR (9°C^2). Le maximum sur l'archipel de Svalbard à une valeur d'environ 13°C^2 pour les configurations GEM-LAM pilotée par ERA 40 et GEM-global, d'environ 12°C^2 pour la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global et d'environ 8°C^2 pour la configuration GEM-VAR. Le dernier maximum, situé sur la mer du Groenland, à une valeur d'environ 8°C^2 pour les configurations GEM-VAR et GEM-global et d'environ 12°C^2 pour les configurations GEM-LAM.

Pour le reste de la région de plus fortes variances de SAT, les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global apparaissent relativement similaire. Il en va également de même pour les configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par ERA 40. Pour le premier groupe, la région de plus fortes variances de SAT touche majoritairement les plaines de Sibérie occidentale, l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale et le sud de la Russie situé à l'ouest de l'Oural. Pour la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, cette zone, beaucoup plus étendue, touche le sud du plateau de Sibérie centrale, le nord des plaines de Sibérie occidentale, l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale, le nord de la Russie située à l'ouest de

l'Oural et l'Europe de l'Est. Pour la configuration GEM-global, cette zone est encore plus grande et touche toutes les plaines de Sibérie occidentale et septentrionale, l'ouest du plateau de Sibérie centrale, la majeure partie de la Russie à l'ouest de l'Oural et l'Europe de l'Est. Les configurations GEM-global et GEM-LAM piloté par ERA 40 montrent un maximum sur le nord de la Russie situé à l'ouest de l'Oural. La configuration GEM-VAR montre un maximum sur les plaines de Sibérie occidentale alors que la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global ne montre pas vraiment de maximum sur ces secteurs. Les valeurs de ces maximums sont respectivement $> 16^{\circ}\text{C}^2$, d'environ 13°C^2 et d'environ 13°C^2 .

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison de configurations de GEM avec les réanalyses NCEP et ERA 40 pour l'hiver (DJF) montrent certaines différences et certains points communs. La configuration GEM–VAR représente par exemple relativement bien la zone de plus fortes variances de SAT sur le sud de la région montagneuse de l'est de la Sibérie, le sud de l'Alaska et de la côte est américaine présentée par la réanalyse ERA 40. Par contre, la zone s'étend un peu plus vers les plaines canadiennes dans le cas de la réanalyse tandis que les variances sont plus fortes avec la configuration GEM–VAR sur le sud de l'Alaska et la côte est américaine. Par contre, pour la réanalyse NCEP, le maximum sur le sud de la région montagneuse de l'est de la Sibérie est plus fort que dans la configuration GEM–VAR.

Les différentes configurations ne sont par contre pas en mesure de représenter la zone de maximum de variances de SAT qui longe la côte nord de la Sibérie et de l'Alaska (sauf la configuration GEM–LAM pilotée par GEM–global), la mer de Beaufort et l'ouest de l'archipel canadien de la réanalyse NCEP et ce même si la configuration GEM–global met des variances de SAT relativement fortes sur tout l'Alaska et le Yukon. De plus, même si les variances de la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40 sont les plus fortes de toutes les configurations sur l'ouest de l'archipel canadien, elles ne sont pas assez fortes pour être comparables avec celles de la réanalyse NCEP. Par contre, les réanalyses et les configurations s'entendent pour

mettre des variances de SAT plus faibles sur l'océan Arctique. Elles s'entendent également pour la zone de variances relativement nulles sur l'Atlantique Nord, l'Islande et la mer de Norvège.

Toutes les configurations, sauf GEM-VAR, ne sont pas non plus aptes à représenter la zone de plus faibles variances de SAT sur l'est des Territoires du Nord-Ouest. La configuration GEM-global est par contre la seule à représenter des variances plus fortes sur l'ouest du Groenland tout comme les réanalyses NCEP et ERA 40. Les configurations de GEM sous-estiment aussi beaucoup l'étendue du maximum situé sur la baie de Baffin et le détroit de Davis tandis que le maximum sur le nord du Québec est fortement surestimé (en particulier pour la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global) par rapport aux réanalyses.

Du côté européen, les configurations n'arrivent pas à générer de plus fortes variances de SAT sur le sud des pays scandinaves. Les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global n'arrivent pas non plus à simuler des variances plus fortes sur l'Europe de l'Est et le nord de la Russie située à l'ouest de l'Oural comme le font les réanalyses. En fait, seule la configuration GEM-global recrée assez bien l'immense zone de grandes variances de SAT sur l'Europe de l'Est, la Russie, les plaines de Sibérie, la Nouvelle Zemble, la mer de Kara, les archipels de Svalbard et François-Joseph et la mer du Groenland. Par contre, la région de maximum, bien que d'intensité

comparable, n'est pas assez étendue en comparaison des réanalyses NCEP et ERA 40 (en particulier dans le triangle délimité par la Nouvelle Zemble et les archipels de Svalbard et François-Joseph).

Pour terminer, cette même région de fortes variances, générée par la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, n'est pas assez étendue et l'intensité et l'étendue du maximum sont fortement sous-estimées par rapport aux réanalyses NCEP et ERA 40, en particulier sur la mer de Kara.

Enfin, les configurations GEM-LAM surestiment l'étendue de la zone de plus fortes variances de SAT sur l'extrême est de la Sibérie tandis que la configuration GEM-global la sous-estime. Par contre, les valeurs et la position des maximums sont relativement similaires aux réanalyses.

Printemps

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

La comparaison des variances de SAT des réanalyses ERA 40 et NCEP pour le printemps (MAM) montrent généralement le même patron de distribution géographique au dessus des continents et de l'océan Arctique. Les zones de plus fortes variances de SAT se trouvent en bordure des continents, sur les mers de Russie, de Sibérie, la mer de Beaufort, l'archipel canadien et les régions centrales du Canada tandis que les zones de plus faibles variances se trouvent sur l'Atlantique Nord, la mer de Norvège, le nord des pays scandinaves et l'Islande. Ici encore, il existe des différences au niveau de l'intensité et de la distribution des maximums de variances de SAT. La seule concordance entre les réanalyses ERA 40 et NCEP, en termes de maximum d'intensité et d'étendue, se trouve sur la mer de Barents avec une valeur maximale d'environ 16°C^2 .

La réanalyse ERA 40 montre aussi des maximums d'environ 9°C^2 sur les plaines de Sibérie septentrionale, 8°C^2 juste au sud de la mer de Sibérie occidentale et de 8°C^2 sur le nord de l'Alaska. Ceux-ci sont par contre plus ou moins bien représentés par la réanalyse NCEP. La réanalyse NCEP présente, quant à elle, plusieurs maximums de même intensité et étendue sur la partie est de la mer de Sibérie orientale, la mer de Beaufort, les îles de la Reine-Élisabeth, le nord de l'île de Baffin et sur le détroit de Davis avec une valeur maximale d'environ 11°C^2 .

Comparaison des configurations de GEM

Les différentes configurations s'entendent relativement bien pour ce qui est de la distribution géographique des variances de SAT avec des maximums de variance le long du littoral du bassin arctique, sur le centre des Territoires du Nord-Ouest ainsi que sur les plaines de Sibérie occidentale. Par contre, les variances de SAT sont relativement plus fortes dans le cas de la configuration GEM-VAR, en particulier sur les plaines de Sibérie septentrionale, de l'Alaska et de la côte ouest américaine. Les configurations sont également en accord pour représenter un minimum de variance de SAT sur l'océan Arctique. Elles ont cependant un peu plus de difficultés à avoir une distribution géographique semblable sur ce secteur.

Toutes les configurations sont de plus en accord sur la position et l'intensité du maximum situé sur la Nouvelle Zemble et sur l'est du Groenland avec des valeurs d'environ 16°C^2 et de 7°C^2 . Dans le cas de la configuration GEM-VAR, ces maximums sont respectivement $> 16^{\circ}\text{C}^2$ (gris) et d'environ 12°C^2 . Ils sont par contre légèrement plus faibles dans le cas des autres configurations. De plus, toutes les configurations génèrent un maximum de variances sur le centre des Territoires du Nord-Ouest, entre le Grand Lac de l'Ours et le Grand Lac des Esclaves. Bien que l'étendue et l'intensité de cette zone de maximum est relativement la même dans les configurations GEM-VAR, GEM-global et GEM-LAM piloté par GEM-global (environ 7°C^2), elle apparaît beaucoup plus étendue et plus intense avec la configuration GEM-LAM

pilotée par ERA 40. En fait, cette zone s'étend jusqu'à la mer de Beaufort et atteint une valeur maximale d'environ 12°C^2 . La configuration GEM-VAR présente aussi des maximums de variance de SAT sur le nord du Québec (8°C^2), l'ouest du Groenland (9°C^2) et sur le détroit de Davis. Ce dernier maximum, d'une valeur d'environ 12°C^2 , est également présent dans les autres configurations mais avec une intensité relativement plus faible d'environ 4°C^2 . Finalement, un fort maximum, d'environ 16°C^2 , est également présent sur le sud de l'Alaska dans la configuration GEM-VAR.

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison des différentes configurations de GEM avec les réanalyses NCEP et ERA 40 permet de constater que la distribution géographique des variances de SAT est relativement similaire pour les configurations et les réanalyses. Par contre, la configuration GEM–VAR présente des variances plus fortes et des zones de maximums plus étendues, notamment le long des plaines de Sibérie septentrionale. Par contre, le maximum situé sur le détroit de Davis correspond parfaitement avec le maximum de la réanalyse NCEP en termes d'intensité et d'étendue. Le maximum présent sur le sud de l'Alaska et le long de la côte est américaine n'est cependant pas représenté par les réanalyses.

De manière générale, toutes les configurations représentent relativement bien le maximum de variance de SAT situé sur la mer de Barents. Par contre, elles sont incapables de reproduire les maximums sur la mer de Sibérie orientale et le long de la côte nord de l'Alaska. Le maximum de variance situé sur la mer de Beaufort dans la réanalyse NCEP n'est pas non plus représenté dans les configurations. Pour terminer, le maximum présent près du Grand Lac de l'Ours et du Grand Lac des Esclaves est toujours surestimé par les différentes configurations de GEM par rapport aux réanalyses, en particulier avec la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40.

Enfin, les différentes configurations de GEM et les réanalyses s'entendent sur la zone de faible variance située sur l'Atlantique, l'Islande et la mer de Norvège ainsi que sur les régions de la mer de l'Alaska et de la mer de Béring.

Été

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

Les configurations ERA 40 et NCEP se ressemblent fortement pour ce qui est de la distribution de la variance de SAT au cours de l'été (JJJ). Il n'y a pratiquement aucune variance sur toute la partie maritime et le nord de l'archipel canadien alors que les plus fortes variances se trouvent sur la partie nord des continents, principalement sur la Russie à l'ouest de l'Oural, les plaines de Sibérie septentrionale et le nord-est des Territoires du Nord-Ouest. La différence la plus importante se trouve sur l'est de l'Alaska où la réanalyse NCEP montre un maximum d'environ 4°C^2 alors que la réanalyse ERA 40 ne présente aucune variance.

Comparaison des configurations de GEM

Toutes les configurations s'entendent pendant l'été (JJA) pour générer un maximum de variance de température de surface au-dessus des continents et un minimum de variance au-dessus des zones maritime. Seule la configuration GEM-VAR montre une variance nulle sur le sud de l'Alaska et le Yukon. Les configurations GEM-VAR et GEM-global présentent un maximum de variabilité sur les plaines de Sibérie occidentale. Par contre, la configuration GEM-global montre de plus fortes variances avec un maximum d'environ 7°C^2 par rapport à 6°C^2 pour la configuration GEM-VAR. La région de plus fortes variances est également plus étendue dans le cas de la configuration GEM-global.

Les configurations GEM-LAM montrent quant à elle un maximum de variances sur les plaines de Sibérie septentrionale, particulièrement au sud de la mer des Laptev. Ce maximum à une valeur d'environ 5°C^2 dans le cas de la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global et d'environ 4°C^2 dans le cas de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40.

Comparaison réanalyses–configurations

De manière générale, toutes les configurations de GEM génèrent une trop grande variance de SAT pour l'été (JJA) par rapport aux réanalyses NCEP et ERA 40, en particulier sur la Russie et la Sibérie. Par contre, les configurations globales (GEM–VAR et GEM–global) sont relativement capables de reproduire la zone de maximum sur les plaines de Sibérie occidentale et les configurations GEM–LAM, la zone de maximum sur les plaines de Sibérie septentrionale des réanalyses. Finalement, la configuration GEM–VAR et la réanalyse ERA 40 s'entendent pour de plus faibles valeurs de variances de SAT sur l'Alaska tandis que les autres s'entendent pour de plus fortes valeurs de variances.

2.1.2.2 Variances des moyennes annuelles de SAT

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

La comparaison des cartes de variances des moyennes annuelles de SAT des réanalyses ERA 40 et NCEP montrent généralement le même patron de distribution au dessus des continents et de l'océan Arctique, avec notamment des valeurs de variances plus fortes sur l'ensemble des continents et le long de la côte du bassin arctique et des valeurs relativement nulle sur l'océan Arctique, les pays scandinaves, la mer de Norvège, l'Islande, l'Atlantique Nord, l'est du Groenland, la Côte-Ouest américaine, le golfe de l'Alaska ainsi que la mer de Béring. De plus, bien que les variances de SAT soient relativement homogènes, avec des valeurs d'environ 2°C^2 , la réanalyse ERA 40 présente deux petites régions de maximum. La première, d'environ 4°C^2 , se trouve entre les archipels de Svalbard et François-Joseph et la Nouvelle Zemble. La deuxième, d'environ 5°C^2 est plutôt située sur la baie de Baffin et le détroit de Davis. Avec la réanalyse NCEP par contre, la zone de plus fortes variances semble légèrement moins étendue. Il apparait également que les variances maximales des moyennes annuelles de SAT sont également plus fortes qu'avec la réanalyses ERA 40. En effet, le maximum situé entre les archipels de Svalbard et François-Joseph et la Nouvelle Zemble à une valeur d'environ 5°C^2 et celui sur la baie de Baffin et le détroit de Davis, une valeur d'environ 8°C^2 . Plusieurs autres maximums, non représentés par la réanalyse ERA 40

sont également visibles. Les plus importants se retrouvent au nord du Yukon et sur l'archipel canadien avec des valeurs d'environ 12°C^2 . Les autres se situent au nord de l'Alaska, sur la mer de Sibérie orientale, sur la mer des Laptev et sur la mer du Groenland avec des valeurs d'environ 5 à 6°C^2 .

Comparaison des configurations de GEM

Les différentes configurations de GEM s'entendent relativement bien pour ce qui est de la distribution géographique des variances de SAT. Les zones de variances les plus importantes sont situées sur le l'ouest du Groenland, le Canada, l'Alaska, le détroit de Béring, l'est de la Sibérie, les plaines de Sibérie occidentale, l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale, la mer de Kara, la région situé entre les archipels de Svalbard et François-Joseph et la Nouvelle Zemble ainsi que la mer du Groenland. Seule la configuration GEM-global présente des valeurs relativement nulles sur la majorité de l'est de la Sibérie et des plaines de Sibérie septentrionale ainsi que l'archipel canadien. Par contre, elle présente, tout comme la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, de plus fortes variances sur l'ouest de la Russie et l'Europe.

Bien que les variances des moyennes annuelles de SAT des différentes configurations de GEM soient relativement faibles et uniformes, avec des valeurs d'environ 2°C^2 , elles présentent quelques zones de plus fortes variances. En effet, toutes les configurations simulent un maximum de variance d'environ 4°C^2 sur la région située entre les archipels de Svalbard et François-Joseph et la Nouvelle Zemble. Néanmoins, seules les configurations GEM-VAR et GEM-global génèrent un maximum d'environ 3°C^2 sur l'ouest de l'Alaska. Enfin, seule la configuration GEM-global montre un maximum de variance sur l'ouest des plaines de Sibérie occidentale.

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison des différentes configurations de GEM avec les réanalyses NCEP et ERA 40 permet de constater que la distribution géographique et l'intensité des variances de SAT est relativement similaire pour les configurations et les réanalyses. Par contre, les configurations GEM–global et GEM–VAR montrent de plus faibles valeurs de variances sur l'est des plaines de Sibérie septentrionale, le plateau de Sibérie et une partie de l'est de la Sibérie et de plus fortes variances sur l'Europe de l'Est que les réanalyses. Elles présentent également de plus faibles valeurs sur l'archipel canadien. Néanmoins, toutes les configurations de GEM semblent en mesure de représenter le maximum situé entre les archipels de Svalbard et François–Joseph et la Nouvelle Zemble ainsi que celui sur la mer du Groenland. Elles éprouvent cependant un peu plus de difficulté à simuler l'intensité du maximum sur la baie de Baffin et le détroit de Davis. Finalement, bien que les configurations GEM–global et GEM–LAM pilotée par GEM–global montrent un maximum de variances sur l'ouest de l'Alaska, celui-ci n'est pas présent dans les réanalyses.

2.2.1 Tendances des pressions au niveau moyen de la mer (SLP)

2.2.1.1 Tendances des moyennes saisonnières de SLP

Automne

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

La comparaison des tendances de pression au niveau moyen de la mer (SLP) des réanalyses NCEP et ERA 40 pour l'automne (SON) permet de conclure que la distribution géographique des tendances positives et négatives est relativement similaire pour les deux ensembles. Tous deux montrent deux zones de tendances positives : la première, de faible étendue, se trouve sur le sud-ouest de l'Alaska, le détroit et la mer de Béring tandis que la deuxième, beaucoup plus grande, s'étend sur la partie ouest de la mer de Kara et des plaines de Sibérie occidentale ainsi que sur l'ouest de la Russie, les pays scandinaves, la mer de Barents, les archipels de Svalbard et François-Joseph, la mer de Norvège, l'Islande, la mer du Groenland et l'Atlantique Nord (juste au sud du Groenland). Les tendances négatives, quant à elles, touchent toutes les autres régions. La seule différence notable entre les réanalyses est au niveau de la position, l'étendue et l'intensité des tendances maximales. Les maximums (positifs et négatifs) de la réanalyse ERA 40 sont légèrement plus forts que ceux de la réanalyse NCEP. Le maximum de tendances positives de pression au niveau moyen de la mer est d'environ 0.24 hPa an^{-1} pour la réanalyse NCEP et se trouve sur la mer de Barents et le nord-ouest de la Russie alors qu'il se trouve plus

particulièrement sur la péninsule de Kola dans le cas de la réanalyse ERA 40 avec une valeur d'environ 0.28 hPa an^{-1} . Les deux réanalyses montrent également un maximum $> 12 \text{ hPa an}^{-1}$ au sud du Groenland. Le maximum de tendances négatives se trouve quant à lui entre les mers de Laptev et de Sibérie orientale pour la réanalyse NCEP et juste au nord de celles-ci pour la réanalyse ERA 40. Les deux maximums ont tous deux une valeur d'environ $-0.16 \text{ hPa an}^{-1}$. Par contre, celui dans la réanalyse ERA 40 est légèrement plus étendu. Cette zone de maximum de tendances négatives a aussi la particularité de s'étendre vers le nord, au dessus de l'océan Arctique, en direction de l'archipel canadien.

Comparaison des configurations de GEM

La comparaison des configurations du modèle GEM entre elles révèle de grandes différences pour l'automne (SON) au niveau des distributions géographiques des tendances positives et négatives de SLP. Par exemple, la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 montre des tendances négatives sur pratiquement tout le domaine (avec des tendances < -0.24 hPa an⁻¹ sur les Territoires du Nord-Ouest, l'archipel canadien, le Groenland, les archipels de Svalbard et François-Joseph, la majeure partie de la mer de Barents, les pays scandinaves, la mer de Norvège et du Groenland, l'Islande et un fort maximum négatif d'environ -0.40 hPa an⁻¹ sur l'archipel de Svalbard) alors que dans le cas des configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global, il y a de grandes zones où les tendances sont positives. En effet, avec la configuration GEM-VAR, les tendances positives de SLP affectent les plaines de Sibérie occidentale, l'ouest de la Russie, l'Europe de l'Est, les pays scandinaves, la mer de Norvège, la mer de Barents, l'Islande, les archipels de Svalbard et François-Joseph, la mer du Groenland, l'océan Arctique, la mer de Sibérie orientale, la mer des Tchouktches, le détroit et la mer de Béring, l'Alaska, la mer de Beaufort, le Yukon, les Territoires du Nord-Ouest, l'archipel canadien, la baie d'Hudson, le nord du Québec, la baie de Baffin et le détroit de Davis tandis que les tendances négatives se retrouvent plutôt sur la mer de Kara et la mer des Laptev, les plaines de Sibérie septentrionale, le plateau de Sibérie centrale et le Kamtchatka, ainsi que sur l'Atlantique Nord, les provinces canadiennes

(Colombie-Britannique, prairies, Ontario) et le golfe de l'Alaska. Les maximums de tendances positives, situés juste au nord de la mer de Beaufort et au sud des plaines de Sibérie occidentale, ont une valeur respective d'environ 0.28 hPa an^{-1} et 0.16 hPa an^{-1} . Les maximums de tendances négatives, situés au sud du Canada et sur le plateau de Sibérie centrale, ont quant à eux des valeurs $< -0.08 \text{ hPa an}^{-1}$ et d'environ $-0.12 \text{ hPa an}^{-1}$.

Pour la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, les tendances négatives de SLP, en plus de toucher la mer de Kara, la mer des Laptev, les plaines de Sibérie septentrionale, le Kamtchatka et l'Atlantique Nord, affectent aussi les plaines de Sibérie occidentale, les régions montagneuses de l'est de la Russie (plateau de Sibérie centrale et de l'Anadyr, les Monts de Verkhoïansk et les Hauteurs de la Kolyma), la majeure partie de l'océan Arctique (entre le pôle, l'est de la Russie et l'archipel canadien), la mer de Sibérie orientale, la mer des Tchouktches, la mer de Beaufort, la partie ouest de l'archipel canadien, la partie centrale des Territoires du Nord-Ouest et le nord de l'Alaska. Contrairement à la configuration GEM-VAR, les tendances sont maintenant positives sur les provinces canadiennes. Les deux maximums de tendances négatives, situés sur les plaines de Sibérie septentrionale et sur la mer de Beaufort, ont des valeurs d'environ $-0.28 \text{ hPa an}^{-1}$ et $-0.16 \text{ hPa an}^{-1}$ respectivement. La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global possède également plusieurs maximums de tendances positives

soit, sur l'île de Baffin, l'archipel de Svalbard, l'ouest des pays scandinaves et au sud de l'Alaska. Leur valeur respective est d'environ 0.16 hPa an^{-1} , 0.24 hPa an^{-1} , 0.20 hPa an^{-1} et $> 0.20 \text{ hPa an}^{-1}$.

La configuration GEM-global est également fort différente des autres configurations. Elle montre trois régions de tendances positives : la plus petite se trouve sur le nord du Québec et le sud de la baie d'Hudson. La deuxième touche la mer de Béring, le golf de l'Alaska et le Kamtchatka tandis que la dernière et la plus grande des trois touche tout l'ouest de la Russie à partir des plaines de Sibérie occidentale, la partie ouest des plaines de Sibérie septentrionale, la mer de Kara, la mer de Barents, les pays scandinaves et l'Europe de l'Est. Les maximums, situés au sud de la mer de Barents et au sud de la mer de Béring, ont des valeurs d'environ 0.12 hPa an^{-1} et $> 0.12 \text{ hPa an}^{-1}$ et celui sur le nord du Québec $> 0.08 \text{ hPa an}^{-1}$. Les tendances négatives touchent quant à elles la majeure partie du bassin arctique, de l'Amérique du Nord, du Groenland, de l'Atlantique et de l'est de la Sibérie avec des maximums sur le plateau de Sibérie centrale, la mer de Beaufort et la mer des Tchouktches, le pôle Nord, la baie de Baffin et l'Islande. Tous, à l'exception de celui de l'Islande (avec une valeur d'environ $-0.20 \text{ hPa an}^{-1}$) et de celui du plateau de Sibérie centrale (avec une valeur d'environ $-0.08 \text{ hPa an}^{-1}$) ont une valeur d'environ $-0.12 \text{ hPa an}^{-1}$.

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison des tendances de SLP des configurations de GEM avec les réanalyses NCEP et ERA 40 montre que la configuration GEM–VAR surestime de beaucoup la zone de tendances positives. Contrairement aux réanalyses, elle montre des tendances positives sur l’Alaska, le Yukon, les Territoires du Nord–Ouest, la baie d’Hudson, l’archipel canadien, la baie de Baffin, l’océan Arctique, la mer de Sibérie orientale, la mer des Tchouktches et la mer de Beaufort. Le maximum de tendances positives des réanalyses, situé sur la mer de Barents, n’est pas du tout présent dans la configuration GEM–VAR. Celle–ci montre plutôt un maximum positif juste au nord de la mer de Beaufort et au sud des plaines de Sibérie occidentale. Le maximum de tendances positives, situé au sud du Groenland, est également absent de la configuration GEM–VAR. De plus, alors que les réanalyses montrent un maximum de tendances négatives sur la mer des Laptev et la mer de Sibérie, la configuration GEM–VAR ne montre aucun maximum. Les tendances négatives sont en fait maximales sur le plateau de Sibérie centrale. Sinon, l’intensité des tendances positives et négatives apparaît relativement semblable aux réanalyses.

Dans la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40, les tendances négatives de SLP sont beaucoup trop fortes comparées aux réanalyses NCEP et ERA 40. En fait, les tendances positives sont pratiquement absentes du domaine sauf pour la région de la mer de Béring et de la région du sud–ouest de la Russie.

Ces deux régions correspondent aux réanalyses et sont pratiquement de même intensité. Par contre, le maximum de tendances positives des réanalyses, situé près de la mer de Barents, n'apparaît pas dans la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40. Celle-ci montre plutôt un maximum de tendances négatives juste au nord, sur l'archipel de Svalbard.

La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global coïncide mieux avec les réanalyses ERA 40 et NCEP sauf pour l'Alaska, le golfe de l'Alaska, le Yukon, les Territoires du Nord-Ouest, la baie d'Hudson, l'archipel canadien, la baie de Baffin et le Groenland, qui montrent des tendances positives au lieu de tendances négatives. La région de maximum de tendances négatives correspond aussi assez bien avec les réanalyses cependant, en plus d'être légèrement plus au sud, son intensité est beaucoup trop importante (environ $-0.28 \text{ hPa an}^{-1}$ contre $-0.20 \text{ hPa an}^{-1}$). Qui plus est, le deuxième maximum de tendances négatives, situé sur la mer de Beaufort, de même que le maximum de tendances positives au sud de l'Alaska, ne sont pas représentés par les réanalyses. De plus, la région de maximum de tendances positives, située entre l'archipel de Svalbard et le Groenland, est décalée vers le nord-ouest relativement aux réanalyses qui la place plutôt sur la mer de Barents.

La configuration GEM-global est celle qui concorde probablement le mieux avec les réanalyses NCEP et ERA 40. La seule différence au niveau de la

distribution géographique se trouve sur le Groenland, l'Islande, la mer du Groenland et l'Atlantique Nord. Alors que les réanalyses montrent une zone de tendances positives, la configuration GEM-global montre plutôt une zone de tendances négatives de SLP avec un maximum centré sur l'Islande. Celui-ci est en fait complètement absent des réanalyses. Pour ce qui est des tendances positives, la zone de tendances positives située sur le nord du Québec n'est pas présente dans les réanalyses et celle située sur la mer de Béring et le golfe de l'Alaska s'étend un peu trop vers l'est et l'ouest. Pour terminer, le maximum de tendances positives (d'environ 0.12 hPa an^{-1}) situé sur la mer de Barents est relativement faible en comparaison des réanalyses où la valeur atteint environ 0.28 hPa an^{-1} .

Hiver

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

Pour l'hiver (DJF), les différences de tendances de pression au niveau moyen de la mer entre la réanalyse NCEP et ERA 40 sont également faibles. Les zones de tendances positives et négatives maximales sont en partie inversées par rapport à l'automne (SON). De plus, la région de tendances positives est moins intense qu'au cours de l'automne. Elle touche maintenant le plateau de Sibérie centrale, la région montagneuse de l'est de la Sibérie (le plateau de l'Anadyr, les Hauteurs de la Kolyma et les Monts de Verkhoïansk) ainsi que l'est de la mer de Kara, la mer des Laptev et la mer de Sibérie orientale. Tout comme à l'automne, le maximum positif est plus fort avec la réanalyse ERA 40. Le maximum de tendances positives est d'environ 0.12 hPa an^{-1} avec la réanalyse NCEP alors qu'il est d'environ 0.24 hPa an^{-1} dans le cas de la réanalyse ERA 40. Les maximums de tendances négatives sont aussi beaucoup plus forts pour l'hiver que pour l'automne. Le premier est centré sur l'Alaska, le Yukon et le détroit de Béring, avec une valeur d'environ $-0.20 \text{ hPa an}^{-1}$ (environ $-0.24 \text{ hPa an}^{-1}$ dans le cas ERA 40), et le deuxième sur les pays scandinaves, la mer de Norvège, la mer de Barents, l'archipel des Svalbard et l'ouest de la Russie, avec environ $-0.32 \text{ hPa an}^{-1}$.

Comparaison des configurations de GEM

La comparaison des configurations du modèle GEM pour les tendances de pression au niveau moyen de la mer durant l'hiver (DJF) montre une distribution géographique des tendances assez différente d'une configuration à l'autre. Pour la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, les régions de tendances négatives touchent seulement une petite partie du domaine. Elles se situent sur le sud du plateau de Sibérie, l'est de la Sibérie ainsi que sur la région s'étendant au sud des pays scandinaves (l'Europe de l'Est) alors que la région de tendances positives s'étend sur tout le reste du domaine. Le maximum de tendances négatives, situé juste au nord du Kamtchatka, est d'environ $-0.12 \text{ hPa an}^{-1}$ et celui au sud des pays scandinaves $< -0.12 \text{ hPa an}^{-1}$. La région de maximum d'intensité de tendances positives ($> 0.24 \text{ hPa an}^{-1}$), la plus forte de toutes les configurations, s'étend sur la mer de Barents, la Nouvelle Zemble, les archipels de Svalbard et François-Joseph, la mer du Groenland, l'Islande, l'Atlantique Nord, le Groenland, la baie de Baffin, l'est de l'archipel canadien et l'océan Arctique (entre le pôle Nord et le Groenland). L'intensité maximale des tendances positives, située sur la partie sud du Groenland, est tellement forte qu'elle dépasse les limitations de l'échelle avec des valeurs $> 0.44 \text{ hPa an}^{-1}$ (représenté en gris).

La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est pratiquement l'inverse de la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global. Dans celle-ci, les

tendances positives de pression au niveau moyen de la mer touchent seulement l'est du plateau de Sibérie, la région montagneuse de l'est de la Sibérie, le plateau de l'Anadyr et le Kamtchatka. La valeur maximale des tendances positives de cette région est d'environ 0.12 hPa an^{-1} .

La zone de tendances négatives maximales de SLP ($< -0.20 \text{ hPa an}^{-1}$) touche le nord-ouest de la Russie, les pays scandinaves, la mer de Barents, les archipels de Svalbard et François-Joseph, la mer de Norvège, la mer de Kara, la majeure partie de l'océan Arctique, la mer du Groenland, l'Islande, l'Atlantique Nord et le Groenland. Ses deux maximums, centrés sur le pôle et entre l'Islande et le sud du Groenland (tout comme la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global), ont tous deux une valeur d'environ $-0.40 \text{ hPa an}^{-1}$. Un autre maximum, d'environ $-0.20 \text{ hPa an}^{-1}$, est également présent sur le sud-est de l'Alaska.

Pour la configuration GEM-global, la distribution géographique des tendances de SLP montre une zone de tendances négatives sur les continents, à l'exception de l'archipel canadien, le Groenland et le Nord du Québec ainsi que la région de l'ouest de la Russie et au sud de celle-ci, tandis que les tendances positives se retrouvent majoritairement sur l'océan Arctique, la majorité des mers de Russie, la mer et le détroit de Béring, la mer de Norvège, la mer du Groenland, l'Atlantique Nord et la baie de Baffin.

La configuration GEM-global possède un maximum de tendances positives sur l'Islande, avec une valeur d'environ 0.24 hPa an^{-1} , et trois maximums de tendances négatives. Ceux-ci sont situés au sud du Yukon et de l'ouest des Territoires du Nord-Ouest, sur l'Europe de l'Est ainsi que sur l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale et les plaines de Sibérie centrale. Ils ont des valeurs respectives d'environ -12 hPa an^{-1} , $< -12 \text{ hPa an}^{-1}$ et -16 hPa an^{-1} .

Pour terminer, la configuration GEM-VAR sépare les tendances de pression au niveau moyen de la mer en deux (selon un axe vertical passant par le centre du domaine) avec les tendances négatives du côté eurasien et les tendances positives du côté Groenland-Amérique (comprenant aussi la mer de Norvège, l'Islande, la mer du Groenland l'Atlantique Nord et la majeure partie de l'océan Arctique). Seule une petite région centrée sur la baie d'Hudson et le nord du Québec est de tendances négatives avec une valeur maximale d'environ $-0.08 \text{ hPa an}^{-1}$. Les deux autres maximums de tendances négatives se trouvent sur le plateau de l'Anadyr et les Hauteurs de Kolyma avec une valeur d'environ $-0.16 \text{ hPa an}^{-1}$ (région de maximum de tendances positives pour les réanalyses) ainsi que sur la région au sud de la mer de Barents et la mer de Kara avec une valeur d'environ $-0.32 \text{ hPa an}^{-1}$. Le maximum de tendances positives est quant à lui situé entre l'Alaska et le Yukon, près de la ville de Fairbanks, avec une valeur d'environ 0.24 hPa an^{-1} . Un autre maximum est aussi présent le long de la côte est du Groenland avec une valeur d'environ 0.16 hPa an^{-1} .

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison des tendances de pression au niveau moyen de la mer des différentes configurations de GEM avec les réanalyses permet de conclure que les configurations de GEM, à l'exception de la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40, éprouvent énormément de difficultés à représenter la forte étendue des tendances négatives des réanalyses NCEP et ERA 40. En effet, la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40 représente relativement bien la distribution géographique des tendances de SLP pour l'hiver (DJF). Par contre, la zone de tendances positives est légèrement trop petite en comparaison des réanalyses. Dans la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40, les tendances positives de SLP touchent seulement l'est du plateau de Sibérie centrale, la région montagneuse de l'est de la Sibérie, le plateau de l'Anadyr et le Kamtchatka alors que dans les réanalyses, les tendances positives touchent également la mer de Sibérie orientale, la mer des Laptev, l'est de la mer de Kara et des plaines de Sibérie septentrionale et une partie des plaines de Sibérie occidentale. Néanmoins, l'intensité et la position du maximum de tendances positives est relativement semblable. La plus grande différence provient de la position et de l'étendue de la zone de maximum de tendances négatives (valeurs < -0.20 hPa an⁻¹). Dans la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40, cette zone est beaucoup trop étendue vers le nord, le sud et l'ouest par rapport aux réanalyses. De plus, le maximum, situé le long de la côte est de Groenland, ne correspond pas avec le maximum des réanalyses, centré sur les pays scandinaves.

Les tendances de SLP de la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global sont complètement en opposition avec celle des réanalyses ERA 40 et NCEP. Il en va également de même pour la configuration GEM-global, sauf en certains endroits (Europe de l'Est et Territoires du Nord-Ouest). En effet, la zone de tendances positives des réanalyses, située sur les plaines de Sibérie occidentale, le plateau de Sibérie centrale, la région montagneuse de l'est de la Sibérie, le plateau de l'Anadyr et le Kamtchatka, est remplacée par une zone de tendances négatives dans les configurations GEM-LAM pilotée par GEM-global et GEM-global (et l'inverse pour les tendances négatives). Enfin, le maximum de tendances positives de la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global est beaucoup trop fort comparé aux valeurs des tendances positives des réanalyses.

Pour terminer, la configuration GEM-VAR éprouve elle aussi beaucoup de difficultés à représenter la distribution des tendances de SLP des réanalyses. En fait, toute la zone de tendances positives est mal positionnée. Seule la zone de tendances négatives, sur l'ouest de la Russie et l'Europe de l'Est, correspond aux réanalyses. De plus, l'intensité du maximum est relativement similaire. Ce maximum est cependant positionné trop à l'est par rapport aux réanalyses (sur le nord-ouest de la Russie au lieu d'être sur les pays scandinaves).

Printemps

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

Pour le printemps (MAM), la distribution géographique des tendances de SLP, représentées par les réanalyses NCEP et ERA 40, apparaissent relativement similaires. Les tendances positives sont situées sur la mer et le détroit de Béring, l'Alaska, le Yukon et la partie ouest des Territoires du Nord-Ouest et des provinces canadiennes. Il y a aussi une région de plus faible intensité sur la baie de Baffin, le Groenland, l'Islande, la mer du Groenland, le sud de la mer de Norvège et l'Angleterre. La zone de tendances négatives touche les pays scandinaves, la majeure partie de la Russie et des mers de Russie, l'océan Arctique, l'archipel canadien, la baie d'Hudson et l'Atlantique Nord (juste au sud du Groenland). Bien que les réanalyses NCEP et ERA 40 soient relativement semblables, la réanalyse ERA 40 demeure toujours légèrement plus intense pour les tendances négatives, notamment sur la mer de Barents. En effet, les maximums de tendances négatives se trouvent sur la mer de Barents et le nord-ouest de la Russie, avec des valeurs d'environ $-0.20 \text{ hPa an}^{-1}$ ($-0.24 \text{ hPa an}^{-1}$ pour ERA 40), entre le pôle Nord et la mer de Sibérie orientale, $-0.20 \text{ hPa an}^{-1}$, sur la baie d'Hudson, $-0.08 \text{ hPa an}^{-1}$, et au sud l'Atlantique Nord, avec une valeur $< -0.08 \text{ hPa an}^{-1}$. Les maximums de tendances positives sont situés sur la partie nord du Groenland avec environ 0.12 hPa an^{-1} (environ 0.08 hPa an^{-1} pour la réanalyse ERA 40), l'Angleterre avec $> 0.12 \text{ hPa an}^{-1}$ et au sud de la mer de Béring avec $> 0.24 \text{ hPa an}^{-1}$.

Comparaison des configurations de GEM

Les distributions géographiques des tendances positives et négatives de pression au niveau moyen de la mer pour le printemps (MAM), représentées par les configurations de GEM, présentent encore des différences importantes. La configuration GEM-VAR est la plus différente avec une importante zone de tendances négatives, sauf pour la mer de Béring, le sud de l'Alaska et le sud-ouest canadien où les tendances sont positives. Le maximum de tendances négatives, situé à l'est du Groenland, à une valeur $< -0.44 \text{ hPa an}^{-1}$ tandis que le maximum positif, situé au sud de la mer de Béring et du golfe de l'Alaska, à une valeur $> 0.24 \text{ hPa an}^{-1}$.

La configuration GEM-global présente trois zones relativement petites de tendances négatives. La plus importante, avec une valeur d'environ $-0.20 \text{ hPa an}^{-1}$, est située sur les plaines de Sibérie occidentale, l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale, la mer de Kara, et la Russie à l'ouest de l'Oural. Les deux autres régions sont situées au sud de l'Islande et sur l'est de la Sibérie et le Kamtchatka. Elles ont des valeurs maximales $< -0.08 \text{ hPa an}^{-1}$. La zone de tendances positives possède deux maximums. Le premier, d'environ 0.20 hPa an^{-1} , est situé au sud de l'archipel de Svalbard et le deuxième, d'environ 0.12 hPa an^{-1} , sur l'Alaska et le sud-est de la mer de Sibérie.

Pour la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, les tendances positives de SLP occupent moins d'importance que dans la configuration GEM-global. Elles touchent tout le Groenland, le Canada (à l'exception de l'ouest de l'archipel canadien), le golfe de l'Alaska, la mer et le détroit de Béring, la mer des Tchouktches, la mer de Sibérie occidentale et l'extrême est de la Sibérie. De plus, deux zones plus petites sont également présentes au sud de plateau de Sibérie centrale et sur la mer de Norvège, les pays scandinaves, la mer de Barents et la Russie à l'ouest de l'Oural. Tout le reste du domaine est affecté par des tendances négatives de SLP. Il y a ainsi quatre maximums négatifs et trois maximums positifs. Les maximums négatifs sont situés au sud de l'Islande, sur l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale et les plaines de Sibérie occidentales, sur le Kamtchatka et sur la région entre le pôle et l'ouest de l'archipel canadien. Ils ont des valeurs respectives $< -0.16 \text{ hPa an}^{-1}$, $< -0.12 \text{ hPa an}^{-1}$, $< -0.08 \text{ hPa an}^{-1}$ et d'environ 0.08 hPa an^{-1} . Les maximums positifs, situés sur l'est des pays scandinaves, l'est du Québec et l'ouest de l'Alaska, ont des valeurs d'environ 0.08 hPa an^{-1} , $> 0.16 \text{ hPa an}^{-1}$ et $> 0.12 \text{ hPa an}^{-1}$ respectivement.

Comparaison réanalyses–configurations

De manière générale, seules les configurations GEM–VAR et GEM–LAM pilotée par GEM–global semblent en partie représenter le patron des tendances de pression au niveau moyen de la mer pour le printemps (MAM). Par contre, la configuration GEM–VAR surestime beaucoup trop le maximum de tendances négatives. En fait, sur le Groenland, les tendances de SLP des réanalyses sont plutôt légèrement positives. La configuration GEM–VAR représente cependant relativement bien les tendances positives sur la mer de Beaufort, le sud de l’Alaska, le golfe de l’Alaska et l’ouest canadien. Les autres configurations représentent aussi cette région de tendances positives. Néanmoins, celle-ci s’étend en général trop au nord et à l’est par rapport aux réanalyses, ce qui fait que les tendances négatives sur l’est du Canada, l’archipel canadien, la mer de Beaufort, la mer des Tchouktches et la mer de Sibérie orientale sont sous–estimée.

Dans la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40, la zone de tendances négatives sur l’est du Canada est légèrement trop faible. Par contre, les tendances positives situées au sud du Groenland, sur la Nouvelle Zemble et l’archipel de François–Joseph ne sont pas du tout présentes dans les réanalyses.

Dans la configuration GEM–LAM pilotée par GEM–global, la zone de tendances négatives de SLP est un peu trop petite en comparaison des

réanalyses. En fait, les tendances négatives ne sont pas présentes sur le sud de l'archipel canadien, la baie d'Hudson, le nord du Québec, au sud du Groenland et sur les pays scandinaves comme dans les réanalyses. Les tendances négatives sur la Sibérie sont néanmoins bien représentées. Par contre, l'intensité et la position des maximums (sur la mer de Barents et au nord de la mer de Sibérie orientale) ne correspondent pas à celles prévues par les réanalyses. Enfin, le maximum de tendances négatives, situé au sud de l'Islande, apparaît relativement de la même intensité. Par contre, il est trop à l'est en comparaison des réanalyses.

La configuration GEM-global place également ce maximum de tendances négatives trop à l'est. De plus, celle-ci n'arrive pas à représenter les tendances négatives sur la majeure partie du secteur maritime ainsi que sur l'archipel canadien, le nord du Québec et le plateau de Sibérie centrale. Enfin, le maximum de tendances négatives, situé sur les plaines de Sibérie occidentale, est trop au sud-est en comparaison des réanalyses. Le maximum de tendances positives, situé sur l'archipel de Svalbard est quant à lui inexistant dans les réanalyses. En fait, les tendances y sont plutôt négatives.

Pour terminer, aucune des configurations de GEM n'est vraiment en mesure de générer les deux maximums de tendances négatives sur la mer de Barents et au nord de la mer de Sibérie orientale.

Été

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

Pour l'été (JJA), les distributions géographiques des tendances SLP des réanalyses ERA 40 et NCEP sont environ de la même intensité et touchent pratiquement les mêmes régions. La différence la plus significative se trouve sur les pays scandinaves, l'Alaska et le Yukon, où la réanalyse ERA 40 montre de faibles tendances positives alors que celle de NCEP montre plutôt de faibles tendances négatives. Les tendances positives touchent maintenant trois régions : la première est située sur l'est des Territoires du Nord-Ouest et de l'archipel canadien, la baie d'Hudson et la baie de Baffin, la deuxième sur l'ouest de la Russie tandis que la dernière s'étend sur la région montagneuse de l'est de la Sibérie, le plateau de l'Anadyr, les Monts de Verkhoïansk, les Hauteurs de Kolyma, le Kamtchatka le détroit et la mer de Béring. Elles ont des maximums respectifs d'environ 0.12 hPa an^{-1} (ouest de la Russie), 0.12 hPa an^{-1} et 0.16 hPa an^{-1} (près de la péninsule du Kamtchatka). Les tendances négatives touchent quant à elles le centre de la Russie (les plaines et le plateau de Sibérie), l'ensemble des mers de Russie, l'océan Arctique, la mer de Beaufort, l'ouest de l'archipel canadien, le Groenland, la mer du Groenland, l'Atlantique Nord, la mer de Norvège, l'Islande et les archipels de Svalbard et François-Joseph. Les deux principaux maximums négatifs sont situés entre la mer des Laptev et la mer de Kara, avec environ $-0.16 \text{ hPa an}^{-1}$, et sur l'Atlantique Nord, avec $< -0.12 \text{ hPa an}^{-1}$.

Comparaison des configurations de GEM

Des différences importantes dans la distribution géographique des tendances de pression au niveau moyen de la mer sont encore observables en été (JJJ) pour les différentes configurations de GEM. Par exemple, la configuration GEM-VAR présente surtout des tendances positives au dessus du bassin arctique alors qu'avec la configuration GEM-global, ces tendances sont majoritairement négatives. En effet, avec la configuration GEM-VAR, les tendances sont négatives seulement sur l'est des Territoires du Nord-Ouest, l'Europe de l'Est, la Russie à l'ouest de l'Oural et une partie des plaines de Sibérie occidentale. Le maximum de tendances négatives sur l'ouest de la Russie est d'environ $-0.08 \text{ hPa an}^{-1}$ et celui sur le centre du Canada d'environ $-0.08 \text{ hPa an}^{-1}$ tandis que le maximum positif, centré sur le pôle est d'environ 0.24 hPa an^{-1} . Pour la configuration GEM-global par contre, les tendances sont positives seulement sur le sud de l'Alaska et du Yukon, le golfe de l'Alaska, l'est de la mer de Béring, les plaines de Sibérie septentrionale, la mer de Kara et la mer des Laptev, l'ouest des pays scandinaves, l'Europe de l'Est, la mer de Norvège, l'Atlantique Nord, le Québec et la baie d'Hudson. Les valeurs sont $> 0.12 \text{ hPa an}^{-1}$ sur l'Europe de l'Est et le golfe de l'Alaska et d'environ 0.08 hPa an^{-1} sur la mer de Kara et l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale. Les tendances négatives sont maximales sur un axe passant par le Groenland et l'extrême est de la Sibérie ainsi que sur la partie sud de la Sibérie. La valeur maximale étant d'environ $-0.12 \text{ hPa an}^{-1}$.

Les deux configurations GEM-LAM sont également fort différentes l'une de l'autre. La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montre deux zones de tendances positives. La première est située sur l'Alaska, le Yukon, le golfe de l'Alaska et l'est de la mer de Béring. Cette région de tendances de SLP est en fait fortement semblable à celle du GEM-global. La deuxième région de tendances positives de SLP comprend l'archipel canadien, la baie d'Hudson, le nord du Québec, le Groenland, l'Islande, la mer du Groenland, la mer de Norvège, les pays scandinaves, la mer de Barents, les archipels de Svalbard et François-Joseph, la mer de Kara, la mer des Laptev, une partie de l'océan Arctique, les plaines de Sibérie septentrionales et le plateau de Sibérie centrale. Les maximums, situés sur la mer du Groenland, le nord de l'île de Baffin et au sud du golfe de l'Alaska, ont des valeurs respectives d'environ 0.16 hPa an^{-1} , 0.12 hPa an^{-1} et $> 0.12 \text{ hPa an}^{-1}$. Les tendances négatives sont situées en grande partie près des frontières du domaine, sauf pour la région de maximum sur la mer de Beaufort, la mer des Tchouktches, la région montagneuse de l'est de la Sibérie, le détroit de Béring et le Kamtchatka avec une valeur d'environ $-0.08 \text{ hPa an}^{-1}$.

La distribution géographique des tendances de pression au niveau moyen de la mer de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est pratiquement inversée par rapport à la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global. Les zones de tendances positives, au compte de trois se trouvent en majeure partie le long de la frontière du domaine. La première se trouve sur l'est du

Canada (l'est des Territoires du Nord-Ouest et de l'archipel canadien, la baie d'Hudson, le nord du Québec et une partie du détroit de Davis) avec un maximum d'environ 0.08 hPa an^{-1} sur la baie d'Hudson. La deuxième, située sur l'ouest de la Russie et l'Europe de l'Est, à une valeur $> 0.08 \text{ hPa an}^{-1}$. La dernière, la plus grande des trois, comprend l'ouest de l'Alaska, la mer et le détroit de Béring, la mer de Tchouktches, l'est de la mer de Sibérie orientale, le plateau de Sibérie centrale et la région montagneuse de l'est de la Sibérie. Celle-ci ressemble en partie à celle de la configuration GEM-VAR. Son maximum, situé sur l'ouest de la mer de Béring est d'environ 0.16 hPa an^{-1} . Les tendances négatives, qui touchent pratiquement tout le bassin arctique, l'ouest du Canada et le centre de la Russie, ont trois maximums. Le plus important, situé sur l'archipel de Svalbard est d'environ $-0.20 \text{ hPa an}^{-1}$. Les deux autres se trouvent au sud-est du Groenland et sur le golfe de l'Alaska avec des valeurs respectives d'environ $-0.12 \text{ hPa an}^{-1}$ et 0.08 hPa an^{-1} .

Comparaison réanalyses–configurations

La configuration de GEM qui se compare le plus aux réanalyses NCEP et ERA 40 durant l'été (JJA) pour ce qui est de la distribution des tendances de pression au niveau moyen de la mer est la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40. Les deux présentent les mêmes trois zones de tendances positives sauf que dans les réanalyses, la région de tendances positives située sur l'Europe de l'Est affecte aussi les pays scandinaves. De plus, dans les réanalyses, cette région ne s'étend pas autant vers l'est. Par contre, la position et l'intensité des maximums de tendances positives est relativement similaire. Il en va également de même pour les tendances négatives de SLP. Il y a de légères différences sur l'ouest du Canada et au sud de l'Islande où les tendances sont respectivement trop fortes et trop faibles par rapport aux réanalyses. Néanmoins, l'intensité est pratiquement la même sur l'ensemble du domaine. Le maximum de tendances négatives, situé sur l'archipel de François–Joseph est légèrement trop fort et trop à l'est comparé aux réanalyses.

Les autres configurations ont relativement plus de difficultés à reproduire le patron de tendances de SLP des réanalyses, sauf pour ce qui est de l'intensité des tendances. La configuration GEM–VAR reproduit grossièrement les tendances sur l'ouest du Canada et un peu mieux sur la mer de Béring et la région montagneuse de l'est de la Russie. Par contre, les fortes tendances positives sur le bassin arctique ne sont pas représentées

dans les réanalyses. Pour la configuration GEM-global, les zones de tendances positives sont trop à l'est par rapport aux réanalyses. De plus, la zone de tendances positives sur la mer de Kara, la mer des Laptev et les plaines de Sibérie septentrionale n'existe pas dans les réanalyses. Il en va également de même pour la configuration GEM-LAM piloté par GEM-global. La vaste zone de tendances positives sur le Groenland et le secteur eurasien du bassin arctique n'existe pas dans les réanalyses. Les tendances positives sur l'Europe de l'Est sont également absentes.

2.2.1.2 Tendances des moyennes annuelles de SLP

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

Pour les moyennes annuelles de SLP, les distributions géographiques des tendances positives et négatives de pression au niveau moyen de la mer, représentées par les données des réanalyses NCEP et ERA 40, apparaissent relativement similaires. Les tendances sont majoritairement négatives sur l'ensemble du domaine à l'exception de la région au sud du Groenland et la région de la mer de Béring et du sud-est de la Sibérie. Encore une fois, les maximums négatifs de tendances de SLP apparaissent plus forts avec la réanalyse ERA 40. Le principal, situé entre le pôle et la mer des Tchouktches, est d'environ $-0.16 \text{ hPa an}^{-1}$ pour la réanalyses ERA 40 et d'environ $-0.12 \text{ hPa an}^{-1}$ pour la réanalyse NCEP. Le principal maximum positif, situé sur le sud de la mer de Béring, est $> 0.08 \text{ hPa an}^{-1}$.

Comparaison des configurations de GEM

Tout comme pour les différentes saisons, les distributions géographiques des tendances positives et négatives de pression au niveau moyen de la mer, représentées par les différentes configurations de GEM, présentent des différences relativement importantes. En fait, bien que les différentes configurations soient en mesure de représenter un maximum de tendances positives sur la mer de Béring, elles éprouvent plus de difficultés sur les autres régions. Les configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par GEM-global apparaissent relativement similaires du point de vue de la distribution géographique avec des tendances négatives sur la Russie, la Sibérie et la mer de Beaufort et des tendances positives sur l'Alaska, l'ensemble du Canada, le Groenland et le secteur maritime. La configuration GEM-global montre par contre des tendances positives de SLP relativement faibles, voire même négatives sur le Groenland, alors qu'elles sont largement positives pour la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global. En effet, la configuration GEM-global montre un maximum d'environ 0.08 hPa an^{-1} sur l'ouest des pays scandinaves et de la mer de Norvège ainsi que $> 0.08 \text{ hPa an}^{-1}$ sur le Nord du Québec alors qu'il est d'environ 0.24 hPa an^{-1} sur le sud-est du Groenland dans la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global. La distribution des tendances négatives apparaît par contre plus similaire entre ces deux configurations de GEM avec un maximum d'environ $-0.08 \text{ hPa an}^{-1}$. Par contre la zone de maximum, située sur les plaines de Sibérie occidentale

dans la configuration GEM-global, s'étend plus à l'est, jusqu'au Kamtchatka, dans la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global.

Alors que les configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par GEM-global montrent surtout des tendances annuelles positives de SLP, les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par ERA-40 montrent majoritairement des tendances négatives. Pour la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, les tendances négatives touchent seulement la mer de Béring, le détroit de Béring et l'est de la Sibérie à partir du plateau de Sibérie centrale. Pour la configuration GEM-VAR, les tendances positives touchent l'extrême est de la Sibérie, la mer et le détroit de Béring, l'Alaska, la majeure partie des Territoires du Nord-Ouest, l'ouest de l'archipel canadien, la mer de Beaufort la mer des Tchouktches, la mer de Sibérie orientale et tout l'océan Arctique jusqu'au pôle. Des tendances positives sont également présentes sur le nord du Québec avec une valeur $> 0.08 \text{ hPa an}^{-1}$.

Pour la configuration GEM-VAR, le maximum de tendances positives se trouve sur l'est de la mer de Kara et la Nouvelle Zemble avec une valeur d'environ $-0.16 \text{ hPa an}^{-1}$. Dans la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, la zone de maximum est beaucoup plus étendue. Elle touche la région entre le pôle et le nord de l'archipel canadien, le nord du Groenland, l'archipel de Svalbard, la mer du Groenland, la mer de Norvège, l'ouest des pays scandinaves et l'Islande. Sa valeur est aussi d'environ $-0.16 \text{ hPa an}^{-1}$.

Enfin, comme il a été mentionné, toutes les configurations de GEM s'entendent sur le maximum de tendances positives de la mer de Béring. Par contre, seule la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 ne semble pas vouloir l'étendre sur le sud de l'Alaska. La valeur du maximum varie d'environ 0.08 hPa an⁻¹ pour la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 à environ 0.16 hPa an⁻¹ pour la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global.

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison de réanalyses et des configurations de GEM montre que les configurations GEM–VAR et GEM–LAM pilotée par ERA 40 sont celles qui ressemblent le plus aux réanalyses NCEP et ERA 40 en termes de distribution géographique des tendances annuelles de pression au niveau moyen de la mer. Par contre, la configuration GEM–VAR n'arrive pas à représenter la forte zone de tendances négatives sur l'océan Arctique, l'Alaska et l'ouest du Canada ainsi que les tendances positives sur l'est de la Sibérie. De plus, la position du maximum de tendances négatives est trop au sud par rapport aux réanalyses. La configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40 représente mieux la distribution et la position du maximum près du pôle que la configuration GEM–VAR. Par contre, les tendances sont légèrement trop fortes au dessus de l'Islande, la mer du Groenland, la mer de Norvège et l'ouest des pays scandinaves.

Les configurations GEM–global et GEM–LAM pilotée par GEM–global sont pratiquement incapables de reproduire le patron de distribution des tendances annuelles de SLP, à l'exception de la région de l'ouest de la Russie. En fait, le fort maximum positif, situé au sud–est du Groenland dans la configuration GEM–LAM pilotée par GEM–global, est totalement inexistant dans les réanalyses.

La zone de faibles tendances positives située au sud du Groenland est par contre mieux représentée, sauf pour la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 où la tendance est clairement négative (et inversement pour la zone de tendances positives sur l'est de la Sibérie). Pour terminer, toutes les configurations représentent bien le maximum sur la mer de Béring. Par contre, il est généralement un peu trop fort et trop étendu vers l'est en direction de l'Alaska (sauf pour la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40).

2.2.2 Variances des pressions au niveau moyen de la mer (SLP)

2.2.2.1 Variances des moyennes saisonnières de SLP

Automne

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

La comparaison des variances de pressions au niveau moyen de la mer (SLP) des réanalyses NCEP et ERA 40 pour l'automne (SON) permet de conclure que la distribution géographique des variances est pratiquement similaire pour les deux ensembles. Les variances de SLP sont les plus fortes au dessus des régions maritimes, en particulier le long des côtes de Russie (mer de Barents, mer de Kara et mer des Laptev). Les variances plus faibles touchent l'Alaska, le Groenland, les pays scandinaves, l'ouest de la Russie et les plaines de Sibérie septentrionale. Il y a deux zones de maximum de variances dans chacune des réanalyses. La première, d'environ 18 hPa², se trouve juste au nord de l'Angleterre. La deuxième touche quant à elle la majeure partie de la mer de Barents et l'ouest de la mer de Kara. Sa valeur maximale est d'environ 24 hPa².

Comparaison des configurations de GEM

Pour l'automne (SON), la comparaison des variances de SLP des différentes configurations de GEM montre que la distribution géographique des variances apparaît relativement semblable pour les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global ainsi que pour les configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par ERA 40. De manière générale, les zones de plus fortes variances des configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global touchent les régions maritimes, notamment l'Atlantique Nord, la mer de Norvège, la mer du Groenland, la mer de Barents, la mer de Kara, la mer des Laptev, l'océan Arctique, la mer de Beaufort, le détroit et de la mer de Béring ainsi que le golf de l'Alaska. Elles touchent également quelques régions terrestres comme l'Alaska, l'est du Groenland, les pays scandinaves ainsi que les plaines de Sibérie septentrionale. Pour la configuration GEM-global, elles s'étendent également sur l'extrême est de la Sibérie ainsi que sur le Yukon, les Territoires du Nord-Ouest et l'archipel canadien. La configuration GEM-VAR présente un maximum de variance de SLP sur la mer de Barents d'environ 24 hPa². La configuration GEM-global simule quand à elle deux maximums. Le premier, d'environ 24 hPa², est situé juste au nord de la mer des Laptev tandis que le second, d'une intensité > 24 hPa², est situé sur la mer de Béring. Pour terminer, le maximum de variance de SLP de la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global se trouve directement sur le pôle avec une valeur d'environ 18 hPa².

La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est la plus différente des quatre. Elle montre une zone de très fortes variances de SLP (valeurs > 38 hPa²) le long de la côte est du Groenland et s'étendant vers l'Islande, la mer de Norvège, la mer du Groenland, les archipels de Svalbard et François-Joseph, la mer de Barents, la Nouvelle Zemble et vers le nord, jusqu'au pôle. Son maximum, d'environ 88 hPa², est situé juste au sud de l'archipel de Svalbard. Finalement, la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 présente également un maximum sur la mer de Béring. Sa valeur est > 18 hPa².

Comparaison réanalyses–configurations

Les configurations GEM–VAR et GEM–LAM pilotée par GEM–global sont celles qui se rapprochent le plus des réanalyses NCEP et ERA 40 en terme de distribution géographique et d'intensité des variances de SLP pour l'automne (SON). Par contre, le maximum de variance de la configuration GEM–global est moins intense et mal positionné comparativement aux réanalyses. Il se trouve au nord de la mer des Laptev au lieu d'être situé sur la mer de Barents et l'est de la mer de Kara. Bien que la configuration GEM–global présente également des variances de SLP d'intensité relativement semblable aux réanalyses, la distribution des variances maximales s'étend trop vers le sud-ouest du Canada. De plus, le maximum sur la mer de Béring est surestimé par rapport aux réanalyses. Pour la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40, la distribution géographique des plus fortes variances de SLP s'étend également trop vers le sud canadien et l'est de la Sibérie. De plus, les maximums, situés sur la mer de Béring et en particulier celui situé au sud de l'archipel de Svalbard, sont trop forts en comparaison des réanalyses NCEP et ERA 40.

Hiver

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

Pour l'hiver (DJF), la comparaison des variances de pression au niveau moyen de la mer des réanalyses NCEP et ERA 40 montre que la distribution géographique des variances est également similaire pour les deux ensembles. Comme pour l'automne, les zones de variances maximales se retrouvent majoritairement sur les secteurs maritimes, en particulier le long des côtes de Russie (mer de Barents, mer de Kara et mer des Laptev). Par contre, elles affectent maintenant une plus grande partie des continents. Elles touchent entre autre l'Alaska, l'ouest canadien, l'archipel canadien, la baie de Baffin, le détroit de Davis, le Groenland, les pays scandinaves, l'ouest de la Russie, les plaines de Sibérie septentrionale ainsi que l'est de la Sibérie. Il y a maintenant trois zones de maximum dans les deux réanalyses. La première, avec une valeur $> 30 \text{ hPa}^2$, se trouve sur le golf de l'Alaska et sur l'est de la mer de Béring. La deuxième et la moins étendue des trois se trouve sur l'océan Arctique, juste au nord de la mer de Kara et de la mer des Laptev. Cette région de maximum de variances de SLP apparait cependant plus étendue avec la réanalyse ERA 40 par rapport à la réanalyse NCEP. La valeur de ce maximum est d'environ 42 hPa^2 avec la réanalyse ERA 40 et 36 hPa^2 avec la réanalyse NCEP. La dernière région de maximum de variance est la plus étendue et la plus intense des trois régions. Elle est située juste au nord des pays scandinaves, entre l'Islande et l'archipel de Svalbard. Sa valeur est d'environ 48 hPa^2 pour les deux réanalyses.

Comparaison des configurations de GEM

Pour l'hiver (DJF) les configurations globales, GEM-VAR et GEM-global présentent relativement la même intensité et distribution géographique de variances de SLP. Tout comme à l'automne, les maximums de variances de SLP se retrouvent majoritairement le long du littoral eurasien. Par contre, elles montrent également un maximum sur la partie de la Russie à l'ouest de l'Oural et sur l'est des pays scandinaves. Pour la configuration GEM-global, cette zone de plus fortes variances de SLP s'étend plus à l'est jusque sur le sud du Groenland et le détroit de Davis. Les valeurs des maximums sont respectivement d'environ 36 hPa² pour la configuration GEM-VAR et d'environ 48 hPa² pour la configuration GEM-global. De plus, la configuration GEM-global simule un autre maximum juste au nord de la mer des Laptev, avec une valeur d'environ 30 hPa². Pour terminer, les deux configurations globales montrent une zone de maximum de variance sur la mer de Béring et le golf de l'Alaska (et le sud de l'Alaska dans le cas de la configuration GEM-VAR). La valeur de ce maximum est > 30 hPa² pour la configuration GEM-VAR et > 24 hPa² pour la configuration GEM-global. Pour terminer, il y a aussi de légères différences pour les zones de minimums de variances entre les configurations GEM-VAR et GEM-global. Par exemple, la configuration GEM-VAR montre une plus grande zone de minimum de variance de SLP sur l'archipel canadien et tout l'est du Canada ainsi que sur le plateau de Sibérie centrale et l'est des plaines de Sibérie septentrionale que la configuration GEM-global.

Les configurations GEM-LAM apparaissent également relativement semblables au niveau de l'intensité et de la distribution géographique des variances de SLP. La zone de plus fortes variances de SLP (valeurs $> 38 \text{ hPa}^2$) touche l'Islande, le Groenland, la mer du Groenland, les archipels de Svalbard et François-Joseph, la mer de Barents, la Nouvelle Zemble, la mer des Laptev, la majeure partie de l'océan Arctique, le nord de l'archipel canadien, l'île de Baffin, la baie de Baffin et le détroit de Davis. La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global présente de plus une extension de la zone de maximum de variances en direction des plaines de Sibérie occidentale. Ses deux maximums, situés sur le sud-est du Groenland et entre l'archipel de François-Joseph et le pôle, ont des valeurs respectives d'environ 98 hPa^2 et d'environ 72 hPa^2 . Avec la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, la zone de maximum s'étend un peu plus vers le sud sur les pays scandinaves, la mer de Norvège et l'Atlantique Nord. Ses deux maximums, situés aux mêmes endroits que la configuration GEM-LAM pilotée par GEM, ont des valeurs $> 98 \text{ hPa}^2$. Le maximum, sur l'est de la mer de Béring et le golf de l'Alaska, apparaît également similaire pour ces deux configurations avec une valeur $> 30 \text{ hPa}^2$. Pour terminer, les deux configurations GEM-LAM présentent relativement les mêmes régions de minimums de variances de SLP, en particulier sur le sud de la Sibérie et du Canada. Par contre, la configuration GEM-LAM pilotée par GEM montre une zone de minimum plus importante sur le détroit de Béring et sur le nord de l'Europe.

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison entre les réanalyses et les configurations de GEM pour l'hiver (DJF) permet de constater que les configurations de type « globale » (GEM–VAR et GEM–global) sont celles qui représentent le mieux les variances de SLP. Les configurations GEM–LAM, par contre, montrent beaucoup trop de variances par rapport aux réanalyses ERA 40 et NCEP, en particulier sur le bassin arctique (côté Russie), le Groenland et le nord de l'archipel canadien (et l'Atlantique Nord pour GEM–LAM pilotée par ERA 40).

Les configurations GEM–VAR et GEM–global représentent relativement bien le patron de distribution géographique des variances de SLP des réanalyses, en particulier le maximum situé sur le sud de la mer de Béring, le sud de l'Alaska et le golfe de l'Alaska. En fait, celui-ci est légèrement trop fort pour la configuration GEM–VAR et légèrement trop faible pour la configuration GEM–global. Par contre, l'étendue de cette zone de maximum est relativement bien respectée.

La seconde zone de maximum de variance de SLP, située au nord de la mer des Laptev, est aussi généralement bien représentée dans la configuration GEM–global en termes d'étendue et d'intensité. Pour la configuration GEM–VAR, par contre, cette région est moins bien définie et l'intensité du maximum est moins importante.

Le dernier maximum, situé sur l'est des pays scandinaves et la mer de Norvège est moins bien représenté par les configurations GEM-VAR et GEM-global. Celles-ci placent plutôt la zone de maximum plus au sud, notamment sur la partie de la Russie à l'ouest de l'Oural et sur l'est des pays scandinaves. Encore une fois, la configuration GEM-global est celle qui représente le mieux l'intensité de ce maximum avec la même valeur de maximum que les réanalyses. Pour la configuration GEM-VAR, la valeur de ce maximum est légèrement inférieure aux réanalyses avec une valeur d'environ 30 hPa² par rapport à environ 48 hPa².

Les zones de minimums de variances de SLP sont aussi relativement bien respectées pour la configuration GEM-VAR, notamment sur le centre du Canada. La seconde zone de minimum, située sur le sud de la Sibérie est légèrement différente des réanalyses. Celle-ci s'étend un peu trop au nord, sur le plateau de Sibérie centrale et l'est des plaines de Sibérie septentrionale, et pas assez vers l'est de la Russie puisque la zone de maximum de variance est située légèrement plus au sud. Enfin, pour la configuration GEM-global, les zones de minimum de variances de SLP sont situées trop au sud par rapport aux réanalyses. Pour les configurations GEM-LAM, la zone de minimum de variances sur le sud de la Sibérie est relativement bien représentée. Par contre, la zone de minimum sur le centre et l'est du Canada est complètement absente.

Printemps

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

Ici encore, la distribution des variances de pression au niveau moyen de la mer des réanalyses NCEP et ERA 40 pour le printemps (MAM) est pratiquement identique. Comme pour les deux saisons précédentes, les zones de plus fortes variances de SLP se retrouvent surtout au dessus des zones maritimes, en particulier le long des côtes de Russie (mer de Barents, mer de Kara et mer des Laptev). Ces zones touchent également l'Alaska, le Groenland, les pays scandinaves, l'ouest de la Russie et les plaines de Sibérie septentrionale. Il y a maintenant deux maximums présents dans les réanalyses, l'intense maximum de l'hiver situé au nord des pays scandinaves étant maintenant disparu. Les deux maximums qui persistent se retrouvent au nord de la mer des Laptev et au sud de la mer de Béring. Leur valeur est respectivement d'environ 30 hPa² et 24 hPa². La majeure partie du Canada, l'archipel canadien, l'Europe de l'Est, la Sibérie et la partie de la Russie à l'est de l'Oural sont les régions avec les plus faibles variances de SLP.

Comparaison des configurations de GEM

Pour le printemps (MAM), les configurations GEM-LAM sont pratiquement semblables au niveau de la distribution géographique des variances de pression au niveau moyen de la mer, de la position et de l'intensité des maximums. La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montre un maximum de variance de SLP entre la mer de Kara et le pôle Nord tandis qu'il se situe sur la mer de Kara pour la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40. La valeur du maximum dans les deux cas est d'environ 54 hPa². De plus, les deux configurations montrent de plus fortes variances sur la mer de Béring et le golfe de l'Alaska ainsi qu'un prolongement vers le Groenland avec un maximum d'environ 30 hPa² sur le sud-est du Groenland dans le cas de la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global et d'environ 24 hPa² sur le sud du Groenland dans le cas de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40. Les deux configurations GEM-LAM montrent également des zones de minimum de variance de SLP sur le sud-ouest du Canada, le sud de la Sibérie, le sud de la Russie et l'Europe de l'Est.

La configuration GEM-VAR situe le maximum de variance de SLP pratiquement au même endroit (juste à l'ouest de l'archipel de Svalbard) et avec presque la même intensité (environ 60 hPa²) que les configurations GEM-LAM. Par contre, la région de maximum de variances de SLP (valeur > 42 hPa²) est beaucoup plus étendue. Elle s'étend vers le sud, en touchant notamment les archipels de Svalbard et François-Joseph, la mer de Norvège,

la mer du Groenland et l'Islande. La configuration GEM-global montre aussi la même distribution géographique pour la zone de maximum, sauf que l'intensité est relativement moindre avec une valeur maximale d'environ 24 hPa². Par contre, elle montre les mêmes positions de maximum de variance de SLP sur la mer de Béring et le golf de l'Alaska ainsi qu'entre le Groenland et l'Islande (environ 18 hPa²) que les configurations GEM-LAM. Dans la configuration GEM-VAR, le maximum de variance de SLP situé sur le sud de la mer de Béring, le sud de l'Alaska et le golfe de l'Alaska est plus important (en termes d'étendue et d'intensité) et s'étend plus à l'est que les autres configurations avec une valeur > 36 hPa².

Pour terminer, la configuration GEM-global montre une zone de plus faibles variances sur le sud de l'Eurasie et tout le Canada, à l'exception de l'archipel canadien. La configuration GEM-VAR est cependant la seule à indiquer de plus fortes variances sur le Yukon et le sud-est de l'Alaska et l'ouest du Canada tandis que les autres configurations montrent des variances de SLP relativement faibles.

Comparaison réanalyses–configurations

Presque toutes les configurations de GEM ont tendance à surestimer le maximum de variance de SLP au printemps. En effet, le maximum situé au nord de la mer des Laptev est beaucoup trop fort pour les configurations GEM–VAR, GEM–LAM pilotée par ERA 40 et GEM–LAM pilotée par GEM–global. De plus, l'extension vers le Groenland de toutes les configurations, en particulier celle de la configuration GEM–VAR (et de son maximum), est également surestimée par rapport aux réanalyses où les variances de SLP sont beaucoup moins importantes sur ce secteur.

La configuration GEM–global est celle qui représente le mieux la distribution et l'intensité du maximum de variance de SLP. Par contre, comme il a été mentionné, elle surestime légèrement le maximum de variance situé entre le Groenland et l'Islande. La configuration GEM–global semble également bien représenter les zones de minimum situées sur le Canada, le sud de la Russie et de la Sibérie, sauf pour ce qui est de la mer de Sibérie orientale et de la mer de Beaufort où les variances sont légèrement trop fortes.

Les autres configurations représentent aussi relativement bien le minimum sur la Russie et la Sibérie. Elles ont toutefois le même problème sur la mer de Sibérie orientale et de la mer de Beaufort que la configuration GEM–global (c'est-à-dire que les variances de SLP y sont légèrement surestimées). Par

contre, elles sont incapables de reproduire la zone de minimum sur le Canada.

Pour terminer, toutes les configurations de GEM de même que les réanalyses NCEP et ERA 40 génèrent un maximum de variance de SLP sur le sud de la mer de Béring et le golfe de l'Alaska. La configuration GEM-VAR présente toutefois des variances trop fortes comparées aux réanalyses. Elle est également la seule à montrer de plus fortes variances sur le sud de l'Alaska.

L'été

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

La distribution spatiale des variances de pression au niveau moyen de la mer pour l'été (JJA) est encore relativement identique pour les réanalyses ERA 40 et NCEP. La zone ayant les plus fortes variances de SLP affecte majoritairement l'océan Arctique et les archipels de Svalbard et François-Joseph. Le maximum de variance apparaît cependant légèrement plus fort avec la réanalyse ERA 40, avec un maximum directement sur le pôle. Sa valeur est d'environ 18 hPa² comparativement à environ 12 hPa² avec la réanalyse NCEP.

Comparaison des configurations de GEM

Pour l'été (JJA) les variances de SLP sont très faibles. Les deux configurations globales, GEM-VAR et GEM-global, s'entendent pour simuler un maximum de variance sur l'océan Arctique, la mer de Kara et les archipels de Svalbard et François-Joseph. Pour la configuration GEM-global, cette zone s'étend également à la mer de Barents. La valeur des maximums sont d'environ 12 à 18 hPa² pour ces deux configurations. La zone de maximum de variance des deux configurations GEM-LAM s'étend par contre sur une plus grande région, soit toute la zone au nord du cercle arctique (le Groenland, l'Islande, la mer du Groenland, la mer de Norvège, les pays scandinaves, la mer de Barents, la mer de Kara, la mer des Laptev, les mers de Sibérie, la mer des

Tchouktches, la mer de Beaufort, l'océan Arctique, le nord de l'archipel canadien, la baie de Baffin et le détroit de Davis). Le maximum, d'environ 18 hPa² est plus ou moins centré sur le pôle Nord pour les deux configurations.

Comparaison réanalyses–configurations

Encore une fois, les deux configurations GEM–LAM surestiment les variances de SLP sur le bassin arctique, ce qui se traduit par un maximum de variance plus élevé que les réanalyses NCEP et ERA 40. Les configurations GEM–VAR et GEM–global sont relativement conforme aux réanalyses avec une zone de maximum de variance de SLP centrée sur l'océan Arctique et les archipels de Svalbard et François–Joseph.

2.2.2.2 Variance des moyennes annuelles de SLP

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

La comparaison des moyennes annuelles des variances de pressions au niveau moyen de la mer (SLP) des réanalyses NCEP et ERA 40 montre peu de différences, les valeurs et l'étendue étant très faibles. En effet, il y a seulement deux petites zones de plus fortes variances (d'environ 12 hPa²). La première est située entre la mer de Laptev et le pôle nord et la deuxième entre l'Islande et le Groenland.

Comparaison des configurations de GEM

La comparaison des moyennes annuelles des variances de pressions au niveau moyen de la mer (SLP) des différentes configurations de GEM montrent des différences plus marquées entre les configurations globales et les configurations LAM. En effet, alors que les configurations globales ne montrent pratiquement pas de variances de SLP, les configurations GEM-LAM présentent des variances relativement plus fortes et étendues. Dans la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, la zone de plus fortes variances touchent le Groenland, l'Islande, la mer de Norvège, la mer de Barents, la mer de Kara, les archipels de Svalbard et François-Joseph et une partie de l'océan Arctique avec des valeurs maximales d'environ 12 hPa². Avec la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, cette région est légèrement

plus étendue. Le maximum, situé entre les archipels de Svalbard et François-Joseph présente une valeur d'environ 18 hPa².

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison des moyennes annuelles des variances de pressions au niveau moyen de la mer (SLP) des réanalyses NCEP et ERA 40 et des configurations de GEM est relativement difficile du fait des faibles valeurs et de l'étendue des plus fortes variances. Néanmoins, il est possible de dire que les configurations GEM–LAM surestiment les variances de SLP sur la région maritime comprise entre le Groenland et l'Europe.

2.3.1 Tendances des hauteurs du géopotential à 500 hPa

2.3.1.1 Tendances des moyennes saisonnières des hauteurs du géopotential à 500 hPa

Automne

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

La comparaison des tendances de hauteurs du géopotential à 500 hPa pour l'automne (SON) entre les réanalyses de NCEP et ERA 40 montre peu de différences du point de vue de la distribution géographique des tendances. Les deux réanalyses montrent une zone de tendances positives sur la moitié est des Territoires du Nord-Ouest, l'archipel canadien, la baie d'Hudson, la baie de Baffin, le détroit de Davis, le Groenland, l'Atlantique Nord, la mer du Groenland, l'Islande, la mer de Norvège, les pays scandinaves, la mer de Barents, l'ouest de la mer de Kara, les archipels de Svalbard et François-Joseph, la Nouvelle Zemble et une portion de l'océan Arctique (entre le Groenland et le pôle Nord) ainsi que sur la péninsule du Kamtchatka, le sud de la région montagneuse de l'est de la Sibérie et de la mer de Beaufort. Les tendances négatives touchent l'ouest des Territoires du Nord-Ouest, le Yukon, l'Alaska, la mer de Beaufort, le détroit de Béring, la mer des Tchouktches, la mer de Sibérie orientale, la mer des Laptev, la mer de Kara, les plaines et le plateau de Sibérie centrale, le plateau de l'Anadyr et les Hauteurs de Kolyma ainsi qu'une partie de l'océan Arctique. La différence la plus importante est reliée à l'étendue des tendances maximales des hauteurs

du géopotential à 500 hPa. Bien que située aux mêmes endroits, l'étendue des maximums de tendances est plus importante pour la réanalyse ERA 40. Les deux maximums de tendances positives des hauteurs du géopotential à 500 hPa sont situés sur la partie est des pays scandinaves et au sud du Groenland, dans l'Atlantique Nord. Ils ont respectivement des valeurs d'environ 3.5m an^{-1} et d'environ 3.0m an^{-1} . Les deux maximums de tendances négatives sont quant à eux situés sur la mer des Laptev et sur le sud de l'Alaska avec des valeurs respectives d'environ -2.0m an^{-1} et d'environ -1.5m an^{-1} .

Comparaison des configurations de GEM

La comparaison de la distribution géographique des tendances des hauteurs du géopotential à 500 hPa des différentes configurations du modèle GEM pour l'automne (SON) révèle de fortes différences les unes par rapport aux autres.

La configuration GEM-VAR montre deux zones de tendances négatives. La première est située sur l'Amérique du Nord, principalement sur l'ouest du Canada, le sud de l'Alaska et le golf de l'Alaska et a une valeur maximale, centrée sur la Colombie Britannique, d'environ -2.0m an^{-1} . La deuxième zone de tendances négatives se trouve sur les plaines de Sibérie occidentale et septentrionale, le plateau de Sibérie centrale et le sud de la mer de Kara et a aussi une valeur maximale d'environ -2.0m an^{-1} . La zone de tendances positives touche tout le secteur maritime ainsi que le nord du Québec, l'archipel canadien, le Groenland, les pays scandinaves, l'Europe de l'Est, la Russie à l'ouest de l'Oural, la région montagneuse de l'est de la Sibérie (Monts de Verkhoïansk, plateau de l'Anadyr, Hauteurs de la Kolyma) et le Kamtchatka. Dans cette zone se trouvent deux maximums de tendances positives des hauteurs du géopotential à 500 hPa. La première se trouve au sud-est des pays scandinaves et la deuxième entre le nord de l'archipel canadien et la mer de Sibérie orientale. Les deux maximums ont une valeur d'environ 4m an^{-1} .

La configuration GEM-global montre trois zones de tendances positives des hauteurs du géopotential à 500 hPa. La première est située au sud de la mer de Béring et du plateau de Sibérie centrale. La deuxième se trouve sur la moitié est du Canada (est des Territoires du Nord-Ouest, sud de l'archipel canadien et prairies inclus) et la dernière sur la mer de Norvège, les pays scandinaves, la mer de Barents, la mer de Kara, la partie ouest des plaines de Sibérie septentrionale, la Nouvelle Zemble et les archipels de Svalbard et François-Joseph. Ces deux dernières régions ne sont cependant pas reliées comme c'est le cas avec la configuration GEM-VAR. Leur valeur maximale respective est d'au moins 1.5m an^{-1} pour les deux premières régions et d'environ 3.0m an^{-1} pour la dernière. Le dernier maximum, centré sur les pays scandinaves, est légèrement plus au nord que dans le cas de la configuration GEM-VAR. La distribution géographique des tendances négatives des hauteurs du géopotential à 500 hPa est relativement différente de la configuration GEM-VAR. Elle constitue maintenant une région beaucoup plus grande soit : l'Atlantique Nord, l'Islande, le Groenland, la baie de Baffin, le nord de l'archipel canadien, l'océan Arctique, la mer de Beaufort, le Yukon, l'Alaska, la Colombie-Britannique, le golfe de l'Alaska, le détroit de Béring, la mer des Tchouktche, la mer de Sibérie orientale, la mer des Laptev, la région montagneuse de l'est de la Sibérie (Monts de Verkhoïansk, plateau de l'Anadyr, Hauteurs de la Kolyma), le plateau de Sibérie centrale, l'est des plaines de Sibérie septentrionale et la majeure partie des plaines de Sibérie orientale. Les tendances négatives de hauteurs

potentielles touchent ainsi une bonne partie du secteur maritime, contrairement à la configuration GEM-VAR, qui n'en montre relativement aucune. Le maximum, situé entre le pôle Nord et la mer de Beaufort, a une valeur d'environ -2.0m an^{-1} .

La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global est également différente des deux précédentes. Cette fois-ci, la région analysée est séparée en deux avec une zone de tendances positives des hauteurs du géopotential à 500 hPa du côté de l'Europe de l'Est, des pays scandinaves, de la mer de Norvège et du Groenland, de l'archipel de Svalbard, de l'Islande, de l'Atlantique Nord, du Groenland et de la moitié est du Canada (l'archipel canadien, est des Territoires du Nord-Ouest, prairies canadiennes, baie d'Hudson) et une zone de tendances négatives sur la Russie à l'ouest de l'Oural, les plaines de Sibérie occidentale et septentrionale, le plateau de Sibérie centrale, la région montagneuse de l'est de la Sibérie (Monts de Verkhoïansk, plateau de l'Anadyr, Hauteurs de la Kolyma), le détroit de Béring, la mer des Tchouktches, la mer de Beaufort, l'océan Arctique, la mer de Sibérie orientale, la mer des Laptev, la mer de Kara et l'est de la mer de Barents. Cette région de tendances négatives inclus aussi, tout comme la configuration GEM-global, l'Alaska, le Yukon, la Colombie-Britannique et le golfe de l'Alaska. Ces deux zones de tendances ont des maximums centrés sur l'est des pays scandinaves et de la mer de Norvège, le nord-ouest de la baie d'Hudson et sur l'est des plaines de Sibérie septentrionale et de la mer

de Kara. Elles ont des valeurs respectives d'environ 3.5m an^{-1} , 3.5m an^{-1} et -3.5m an^{-1} . Pour terminer, une zone de tendances positives est également présente sur la mer Béring (comme c'est le cas pour les configurations GEM-VAR et GEM-global) avec une valeur d'environ 1.0m an^{-1} .

La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est aussi différente des autres. Elle montre la région de tendances négatives des hauteurs du géopotential à 500 hPa la plus étendue et avec la plus forte intensité de toutes les configurations. Celle-ci touche pratiquement tout le domaine, à l'exception de l'Europe de l'Est, la Russie à l'ouest de l'Oural, les plaines de Sibérie occidentale, l'est des plaines de Sibérie septentrionale, la majeure partie du plateau de Sibérie centrale et du Kamtchatka où les tendances sont positives. Les valeurs maximales des tendances positives et négatives, centrées sur l'Europe de l'Est et la Russie à l'ouest de l'Oural ainsi que sur l'ouest de l'archipel canadien sont d'environ 1.5m an^{-1} et -4.5m an^{-1} .

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison des différentes configurations de GEM avec les réanalyses pour l'automne (SON) permet de déterminer que la configuration GEM–LAM pilotée par GEM–global correspond le mieux aux réanalyses NCEP et ERA 40 du point de vue de la distribution géographique des tendances des hauteurs du géopotential à 500 hPa. Celle–ci montre, tout comme les réanalyses, une zone de tendance négative des hauteurs du géopotential à 500 hPa sur l'Asie et l'Alaska et une zone de tendances positives sur la moitié est du Canada, le Groenland et l'Europe (chacune ayant environ la moitié de l'océan Arctique). La configuration GEM–VAR représente aussi relativement bien l'allure des tendances des réanalyses NCEP et ERA 40. Le seul problème est qu'elle ne représente pas la tendance négative sur l'est de l'Asie. La configuration GEM–global ressemble aussi aux réanalyses sauf pour l'extension des tendances négatives en direction du Groenland et de l'Atlantique Nord. La configuration la moins représentative des quatre est la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40. Celle–ci montre une zone de tendance négative sur pratiquement tout le domaine (sauf une partie de la Russie).

Toutes les configurations, à l'exception de la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40, s'entendent approximativement sur l'amplitude et la position du maximum sur l'ouest des pays scandinaves tel que représenté dans les réanalyses NCEP et ERA 40. La position du maximum est plus ou moins bonne dans le cas de la configuration GEM–global, légèrement trop à l'ouest

dans le cas de la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global et trop au sud, dans le cas de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 et GEM-VAR. L'étendue et l'intensité de ce dernier, avec une valeur d'environ 4.0m an^{-1} , sont généralement trop grandes en comparaison des réanalyses dont la valeur est d'environ 3.5m an^{-1} . En contrepartie, l'intensité de la configuration GEM-global apparaît un peu trop faible avec une valeur d'environ 3.0m an^{-1} et celui de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 beaucoup plus faible avec une valeur d'environ 1.5m an^{-1} .

La position du deuxième maximum, au sud du Groenland, n'est cependant pas aussi bien représentée par les différentes configurations de GEM. Les configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par GEM-global la place plutôt sur la baie d'Hudson alors qu'elle est complètement absente pour la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40.

La position des maximums de tendances négatives est relativement bien représentée, sauf dans le cas de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40. Celle-ci place un très fort maximum négatif sur l'ouest de l'archipel canadien, avec une valeur d'environ -4.5m an^{-1} . Les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global arrivent assez bien à situer la position des maximums négatifs de la mer de Laptev et du sud de l'Alaska. La configuration GEM-global représente seulement de manière partielle les maximums négatifs du sud de l'Alaska et de la mer des Laptev étant donné

qu'elle place son maximum pratiquement au même endroit que la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40.

La valeur minimale d'environ -1.5m an^{-1} présent au sud de l'Alaska dans les réanalyses est généralement respectée avec des valeurs d'environ -1.5m an^{-1} , -1.0m an^{-1} et -0.5m an^{-1} respectivement pour les configurations GEM-VAR, GEM-LAM pilotée par GEM-global et GEM-global. Dans le cas du maximum négatif d'environ -1.5m an^{-1} généré par les réanalyses près de la mer des Laptev, la configuration GEM-VAR le représente un peu plus au sud avec une valeur pratiquement égale d'environ -1.5m an^{-1} tandis que la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global le place au pratiquement au même endroit mais avec une valeur beaucoup trop grande d'environ -3.5m an^{-1} . La configuration GEM-global présente quant à elle des tendances négatives sans toutefois mettre de maximum.

Hiver

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

La comparaison de la distribution géographique des tendances des hauteurs du géopotential à 500 hPa pour l'hiver (DJF) entre les réanalyses NCEP et ERA 40 montre également peu de différences. Cette fois, les tendances positives sont limitées à trois régions : la région au sud-ouest des pays scandinaves, la région du centre du Canada ainsi que la région contenant la mer de Kara, la mer des Laptev, l'est des plaines de Sibérie occidentale et le plateau de Sibérie centrale. Cette dernière région, la plus étendue des trois, possède deux maximums de tendances positives des hauteurs du géopotential à 500 hPa. Le premier est situé entre la mer de Kara et la mer des Laptev et le deuxième au sud du Plateau de Sibérie centrale, près de la mer d'Okhotsk. Les valeurs de ces maximums sont respectivement d'environ 1.0m an^{-1} (environ 2.0m an^{-1} dans le cas de la réanalyse ERA 40) et 1.5m an^{-1} . Les deux autres régions ont des maximums de tendances $> 2.0\text{m an}^{-1}$ (Canada) et 1.5m an^{-1} (pays scandinaves). Les tendances négatives des hauteurs du géopotential à 500 hPa, qui touchent toutes les autres régions, possèdent quatre maximums négatifs. Le premier, le plus intense des quatre, est situé sur le détroit de Béring, le deuxième sur la baie de Baffin, le troisième sur la mer de Norvège et le dernier sur la Russie à l'ouest de l'Oural. Les valeurs de ceux-ci sont respectivement d'environ : -3.0m an^{-1} , -2.0m an^{-1} , -1.5m an^{-1} et -2.0m an^{-1} pour la réanalyse ERA 40 et d'environ -3.5m an^{-1} , -2.0m an^{-1} , -1.5m an^{-1} et -2.5m an^{-1} dans le cas de la réanalyse NCEP.

Comparaison des configurations de GEM

La comparaison des tendances des hauteurs du géopotential à 500 hPa des différentes configurations de GEM pour l'hiver (DJF) montre, tout comme à l'automne, des différences relativement importantes. La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 montre des tendances négatives sur pratiquement tout le domaine à l'exception de trois zones de tendances positives situées près des frontières du domaine. La première, de valeur $> 3.0\text{m an}^{-1}$, est située au sud-ouest des pays scandinaves. La deuxième, de valeur $> 1.5\text{m an}^{-1}$, se trouve au sud du plateau de Sibérie centrale et la dernière, de valeur $> 1.5\text{m an}^{-1}$, est située sur l'est des prairies canadiennes. La région de tendances négatives, qui couvre tout le reste du domaine, possède trois maximums négatifs. Le premier, se trouve au sud de l'Alaska et a une valeur d'environ -3.0m an^{-1} . Le deuxième, situé à l'ouest des plaines de Sibérie, a aussi une valeur d'environ -3.0m an^{-1} . Le troisième maximum est par contre très intense. Il est situé juste au nord du Groenland et de l'archipel canadien. Sa valeur maximale est d'environ -4.5m an^{-1} .

La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global est complètement à l'opposé de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40. Elle montre une zone de tendances positives sur pratiquement tout le domaine à l'exception de deux zones négatives. La première est située au sud-ouest des pays scandinaves et la seconde au sud du plateau de Sibérie centrale et de la région montagneuse de l'est de la Sibérie (près des frontières du domaine).

Leur valeur maximale respective est d'environ -0.5m an^{-1} et $< -1.5\text{m an}^{-1}$. La zone de tendances positives montre un immense et intense maximum positif avec une valeur $> 5.5\text{m an}^{-1}$ sur pratiquement tout le Groenland, la baie et l'île de Baffin le détroit de Davis et l'Atlantique Nord ainsi qu'un autre maximum, beaucoup plus faible, situé sur le sud de l'Alaska avec une valeur d'environ 1.5m an^{-1} .

La configuration GEM-VAR montre également le même patron de tendances négatives des hauteurs du géopotential à 500 hPa mais avec maintenant trois zones. La première et la plus importante se trouve plus au nord-est que celle des configurations GEM-LAM pilotée par GEM-global et GEM-global. Elle est située sur les pays scandinaves, l'ouest de la Russie, la mer de Norvège, la mer du Groenland, la mer de Barents, les archipels de Svalbard et François-Joseph, la Nouvelle Zemble, la mer de Kara et l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale. Sa valeur maximale, située sur la Nouvelle Zemble, est d'environ -2.5m an^{-1} . La deuxième zone se trouve sur la péninsule du Kamtchatka et l'ouest de la mer de Béring (près des frontières du domaine) et a une valeur maximale d'environ -0.5m an^{-1} . La troisième se trouve sur la baie d'Hudson, les prairies canadiennes, les Territoires du Nord-Ouest et la Colombie Britannique et possède une valeur maximale $< -1.5\text{m an}^{-1}$. La zone de tendances positives qui touche la majeure partie du domaine (comme la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global) possède trois maximums : le premier au sud du Groenland avec une valeur $> 2.0\text{m an}^{-1}$, la

deuxième, au sud des Plaines de Sibérie, avec une valeur également $> 2.0\text{m an}^{-1}$, et la dernière, sur le nord de l'Alaska, avec une valeur maximale d'environ 3.5m an^{-1} .

La configuration GEM-global possède quant à elle deux zones de tendances négatives des hauteurs du géopotential à 500 hPa. La première est située sur le détroit de Béring, l'Alaska, le Yukon, l'ouest de l'archipel canadien, la mer de Beaufort, la majeure partie de l'océan Arctique et la mer de Kara tandis que la deuxième se retrouve sur les pays scandinaves et au sud de ceux-ci. Le premier maximum est situé sur l'Alaska et la mer de Beaufort avec une valeur d'environ -1.0m an^{-1} et le deuxième, au sud des pays scandinaves, avec une valeur $< -1.0\text{m an}^{-1}$. Il y a également un maximum positif de tendance des hauteurs du géopotential à 500 hPa au sud-est du Groenland, avec une valeur $> 2.5\text{m an}^{-1}$, et plusieurs petits maximums sur la Russie et la Sibérie avec chacun une valeur d'environ 1.5m an^{-1} .

Comparaison réanalyses–configurations

À la différence de l'automne, la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40 est probablement celle qui représente le mieux les tendances de hauteurs potentielles à 500 hPa des réanalyses NCEP et ERA 40. Cependant, elle est incapable de représenter la zone de tendances positives sur la mer de Kara, la mer des Laptev et la partie de l'océan Arctique juste au nord de celles-ci. Elle génère plutôt un fort maximum de tendances négatives juste au nord du Groenland et de l'archipel canadien. Ce maximum négatif ne correspond pas du tout avec les réanalyses NCEP et ERA 40. Par contre, la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40 arrive à bien représenter les trois zones de tendances positives situées près des frontières du domaine. Par contre, la zone située sur le Canada ne s'étend pas assez vers le nord (i.e. vers les Territoires du Nord–Ouest) comme dans les réanalyses. De plus, la position et l'intensité des maximums négatifs situés sur l'ouest de la Russie et le détroit de Béring correspondent assez bien avec les réanalyses. Cependant, le maximum qui devrait être situé sur le détroit de Béring est légèrement plus au sud–est dans la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40. Il se trouve en fait juste au sud de l'Alaska. Pour terminer, le maximum sur la baie de Baffin est de beaucoup surestimé dans la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40 comparé aux réanalyses.

Pour l'hiver, les autres configurations éprouvent énormément de difficultés à représenter les patrons généraux de tendances des hauteurs du géopotential

à 500 hPa. Par exemple, la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global présente le patron inverse, avec des tendances positives au lieu de tendances négatives et vice-versa. Il en va également de même avec la configuration GEM-VAR mais de manière un peu moins marquée puisqu'elle est capable de représenter les tendances négatives sur l'ouest de la mer de Béring ainsi que sur les pays scandinaves, la mer de Norvège, la mer de Barents, et l'ouest de la Russie et les tendances positives au sud de la Sibérie. Pour la configuration GEM-global, la situation est sensiblement la même. Les seules régions qui ont les mêmes tendances que les réanalyses sont situées sur le centre du Canada (tendances positives) et sur l'Alaska et la mer de Beaufort (tendances négatives).

Printemps

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

Tout comme l'automne et l'hiver, la comparaison de la distribution géographique des tendances des hauteurs du géopotential à 500 hPa pour le printemps (MAM) entre les réanalyses NCEP et ERA 40 montre peu de différences. La réanalyse ERA 40 montre deux zones de tendances négatives. La première est située sur les pays scandinaves, l'Europe de l'Est, l'ouest de la Russie, la mer de Norvège, l'archipel de Svalbard, la mer de Barents, la Nouvelle Zemble et l'est de la mer de Kara et la deuxième sur la mer de Sibérie orientale et la région de l'océan Arctique située juste au nord de celle-ci. Dans la réanalyse NCEP par contre, cette zone de tendances négatives des hauteurs du géopotential à 500 hPa touchent en plus la mer des Laptev, l'archipel de François-Joseph, la majeure partie de l'océan Arctique, le plateau de Sibérie centrale et la région montagneuse des Monts de Verkhoïansk. Ces deux régions ont chacune un maximum négatif: le premier est situé sur la péninsule de Kola, avec une valeur d'environ -2.0m an^{-1} , et le deuxième, légèrement au nord de la mer de Sibérie orientale, avec une valeur d'environ -1.0m an^{-1} . Dans le cas de la réanalyse NCEP, ce dernier maximum s'étend plus au nord sur une bonne partie de l'océan Arctique et a une valeur d'environ -1.5m an^{-1} . Les tendances négatives sont donc plus fortes et plus étendues dans la réanalyse NCEP. Une zone de tendances négatives est également observable sur le sud du Canada et l'est

de l'Atlantique Nord, près de la frontière du domaine, pour les deux réanalyses sans toutefois montrer de maximum apparent.

Les tendances positives des hauteurs du géopotential à 500 hPa s'étendent en deux régions. La première et la plus importante se retrouve sur le plateau de l'Anadyr et les Hauteurs de Kolyma, le détroit et la mer de Béring, le golfe de l'Alaska, l'Alaska, la mer de Beaufort, les Territoires du Nord-Ouest, l'archipel canadien, la baie de Baffin, le Groenland, l'Atlantique Nord, l'Islande, l'Angleterre et la mer du Nord. La deuxième région de tendances positives se situe sur les plaines de Sibérie occidentale et l'ouest du plateau de Sibérie centrale. La première région compte trois maximums : le premier au sud de la mer de Béring, le deuxième sur l'île de Baffin et le troisième au sud de l'Angleterre. La deuxième région compte seulement un seul maximum, situé sur le plateau de Sibérie centrale. Les valeurs de chacun sont respectivement d'environ 3.0m an^{-1} , 2.0m an^{-1} , 2.0m an^{-1} et 2.0m an^{-1} pour la réanalyse NCEP tandis qu'elles sont légèrement plus grandes dans le cas de la réanalyse ERA 40 avec des valeurs d'environ 3.0m an^{-1} , 2.5m an^{-1} , 2.0m an^{-1} et 2.5m an^{-1} .

Comparaison des configurations de GEM

La comparaison de la distribution géographique des tendances des hauteurs du géopotential à 500 hPa pour les différentes configurations du GEM présente aussi des différences importantes pour le printemps (MAM). Les configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par GEM-global possèdent par contre certaines similitudes, probablement dû au fait que la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global utilise les données du GEM-global comme conditions frontières pour le pilotage du modèle. La configuration GEM-global présente quatre zones de tendances négatives des hauteurs du géopotential à 500 hPa. La première, également présente dans la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, touche la région du Kamtchatka et de la mer d'Okhotsk et a une valeur maximale d'au moins -0.5m an^{-1} . La deuxième se trouve sur l'Atlantique Nord, juste à l'ouest de l'Angleterre, et possède une valeur maximale d'au moins -0.5m an^{-1} . La troisième est située sur l'archipel canadien, la mer de Beaufort, une partie de l'océan Arctique, les Territoires du Nord-Ouest et les prairies canadiennes avec un maximum d'environ -1.0m an^{-1} , centré sur l'ouest de l'archipel canadien et la mer de Beaufort (idem pour la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global). Dans la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, cette zone s'étend vers le sud en direction du Groenland, de l'Islande pour rejoindre la zone de tendances négatives située sur l'Atlantique Nord. La dernière zone touche la Russie à l'ouest de l'Oural, le nord des plaines de Sibérie occidentale, l'est des plaines de Sibérie septentrionale, le sud de la

mer de Barents et la mer de Kara. Elle possède un maximum négatif d'environ -1.5m an^{-1} centré sur la région montagneuse de l'Oural. Pour la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, cette zone apparaît légèrement moins étendue de sorte qu'elle ne touche plus la mer de Barents et la mer de Kara. Le maximum, de même intensité, est situé un peu plus au sud.

Dans la configuration GEM-global, les zones de tendances positives apparaissent plus continues et légèrement plus fortes que dans la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global. Celles-ci touchent les pays scandinaves, le nord de la mer de Barents, la mer de Norvège, la mer du Groenland, l'Islande, le Groenland, le détroit de Davis, la baie et le sud de l'île de Baffin, le nord du Québec, la baie d'Hudson, les archipels de Svalbard et François-Joseph, une partie de l'océan Arctique, la mer des Laptev, la mer de Sibérie orientale, le sud des plaines de Sibérie occidentale, le plateau de Sibérie centrale, l'est de la Sibérie, le détroit et la mer de Béring, le sud de l'Alaska, la Colombie-Britannique et le golfe de l'Alaska. Dans la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, les zones de tendances positives sont plus petites et restreintes au sud de l'île de Baffin, au détroit de Davis, au nord du Québec, au pays scandinaves, à la mer de Norvège, aux archipels de Svalbard et François-Joseph, à la Nouvelle Zemble, à l'est de la Sibérie, à la mer de Sibérie occidentale, au détroit et à la mer de Béring, au sud de l'Alaska et au golfe de l'Alaska. La configuration GEM-global possède

un maximum positif sur la mer du Groenland d'environ 2.5m an^{-1} ainsi que trois autres maximums plus faibles d'environ 1.0m an^{-1} sur le nord du Québec, le détroit de Davis et au sud du plateau de Sibérie centrale. La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montre quant à elle un maximum d'environ 1.0m an^{-1} sur la mer de Sibérie orientale et au sud des pays scandinaves.

La configuration GEM-VAR est celle avec les plus fortes tendances négatives des hauteurs du géopotential à 500 hPa. Cette zone de tendances négatives s'étend du plateau de Sibérie centrale à l'Atlantique Nord en passant par la mer des Laptev, la mer de Sibérie orientale, la mer des Tchouktches, la mer de Beaufort, le nord de l'Alaska, l'océan Arctique, les archipels de Svalbard et François-Joseph, la mer de Norvège, la mer du Groenland, l'Islande, le Groenland, l'archipel canadien, les Territoires du Nord-Ouest, le nord du Québec, l'île et la baie de Baffin et le détroit de Davis. Le premier des deux maximums négatifs se trouve entre le plateau de Sibérie centrale et la région des monts de Verkhoïansk et a une valeur d'environ -1.0m an^{-1} . Le deuxième se trouve sur le sud de l'île de Baffin et a une valeur d'environ -4.5m an^{-1} . Les zones de tendances positives des hauteurs du géopotential 500 hPa touchent, quant à elles, la mer de Béring, le sud de l'Alaska et la Colombie-Britannique ainsi que l'Europe de l'Est, le sud des pays scandinaves, la Russie à l'ouest de l'Oural la mer de Barents et la mer de Kara. Ces deux régions ont des valeurs maximales d'au moins 1.5m an^{-1} et 1.0m an^{-1} .

La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est également fort différente des autres configurations. Elle présente une mince bande de tendances négatives des hauteurs du géopotential à 500 hPa s'étendant vers le nord entre le plateau de Sibérie centrale et les monts de Verkhoïansk puis vers l'est en direction de la mer de Beaufort. Elle montre aussi deux autres zones de tendances négatives. Une petite sur la baie d'Hudson et une plus importante sur l'Europe de l'Est, l'est des pays scandinaves et la Russie à l'ouest de l'Oural. Ces trois régions ont des valeurs maximales d'environ -0.5 m an^{-1} , -0.5 m an^{-1} et -1.5 m an^{-1} respectivement. Tout le reste du domaine est représenté par des tendances positives avec des maximums au sud de la mer de Béring, sur l'Atlantique Nord et entre les archipels de Svalbard et François-Joseph et la Nouvelle Zemble d'environ 2.5 m an^{-1} , 3.5 m an^{-1} et 3.5 m an^{-1} respectivement.

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison des différentes configurations du GEM avec les réanalyses ERA 40 et NCEP pour le printemps (MAM) permet de constater que le modèle, peu importe la configuration, n'arrive pas à simuler dans l'ensemble la distribution géographique des différents patrons de tendances des hauteurs du géopotential à 500 hPa, en particulier pour les tendances négatives. Il en va également de même pour la position des maximums de tendances. Par contre l'intensité des maximums et des minimums apparaît relativement similaire, à l'exception des très fortes tendances négatives de la configuration GEM–VAR sur le sud du Groenland et l'est de l'archipel canadien. Toutes les configurations représentent aussi de manière acceptable les tendances positives sur la mer de Béring ainsi que sur les plaines de Sibérie occidentale. De plus, la configuration GEM–VAR représente relativement bien la zone de tendances négatives des hauteurs du géopotential à 500 hPa sur la région montagneuse de la Sibérie et de l'océan Arctique. Pour terminer, la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40 est la seule à montrer une zone de tendances positives sur l'archipel canadien. Elle est cependant incapable d'y représenter le maximum prévu par les réanalyses d'environ 2.0m an^{-1} .

Été

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

Pour l'été (JJA), la comparaison des tendances des hauteurs du géopotential à 500 hPa montre des différences plus importantes que pour les autres saisons. En effet, avec la réanalyse ERA 40, deux zones de tendances négatives sont présentes et séparées par une zone de tendances positives tandis qu'avec la réanalyse NCEP, ces deux régions sont reliées. Pour la réanalyse ERA 40, la première région est située sur l'Islande et l'Atlantique Nord et la deuxième sur les plaines de Sibérie occidentale et septentrionale, l'archipel de François-Joseph, la mer de Kara, la Nouvelle Zemble et vers l'est, entre la mer de Sibérie orientale et l'océan Arctique, jusqu'à l'Alaska. Avec la réanalyse NCEP par contre, la tendance négative touche aussi à tout l'océan Arctique, la mer de Beaufort, la mer des Tchouktches, la mer de Sibérie orientale, l'archipel de Svalbard, la mer de Barents, la mer de Norvège, la mer du Groenland et le nord du Groenland.

Pour les tendances positives de GZ À 500 HPA, la réanalyse de NCEP montre clairement trois zones : la première (similaire pour la réanalyse ERA 40) est située sur le plateau de Sibérie centrale ainsi que sur la région montagneuse de l'est de la Sibérie, le Kamtchatka, la mer et le Détroit de Béring et l'ouest de l'Alaska; la deuxième se trouve sur l'est des Territoires du Nord-Ouest, la baie d'Hudson, la baie de Baffin et le sud de l'archipel canadien; la troisième région touche les pays scandinaves, l'Europe de l'Est et l'ouest de la Russie.

Avec la réanalyse ERA 40, par contre, ces deux dernières régions de tendances positives sont reliées. Elles comprennent en plus, l'océan Arctique, entre le pôle Nord et le Groenland, la majeure partie du Groenland, la mer de Beaufort, la mer du Groenland, l'Islande et la mer de Norvège.

Deux maximums de tendances négatives sont présents avec la réanalyse ERA 40. Le premier se trouve sur l'Atlantique Nord et la seconde sur la partie ouest des plaines de Sibérie septentrionale. Les deux maximums négatifs ont une valeur d'environ -1.5m an^{-1} . Dans la réanalyse NCEP, le maximum négatif sur l'ouest des plaines de Sibérie septentrional est plus prononcé avec une valeur d'environ -2.0m an^{-1} . Il y a de plus un troisième maximum sur l'océan Arctique, juste au nord de la mer de Sibérie orientale, avec une valeur également d'environ -1.5m an^{-1} . Pour les maximums de tendances positives, les deux réanalyses s'entendent généralement bien sur l'emplacement de ces maximums. Pour la réanalyse NCEP, le premier est situé au sud du plateau de Sibérie centrale, avec une valeur d'environ 2.0m an^{-1} . Le deuxième se trouve sur l'extrême est des Territoire du Nord-Ouest, avec une valeur d'environ 3.0m an^{-1} , et le dernier, sur l'ouest de la Russie avec une valeur d'environ 2.0m an^{-1} . Les valeurs des maximums sont respectivement d'environ 2.5m an^{-1} , 3.0m an^{-1} et 2.0m an^{-1} dans le cas ERA 40. Ici encore, les tendances positives sont plus fortes et plus étendues dans la réanalyse ERA 40 alors que les tendances négatives sont plus fortes et étendues dans la réanalyse NCEP.

Comparaison des configurations de GEM

La comparaison de la distribution géographique des tendances des hauteurs du géopotential à 500 hPa pour les différentes configurations du GEM présente pour l'été (JJA), tout comme les autres saisons, des différences importantes. Les configurations GEM-global et GEM-LAM pilotée par GEM-global possèdent par contre certaines similitudes. La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global présente une zone de faibles tendances négatives sur l'Europe de l'Est et une autre, plus importante, sur le plateau de Sibérie centrale, la région montagneuse de l'est de la Sibérie, l'est de la mer des Laptev, la mer de Sibérie orientale, le détroit de Béring, le nord de l'Alaska, la mer de Tchouktches, la mer de Beaufort et la majeure partie de l'océan Arctique. Les valeurs des maximums négatifs sont d'environ -0.5m an^{-1} et -1.0m an^{-1} (environ -1.5m an^{-1} pour GEM-global; situé sur la mer de Sibérie orientale) respectivement. La configuration GEM-global présente de plus une zone contigüe de tendances négatives sur l'archipel canadien, la baie de Baffin, le détroit de Davis, le Groenland et la mer du Groenland avec une valeur de maximum négatif d'environ -1.0m an^{-1} située sur le sud du Groenland et le détroit de Davis.

La configuration GEM-global montre des maximums de tendances positives des hauteurs du géopotential à 500 hPa tout le long de la frontière du domaine. Cependant elle présente une zone positive sur la Russie à l'ouest de l'Oural et sur les plaines de Sibérie occidentale s'étendant jusqu'en

bordure du Groenland. Cette région possède un maximum d'environ 2.0m an^{-1} situé en Nouvelle Zemble. La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montre par contre une absence de tendances positives le long de la frontière du domaine entre l'Europe et le Québec. Par contre, elle montre deux maximums positifs (non représentés par la configuration GEM-global). Le premier est situé sur la mer du Groenland et le second, juste au sud de l'archipel canadien. Ces maximums ont une valeur respective d'environ 3.5m an^{-1} et 2.0m an^{-1} .

La configuration GEM-VAR présente trois zones de tendances négatives des hauteurs du géopotential à 500 hPa. La première est située au sud du Groenland, la deuxième sur le plateau de Sibérie centrale et la dernière, la plus étendue, sur l'Alaska, le Yukon et l'ouest des Territoires du Nord-Ouest. Elles ont respectivement des valeurs maximales d'environ -1.0m an^{-1} , -0.5m an^{-1} et -0.5m an^{-1} . Les tendances positives se trouvent sur les pays scandinaves, l'Islande, la mer de Norvège, la mer du Groenland, le Groenland, la baie de Baffin, la baie d'Hudson, l'archipel canadien, les archipel de Svalbard et François Joseph, la mer de Kara, la mer des Laptev, l'océan Arctique, la mer de Sibérie orientale, les régions montagneuses de l'est de la Sibérie, le Kamtchatka et l'est de la mer de Béring avec un fort maximum d'environ 4.0m an^{-1} sur l'océan Arctique.

Dans la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, les zones de tendances positives des hauteurs du géopotential à 500 hPa occupent trois régions. La première se situe sur l'Europe de l'Est. La deuxième occupe l'archipel canadien, la baie de Baffin, le détroit de Davis, le nord du Québec, la baie d'Hudson et l'est des Territoires du Nord-Ouest tandis que la dernière se situe sur l'ouest de l'Alaska, la mer des Tchouktches, le détroit et la mer de Béring, la mer de Sibérie orientale, la mer des Laptev et toute la Sibérie jusqu'aux plaines de Sibérie. La première région a une valeur maximale $> 2.0 \text{ m an}^{-1}$, la troisième d'environ 2.0 m an^{-1} (juste au sud de l'île de Baffin). La deuxième zone possède deux maximums. Le premier, d'environ 2.0 m an^{-1} se trouve à l'est du Kamtchatka tandis que le second, situé au sud du plateau de Sibérie centrale, a une valeur d'environ 2.0 m an^{-1} . Les tendances négatives occupent les régions de l'est de l'Alaska, le Yukon, la mer de Beaufort, la majeure partie de l'océan Arctique, le Groenland, l'Islande, la mer du Groenland, la mer de Norvège, les pays scandinaves, la Russie à l'ouest de l'Oural, la mer de Barents, la mer de Kara, les archipel de Svalbard et François-Joseph, la Nouvelle Zemble et l'ouest de plaines de Sibérie occidentale. Le maximum principal de tendances négatives se trouve entre le pôle et les archipels de Svalbard et François-Joseph et les deux maximums secondaires sur le sud de l'Alaska et l'ouest des plaines de Sibérie occidentale. Leur valeur respective est d'environ -1.0 m an^{-1} , -1.0 m an^{-1} et de -2.5 m an^{-1} .

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison des différentes configurations du GEM avec les réanalyses ERA 40 et NCEP pour l'été (JJA) permet de constater que le modèle, peu importe la configuration, éprouve de la difficulté à simuler la distribution géographique des différents patrons de tendances des hauteurs du géopotential à 500 hPa. La seule configuration qui présente un patron quelque peu similaire est la distribution GEM–LAM pilotée par ERA 40. Celle-ci montre une zone de tendances négatives qui traverse l'océan Arctique depuis l'Alaska jusqu'aux pays scandinaves avant de bifurquer vers le sud du côté de l'ouest de la Russie et du côté du Groenland et de l'Atlantique Nord. Par contre, elle positionne le maximum de tendances des hauteurs du géopotential à 500 hPa pratiquement sur le pôle alors que les réanalyses positionnent le maximum sur l'est des plaines de Sibérie septentrionale. Les configurations GEM–global et GEM–LAM pilotée par GEM–global montrent aussi les mêmes tendances négatives au dessus de l'océan Arctique (au nord de la mer de Sibérie orientale et de la mer de Beaufort) que les réanalyses. Elles ne représentent pas cependant les tendances négatives sur la mer de Barents et la mer de Kara. Toutes les configurations, à l'exception de la configuration GEM–global sont en mesure de simuler les tendances positives et le maximum sur l'archipel canadien et la moitié est du Canada. Pour terminer, l'ensemble des configurations simule avec succès les tendances positives sur la mer de Béring.

2.3.1.2 Tendances des moyennes annuelles des hauteurs du géopotential à 500 hPa

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

La comparaison des tendances des moyennes annuelles des hauteurs du géopotential à 500 hPa pour les réanalyses NCEP et ERA 40 présente quelques différences au niveau de la distribution géographique et de l'intensité des tendances. Pour la réanalyse NCEP, les tendances positives apparaissent plus étendues et légèrement plus fortes tandis que pour la réanalyse ERA 40, ce sont les tendances négatives qui apparaissent plus étendues et légèrement plus fortes.

Pour la réanalyse NCEP, les tendances négatives touchent le golfe de l'Alaska, la Colombie-Britannique, le Yukon, l'Alaska, le détroit de Béring, la mer de Tchouktches et la mer de Sibérie orientale ainsi que la région au sud de l'ouest de la Russie. Pour la réanalyse ERA 40, celles-ci touchent également l'océan Arctique, la mer des Laptev, la mer de Kara, les plaines de Sibérie occidentale et septentrionale, la mer de Beaufort, le nord du Groenland et la région entre les pays scandinaves et l'archipel de Svalbard. Toujours dans la réanalyse ERA 40, les tendances positives sont situées sur les Territoires du Nord-Ouest, la baie d'Hudson, le nord du Québec, le sud de l'archipel canadien, le détroit de Davis, le sud du Groenland, l'Atlantique Nord, l'Islande, sur les régions au sud des pays scandinaves et sur les

régions au sud du plateau de Sibérie centrale et de la région montagneuse de l'est de la Sibérie. Dans la réanalyse NCEP, la zone de tendances positives s'étend aussi au sud de la mer de Béring, à tout le Groenland et l'archipel canadien, la mer du Groenland et les archipels de Svalbard et François-Joseph.

L'intensité des maximums de tendances des hauteurs du géopotential à 500 hPa est généralement plus faible que pour les moyennes saisonnières. Les deux réanalyses, NCEP et ERA 40, présentent un maximum de tendances positives sur l'extrême est des Territoires du Nord-Ouest d'environ 1.5m an^{-1} et 1.0m an^{-1} respectivement. Elles montrent de plus deux maximums de tendances négatives. Le premier, d'environ -1.0m an^{-1} , est situé sur le golfe de l'Alaska tandis que le deuxième, également d'environ -1.0m an^{-1} (-1.5m an^{-1} pour la réanalyse ERA 40), se trouve juste au nord de la mer de Sibérie orientale, près de la mer de Tchouktches.

Comparaison des configurations de GEM

La comparaison des tendances des moyennes annuelles des hauteurs du géopotential à 500 hPa des configurations de GEM permet de déceler des différences importantes.

La configuration GEM-VAR montre une zone de tendances positives sur la mer et le détroit de Béring, le Kamtchatka, la région montagneuse de l'est de la Sibérie, l'ouest de l'Alaska, la mer des Tchouktches, la mer de Sibérie orientale et la région de l'océan Arctique au nord de celle-ci qui va jusqu'au pôle ainsi qu'une autre sur les pays scandinaves, l'Europe de l'Est et l'ouest de la Russie. Les maximums, situés au sud-est des pays scandinaves au nord de la mer de Sibérie orientale et au sud de la mer de Béring ont tous une valeur d'environ 1.5 m an^{-1} . Les tendances négatives se trouvent sur les Territoires du Nord-Ouest, la baie d'Hudson, l'île et la baie de Baffin, le détroit de Davis, le sud du Groenland, l'Islande et l'Atlantique Nord. Une autre zone de tendances négatives est également présente sur le plateau de Sibérie centrale, l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale, la mer de Kara, la Nouvelle Zemble et les archipels de Svalbard et François-Joseph.

La configuration GEM-global est relativement différente de la configuration GEM-VAR. Elle montre une zone de tendances négatives plus ou moins centrée sur l'océan Arctique. Cette zone touche entre autre l'archipel canadien, la baie de Baffin, la mer de Beaufort, le Yukon, l'Alaska, le détroit

de Béring, la région montagneuse de l'est de la Sibérie, le plateau de Sibérie centrale, les plaines de Sibérie septentrionale, l'océan Arctique et l'ouest du Groenland en plus d'une région au sud-ouest de la Russie. Le maximum négatif, centré sur la mer de Beaufort, a une valeur d'environ -1.0m an^{-1} . Les tendances positives, qui touchent tout le reste du domaine, ont trois maximums apparents. Le premier est situé sur les pays scandinaves, la mer de Norvège, la mer du Groenland, l'Islande, le nord de la mer de Barents et l'archipel de Svalbard, le deuxième au sud de la baie d'Hudson et le dernier au sud de la mer de Béring. Ces trois maximums ont tous une valeur d'environ 1.0m an^{-1} .

La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global est également différente des deux premières. Elle présente une faible zone de tendances négatives sur les plaines de Sibérie occidentale et septentrionale, la mer des Laptev et le plateau de Sibérie centrale. Les tendances positives sont présentes sur la mer de Béring, le sud de l'Alaska, le golfe de l'Alaska et toute la région comprise entre les Territoires du Nord-Ouest, les pays scandinave et la Nouvelle Zemble. Le maximum de tendances positives, centré sur le détroit de Davis, la baie et l'île de Baffin, a une valeur d'environ 3.5m an^{-1} .

Pour terminer, la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est pratiquement à l'opposé de la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global. Celle-ci montre une zone de tendances positives sur l'est des

Territoires du Nord-Ouest et de la baie d'Hudson, une autre sur le sud de la mer de Béring, le Kamtchatka, le sud de la région montagneuse de l'est de la Sibérie, le plateau de Sibérie centrale, les plaines de Sibérie occidentale, l'ouest des plaines de Sibérie septentrionale, la mer de Kara et la mer de Barents et une dernière zone sur l'Angleterre (près des frontières du domaine). Les tendances négatives touchent tout le reste du domaine. Elles ont de plus un maximum négatif d'environ -2.5m an^{-1} centré entre le pôle et la mer de Beaufort.

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison des tendances des moyennes annuelles des hauteurs du géopotential à 500 hPa des configurations de GEM avec les réanalyses ERA 40 et NCEP permet d'identifier des différences relativement importantes. Les configurations GEM–VAR et GEM–LAM pilotée par ERA 40 montrent des tendances négatives sur l'est du Canada, le Groenland, l'Atlantique Nord et l'Europe de l'Est alors que les réanalyses présentent des tendances positives des hauteurs du géopotential à 500 hPa. Par contre, la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40 montre des tendances positives sur le centre du Canada ainsi qu'au sud du plateau de Sibérie centrale et de la mer de Béring tout comme les réanalyses. De plus, les tendances négatives sur l'Alaska, le détroit de Béring, les plaines de Sibérie septentrionale et la majeure partie de l'océan arctique coïncident assez bien avec celles de la réanalyse NCEP. Dans la configuration GEM–VAR, les tendances sont plutôt positives sur l'océan Arctique, l'Alaska, le détroit et la mer de Béring ainsi que sur l'est de la Russie. Les tendances sont également inversées sur l'ouest de la Russie et devraient plutôt être négatives.

Pour la configuration GEM–global, les tendances négatives sont plus ou moins les mêmes que les réanalyses (sur l'océan Arctique, l'Alaska, l'est de la Russie et le long des plaines de Sibérie septentrionale). Par contre, les tendances positives sont légèrement trop fortes sur la mer de Norvège, la

mer du Groenland et la mer de Barents si elles sont comparées à la réanalyse ERA 40 et de signe inverse si comparées à la réanalyse NCEP.

Pour terminer, la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global présente des tendances des hauteurs du géopotential à 500 hPa relativement semblables à la réanalyse ERA 40. Néanmoins, l'intensité du maximum, situé sur l'île de Baffin (d'environ 3.5m an^{-1}), est trop forte comparée aux réanalyses (environ 2.0m an^{-1}). Le maximum négatif de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, situé sur l'océan Arctique (d'environ -2.5m an^{-1}), est également trop fort comparé aux réanalyses (environ -1.5m an^{-1}).

2.3.2 Variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa

2.3.2.1 Variances des moyennes saisonnières des hauteurs du géopotential à 500 hPa

Automne

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

La comparaison des variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa pour l'automne (SON) entre les réanalyses de NCEP et ERA 40 montre peu de différences du point de vue de la distribution géographique des variances. Pour les deux réanalyses, il est possible d'identifier trois zones de minimum de variances des hauteurs du géopotential. La première, est située sur le nord du Groenland, la deuxième, sur l'ouest des pays scandinaves et la dernière sur les plaines de Sibérie septentrionale. La variance est également plus faible sur l'est de la Russie, le Kamchatka, la mer de Béring ainsi que sur l'Alaska et le centre du Canada. Il y a deux maximums secondaires de variance. Le premier est situé sur l'île de Baffin et le deuxième, au sud de l'Islande. Ils ont une valeur respective d'environ 2500m² et 2000m². Le maximum de variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa le plus important se situe sur la mer de Barents, la Nouvelle Zemble, l'ouest de la mer de Kara, l'archipel de François-Joseph et la région juste au nord de celle-ci en direction du pôle. La valeur de ce maximum est d'environ 3000m².

Comparaison des configurations de GEM

La comparaison pour l'automne (SON) des différentes configurations de GEM montre un certain nombre de différences du point de vue de la distribution géographique des variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa. Les configurations globales, GEM-global et GEM-VAR, montrent de plus faibles valeurs de variances comparées aux configurations à aire limitée, GEM-LAM pilotée par ERA 40 et GEM-LAM pilotée par GEM-global. La configuration GEM-VAR montre une zone de faibles variances sur l'Islande et l'Atlantique Nord, le centre de la Russie (les plaines de Sibérie occidentale, l'est des plaines de Sibérie septentrionale et le Plateau de Sibérie centrale) ainsi que sur le nord du Canada (Territoires du Nord-Ouest et Québec) et de l'Alaska. Les maximums, au compte de deux, se trouvent sur l'océan Arctique (coté Amérique) et sur la Russie à l'ouest de l'Oural. Ils ont des valeurs respectives d'environ 2000m² et 2500m². Pour la configuration GEM-global, des maximums de variances sont également présent sur la Russie à l'ouest de l'Oural ainsi que sur l'océan Arctique (coté Russie par contre). Leur valeur est d'environ 2500m². De plus, au lieu de retrouver une zone de variances plus faibles sur le nord du Canada et l'Atlantique Nord comme c'est le cas pour la configuration GEM-VAR, la configuration GEM-global simule un maximum d'environ 3000m² sur le Yukon et d'au moins 2000m² sur l'Atlantique Nord. Les zones de faibles variances se retrouvent ainsi sur la baie d'Hudson, le nord du Québec, le détroit de Davis, le Groenland, la mer du Groenland, l'Islande, les archipels de Svalbard et François-Joseph ainsi que sur le centre

de la Russie. Cette dernière région s'étend par contre plus à l'est avec à la configuration GEM-VAR. Elle touche ainsi à tout l'est de la Sibérie et au détroit de Béring en plus des autres régions mentionnées précédemment.

Les deux configurations LAM présentent également ce minimum de variances sur toute la Russie à l'est de l'Oural jusqu'au détroit de Béring. Par contre, le maximum de variances est relativement plus élevé et étendu que pour les configurations globales. La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global à notamment le maximum le plus étendu et le plus fort avec une valeur d'environ 6000m² et centré sur l'archipel de Svalbard. La région, avec des valeurs > 3000m², s'étend sur les Territoires du Nord-Ouest, le Yukon, la mer de Beaufort, l'océan Arctique, l'archipel canadien, la baie de Baffin, le détroit de Davis, le Groenland, l'Islande, la mer de Norvège et du Groenland, les archipels de Svalbard et François-Joseph ainsi que sur le nord de la mer de Barents. Pour la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, la zone de maximum de variances est moins forte et moins étendue. Elle possède en fait deux maximums. Le premier, d'environ 4500m², se trouve entre l'archipel de François-Joseph et la Terre du Nord tandis que le deuxième, d'environ 4000m², se trouve sur la baie de Baffin. En fait, la zone de maximum (avec des valeurs > 3000m²) s'étend sur le Yukon, la mer de Beaufort, le nord de l'archipel Canadien, la baie de Baffin, l'ouest du Groenland, l'océan Arctique, les archipels de Svalbard et François-Joseph et la Terre du Nord.

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison des variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa entre les réanalyses et les différentes configurations de GEM permet de déterminer que les configurations globales (GEM–VAR et GEM–global) sont celles qui s’approchent le plus des réanalyses en terme d’intensité et de distribution géographique de variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa. Les deux configurations montrent une zone de faibles variances sur la Russie tout comme les réanalyses. La configuration GEM–global est cependant la seule à représenter le minimum de variances sur le Groenland et l’ouest des pays scandinaves. Par contre, elle simule à tort de faibles valeurs de variances des hauteurs du géopotential à 500 mb sur le sud de l’île de Baffin, le nord du Québec et la baie d’Hudson. La configuration GEM–VAR reproduit mieux le minimum de variance sur l’Alaska et le nord du Canada que la configuration GEM–global, qui simule plutôt un maximum de variances sur les Territoires du Nord–Ouest. Par contre, elle génère une zone de faibles variances au sud de l’Islande. Celle–ci devrait être en fait plus importante si elle est comparée aux réanalyses. Pour terminer, les deux configurations s’entendent plus ou moins bien avec le maximum de variances situé sur le centre de l’océan Arctique. En fait, la configuration GEM–VAR le place du côté canadien tandis que la configuration GEM–global le place plutôt du côté de la Russie. Pour ce qui est du maximum de variances sur la mer de Barents, les configurations GEM–VAR et GEM–global le placent légèrement plus au sud, soit sur l’ouest de la Russie.

Les deux configurations LAM s'entendent aussi sur la zone de plus faibles variances située sur le centre de la Russie (en étendue et en intensité). Par contre, les minimums sur le nord du Canada, le Groenland et l'ouest des pays scandinaves sont totalement absents. Ceux-ci s'entendent aussi plus ou moins bien avec le maximum sur l'océan Arctique et sur la mer de Barents. Ce dernier est légèrement trop à l'ouest dans le cas de la configuration GEM-LAM pilotée par GEM et trop à l'est, dans le cas la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40. De plus, leur intensité est de beaucoup supérieure aux valeurs des réanalyses. Pour terminer, la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 semble montrer un maximum de variances entre l'île de Baffin et le Groenland. Celui-ci est par contre situé du côté ouest de l'île dans les réanalyses.

Hiver

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

Encore une fois, la comparaison des variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa pour l'hiver (DJF) entre les réanalyses de NCEP et ERA 40 montre peu de différences du point de vue de la distribution géographique des variances. Les régions de l'est de la Russie, de l'Alaska, du Canada et de l'Europe de l'Est sont celles avec le moins de variance tandis que les régions maritimes sont majoritairement celles avec les plus fortes variances. Il y a une zone de fortes variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa sur la région au nord de l'Angleterre, l'Islande, le sud du Groenland, la mer de Norvège, la mer du Groenland, les archipels de Svalbard et François-Joseph, l'est de la mer de Kara, la mer des Laptev, la partie est des plaines de Sibérie septentrionale et s'étendant vers le sud ouest en direction des plaines de Sibérie occidentale. Dans cette région de plus fortes variances, il y a deux zones de maximum. La première, d'environ 4500m², est située sur le sud du Groenland et la deuxième, d'environ 4000m² (environ 3500m² pour la réanalyse NCEP), se trouve juste au nord de la mer des Laptev. Pour terminer, les deux réanalyses présentent un maximum de variances (> 3000m²) au sud de la mer de Béring et du golfe de l'Alaska.

Comparaison des configurations de GEM

Encore une fois, la comparaison des variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa pour l'hiver (DJF) entre les différentes configurations montre un certain nombre de différences du point de vue de la distribution géographique des variances. Les configurations globales, GEM-global et GEM-VAR, montrent de plus faibles variances comparées aux configurations à aire limitée, GEM-LAM pilotée par ERA 40 et GEM-LAM pilotée par GEM-global. La configuration GEM-VAR montre une zone de faibles variances sur le plateau de Sibérie centrale ainsi que sur le nord-est canadien. Elle présente aussi trois zones de maximum de variances. La première, avec une valeur d'environ 2500m², se trouve sur l'Angleterre et la deuxième, de valeur semblable, sur la partie est des plaines de Sibérie septentrionale. La dernière, la plus étendue et la plus forte des trois (valeur > 3000m²) s'étend vers le sud depuis l'Alaska, l'est de la mer de Béring et le golfe de l'Alaska.

La distribution géographique des maximums de variances de la configuration GEM-global est relativement différente de celle de GEM-VAR. Les valeurs des maximums sont également plus élevées. Celle-ci présente, tout comme la configuration GEM-VAR, un maximum sur le golfe de l'Alaska, l'Angleterre ainsi que sur l'est des plaines de Sibérie septentrionale. Par contre, le premier ne s'étend pas sur l'Alaska et la mer de Béring comme c'est le cas avec la configuration GEM-VAR. De plus, le dernier maximum affecte aussi l'est des pays scandinaves et la mer de Norvège, ce qui n'est

pas le cas avec la configuration GEM-VAR. Il a une valeur d'environ 4500m^2 . Contrairement à la configuration GEM-VAR, la configuration GEM-global simule également deux autres maximums de variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa. Le premier, d'une valeur d'environ 4500m^2 , est situé entre la mer des Laptev et le pôle. Le deuxième, d'une valeur d'environ 3500m^2 , se trouve sur le sud de l'île de Baffin. Pour terminer, la configuration GEM-global présente une zone de faibles variances sur pratiquement toute la Russie, la Sibérie (à l'exception des plaines de Sibérie septentrionale) et le détroit de Béring. Elle montre aussi une zone de plus faibles variances sur la partie ouest de l'archipel canadien et s'étendant vers le sud en direction du centre des Territoires du Nord-Ouest.

À première vue, la distribution géographique des variances des configurations LAM est relativement semblable. Il y a cependant quelques petites différences. Les deux configurations montrent une zone de plus faibles variances sur le sud-ouest canadien, l'Europe de l'Est, les pays scandinaves (et plus particulièrement juste au nord de l'Angleterre dans le cas de la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global) ainsi que sur la majeure partie de la Russie, à l'est de l'Oural, de la Sibérie, du détroit et de la mer de Béring. La zone de plus fortes variances (valeur $> 3000\text{m}^2$) touche toutes les mers de Russie et de Sibérie ainsi que l'océan Arctique, le Groenland, la mer du Groenland, l'Islande, la mer de Beaufort et la majeure partie du Canada et de l'Alaska en plus de s'étendre vers le sud, en direction

du golfe de l'Alaska. Pour la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, cette zone de plus fortes variances s'étend aussi de manière plus prononcée vers le sud en direction de l'ouest de la Russie et de l'Europe de l'Est que la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40. De plus, alors que la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montre un seul maximum, de valeur $> 8000\text{m}^2$, au dessus de l'île de Baffin, de la baie de Baffin, du détroit de Davis et du Nord du Québec, la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 montre plutôt deux maximums, également $> 8000\text{m}^2$. Le premier, situé pratiquement sur la même région que la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, touche le sud de l'île de Baffin et du Groenland, le détroit de Davis, le nord du Québec et une partie de l'Atlantique Nord. Le deuxième affecte la majeure partie de l'océan Arctique, de la mer de Kara et de la mer des Laptev.

Comparaison réanalyses–configurations

Bien que les configurations GEM–VAR et GEM–global soient celles qui se rapprochent le plus des réanalyses en termes de l'intensité des variances des hauteurs du géopotential à 500 mb, la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40 apparaît comme étant celle qui reproduit le mieux la position des maximums de variances (sauf pour ce qui est du maximum sur l'est de l'Alaska et le Yukon qui apparaît plutôt comme une zone de faibles variances dans les réanalyses). En effet, les positions des maximums situés au sud de l'île de Baffin et du Groenland et au nord de la mer des Laptev dans la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40 correspondent pratiquement à ceux des réanalyses. Par contre, leur intensité est mal représentée. De plus, les zones de plus faibles variances situées sur l'Europe de l'Est, l'est de la Russie, le détroit et la mer de Béring sont très similaires aux réanalyses. Ces zones de minimums sont généralement bien représentées dans les autres configurations.

La configuration GEM–LAM pilotée par GEM–global positionne la zone de faibles variances de l'est des pays scandinaves et la zone de maximums de l'île de Baffin trop à l'ouest comparativement au même minimum et maximum des réanalyses. De plus, la zone de faibles variances située sur le centre du Canada est mal représentée et correspond plutôt à une zone de maximum de variances dans les réanalyses.

Pour la configuration GEM-global, le maximum situé juste au nord de la mer des Laptev correspond relativement bien en étendue et en intensité à celui des réanalyses. Par contre, elle positionne le maximum de l'île de Baffin trop à l'ouest. De plus, le maximum situé sur l'est des pays scandinaves ne correspond pas aux réanalyses qui montrent plutôt une zone de plus faibles variances à cet endroit.

Pour terminer, la distribution des maximums et des faibles variances de la configuration GEM-VAR est presque inversée par rapport aux réanalyses. Par exemple, alors que les réanalyses NCEP et ERA 40 montrent des maximums de variances sur le sud du Groenland et au nord de la mer des Laptev, la configuration GEM-VAR simule une zone de faibles variances. Enfin, le maximum situé sur le golfe de l'Alaska s'étend beaucoup trop vers le nord en comparaison des réanalyses.

Printemps

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

La comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP montre pour le printemps (MAM) qu'il y a deux maximums principaux et deux maximums secondaires de variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa. Le premier maximum principal se trouve au sud-ouest du Groenland, plus particulièrement sur le détroit de Davis, avec une valeur d'environ 3000m². Le deuxième, de valeur semblable, se trouve juste au sud de l'Alaska et de la mer de Béring. Les deux réanalyses génèrent aussi un maximum de variances sur les plaines de Sibérie occidentale et un autre sur l'océan Arctique, entre la mer des Laptev et le pôle Nord. Ces deux maximums secondaires ont des valeurs d'environ 2000m² et 2500m² respectivement. Pour terminer, les plus faibles valeurs de variances se retrouvent sur les continents alors que les plus fortes se situent au dessus de l'eau.

Comparaison des configurations de GEM

La comparaison des différentes configurations de GEM montre de manière générale que toutes les configurations s'entendent pour simuler de plus faibles valeurs de variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa au dessus des continents au printemps (MAM), à l'exception de la région du Groenland et de la partie nord-est du Canada. Par contre, les configurations éprouvent plus de difficulté pour situer les zones de maximum. La configuration GEM-VAR montre une immense zone de plus fortes variances s'étendant sur le golfe de l'Alaska, l'Alaska, la majeure partie de la mer de Beaufort et de l'océan Arctique, les archipels de Svalbard et François-Joseph, la mer du Groenland, l'Islande, le Groenland, l'Atlantique Nord, le détroit de Davis, la mer de Baffin, l'île de Baffin et le nord de la baie d'Hudson. Il y a ainsi trois maximums de variances, le premier est situé au sud-est du Groenland, avec une valeur d'environ 5500m^2 , le deuxième, près du pôle Nord, avec une valeur d'environ 6000m^2 , et le dernier, sur le sud de l'Alaska, avec une valeur d'environ 5000m^2 . De plus, la configuration GEM-VAR montre des zones de faibles variances sur le centre des Territoires du Nord-Ouest et sur la Russie à l'est de l'Oural (idem pour les autres configurations) et un maximum secondaire, beaucoup plus faible (d'environ 2500m^2), sur l'Europe de l'Est.

La configuration GEM-global montre des valeurs de variances plus faibles que la configuration GEM-VAR avec un maximum d'environ 4000m^2 , entre

l'Islande et le sud du Groenland et un maximum d'environ 2500 m² près du pôle Nord (juste au nord de la mer des Laptev). L'Alaska apparaît dans ce cas-ci, ainsi que pour le cas des configurations LAM, comme une zone de faibles variances. Les deux configurations LAM simulent quant à elles une zone de plus fortes variances (tout comme GEM-VAR) entre la Nouvelle Zemble et le pôle Nord. Cette zone, avec des valeurs > 3000m², apparaît légèrement plus étendue avec la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global alors qu'elle s'étend vers le sud entre le Groenland et l'île de Baffin. La valeur de ce maximum est d'environ 6000m², dans le cas de la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, et d'environ 5500m² pour la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40. Pour terminer, les configurations LAM s'entendent pour simuler un maximum de variance, d'environ 3500m², sur la baie d'Hudson et au sud de l'île de Baffin. Pour terminer, les configurations GEM-global, GEM-LAM pilotée par GEM-global et GEM-LAM pilotée par ERA 40 génèrent aussi un maximum d'intensité relativement similaire au sud de la mer de Béring et du golfe de l'Alaska.

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison des réanalyses avec les configurations de GEM permet aisément de voir que les différentes configurations de GEM génèrent des valeurs de variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa beaucoup trop grandes comparées aux réanalyses pour le printemps (MAM). Par contre, celles-ci s'entendent généralement bien sur la position et la valeur du maximum de variances situé au nord de la mer des Laptev. La configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40 le positionne par contre un peu trop à l'ouest. De plus, toutes les configurations, à l'exception de la configuration GEM–global surestiment la valeur de ce maximum. Le maximum situé au sud de l'île de Baffin est également bien représenté par les configurations GEM–LAM. Néanmoins, le maximum est situé trop à l'est dans le cas de la configuration GEM–global. Il est également beaucoup trop fort et étendu dans le cas de la configuration GEM–VAR. La configuration GEM–VAR positionne par contre relativement bien le maximum situé sur le sud de l'Alaska mais ici encore, l'intensité est trop forte comparée aux réanalyses. L'intensité est relativement bonne pour les autres configurations cependant, la zone de plus fortes variances est située un peu trop au sud. Enfin, seule la configuration GEM–VAR est en mesure de représenter la zone de faibles variances située sur le centre du Canada. Les configurations GEM–LAM et la configuration GEM–global la place un peu trop à l'ouest de sorte qu'elle touche l'Alaska, toute la chaîne montagneuse et le littoral Pacifique.

Été

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

Les comparaisons de deux réanalyses montrent plusieurs petits maximums de variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa sur diverses régions : au sud de l'archipel canadien, au sud de la mer de Béring, sur l'Atlantique Nord, sur les plaines de Sibérie occidentale, sur les archipels de Svalbard et François-Joseph et sur l'océan Arctique. Les trois premiers de ces maximums ont une valeur d'environ 1500 m² (environ 2000m² pour celui de l'Atlantique Nord dans le cas de la réanalyse ERA 40) et les trois derniers une valeur d'environ 2000m² (environ 2500m² pour les maximums des archipels de Svalbard et François-Joseph et de l'océan Arctique dans le cas de la réanalyse ERA 40). Les deux derniers maximums mentionnés ont la plus grande étendue sur le domaine d'étude. Pour terminer, les réanalyses présentent une zone de variances relativement nulles sur l'Alaska, l'ouest canadien, le nord du Québec et le sud des plaines de Sibérie occidentale. L'été est donc la saison avec les plus faibles variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa

Comparaison des configurations de GEM

La comparaison des variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa des différentes configurations de GEM montre une certaine uniformité pour ce qui est de l'intensité des maximums, à l'exception de la configuration GEM-VAR. Celle-ci simule un maximum de variances relativement important près du pôle d'environ 3500m² avec une extension plus faible vers le sud-est en direction de l'archipel canadien, de la baie de Baffin et du sud du Groenland. La configuration GEM-VAR montre également des zones de maximum sur l'Europe de l'Est et les plaines de Sibérie occidentale, entre les archipels de Svalbard et François-Joseph et au sud de la mer de Béring et du golfe de l'Alaska avec des valeurs respectives d'environ 2000m², 2000m² et 1500m². Les zones de faibles variances se trouvent quant à elles sur les plaines canadiennes, le plateau de Sibérie centrale, sur la mer de Norvège et la mer du Groenland.

La configuration GEM-global présente une zone de maximum de variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa le long du littoral de l'Europe, de la Russie et de l'Alaska ainsi qu'une zone beaucoup plus petite juste à l'est de l'île de Baffin. Celles-ci ont une valeur d'environ 1500m². Tout comme la configuration GEM-VAR, la configuration GEM-global montre des régions de faibles variances sur le centre du Canada, sur les mers de Norvège et du Groenland et au sud du plateau de Sibérie centrale. Par contre, cette dernière s'étend plus à l'est jusque sur le plateau de l'Anadyr et les Monts de

Verkhoïansk. De plus, la configuration GEM-global est la seule des configurations de GEM à générer un minimum de variances juste à l'est du Québec. Enfin, elle produit, tout comme la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, une zone de faibles variances juste au sud du détroit de Béring.

La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global génère trois maximums de variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa. Ceux-ci sont situés au nord de la mer de Beaufort et de la mer des Laptev, sur l'archipel de Svalbard et sur le sud de la baie d'Hudson. Ils ont des valeurs d'environ 2500m², 2000m² et 1500m². De plus, la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montre un maximum de variances plus important que les autres configurations au sud du golfe de l'Alaska avec une valeur > 2000 m². Pour terminer, la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montre une zone de faibles variances sur tout le sud de la Russie et de l'Europe. Par contre, contrairement au deux configurations précédentes, GEM-VAR et GEM-global, elle ne montre pas de minimum sur les plaines canadiennes et sur les mers de Norvège et du Groenland.

La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est celle qui présente la région la plus étendue de variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa. En d'autres mots, les régions de plus fortes variances sont majoritairement situées sur les zones maritimes alors que les zones continentales présentent

les variances les plus faibles (à l'exception du Groenland et de l'archipel canadien, de l'est de la Sibérie et des pays scandinaves). La configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 est ainsi la seule à produire une plus grande variance sur le détroit et la mer de Béring, la mer du Groenland et la mer de Norvège. Pour terminer, la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 présente une distribution plus uniforme des variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa, ce qui permet d'identifier facilement deux zones de maximums. La première, d'une valeur d'environ 2500m², est située juste au nord de la mer des Laptev et la seconde, d'environ 2000m², entre l'Angleterre et l'Islande.

Comparaison réanalyses–configurations

En général, les différentes configurations de GEM, de même que les réanalyses s'entendent pour montrer de faibles variances des hauteurs du géopotential à 500 hPa sur les zones continentales et de maximum de variances sur les zones maritimes pour l'été. Par contre, les zones de plus fortes variances sont relativement plus étendues pour les configurations de GEM que pour les réanalyses. La configuration GEM–global est probablement celle qui ressemble le plus aux réanalyses en termes d'étendues. Par contre, l'intensité est trop forte sur le nord de l'Europe et les pays scandinaves. De plus, les maximums près du pôle et des archipels de Svalbard et François-Joseph ne sont pas représentés. Les deux configurations GEM–LAM représentent mieux ces maximums. Pour la configuration GEM–VAR, l'intensité du maximum près du pôle est relativement trop forte comparée à la valeur des réanalyses. Pour terminer, les configurations GEM–VAR et GEM–global sont celles qui représentent le mieux les zones de minimums sur l'ouest du Canada et l'est du Québec. Par contre, aucune n'est en mesure d'étendre cette zone de faibles variances jusque sur l'Alaska et le détroit de Béring. Les configurations GEM–LAM sont les seules qui mettent un minimum de variances sur le détroit de Béring.

2.3.2.2 Variances des moyennes annuelles des hauteurs du géopotential à 500 hPa

Comparaison des réanalyses ERA 40 et NCEP

La comparaison des variances des moyennes annuelles des hauteurs du géopotential à 500 hPa pour les réanalyses NCEP et ERA 40 présente quelques faibles différences au niveau de l'étendue. Les plus fortes variances sont légèrement plus étendues avec la réanalyse ERA 40. En effet, la réanalyse NCEP présente trois zones distinctes de plus fortes variances. La première est située sur l'est de la Russie et est de dimension relativement semblable à celle de la réanalyse ERA 40. La deuxième et la troisième sont respectivement situées sur l'ouest de la mer de Kara, l'est de la mer des Laptev, l'archipel de François-Joseph et une partie de l'océan Arctique jusqu'au pôle nord ainsi que sur l'Islande, le sud du Groenland, l'Atlantique Nord, l'île et la baie de Baffin et le nord du Québec. Dans la réanalyse ERA 40, ces deux régions sont regroupées. Elles touchent de plus l'archipel de Svalbard, le nord du Groenland, la baie d'Hudson et l'archipel canadien.

Comme prévu, l'intensité des variances des moyennes annuelles des hauteurs du géopotential à 500 hPa pour les réanalyses NCEP et ERA 40 sont de plus faibles intensités que les moyennes saisonnières. Pour les deux réanalyses, les valeurs maximales ne dépassent pas 1000m^2 alors qu'elles apparaissent beaucoup plus fortes pour les moyennes saisonnières.

Comparaison des configurations de GEM

La comparaison des variances des moyennes annuelles des hauteurs du géopotential à 500 hPa des différentes configurations de GEM montrent certaines différences plus ou moins importantes au niveau de l'étendue et de l'intensité des variances. Les configurations GEM-LAM montrent en effet que les variances sont plus fortes et que celles-ci sont plus étendue que les configurations globales. Pour la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, le maximum, d'environ 2500m², est situé sur la baie de Baffin tandis que les variances relativement nulles se trouvent majoritairement sur l'Europe et l'Asie. De plus, les variances sont légèrement plus fortes sur l'Amérique du Nord. Pour la configuration GEM-LAM piloté par ERA 40 par contre, l'intensité est plus faible avec une valeur maximale d'environ 1500m². Cette région de maximum touche une plus grande étendue soit, la majeure partie de l'océan Arctique, le nord de l'archipel canadien, l'ouest du Groenland, l'île et la baie de Baffin, le détroit de Davis et le nord du Québec.

Pour la configuration GEM-VAR, les plus fortes variances se retrouvent principalement sur la zone maritime de l'océan Arctique, le nord du Pacifique, les différentes mers de Russie et de Sibérie ainsi que sur le sud du Groenland, l'Atlantique Nord, le détroit de Davis, le nord du Québec et l'île et la baie de Baffin. L'intensité maximale des variances est d'environ 1000m².

La configuration GEM-global présente les variances les plus fortes les moins étendues de toutes les configurations. Celles-ci touchent quatre zones principales : le nord du Québec, l'est de l'Alaska et la Côte-Ouest américaine, la région de la mer des Laptev ainsi que la région de la mer de Norvège, l'Islande, l'archipel de Svalbard, la mer de Barents et l'est des pays scandinaves. L'intensité de ces zones de maximums de variances est également d'environ 1000m².

Comparaison réanalyses–configurations

La comparaison des variances des moyennes annuelles des hauteurs du géopotential à 500 hPa des réanalyses NCEP et ERA 40 avec les différentes configurations de GEM montre que les configurations GEM–LAM présentent des maximums de variances légèrement trop forts et trop étendus en comparaison des réanalyses. Les configurations globales, GEM–VAR et GEM–global, sont par contre en meilleur accord.

En comparant les différentes régions de plus fortes variances, il est possible de constater que toutes les configurations sont en mesure de reproduire la zone de plus fortes variances située sur la mer de Kara, la mer des Laptev et l’océan Arctique ainsi que celle située sur l’est de la Russie. Toutes les configurations, sauf la configuration GEM–global, représentent également relativement bien la zone de plus fortes variances située sur le Groenland, l’île et la baie de Baffin, le nord du Québec et l’Atlantique Nord. Par contre, les configurations GEM–global et GEM–LAM pilotée par GEM–global montrent des variances légèrement trop fortes sur la mer de Norvège. De plus, toutes les configurations de GEM montrent des variances trop fortes sur la mer de Barents ainsi que sur l’Alaska et la Côte–Ouest américaine. Enfin, pour terminer, toutes les configurations sont en accord pour simuler des variances plus faibles sur l’Europe et la majeure partie de l’Asie. Ce qui est en accord avec les réanalyses NCEP et ERA 40.

CHAPITRE III

CHAPITRE III

ANALYSE ET DISCUSSION

Patrons atmosphériques, tendances et variabilité

La reconnaissance des différents patrons de variabilité est importante pour associer les changements observés à des mécanismes physiques particuliers. C'est pourquoi plusieurs recherches ont tenté d'identifier les causes et la nature de la variabilité du climat en Arctique via l'analyse de données atmosphériques, océaniques, hydrologiques, de glace de mer, etc. Or, l'analyse de la variabilité en Arctique est limitée environ aux cinquante dernières années (moment où la couverture spatiale est devenue suffisante). Néanmoins, avec l'augmentation graduelle de la période d'observation, des études récentes ont permis de démontrer que l'Arctique est particulièrement sensible aux changements climatiques.

En hiver, par exemple, les changements observés sont plus forts et apparaissent plus rapidement que partout ailleurs, du moins, ils deviennent perceptibles plus tôt comparativement aux autres saisons (Semenov et Bengtsson, 2003; Kelly et al., 1982). Dans la même idée, Polyakov et al. (2003) ont notamment démontré que la variabilité de SAT est particulièrement forte durant la saison froide et plus faible durant la saison

chaude. En effet, les réanalyses ERA 40 et NCEP, de même que les différentes configurations de GEM, montrent une plus forte variabilité de SAT (mais également de SLP et de GZ à 500 hPa) en hiver (DJF) qu'en été (JJA) (SAT, SLP et GZ : FIGURE V-#H vs FIGURE V-#E). Pour expliquer les plus faibles variances de SAT observées durant l'été, Kelly et al. (1982) suggèrent que les patrons atmosphériques responsables des variations de SAT sont moins bien organisés spatialement que durant les autres saisons. En fait, dépendamment du moment de l'année, différentes régions paraissent plus sensibles aux variations à longs et à courts termes. Selon plusieurs auteurs, la variabilité de la SAT et de la SLP est reliée à différents modes de circulation atmosphérique, en particulier la NAO, l'AO (Thompson et Wallace, 1998; Hurrell, 1996), la PNA et le patron de l'Ouest Pacifique (WP) (Semenov et Bengtsson, 2003), mais également à d'autres modes plus subtils tel l'oscillation de Barents (Skeie, 2000) ou le dipôle est Arctique/ouest Arctique (Wu, Wang et Walsh, 2006). Le fait que ces modes sont surtout actifs pendant l'hiver (Semenov et Bengtsson, 2003) permettrait donc d'expliquer les plus fortes variabilités observées durant cette saison²⁸. L'important est maintenant de voir si les configurations du modèle GEM sont en mesure de reproduire ces différents modes, en particulier durant l'hiver (puisque'il s'agit du moment où ils sont le plus actifs).

²⁸Par exemple, Semenov et Bengtsson (2003) associent les fortes variances de SAT observées durant l'hiver au dessus du nord de l'Europe et de l'Asie à la variabilité de la NAO.

La dépression des Aléoutienne et le patron Pacifique – Nord Amérique

Premièrement, analysons le côté ouest de l'Arctique ainsi que le nord du Pacifique. La comparaison des anomalies/tendances de SAT et SLP observées suggère une certaine corrélation spatiale sur ces régions (Overland et al., 2004). Trendberth et Hurrell (1994) notent par exemple que les anomalies négatives de tendance de SAT sur le nord du Pacifique, l'est de la Sibérie, la mer et le détroit de Béring, ainsi que les anomalies positives de tendance de SAT sur la Côte-Ouest américaine, sont reliées aux variations de la SLP durant les années 1980–1990. Selon eux, ces changements de la circulation atmosphérique sont associés aux variations du patron Pacifique/Nord-Amérique (PNA) et correspondent à une amplification et un déplacement vers l'est du système de basses pressions des Aléoutiennes²⁹. Ainsi, suite à ce déplacement, il y aurait eu une augmentation d'advection d'air chaud et humide sur la Côte-Ouest américaine et un augmentation d'advection d'air froid et sec sur le nord du Pacifique, l'est de la Sibérie, le détroit et la mer de Béring. C'est par conséquent ces augmentations dans la fréquence des

²⁹ En effet, l'indice PNA est passé de valeurs négatives à des valeurs fortement positives au début des années 1980. Par la suite, il est demeuré relativement stable et c'est seulement vers la fin des années 1990 et le début des années 2000 qu'il a commencé à redescendre vers des valeurs plus faibles (non montré). De plus, selon Trendberth et Hurrell (1994), le mode Pacifique-Nord-Amérique est relié au mode ENSO. Le changement de température de la surface de l'océan dans la partie tropicale du Pacifique entre les années La Nina (froid) et El Nino (chaud) produit un changement de localisation de la convection tropicale dans le Pacifique. La convection tropicale agit comme une source d'onde de Rossby dans la haute troposphère. Ces ondes peuvent se propager et causer des anomalies des hauteurs du géopotentiel à 500 hPa et de vitesses du vent à 200 hPa au dessus de l'Amérique du Nord. Le patron de distribution des hauteurs et des vitesses du vent dépend de la phase d'ENSO. C'est donc les fluctuations entre El Nino et La Nina qui sont principalement responsables du mode d'oscillation Pacifique-Nord-Amérique (Trendberth et Hurrell, 1994).

événements d'advections d'air chaud et froid qui seraient responsables des anomalies de SAT observées sur ces secteurs.

En effet, des tendances négatives de SLP sont observées sur le nord-est du Pacifique durant l'hiver dans les réanalyses NCEP et ERA 40 pour la période 1978–2002 (SLP : [FIGURE T-5H](#) et [FIGURE T-6H](#)), ce qui pourrait confirmer l'amplification et le déplacement vers l'est de la dépression des Aléoutiennes durant cette saison. Par contre, les autres saisons (de même que les tendances des moyennes annuelles de SLP) ne montrent aucun signe d'intensification mais plutôt de fortes tendances positives de SLP, notamment au printemps et à l'été. Cela permet donc de supposer que l'amplification de la dépression des Aléoutienne n'est donc pas un processus dominants tout au long de l'année. Dans les configurations de GEM, seules les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par ERA 40 sont en mesure de reproduire des tendances négatives de SLP sur le nord du Pacifique durant l'hiver (SLP : [FIGURE T-1H](#) et [FIGURE T-4H](#)). Il est donc possible de supposer qu'elles sont donc capables de représenter l'intensification de la dépression des Aléoutiennes observée dans les réanalyses. Pour les autres saisons (de même que les tendances des moyennes annuelles), toutes les configurations sont relativement en accord avec les tendances positives de SLP des réanalyses, notamment au printemps avec des tendances positives de SLP relativement fortes comparées à celles de l'automne ou de l'été (SLP :

FIGURE T-(1 à 4)P, T-(1 à 4)E et FIGURE T-4A). Il n'y a donc, tout comme pour les réanalyses, aucun signe d'intensification de la dépression.

Les tendances de SAT des réanalyses ERA 40 et NCEP montrent, tel que supposé, des tendances négatives sur l'est de la Sibérie et des tendances positives sur la Côte-Ouest durant l'hiver (SAT : FIGURE T-5H, FIGURE T-6H). Au printemps, par contre, les tendances de SAT s'inversent rapidement. Elles deviennent fortement positives sur l'est de la Sibérie et la mer de Beaufort et négatives sur la Côte-Ouest et le sud de l'Alaska (SAT : FIGURE T-5P, FIGURE T-6P) et demeurent ainsi durant l'été et l'automne (SAT : FIGURE T-5E, FIGURE T-6E, FIGURE T-5A, FIGURE T-6A). Ceci est donc en accord avec le fait que les tendances de SLP changent de signe et demeurent positives durant ces saisons et donc, sur le fait que les tendances de SLP ne montrent aucun signe d'intensification durant le printemps, l'été et l'automne. Par contre, les tendances négatives (positives) de SAT observées dans la réanalyse NCEP durant l'été sur l'est de la Sibérie (l'Alaska et la Côte-Ouest) ne peuvent cependant pas être expliquées par les tendances de SLP et donc par l'augmentation des advections d'air froid (chaud). Pour les tendances des moyennes annuelles de SAT, les réanalyses NCEP et ERA 40 montrent des tendances négatives sur le nord du Pacifique, la mer et le détroit de Béring ainsi que l'ouest de l'Alaska (SAT : FIGURE T-5Y et FIGURE T-6Y). Cependant, aucunes tendances négatives de SAT ne sont observées sur l'est de la Sibérie et seulement de faibles tendances positives de SAT sont observées sur la

Côte-Ouest américaine. Par conséquent, ces observations viennent donc également confirmer le fait que la PNA est un patron dominant uniquement durant l'hiver.

Pour les simulations réalisées avec GEM, il est facile de constater que la majorité des configurations de GEM éprouvent de la difficulté à reproduire un patron clair de tendances de SAT durant l'hiver (SAT : FIGURE T-(1 à 4)H), tel que celui suggéré par Trendberth et Hurrell, (1994). Néanmoins, la configuration GEM-global est celle qui représente le mieux le patron de tendances de SAT au cours de l'hiver. De plus, bien que les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par ERA 40 reproduisaient relativement bien les tendances négatives de SLP sur le nord du Pacifique durant cette saison, les tendances de SAT de ces deux configurations ne montrent aucun signe d'augmentation des advections chaudes et froides sur la Côte-Ouest et l'est de la Sibérie. Par conséquent, les différentes configurations de GEM sont incapables de représenter les tendances de SAT reliées à l'amplification de la dépression islandaise durant l'hiver. Enfin, pour les autres saisons, les différences de tendances de SAT sont telles qu'il est difficile d'établir un lien direct avec les tendances de SLP.

Finalement, les tendances de GZ à 500 hPa des réanalyses NCEP et ERA 40 montrent clairement une baisse importante de hauteurs géopotentielles durant l'hiver et une hausse plus ou moins marqué sur le nord du Pacifique

au printemps (GZ: [FIGURE T-5H](#), [FIGURE T-5P](#), [FIGURE T-6H](#) et [FIGURE T-6P](#)). Ainsi, celles-ci pourraient être reliées aux fortes tendances positives et négatives de SLP qui ont lieu sur ce même secteur à l'hiver et au printemps. De plus, ces deux saisons correspondent avec le moment où les variances de SLP et de GZ à 500 hPa sont les plus fortes sur le nord du Pacifique (GZ: [FIGURE V-5H](#), [FIGURE V-5P](#), [FIGURE V-6H](#) et [FIGURE V-6P](#)). Les fortes variances laissent donc aussi supposer que des changements importants reliés à la PNA ont lieu au cours de ces deux périodes. Voyons maintenant s'il est possible de retrouver les mêmes corrélations avec les configurations de GEM. En effet, les configurations de GEM représentent relativement bien ce patron de tendances positives de GZ à 500 hPa au printemps. Par contre, seule la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 arrive à simuler les fortes tendances négatives de GZ à 500 hPa durant l'hiver (GZ: [FIGURE T-4H](#)). De plus, bien que les configurations de GEM représentent relativement bien le maximum de variance de SLP sur le nord du Pacifique à l'hiver et au printemps, elles éprouvent plus de difficultés avec celui des GZ à 500 hPa à l'hiver. En fait, il apparaît souvent mal positionné et généralement trop intense. Le maximum de variance de GZ à 500 hPa au printemps apparaît néanmoins relativement similaire aux réanalyses ERA 40 et NCEP. Par conséquent, les configurations de GEM éprouvent plus de difficultés à représenter les tendances et la variabilité de GZ à 500 hPa durant l'hiver.

En résumé, les différents changements observés dans la circulation atmosphérique (i.e. de la SLP et des GZ à 500 hPa) des réanalyses ERA 40 et NCEP apparaissent en grande partie responsables des anomalies de SAT observées sur l'ouest de l'Arctique et le nord du Pacifique. Par contre, les différentes configurations de GEM éprouvent relativement de difficulté à représenter un tel patron. De plus, compte tenu de ces observations, il est possible de supposer que l'amplification de la PNA ne joue un rôle relativement important qu'au cours de l'hiver puisque les tendances de SLP sont positives pour les autres saisons. Ainsi, cela viendrait expliquer les fortes corrélations observées entre la SLP, les SAT et les GZ à 500 hPa dans cette région au cours de l'hiver. Par contre, il a toutefois été impossible de déterminer le processus qui produit le rapide changement de tendances de SLP, SAT et GZ à 500 hPa au cours du printemps.

La dépression islandaise

La comparaison des anomalies/tendances de SAT et SLP des réanalyses ERA 40 et NCEP suggère également une certaine corrélation spatiale sur l'est de l'Arctique et le nord de l'océan Atlantique, notamment sur la baie de Baffin et l'Europe. En effet, alors que la région de la baie de Baffin montre des tendances négatives de SAT durant l'hiver, les régions du nord de l'Europe et de la Sibérie montrent plutôt des tendances positives (SAT: [FIGURE T-5H](#) et [FIGURE T-6H](#)). L'augmentation des SAT moyennes en Europe et en Sibérie durant l'hiver est possiblement associée à l'intensification et l'extension vers

le nord-est de la dépression islandaise (Polyakov et al., 2003) ainsi qu'à l'augmentation de la fréquence des cyclones provenant de l'Atlantique Nord (Skeie, 2000; Rogers et Mosley-Thompson, 1995). En effet, les cyclones arctiques qui traversent la mer de Barents et la mer de Kara produisent des anomalies de forts vents d'ouest/sud-ouest sur l'Europe et l'ouest de la Sibérie (Hurrell, 1995). Ces vents d'ouest/sud-ouest transportent de l'air maritime relativement chaud et pourraient ainsi être responsables des hausses de températures observées dans les réanalyses sur ces régions.

L'augmentation et la trajectoire particulière de ces dépressions est en fait observable en hiver dans les tendances mais également dans les variances de SLP des réanalyses ERA 40 et NCEP (SLP: [FIGURE T-5H](#) et [FIGURE T-6H](#) vs [FIGURE V-5H](#) et [FIGURE V-6H](#)). En fait, la variance (ou l'écart type) de la SLP peut être utilisée comme un indicateur de l'activité synoptique (Dorn et al., 2000). Une forte variance est associée avec de grandes anomalies de SLP, causées par exemple par le passage répété de cyclones. Durant l'hiver, les réanalyses ERA 40 et NCEP montrent de fortes valeurs de variances de SLP s'étendant de l'est de l'Atlantique jusqu'à la mer de Kara en passant par les pays scandinaves et la mer de Barents. Par conséquent, celles-ci représentent donc une zone de forte activité synoptique. Par contre, les valeurs plus faibles, comme par exemple celles se trouvant sur l'est de la Sibérie et l'ouest de l'Arctique, représentent une zone plus calme (Dorn et al., 2000). L'activité synoptique y est donc plus faible. De plus, compte tenu

du fait que les plus grandes variances de SLP sont observées principalement durant l'hiver, l'hiver est donc considéré, selon Rogers et Mosley-Thompson (1995), comme le moment de l'année où le nombre de tempêtes pénétrant en Arctique est le plus important.

Le problème est que la majorité des configurations de GEM, à l'exception possiblement de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, n'arrivent pas à reproduire les tendances et les variances de SLP associées à l'intensification et l'extension de la dépression islandaise durant l'hiver (SLP : FIGURE T-(1 à 4)H et FIGURE V-(1 à 4)H). Celles-ci éprouvent donc de la difficulté à simuler les changements de vents et les advections de températures associées³⁰. Seules les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par ERA 40 font un peu mieux que les autres durant l'hiver en montrant des tendances positives de SAT sur l'Europe et l'ensemble de la Russie.

Au printemps et à l'été, les réanalyses ERA 40 et NCEP montrent également des tendances négatives de SLP s'étendant de l'est de l'Atlantique jusqu'à la mer de Kara en passant par les pays scandinaves et la mer de Barents (SLP: FIGURE T-5P, FIGURE T-6P, FIGURE T-5E et FIGURE T-6E). Par contre, celles-ci sont relativement moins fortes que durant l'hiver. Il est donc possible de supposer que l'intensification de la dépression islandaise se poursuit

³⁰ Il en va également de même pour les advections d'air froid sur les régions de l'ouest du Groenland, de l'Arctique canadien et du nord-ouest de l'Atlantique Nord.

également au cours de ces saisons. Par contre, les tendances de SLP montrent une zone de tendances positives de SLP sur l'est de l'Europe durant l'été qui progresse en taille pour finalement dominer complètement la majeure partie de l'est de l'Arctique et de l'Atlantique Nord à l'automne (SLP: [FIGURE T-5A](#) et [FIGURE T-6A](#)). Il est cependant impossible de déterminer le processus qui cause ce fort changement de tendances de SLP à l'été et à l'automne. Néanmoins, comme le laissait supposer les tendances de SLP, les tendances de SAT demeurent positives sur l'Europe durant le printemps et l'été (SAT: [FIGURE T-5P](#), [FIGURE T-6P](#), [FIGURE T-5E](#) et [FIGURE T-6E](#)). Par contre, au printemps, la réanalyse NCEP montre une zone de tendances négatives de SAT sur l'est de l'Europe qui ne peut être expliquée par le changement de SLP. Les tendances négatives observées sur l'Islande, le nord de la Scandinavie et la mer de Norvège et la mer du Groenland au printemps dans les réanalyses ERA 40 et NCEP ne peuvent pas non plus être expliquées par le changement de SLP puisque le patron de tendances de SLP est resté relativement similaire à celui de l'hiver. Ce qui laisse supposer qu'un processus relativement important cause un refroidissement sur ces régions au printemps. Finalement, la réanalyse ERA 40 montre des tendances négatives de SAT (reliées aux vents du nord) sur l'Europe tel que supposé par les tendances de SLP à l'automne (SAT: [FIGURE T-5A](#)). Par contre, dans le cas de la réanalyse NCEP, les tendances de SAT sont positives (SAT: [FIGURE T-6A](#)). Celles-ci ne peuvent donc être expliquées par les tendances positives de SLP. Ceci montre donc que des différences relativement importantes

peuvent survenir entre les réanalyses. Néanmoins, toutes deux montrent des tendances positives de SAT sur la Scandinavie, la mer de Norvège, la mer du Groenland et l'Atlantique Nord. Ce qui est en accord avec les anomalies de vent du sud/sud-ouest reliées au maximum de tendances de SLP situé sur la mer de Barents. Finalement, les tendances négatives des moyennes annuelles de SLP des réanalyses ERA 40 et NCEP laissent aussi supposer que l'amplification de la dépression islandaise a lieu durant la majeure partie de l'année (SLP: FIGURE T-5Y et FIGURE T-6Y). Ceci vient donc expliquer le fait que les tendances positives de SAT qui lui sont associées prédominent sur l'Europe et la Russie malgré les tendances négatives de SAT à l'automne (SAT: FIGURE T-5Y et FIGURE T-6Y).

Tout comme à l'hiver, la majorité des configurations de GEM n'arrivent pas à reproduire les tendances de SLP associées à l'intensification de la dépression islandaise durant le printemps et l'été (SLP : FIGURE T-(1 à 4)P et FIGURE V-(1 à 4)P) (à l'exception de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 au printemps). Celles-ci éprouvent donc de la difficulté à simuler les changements de vents et les advections de températures associées. De plus, bien que la majorité des configurations de GEM reproduisent en partie les tendances positive de SLP sur l'Europe à l'automne (SLP: FIGURE T-(1 à 4)A), elles sont incapable de représenté l'intensité du maximum des réanalyses ERA 40 et NCEP. Par conséquent, les tendances négatives de SAT sur l'Europe associées aux changements de direction des vents ne sont pas

représentées (SAT: FIGURE T-(1 à 4)A). Néanmoins, bien que certaines différences de tendances de SAT soient observables sur l'ouest de la Russie, les configurations de GEM représente relativement bien les tendances positives des moyennes annuelles de SAT (SAT: FIGURE T-(1 à 4)Y). Cependant, ces tendances ne peuvent pas toutes être expliquées par les tendances de SLP puisque seules les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par ERA 40 représente relativement bien les tendances des moyennes annuelles de SLP reliées à l'intensification de la dépression islandaise (SLP: FIGURE T-(1 à 4)Y).

De l'autre côté, sur les régions de l'ouest du Groenland, de l'Arctique canadien et du nord-ouest de l'Atlantique Nord, l'amplification de la dépression islandaise produit une anomalie de vent du nord (Hurrell, 1995). Celle-ci favorise le transport d'air arctique froid, l'advection et la formation de glace de mer et les pertes de chaleur radiative (que le gel de la mer vient par la suite réduire) (Overland et al., 2004), d'où les tendances négatives de SAT observées durant l'hiver dans les réanalyses ERA 40 et NCEP (SAT : FIGURE T-5H et FIGURE T-6H). Ces tendances négatives de SAT sont également observées au printemps et à l'été (de même que dans les moyennes annuelles) (SAT : FIGURE T-5P, FIGURE T-6P, FIGURE T-5E, FIGURE T-6E, FIGURE T-5Y et FIGURE T-6Y). Ce qui est aussi en accord avec le fait que les tendances de SLP sont négatives durant le printemps et l'été (SLP : FIGURE T-5P, FIGURE T-6P, FIGURE T-5E et T-6E). Pour terminer, les

tendances positives de SAT observées sur la baie de Baffin à l'automne dans les réanalyses ERA 40 et NCEP ne peuvent être expliquées par l'amplification de la dépression islandaise (SAT : FIGURE T-5A et FIGURE T-6A). Par contre, celles-ci sont en accord avec le fait que les tendances de SLP sont fortement positives à l'automne (ce qui favorise un vent sud/sud-ouest) (SLP : FIGURE T-5A et FIGURE T-6A). Néanmoins, le fait que les tendances de SAT sont également négatives dans les moyennes annuelles laisse croire que l'ensemble des processus causant le refroidissement observé est dominant la majeure partie de l'année. Par conséquent, il est possible de supposer que l'amplification de la dépression islandaise agit la majeure partie de l'année sur les régions de l'ouest du Groenland, de l'Arctique canadien et du nord-ouest de l'Atlantique Nord malgré le fait que les tendances de SLP et de SAT soient positives à l'automne.

Pour les configurations de GEM, les tendances négatives de SAT sont relativement bien représentées à l'hiver et au printemps sur les régions de l'ouest du Groenland, de l'Arctique canadien et du nord-ouest de l'Atlantique Nord (SAT : FIGURE T-(1 à 4)H et FIGURE T-(1 à 4)P). À l'été, par contre, les configurations de GEM éprouvent plus de difficultés (SAT : FIGURE T-(1 à 4)E) tandis qu'à l'automne, les tendances positives de SAT sont généralement bien simulées (SAT : FIGURE T-(1 à 4)A). Finalement, les tendances des moyennes annuelles de SAT sont aussi négatives dans

certaines configurations de GEM (SAT : FIGURE T-(1 à 4)Y). Par conséquent, les processus causant le refroidissement est plus ou moins bien représenté.

En plus des tendances négatives de SAT observées durant l'hiver, de fortes variances de SAT sont également présentes sur l'ouest du Groenland et la baie de Baffin dans les réanalyses ainsi que dans les différentes configurations de GEM (SAT : FIGURE V-#H). Selon Kelly et al. (1982), les plus fortes variances de SAT observées sur ces régions peuvent refléter des changements dans la circulation méridionale (par l'amplification de la dépression islandaise) ou dans la fréquence de formation et de dissipation de la couche d'inversion au dessus du Groenland. Par contre, selon Semenov et Bengtsson (2003), ces fortes variations sont reliées à la variation interannuelle et interdécennale de la concentration de glace de mer.

Zakharov (1974) ainsi que Semenov et Bengtsson (2003) supposent de plus que les fortes variabilités de SAT et de SLP observées sur les régions de la mer de Barents et de la mer de Kara (principalement durant l'automne, l'hiver et le printemps) (SAT et SLP: FIGURE V-#A, FIGURE V-#H et FIGURE V-#P) sont également reliées à des changements importants dans la couverture de glace de mer³¹. Ils mentionnent également que des changements de la couverture de glace de mer peuvent produire des modifications importantes

³¹ Si cette hypothèse s'avère exacte, il apparait de manière relativement évidente que les différentes configurations de GEM sont aussi en mesure de reproduire les plus grandes variabilités de SLP et de SAT ainsi que les tendances de SAT qui lui sont associées puisque les conditions de glace de mer et les températures de surface de l'océan (SST) ont été utilisées pour piloter les données de surface.

du bilan énergétique local (voir plus loin : L'effet de l'AO sur la glace de mer et les SAT observées) et par conséquent, influencer la circulation atmosphérique. Mysak et Venegas (1998) notent cependant qu'il est difficile de discerner si les anomalies de SLP et de SAT sont produites par les anomalies de glace de mer ou l'inverse. En fait, selon Mysak et Venegas (1998), la majorité de la variabilité spatiale et interannuelle des anomalies de SLP et de SAT est plutôt causée par des changements constants et rapides de la circulation atmosphérique³². Autrement dit, pour expliquer ces récentes tendances de SAT et de SLP observées sur le nord de l'Atlantique et de l'Eurasie, Mysak et Venegas (1998) suggèrent qu'au cours d'une période relativement courte, l'atmosphère doit répondre rapidement aux anomalies de glace de mer et aux nouvelles conditions de l'océan, ce qui entraîne une amplification ou une diminution du patron de la NAO. Ainsi, les changements fréquents dans le patron de la NAO produisent des anomalies de circulation atmosphérique qui, via la circulation océanique, sont à nouveau responsables de nouvelles variations de glace de mer et de SAT (voir Mysak et Venegas, 1998, pour plus d'explication). Finalement, pour expliquer l'amplification du patron de la NAO, ils supposent que lorsque la couverture de glace sur la mer du Groenland est faible, les flux de chaleur de l'océan à l'atmosphère sont plus importants. L'augmentation du transfert de chaleur contribue donc à amplifier la dépression islandaise, en particulier

³² Mysak et Venegas (1998) mentionnent entre autre que les changements de pression (et in extremis, de la direction des vents), notamment la diminution de la cellule de haute pression située sur la mer de Beaufort et l'amplification de la cellule de basses pressions sur l'Europe, sont considérés comme des facteurs importants pour expliquer la variabilité de la SAT observée.

durant l'hiver, jusqu'au point où l'indice de la NAO change de signe et devient positif³³ (de façon similaire, lorsque la glace de mer augmente sur la mer du Groenland, les flux de chaleur sont réduits et le processus est inversé; l'indice de la NAO devient négatif).

Patron de l'oscillation de l'Atlantique Nord

En effet, ces patrons de tendances positives et négatives de SAT de même que les variations dans l'écoulement sont possiblement reliés au changement de signe du patron de la NAO (van Loon et Rogers, 1978; Hurrell, 1996). Or, le patron de la NAO est justement passé de valeurs relativement négatives à des valeurs fortement positives vers la fin des années 1980. Comme l'indice NAO est défini par la différence de SLP entre l'Islande et Lisbonne, un indice NAO positif signifie que la pression est plus élevée que la moyenne à Lisbonne et plus faible que la moyenne en Islande. Par conséquent, l'anticyclone des Açores est plus fort que la normale et la dépression islandaise, plus creuse. La NAO possède ainsi une certaine influence sur le positionnement et la trajectoire des dépressions de l'hémisphère Nord. Ce changement dans l'indice NAO peut donc expliquer l'augmentation des cyclones sur l'est de l'Arctique et les températures plus chaudes observées. En effet, un changement vers un indice NAO positif

³³ L'anomalie cyclonique de SLP sur l'est de l'Arctique implique une augmentation de la divergence de la glace de mer et la formation de zones d'eau libre (Rigor et al., 2002). La quantité de glace de mer quittant ainsi la mer de Barents et la mer de Kara de même que le nord du Canada et du Groenland devient donc plus importante (Wu, Wang and Walsh, 2006), ce qui favorise les pertes de chaleur et les anomalies positives de SAT.

produit une anomalie de vent zonal sur l'Atlantique Nord et par le même fait, une anomalie d'air maritime relativement chaud sur la Scandinavie, la mer du Groenland, la mer de Norvège (Hurrell, 1995), mais également sur l'ouest de la Russie. Autrement dit, lorsque l'indice de la NAO est positif, les vents d'ouest/sud-ouest entre les deux systèmes sont relativement plus forts : les tempêtes et les coups de vent sont donc plus fréquents et plus violents sur l'Europe septentrionale. En contrepartie, ces régions bénéficient d'une grande douceur apportée par les masses d'air océaniques, mais aussi par des précipitations accrues. L'air froid, venu de la Sibérie, est donc repoussé plus au nord et à l'est. Sur la région de la baie de Baffin par contre, un indice NAO positif se traduit par une anomalie de vent du nord et par conséquent des températures plus froides (Hurrell, 1995). Ce qui est en accord avec ce qui a été observé et décrit précédemment.

Overland et al. (2004) notent cependant une inversion des tendances de SAT (de négative à positive) vers la fin des années 1990 sur le secteur de la baie de Baffin et de l'archipel canadien. Selon eux, cette inversion n'est pas reliée au changement de l'indice NAO vers les valeurs négatives puisque les températures sont demeurées au-dessus de la normale sur le nord de l'Europe³⁴. À moins bien sûr qu'un autre processus soit responsable des

³⁴ Le patron de circulation associé à la NAO (principalement du sud/sud-ouest) ne permet pas non plus d'expliquer le refroidissement observé sur la région située au sud de la mer de Kara (Overland et al., 2004). Les réanalyses ERA 40 et NCEP montrent en effet des tendances négatives de SAT durant l'automne, l'hiver et l'été ainsi que dans les moyennes annuelles (SAT : FIGURE T-5(A, H, E et Y) et FIGURE T-6(A, H, E et Y)).

températures plus chaudes observées. Néanmoins, le changement des tendances de SAT observé à la fin des années 1990 par Overland et al. (2004) sur le secteur de la baie de Baffin et de l'archipel canadien pourrait expliquer les tendances négatives plus faibles observées sur ce secteur. En effet, dans les réanalyses NCEP et ERA 40 pour la période 1978-2002, les tendances négatives des moyennes annuelles de SAT apparaissent plutôt faibles et localisées. Il est donc difficile d'affirmer si elles sont effectivement reliées au changement de signe de la NAO (SAT : FIGURE T-5Y et FIGURE T-6Y).

De plus, même si les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par ERA 40 arrivent en partie à reproduire les tendances positives et négatives de SAT associés au changement de signe de la NAO discuté plus haut (SAT : FIGURE T-1Y et FIGURE T-4Y), les configurations de GEM ne sont de toutes évidence pas en mesure de représenter les changements de SLP (SLP : FIGURE T-(1 à 4)Y). Ceci est également confirmé par les variances de GZ à 500 hPa (GZ : FIGURE V-(1 à 4)Y). En effet, comme la NAO est défini par la variation de SLP entre l'Islande et Lisbonne, ces endroits devraient être caractérisés par une variabilité plus importante de SLP et de GZ à 500 hPa. Or, c'est effectivement ce qui est observé dans les réanalyses NCEP et ERA 40 durant l'hiver (GZ : FIGURE V-5H et FIGURE V-6H). Par contre, les configurations de GEM n'arrivent pas à représenter ces principaux centres. Par exemple, alors que les réanalyses positionnent le maximum de variances

de GZ à 500 hPa sur le sud du Groenland et au nord de l'Islande durant l'hiver, les configurations GEM-LAM, en plus de fortement surestimer la valeur du maximum, le place plutôt du côté ouest du Groenland et au sud de celui-ci (GZ : FIGURE V-3H et FIGURE V-4H). Les configurations GEM-VAR et GEM-global le positionnent par contre sur les pays scandinaves et l'ouest de la Russie (GZ : FIGURE V-1H et FIGURE V-2H). Il en va également de même pour les variances de SLP (SLP : FIGURE V-(1 à 4)H). Il est donc possible de supposer que les configurations de GEM n'arrivent pas à simuler les variations du patron de la NAO.

L'anticyclone de Sibérie

Le patron de l'anticyclone de Sibérie est un autre patron qui mérite d'être analysé. L'anticyclone de Sibérie est un patron atmosphérique qui joue un rôle important dans le climat arctique, notamment durant l'hiver, avec la formation d'air relativement froid. L'anticyclone de Sibérie est situé dans une région où des zones de hautes pressions prédominent largement durant une partie importante de l'année. Les anticyclones apparaissent régulièrement dans cette région à partir de la fin l'été avant d'être remplacés par des dépressions au début du printemps. Durant l'hiver, l'anticyclone est prédominant et il devient le plus important en taille et en pression de toutes les zones anticycloniques de l'hémisphère nord.

Cet anticyclone provient du refroidissement de l'air causé par le faible ensoleillement durant l'hiver. L'air froid devient très dense près du sol, ce qui cause un affaissement de la colonne d'air. En altitude, la pression devient plus basse que les régions environnantes. Ceci induit une circulation qui va contribuer à augmenter la masse d'air dans la colonne et à donner une pression au sol encore plus importante. La force de l'anticyclone est de plus augmentée par le fait que la plaine sibérienne est entourée de montagnes qui empêchent l'air froid des bas niveaux d'en sortir. Le mouvement descendant de l'air dans l'anticyclone garde le ciel dégagé, ce qui favorise également la perte de chaleur par rayonnement et le maintien de températures très froides³⁵. Les anticyclones de Sibérie peuvent donc donner des vagues persistantes de froid intense sur l'Eurasie et le nord-ouest de l'Amérique du Nord. De plus, il bloque ou dévie la trajectoire des dépressions qui vont alors passer plus au sud ou même faiblir.

Les réanalyses ERA 40 et NCEP montrent que durant l'hiver, les tendances de SLP dans l'anticyclone de Sibérie sont légèrement à la hausse (principalement sur l'est de la Sibérie) (SLP : [FIGURE T-5H](#) et [FIGURE T-6H](#)). Ceci est donc en accord avec les tendances plus froides de SAT observées dans les réanalyses sur ce secteur (SAT : [FIGURE T-5H](#) et [FIGURE T-6H](#)). Au printemps et à l'automne par contre, les tendances de SLP de l'anticyclone de Sibérie sont à

³⁵ Des changements dans la couverture de glace peuvent aussi venir altérer la haute pression de Sibérie et la basse pression des Aléoutiennes (Yamazaki, 1989, cité par Trenberth, 1990).

la baisse (SLP : [FIGURE T-5P](#), [FIGURE T-5A](#), [FIGURE T-6P](#) et [FIGURE T-6A](#)). Par conséquent, l'anticyclone de Sibérie tend donc à être moins fort durant ces saisons qu'au cours de l'hiver. Ces changements de pressions semblent correspondre également aux hausses de SAT observées dans les réanalyses pour ces mêmes périodes (SAT : [FIGURE T-5P](#), [FIGURE T-5A](#), [FIGURE T-6P](#) et [FIGURE T-6A](#)). Cependant, la zone de refroidissement observée dans la réanalyse NCEP au printemps ne permet pas d'expliquer les tendances à la hausse de SLP. Enfin, en été, au moment où l'anticyclone de Sibérie est remplacé par des dépressions, les réanalyses présentent des tendances négatives de SLP sur l'ouest de la Sibérie et des tendances positives sur l'est de celle-ci (SLP : [FIGURE T-5E](#) et [FIGURE T-6E](#)). Il est donc possible de supposer que le nombre de dépressions sur le secteur ouest est plus important. La corrélation avec les tendances de SAT en été apparaît néanmoins plus difficile que pour les autres saisons, notamment par le fait que la réanalyse NCEP présente des zones de tendances négatives et pas la réanalyse ERA 40.

De plus, comme l'anticyclone se maintient la majeure partie de l'année, les variances de SLP et de SAT des réanalyses ERA 40 et NCEP sont relativement faibles (SLP et SAT: [FIGURE V-5 \(A, H, P, E et Y\)](#) et [FIGURE V-6 \(A, H, P, E et Y\)](#)). Par contre, elles montrent une forte variabilité de SAT sur les secteurs de l'ouest de la Sibérie durant l'hiver (SAT : [FIGURE V-5H](#) et [FIGURE V-6H](#)). Celle-ci correspond à des baisses de SLP et à des hausses de SAT puisqu'elle

est située dans le prolongement de la dépression islandaise (SAT et SLP: FIGURE T-5H et FIGURE T-6H). Ces fortes variabilités de SLP et de SAT pourraient donc être causées par l'augmentation des dépressions pénétrant dans l'Arctique avant d'être déviées vers le sud par la présence de l'anticyclone de Sibérie.

Encore une fois, les configurations de GEM, à l'exception de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40, n'arrivent pas à reproduire la faible hausse de SLP sur l'est de la Sibérie durant l'hiver (SLP: FIGURE T-(1 à 4)H). Par conséquent, l'amplification de l'anticyclone de Sibérie et ses SAT plus froides ne sont pas représentée et les tendances de SAT simulées sont à la hausse sur ce secteur (SAT: FIGURE T-(1 à 4)H). La configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global montre cependant de fortes tendances négatives de SAT sur l'ouest de la Sibérie et la majeure partie de la Russie (SAT: FIGURE T-3H). Celles-ci ne peuvent pas être expliquées par l'amplification de l'anticyclone de Sibérie parce que celui-ci se trouve plus à l'est. Elles ne peuvent non plus trouver d'explications en lien avec l'augmentation des tempêtes déviées par l'anticyclone puisqu'elles sont associées avec des hausses de SAT. Au printemps et à l'automne par contre, la majorité des configurations de GEM arrivent à simuler les baisses de SLP et les hausses de SAT qui leurs sont associées (SAT et SLP: FIGURE T-(1 à 4)P et FIGURE T-(1 à 4)A). Durant l'été, la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 (SAT et SLP: FIGURE T-4E) est celle qui correspond le mieux aux tendances de SLP et de SAT des réanalyses

ERA 40 et NCEP. Par conséquent, compte tenu de ces observations, les configurations de GEM éprouvent donc passablement de difficultés à représenter les variations annuelles de l'anticyclone de Sibérie. Finalement, l'ensemble des configurations de GEM arrivent à bien représenter les minimums de variance de SLP et de SAT associés à l'anticyclone de Sibérie pour l'ensemble des saisons (SAT et SLP: FIGURE V-(1 à 4)A, H, P, E) de même que les plus fortes variances de SAT sur l'ouest de la Sibérie durant l'hiver (SAT: FIGURE V-(1 à 4)H). Elles sont donc capables de simuler l'intensité de ces changements.

Pour terminer, un autre patron ou processus est possiblement présent entre la mer des Laptev et le pôle nord, en particulier pendant l'hiver. Celui-ci se traduit notamment par un maximum de variances de SLP et de GZ à 500 hPa dans les réanalyses ERA 40 et NCEP (SLP et GZ: FIGURE V-5H et FIGURE V-6H) ainsi que par un maximum positif de tendances de GZ à 500 hPa (GZ: FIGURE T-5H et FIGURE T-6H). Par contre, les tendances et les variances de SAT ne semblent également pas montrer de caractéristiques particulières sur cette région (SAT: FIGURE T-5H et FIGURE V-6H). La variabilité du patron ou processus semble néanmoins être bien représenté par les différentes configurations de GEM puisque celles-ci présentent un maximum similaire de variance de SLP et de GZ à 500 hPa (SLP et GZ: FIGURE V-(1 à 4)H). Par contre, les configurations GEM-LAM surestiment beaucoup la variabilité qui lui est associé tandis que la configuration GEM-VAR la sous-estime

légèrement. Les différentes configurations, à l'exception probablement de la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global, ne sont également pas en mesure de reproduire les tendances positives de GZ à 500 hPa durant l'hiver (GZ: [FIGURE T-\(1 à 4\)H](#)).

En fait, les variances de SLP observées en hiver dans les réanalyses ERA 40 et NCEP (SLP: [FIGURE V-5H](#) et [FIGURE V-6H](#)) correspondent relativement bien avec les anomalies de SLP présentées par Wu, Wang and Walsh (2006) dans leur figure 7. Selon eux, elles seraient associées au dipôle est Arctique (entre la mer de Kara et la mer des Laptev)/ouest Arctique. Les anomalies de SAT de la phase négative présentées par Wu, Wang and Walsh (2006) dans leur figure 14b coïncident aussi relativement bien avec les tendances de SAT observées durant l'hiver dans les réanalyses, notamment sur la mer des Laptev, la mer de Sibérie septentrionale³⁶, la mer des Tchouktches, la mer de Beaufort, la mer de Norvège, la mer du Groenland, le Groenland et la baie de Baffin (SAT: [FIGURE T-5H](#) et [FIGURE T-6H](#)). Il en va également de même avec les maximums positifs de SAT présents entre les archipels de Svalbard et François-Joseph et la Nouvelle Zemble ainsi que sur l'archipel canadien. Par contre, les tendances négatives de SAT présentent dans la phase négative sur la Russie et la Sibérie ne sont cependant pas observées. Ce processus ou patron demande donc d'être étudié plus en profondeur.

³⁶ NCEP seulement

Les différents modes internes de variabilité observés en Arctique mettent donc l'emphase sur la difficulté de la détection et de l'attribution des changements climatiques anthropogéniques. Cela ne veut pas dire que l'augmentation des SAT en Arctique n'est pas reliée à l'augmentation des gaz à effet de serre mais, que le réchauffement qui lui est associée peut se manifester via l'intensification d'un patron existant ou par la génération de nouveaux patrons, similaires à un mode d'oscillation. En effet, dans le système climatique, les forçages externes, tel le réchauffement anthropique, peuvent favoriser un mode naturel plutôt qu'un autre (Semenov et Bengtsson, 2003). Le système climatique se trouvera alors plus fréquemment dans ce mode de variabilité. Ainsi, il y a de plus en plus de personnes en accord avec le fait que le forçage radiatif associé avec l'augmentation des gaz à effet de serre pourrait entraîner le système climatique dans un mode naturel particulier de variabilité. Cette hypothèse est notamment appuyée par plusieurs modèles climatiques et certaines observations. Ceux-ci tendent en fait à démontrer que l'augmentation de l'indice NAO est possiblement reliée au réchauffement global (Scheinder et al., 2003, cité par Semenov et Bengtsson, 2003; Gillett et al., 2002; Hoerling et al., 2001). Par conséquent, il est donc important de bien comprendre les différents patrons de variabilité afin de déterminer les changements et les effets qui leurs sont associés.

Tendances et variabilité de la SAT et de la SLP sur le bassin arctique

L'augmentation des évènements météorologiques menaçants vient appuyer le fait qu'un réchauffement global est observé au cours des dernières décennies. En fait, plusieurs auteurs montrent que les tendances de SAT les plus fortes se retrouvent en Arctique (Hansen et al., 1999, Jones et al., 1999). Par contre, les patrons de réchauffement observés aux hautes latitudes pour les années 1980–1990 sont relativement différents d'une analyse à l'autre (FIGURE 4, FIGURE 5, SAT : FIGURE T-5(A, H, P, E et Y) et FIGURE T-6(A, H, P, E et Y)).

Néanmoins, le fait le plus marquant observé dans les réanalyses ERA 40 et NCEP pour les tendances de SAT durant la période 1978–2002 est l'étendue des tendances positives sur le bassin arctique et le long de sa côte continentale, particulièrement au printemps et à l'automne (SAT : FIGURE T-5P, FIGURE T-6P, FIGURE T-5A et FIGURE T-6A). Compte tenu de l'importance des tendances positives de SAT observées au cours de ces saisons, l'identification des processus responsables du réchauffement est donc d'un intérêt particulier. En fait, ces fortes tendances de SAT sont également observées par Rigor, Colony et Martin (2000). Rigor, Colony et Martin (2000) ont noté qu'au cours du printemps des années 1990, tout le centre de l'Arctique présentait des tendances significatives au réchauffement, avec des anomalies particulièrement fortes le long de la côte

de la Sibérie, de l'Alaska et du nord du Canada. Seule la région maritime au nord de l'Europe ne montrait pas d'anomalies positives mais plutôt des tendances négatives de SAT. Ces zones de tendances positives et négatives de SAT décrite par Rigor, Colony et Martin (2000) sont en effet observés dans les réanalyses ERA 40 et NCEP pour la période 1978–2002 (SAT : [FIGURE T-5P](#) et [FIGURE T-6P](#)).

Selon Rigor et al. (2002), les tendances positives de SAT observées au printemps au nord de la Sibérie, l'Alaska et du Canada (SAT : [FIGURE T-5P](#), [FIGURE T-6P](#)) sont reliées au changement de la fréquence des évènements d'advection d'air chaud. En effet, Rigor et al. (2002) ont observé un prolongement des anomalies de basses SLP au cours du printemps. Tel que mentionné, ces anomalies engendrent une augmentation des anomalies de vents sud/sud-ouest et donc une augmentation des évènements d'advection d'air continental chaud (Rigor et al., 2002). Cette augmentation de la fréquence des évènements d'advection d'air chaud pourrait ainsi être responsable d'une partie des augmentations de SAT observées sur l'Arctique au printemps³⁷ (Overland et al., 2002). De plus, selon Walsh, Chapman et Shy (1996), l'augmentation des advections d'air chaud est accompagnée par des changements importants de la couverture de glace de mer et de la circulation atmosphérique.

³⁷ Overland et al. (2002) ont même noté que l'anomalie chaude en surface avait tendance à persister au cours du mois de mai.

En effet, Rigor et al. (2002) supposent que le fait que les températures soient plus chaudes sur l'océan Arctique durant l'hiver (notamment à cause de l'augmentation du flux de chaleur dans les zones d'eau libre) et le fait que la nouvelle glace de mer fond à plus basse température (à cause de la plus grande quantité de sel présent) accélèrent le début de la fonte au printemps. Cela a pour effet d'augmenter la taille des zones libres de glace, et ce, plus tôt au début du printemps. Par conséquent, les quantités de chaleur relâchée par l'océan augmentent. Il en résulte une réduction accrue de la neige et de la glace de mer ainsi qu'une diminution plus importante de l'albédo de surface des continents et des océans³⁸. Les tendances positives de SAT sont donc plus fortes et contribuent encore plus à la diminution de la neige et de la glace. Durant l'été, la diminution de la concentration et de la superficie de glace de mer se poursuit. Par conséquent, la quantité de rayonnement solaire alors absorbé par l'océan augmente de plus en plus pour atteindre son maximum vers la fin de l'été. Néanmoins, la fonte de la neige et de la glace de mer maintient les SAT au dessus de l'océan près du point de congélation, ce qui a pour effet de tempérer les extrêmes de température³⁹. Les variations de SAT plus marquées durant l'été sont alors généralement reliées à des effets locaux, comparativement à l'automne, l'hiver et au

³⁸ En effet, les observations montrent une réduction significative de la glace de mer en accord avec le réchauffement au dessus de l'océan (Rigor et al, 2002)

³⁹ C'est pourquoi les tendances de SAT observées dans les réanalyses demeurent relativement nulles sur l'océan Arctique au cours de l'été (SAT : [FIGURE T-5E](#) et [FIGURE T-6E](#)).

printemps, où les effets synoptiques apparaissent plus importants. Autrement dit, des anomalies de SAT de plus faible étendue sont présentes durant l'été (SAT : FIGURE V-5E et FIGURE V-6E) en partie à cause de l'importance des processus radiatifs, de la fonte de la glace et de neige et parce que les contrastes terre-eau (dans les endroits où la mer est libre de glace) sont beaucoup moins importants comparé à l'hiver. Une fois l'automne venu, les surplus de chaleur absorbés par l'océan dans les zones d'eau libre retardent le gel de la mer. La quantité de chaleur libérée est alors plus importante que dans les endroits où la glace de mer a commencé à se reformer. Les SAT sont par conséquent plus chaudes à ces endroits. Ce processus est typiquement appelé la rétroaction glace-albédo.

Selon Hurrell (1996), les plus forts réchauffements observés au dessus des continents au printemps et à l'automne s'expliquent aussi par la différence de capacité calorifique entre la terre et les océans⁴⁰. En fait, les surfaces terrestres atteignent plus rapidement l'équilibre avec la température de la masse d'air que les océans. Comme, au printemps, les continents absorbent rapidement l'énergie du soleil, ils sont donc plus chauds. De plus, cette augmentation de température est d'autant plus importante que la diminution de la quantité de neige et de glace augmente et que l'albédo de surface diminue. Au dessus des océans, par contre, les anomalies positives de SAT

⁴⁰ Les contrastes terre-eau (dans les endroits où la mer est libre de glace) sont néanmoins beaucoup moins importants que durant l'hiver.

sont atténuées par la grande capacité calorifique de l'eau qui absorbe la plus grande partie de la chaleur de la masse d'air et des rayons du soleil. Autrement dit, la quantité d'énergie nécessaire pour augmenter la température de l'eau est beaucoup plus grande que celle des continents. Les SAT sont donc plus froides et les variations plus faibles. Par conséquent, les tendances positives de SAT observées sur le bassin arctique sont plus faibles qu'en marge des continents.

De plus, selon Rigor et al. (2002), les variations des SAT au dessus de l'océan peuvent également être influencées par la présence de glace de mer. En effet, lorsque la glace de mer est suffisamment épaisse, celle-ci empêche les échanges de chaleur entre l'air et l'océan. La grande valeur d'albédo de la glace et de la neige empêche la masse d'air de se modifier rapidement de sorte que l'air chaud/froid peut se propager sur une plus grande distance sans être trop affecté par l'océan. Les SAT demeurent donc relativement stables. Par contre, lorsque la quantité de glace de mer varie de manière importante dans le temps et l'espace, les SAT peuvent être fortement affectées. En effet, les plus grandes tendances de réchauffement observées au printemps et à l'automne se produisent dans les zones où les variations de la concentration de la neige et de la glace sont les plus importantes (Rigor et al., 2002). Ainsi, de fortes anomalies chaudes de SAT sont présentes dans les réanalyses ERA 40 et NCEP le long de la côte du Canada et de la Sibérie au printemps et à l'automne, plus particulièrement sur l'archipel canadien, la

mer de Beaufort, la mer des Tchouktches, la mer de Sibérie orientale, au nord et à l'est du Groenland (automne seulement), sur la mer de Kara et entre les archipels de Svalbard et François-Joseph et la Nouvelle Zemble (printemps seulement) (SAT : [FIGURE T-5P](#), [FIGURE T-6P](#), [FIGURE T-5A](#) et [FIGURE T-6A](#)). Ces fortes variations de glace de mer se traduisent aussi par des variances de SAT plus grandes, comme notamment sur la baie de Baffin et au nord de la Sibérie, de l'Alaska et du Canada (SAT : [FIGURE V-5P](#), [FIGURE V-6P](#), [FIGURE V-5A](#) et [FIGURE V-6A](#)). Par contre, de plus grandes zones de variances de SAT sont présentes sur ces secteurs à l'automne comparativement au printemps, où ces zones apparaissent plus éparpillées. Ceci est probablement dû au fait que les surfaces d'eau libre sont plus étendue à l'automne qu'au printemps et qu'elles ont eu le temps d'emmagasiner plus de chaleur.

En fait, les observations montrent que la variabilité de la SAT est à son maximum à l'intérieure des continents et le long de la côte du bassin arctique (Walsh, 1977; Barnett, 1978a). Conséquemment à ces observations, Barnett (1978a) a démontré que les variations de SAT peuvent être de 2 à 6 fois plus grande au dessus des terres qu'au dessus des océans. Ces résultats sont en effet également comparables aux variances de SAT observées en bordure des continents dans les réanalyses ERA 40 et NCEP (SAT : [FIGURE V-5\(A, H, P, E et Y\)](#) et [FIGURE V-6\(A, H, P, E et Y\)](#)).

Bien que les différentes configurations de GEM simulent généralement bien les tendances relativement nulles de SAT sur l'océan Arctique et les tendances majoritairement positives le long de la côte de l'Amérique et de l'Eurasie durant l'été (SAT : FIGURE T-(1 à 4)E), elles sont incapables de générer de fortes tendances positives de SAT telles que celles observées le long des côtes continentales arctiques dans les réanalyses NCEP et ERA 40 pour le printemps et l'automne (SAT : FIGURE T-(1 à 4) (P et A)). Il est donc possible de supposer qu'il existe certains problèmes en lien avec le bilan énergétique, la fonte de la neige et la glace et/ou la circulation atmosphérique. Par exemple, le fait que les concentrations de glace de mer et les températures de surface de la mer (SST) ont été interpolées à partir des moyennes mensuelles de l'analyse climatologique de PCMDI2/AMIP II pourrait être une source d'erreur. En effet, comme l'Arctique est extrêmement sensible aux faibles variations, les erreurs sur l'interpolation pourraient donc avoir un effet relativement important sur la rétroaction de la vapeur d'eau et/ou sur la rétroaction glace-albédo et notamment sur les quantités de chaleur transférées entre l'océan et l'atmosphère.

De plus, le fait que les fortes tendances négatives de SLP ne soient pas bien représentées par les configurations de GEM au printemps et à l'automne (SLP : FIGURE T-(1 à 4) (P et A)) pourrait expliquer une bonne partie des problèmes liés aux tendances de SAT. En effet, une anomalie de tendances négatives de SLP produit une anomalie de vents sud/sud-ouest plus fort qui,

à son tour, est responsable de l'augmentation des événements d'advection d'air relativement chaud⁴¹. Par conséquent, cette absence de tendances négatives de SLP se traduit par un déficit d'advection d'air chaud et donc par des tendances de SAT plus froides.

En fait, la majeure partie des configurations de GEM sont incapable des reproduire les patrons de tendances négatives et positives des moyennes annuelles et saisonnières de SLP sur le bassin arctique pour la période 1978–2002 tels que ceux observés dans les réanalyses ERA 40 et NCEP.

Durant l'hiver, seule la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40 représente en partie les tendances positives et négatives de SLP associées à la dépression islandaise et l'anticyclone de Sibérie (SLP : [FIGURE T-4H](#)). De plus, les tendances négatives maximale, correspondant à la trajectoire des tempêtes pénétrant dans l'Arctique, sont surestimées et trop étendue comparé aux réanalyses. La dimension de l'anticyclone de Sibérie en est donc réduite. Néanmoins, la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40 est la seule des configurations à montrer des tendances négatives de SLP sur l'océan Arctique au cours de l'hiver. [Les configurations GEM–LAM vont même jusqu'à fortement surestimer les variances de SLP sur l'océan Arctique, notamment durant l'hiver (SLP : [FIGURE V-3H](#) et [FIGURE V-4H](#)).]

⁴¹ Walsh, Chapman et Shy (1996) mentionnent notamment que puisque les tendances de SLP ont été négatives au cours des années 1980-1990, la vorticité cyclonique des vents a augmenté jusqu'à des valeurs extrêmes sur le bassin arctique comparativement aux dernières décennies.

Au printemps, seules les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par GEM-global sont en mesure de représenter les anomalies de basses pressions situées au-dessus du bassin arctique et les anomalies de hautes pressions situées au sud du détroit de Béring et de l'Alaska (SLP : [FIGURE T-1P](#) et [FIGURE T-3P](#)). La configuration GEM-VAR surestime de plus très fortement les tendances négatives de SLP en plus de mal positionner le maximum correspondant à l'anomalie de basses pressions de la mer de Barents. Par conséquent, les configurations de GEM sont incapables de correctement représenter l'augmentation des dépressions pénétrant dans l'Arctique au cours du printemps.

Bien que les tendances de SLP soient de plus faible intensité, les configurations de GEM parviennent à mieux représenter les tendances négatives de SLP sur le bassin arctique durant l'été. Par contre, la configuration GEM-LAM pilotée par GEM-global et (en particulier) la configuration GEM-VAR éprouvent plus de difficultés à simuler les anomalies de basses pressions (SLP : [FIGURE T-1E](#) et [FIGURE T-3E](#)). Enfin, seule la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 arrive à simuler les tendances positives de SLP présentes dans les réanalyses sur l'Europe, le nord-est du Canada ainsi que sur l'est de la Sibérie, la mer et le détroit de Béring (SLP : [FIGURE T-4E](#)). Les configurations de GEM éprouvent donc, tout comme à l'hiver et au printemps, passablement de problèmes avec les tendances de SLP sur le bassin arctique.

Finalement, durant l'automne, les réanalyses montrent une zone de tendances positives de SLP centré sur les pays scandinaves, la mer des Laptev, la mer de Barents, la mer de Norvège, la mer du Groenland et l'Atlantique Nord (SLP : [FIGURE T-5A](#) et [FIGURE T-6A](#)). Sur le reste du bassin arctique, les tendances de SLP demeurent néanmoins majoritairement négatives, avec un maximum sur la mer de Sibérie. Encore une fois, les configurations de GEM sont généralement incapables de reproduire un tel patron de tendances de SLP. Néanmoins, la configuration GEM-LAM piloté par GEM-global représente plus ou moins bien ce patron.

Par conséquent, le fait que configurations de GEM sont incapable des reproduire les tendances négatives et positives des moyennes annuelles et saisonnières de SLP sur le bassin arctique pour la période 1978-2002 est probablement une des principales raisons pour expliquer le fait que les patrons de tendances de SAT en Arctique ne soient pas simulées.

Les effets de l'AO sur la glace de mer et les SAT observées

Rigor et al. (2002) suggèrent que les diminutions de SLP, telles que celles observées au dessus du bassin arctique dans les réanalyses ERA 40 et NCEP (SLP : [FIGURE T-5\(P, E, A, H et Y\)](#) et [FIGURE T-6\(P, E, A, H et Y\)](#)), sont associées au changement de l'indice AO. En effet, la tendance de l'indice AO vers les fortes valeurs positives au cours des années 1990 est aussi une solution possible pour expliquer les changements de SLP, de vents l'épaisseur de la glace de mer et par conséquent, le bilan énergétique et les SAT observés. Durant la phase négative de l'AO, le centre de hautes pressions sur l'ouest de l'Arctique (juste au nord du détroit de Béring) est bien développé et le centre de basses pressions en Islande, moins profond (Polyakov et al., 2003). Inversement, durant la phase positive, le centre de hautes pressions sur l'ouest de l'Arctique est plus faible et le centre de basses pressions sur l'Islande plus profond⁴². En résumé, lorsque l'indice AO est positif, la SLP est plus faible sur le bassin arctique. Par conséquent, les variations de SLP engendrent des changements dans la direction des vents de surface et donc dans le déplacement de la glace de mer. Ces déplacements entraînent ensuite des variations de la concentration et de l'épaisseur de la glace qui modifient à leur tour la distribution des flux de chaleur latente et sensible. En effet, la convergence de la glace de mer augmente l'épaisseur de celle-ci et isole l'atmosphère de l'océan. Par contre,

⁴² Autrement dit, la haute pression située sur la mer de Beaufort est plus faible et la circulation cyclonique sur le nord de la mer de Kara et la mer des Laptev plus forte (Rigor et al., 2002)

la divergence de la glace de mer entraîne une diminution de l'épaisseur de la glace de sorte que les zones d'eau libre ainsi créées favorisent les pertes de chaleur de l'océan vers l'atmosphère.

Les échanges de chaleur entre l'océan Arctique et l'atmosphère dépendent donc fortement de l'épaisseur de la glace de mer. Par exemple, durant l'hiver, le flux de chaleur latente et sensible d'une zone d'eau libre en train de regeler est d'environ 700Wm^{-2} . Par contre lorsque la glace atteint plus de 3m d'épaisseur, le flux est d'environ 10Wm^{-2} (Maykut, 1978, cité par Rigor et al., 2002). Par conséquent, les plus grandes quantités de la chaleur transférée de l'océan Arctique à l'atmosphère se retrouvent dans les zones d'eau libre et dans des conditions de glace mince (Maykut, 1978, cité par Rigor et al., 2002). Les processus qui favorisent l'augmentation des zones d'eau libre et la formation de glace mince ont donc un impact significatif sur les flux de chaleur entre l'océan Arctique et l'atmosphère et évidemment, sur les SAT.

Par conséquent, la diminution de la zone de haute pression, située sur la mer de Beaufort, durant la phase positive de l'AO, entraîne une baisse de la quantité de glace transportée de la mer de Beaufort et de l'ouest de l'océan Arctique vers l'est de la mer de Sibérie, la mer de Laptev et la mer de Kara (Rigor et al., 2002). La diminution de la convergence sur ces secteurs implique donc une plus faible concentration de glace. Ainsi, la glace qui s'y

retrouve est moins épaisse et plus fracturée. Les pertes de chaleur y sont donc plus importantes que lorsque l'AO était dans sa phase négative. De plus, l'augmentation de l'advection de glace vers le large (loin des côtes de l'est de la Sibérie et de la mer des Laptev) permet la création de nouvelles fissures le long de la banquise dans lesquelles de la nouvelle glace peut se former.

De la même façon, l'anomalie cyclonique de SLP sur l'est de l'Arctique implique une augmentation de la divergence de la glace de mer qui favorise aussi la formation de zones d'eau libre (Rigor et al., 2002). La quantité de glace de mer quittant ainsi la mer de Laptev, la mer de Kara, de même que le nord du Canada et du Groenland (Wu, Wang and Walsh, 2006), devient donc plus grande, ce qui favorise également les pertes de chaleur et les SAT plus chaudes. Finalement, l'augmentation de la circulation cyclonique oblige aussi la glace de mer à passer plus près du pôle avant d'atteindre le détroit de Fram (Rigor et al., 2002). La quantité de glace sur la mer de Barents et au nord de l'Europe est donc moins importante. En fait, Holland (2003, cité par Wu, Wang and Walsh, 2006) suggère que le transport de la glace de mer vers le détroit de Fram est fortement relié à la réduction de la SLP le long de la côte eurasienne et à l'augmentation de la SLP sur le nord du Canada et du Groenland au printemps et à l'été. Il en résulte donc de plus faibles quantités de glace de mer sur les secteurs de l'ouest de la Russie et du nord de l'Europe. Par conséquent, cela pourrait expliquer les fortes tendances

positives de SAT observées au printemps dans les réanalyses ERA 40 et NCEP sur ces secteurs (SAT : FIGURE T-5P et FIGURE T-6P).

Ainsi, selon Thompson et Wallace (1998), le changement de l'indice AO vers des valeurs positives, au cours des années 1990, permettrait donc d'expliquer une part importante des changements et de la variabilité atmosphérique observées en Arctique, notamment, les tendances négatives de SLP, les concentrations de glace de mer et la majeure partie des tendances de SAT (Rigor et al., 2002) soit, un réchauffement sur le secteur est, en particulier sur la mer des Laptev, la mer de Sibérie et la mer de Tchouktches et un refroidissement sur le secteur ouest (Amérique du Nord). Cette affirmation est par contre contredite par Comiso (2006) qui mentionne que la glace de mer et les SAT sont faiblement corrélées avec l'AO durant l'hiver et le printemps au cours de la période 1979-2006. De plus, selon Wu, Wang et Walsh (2006), il n'existerait aucune corrélation significative entre les vents de surface et l'AO sur les régions de la mer de Barents, la mer du Groenland et aux environs du détroit de Fram durant l'hiver. Ceci impliquerait donc que l'AO n'est pas un facteur déterminant dans le déplacement de la glace de mer sur ces secteurs (Kwok et Rothrock 1999, cité par Wu, Wang et Walsh, 2006). Kwok et Rothrock (1999, cité par Wu, Wang et Walsh, 2006) mentionnent par contre qu'il existe une forte corrélation entre la phase positive de la NAO et les régions qui favorisent le transport de la glace vers le détroit de Fram.

Compte tenu de ces affirmations, il est donc possible de supposer que l'AO affecte de manière plus importante l'ouest de l'Arctique tandis que la NAO affecte particulièrement l'est. Néanmoins, les baisses de SLP observées dans les réanalyses sur le bassin arctique au cours de la période 1978–2002 sont évidentes, autant pour les moyennes annuelles de SLP que pour l'ensemble des saisons. Bien que les effets de cette baisse de SLP et les rôles de l'AO et de la NAO ne soient pas encore bien compris, il apparaît qu'ils sont non négligeable sur les vents, le déplacement de la glace de mer, les SAT et donc, sur le climat arctique.

Circulation atmosphérique, AO et vortex polaire

Comme il a été mentionné, les variations à longs et à courts termes en Arctique dépendent du moment de l'année et de l'endroit où elles sont observées mais aussi des différents processus en place en fonction des saisons.

Durant l'hiver arctique, le bilan d'énergie thermique de l'atmosphère est un équilibre entre la radiation réfléchie au sommet de l'atmosphère, les flux radiatifs et de chaleur sensible à la surface et les advections horizontales de température (Overland et Guest, 1991). Autrement dit, en l'absence de rayonnement solaire (soit de courtes longueurs d'ondes), les flux des grandes longueurs d'onde dominant et la SAT varie en réponse aux forçages radiatifs et aux effets des nuages. Les différences régionales de SAT observée en Arctique en hiver résultent donc principalement de variations locales du bilan énergétique.

Les variations spatiales de SAT sont aussi influencées par les conditions atmosphériques en altitude, près du sommet de l'atmosphère et donc, par la dynamique de l'atmosphère polaire. En effet, la forte différence de température qui s'établit entre le pôle et les latitudes moyennes au cours de l'hiver engendre un gradient latitudinal de pression qui force la circulation générale. Dans la stratosphère, le vortex polaire, formé par ce gradient de pression, s'étend graduellement vers les bas niveaux et isole

progressivement l'air froid des régions en périphérie. L'air ainsi emprisonné communique graduellement sa faible température vers les niveaux inférieurs et la surface via des processus radiatifs (Overland, Adam et Bond, 1997), ce qui favorise le refroidissement graduel de toute la couche de la masse d'air. Par conséquent, le vortex polaire permet le couplage entre les températures de la haute atmosphère et celle de la basse atmosphère. Or, le lien entre la stratosphère et la surface est d'autant plus fort que l'humidité dans la couche est faible. Autrement dit, plus l'air est sec et faible en humidité, plus l'émissivité de l'air diminue (i.e. plus les flux radiatifs de la couche diminue) et plus la transmissivité entre la haute atmosphère et la surface augmente. L'uniformisation des températures dans la couche s'effectue donc plus rapidement.

De plus, le fait que transmissivité, entre la surface, la haute atmosphère et i.e. l'espace, augmente, permet également d'obtenir des conditions favorables au refroidissement radiatif. Autrement dit, la diminution de la vapeur d'eau lors des épisodes de froid intense permet d'augmenter l'ouverture de la fenêtre atmosphérique dans les grandes longueurs d'onde (IR). L'effet de serre dû à la vapeur d'eau est donc tellement faible que l'atmosphère peut se refroidir efficacement en émettant la majorité de sa radiation vers l'espace.

Lorsque l'air en altitude refroidit, il devient très dense. Ce qui cause un affaissement de la colonne d'air. Par conséquent, la pression et les hauteurs du géopotential deviennent plus basses que dans les régions environnantes. La tropopause tend donc à se rapprocher fortement de la surface. Or, au dessus de la tropopause, la température est inférieure à $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sous ces conditions, la déshydratation de l'atmosphère devient un facteur important pour la production de masses d'air arctiques très froides. Ainsi, lorsque ces conditions ont lieu, il se produit une augmentation de l'efficacité du refroidissement radiatif de sorte que le refroidissement peut être fortement amplifié. Toutes ces différentes conditions font donc en sorte que l'atmosphère au dessus du pôle peut alors être considérée comme un immense réservoir d'air froid.

Au printemps, après une absence de plusieurs mois, le soleil refait son apparition en Arctique. Le retour du soleil permet la mise en place de différents processus de rétroactions reliés au gradient thermique, qui incluent notamment les interactions entre la dynamique atmosphérique et la chimie stratosphérique et entre l'albédo et la fonte de la neige et la glace. Dans la troposphère, le réchauffement printanier de la surface entraîne progressivement la dissipation du vortex polaire qui s'est formé au cours de l'hiver (Overland et al., 2004). Le réchauffement graduel de la masse d'air à bas niveaux engendre aussi une diminution de la pression de surface et une augmentation des hauteurs du géopotential. En altitude par contre, l'air froid

est maintenu emprisonné dans le vortex polaire, ce qui maintient les hauteurs du géopotential à 500 hPa plus basses. Ainsi, les anomalies de basses hauteurs du géopotential, produites par la persistance des températures froides dans la stratosphère et la haute troposphère, sont associées à des anomalies de hautes hauteurs du géopotential à 500 hPa dans la basse troposphère⁴³. Ce sont ces anomalies de hautes et basses hauteurs, reliées aux zones de basses SLP, qui favorisent les advections d'air continental relativement chaud. Par conséquent, le couplage de la troposphère et la stratosphère est important pour le maintien du patron de circulation en surface et donc, pour le maintien des anomalies d'air chaud (Newman et al., 2001; Moritz et al., 2002; Ambaum et Hoskins, 2002).

Finalement, à mesure que le printemps progresse, le vortex polaire s'affaiblit dramatiquement de sorte qu'au cours du mois de mai, la circulation d'été commence graduellement à prendre place dans la stratosphère. Les liens entre les anomalies de températures de la basse stratosphère et de la troposphère deviennent par conséquent beaucoup moins prononcés (Overland et al., 2002).

⁴³ En fait, mars et avril apparaissent comme le moment de l'année où les conditions de la basse stratosphère sont le plus fortement reliées à celles près de la surface (les anomalies mensuelles de températures dans la troposphère tendent à être hors phase par rapport à celles de la basse stratosphère (Overland et al., 2002); autrement dit, les anomalies froides de température observées dans la basse stratosphère sont accompagnées par des anomalies chaudes dans la basse troposphère).

Ainsi, pour expliquer les anomalies de basses pressions observées au printemps sur l'Arctique (SLP : [FIGURE T-5P](#) et [FIGURE T-6P](#)), Pawson et Naujokat (1999) (cité par Overland et al., 2002) ont émis l'hypothèse que puisque la stratosphère dans l'Arctique était particulièrement froide et le vortex polaire particulièrement fort à la fin de l'hiver durant les années 1990, cela lui permettait de persister plus longtemps au cours du printemps (Waugh et Randel, 1999). En fait, selon Thompson et Wallace (1998), le réchauffement au dessus de l'Eurasie, le refroidissement sur l'ouest du Groenland (Overland et al., 2002), la persistance de l'anomalie cyclonique des vents de surface sur la mer de Beaufort (Walsh, Chapman et Shy, 1996) et l'augmentation de l'indice NAO vers des valeurs positives extrêmes (Hurrell, 1995) au cours des années 1980-1990 sont reliée à l'amplification du vortex polaire pendant l'hiver. Par conséquent, ce sont ces anomalies dans la circulation à bas niveaux produites par l'amplification vortex polaire qui seraient responsable de l'augmentation des épisodes d'advection d'air chaud et donc du réchauffement observé.

En poussant l'idée un peu plus loin, Overland et al. (2002) ont émis l'hypothèse que les changements observés dans la circulation à bas niveaux sur l'ouest de l'Arctique au cours des années 1980-1990 sont reliés à la signature de l'AO. Or, comme il a déjà été mentionné, l'indice AO est passé de valeurs négatives à des valeurs fortement positives au cours des années 1980-1990, il est donc possible de supposer que le vortex polaire a gagné

en intensité au cours de ces années. En effet, durant la phase négative de l'AO, la boucle de forts vents, formés en altitude par le gradient thermique entre le pôle et les latitudes moyennes, tourne moins rapidement. Elle contient aussi un plus grand nombre d'oscillations, ce qui permet aux masses d'air arctique de s'échapper plus facilement vers les latitudes plus basses. Par conséquent, les températures en altitude y apparaissent moins froides. Par contre, durant la phase positive de l'AO, l'anneau de forts vents tourne plus rapidement autour du pôle. Celui-ci agit alors comme barrière pour maintenir l'air froid arctique à l'intérieur des régions polaires. Les températures y sont donc plus froides plus longtemps.

Or, comme il a été mentionné, plus le vortex polaire est fort, plus les températures au dessus du bassin arctique peuvent devenir froides durant l'hiver. Comme le vortex est produit par le gradient latitudinal de pression, qui est lui-même produit par la différence de température entre le pôle et les latitudes moyennes, cela engendre un effet de rétroaction qui contribue à son auto-amplification. Par conséquent, plus le vortex polaire est fort, plus le couplage entre la stratosphère et la troposphère dure longtemps à l'arrivée du printemps. Cela permet donc le maintien de l'anomalie de basse SLP et donc des SAT plus chaude sur l'Arctique.

Selon Overland et Turet (1994), le vortex polaire agit également comme barrière pour les dépressions, de sorte que ces systèmes météorologiques,

considérés comme les plus importants mécanismes de transport horizontal de chaleur, sont dirigés vers l'est de l'Arctique (Europe et Russie). Ceci a pour résultat de produire un flux de chaleur plus important sur ces secteurs comparativement à l'ouest de l'Arctique. L'intensification du vortex polaire pourrait donc expliquer l'augmentation du nombre de tempêtes pénétrant sur l'est de l'Arctique, l'amplification de la dépression islandaise et les tendances de SAT qui lui sont associées (Rogers et McHugh, 2002). Par conséquent, la force, l'extension et la persistance du vortex polaire sont donc possiblement des facteurs majeurs du climat arctique.

Cependant, il n'est pas possible de conclure que les effets de l'AO sur le climat de l'ouest de l'Arctique puissent être reliés à la position privilégiée du centre de hautes SLP sur la mer de Beaufort (Overland et al., 2002). Néanmoins, Valdes et Hoskins (1991) ont remarqué que le vortex polaire avait tendance à se retrouver au dessus de l'ouest de l'Arctique. En ce sens, Da Silva et Lindzen (1993), Valdes et Hoskins (1991) et Nigam et al. (1988) ont émis l'hypothèse que le vortex polaire est une onde planétaire forcée, influencée par la localisation et l'orientation des montagnes rocheuses, et que cette onde varie en fonction des fluctuations de la circulation aux latitudes moyennes. En effet, ces fluctuations causent des variations dans l'écoulement en amont des montagnes rocheuses et par conséquent, des variations dans l'intensité et la position du vortex polaire. De manière générale, cette onde planétaire (avec comme centre l'archipel canadien) se

forme à l'est des Rocheuses, s'étend vers le sud avant de remonter vers les Grands-Lacs jusqu'au Groenland et ensuite au nord jusqu'au pôle. Par conséquent, il aurait également été possible de supposer que le Groenland pourrait produire une onde similaire. Or, le Groenland, bien que de hauteur comparable aux montagnes rocheuses, a une influence moins importante sur la circulation arctique parce que l'écoulement y est plus faible (Overland et al., 2002). Par conséquent, le climat de l'ouest de l'Arctique est donc plus facilement influencé par les variations du vortex polaire.

Bien que les différents points traités ici apportent certains éclaircissements sur le rôle du vortex polaire et de l'AO sur le climat arctique, les liens entre le vortex polaire et l'AO/NAO demeure encore mal compris. Il faudra encore plusieurs années et des études plus approfondies afin de déterminer leur importance réelle pour le climat arctique.

CONCLUSION

L'importance de la couverture médiatique vis-à-vis des changements climatiques et de l'augmentation des gaz à effet de serre est venue réaffirmer l'importance de la recherche face aux variations du climat. En effet, selon les récentes tendances observées, plusieurs changements majeurs sont déjà en cours : les températures augmentent de partout, la taille des glaciers et des banquises diminue à un rythme accéléré, la fonte du pergélisol s'accroît et la végétation progresse tranquillement vers le nord. Afin de mieux comprendre le climat et de prévoir les tendances futures et les impacts biophysiques et socio-économique associés à ces récents changements, le développement de modèle climatique est donc extrêmement important. Ainsi, la comparaison des modèles avec les observations est capitale pour la validation et le développement de modèles fiables, de même que pour la compréhension de leurs limitations lors des projections vers le futur. Le problème est que seulement quelques modèles couplés sont en mesure de reproduire les tendances majeures de SAT du 20^e siècle (3^e Rapport du GIEC, IPCC-2001). De plus, des problèmes de grande échelle sont toujours présents et plusieurs processus de petite échelle ne peuvent pas être résolus explicitement et doivent être approximés. En fait, selon le GIEC, ces derniers seraient responsables des plus grandes sources d'erreurs dans les modèles (4^e Rapport du GIEC, IPCC-2007).

Pour l'Arctique, ces difficultés peuvent s'expliquer par un certain nombre de critères. L'Analyse et la validation des simulations est difficile à cause de la faible densité des observations et de la faible distribution temporelle. Par conséquent, les ensembles de données d'observation diffèrent souvent considérablement d'un à l'autre (Serreze et Hurst, 2000; ACIA, 2005; Liu et al., 2005; Wiser et Jones, 2005). De plus, le climat arctique est caractérisé par des interactions non linéaires complexes entre l'atmosphère, les océans, les continents, la cryosphère et les écosystèmes, ce qui rend l'identification des phénomènes relativement difficile (4^e Rapport du GIEC, IPCC-2007). Ainsi, par exemple, la glace de mer joue un rôle crucial sur le climat arctique par son effet de rétroaction. La variabilité naturelle complique également de manière importante la détection et l'attribution des changements climatiques. En effet, le nombre important de patrons naturels de variabilité atmosphérique, tels l'oscillation de l'Atlantique Nord (NAO), l'oscillation arctique (AO), le patron Pacifique-Nord Amérique (PNA), le Northern Annular Mode (NAM), l'oscillation décennale du Pacifique (PDO) et l'oscillation est Arctique/ouest Arctique, engendre des variations importantes sur le climat arctique en produisant notamment des changements dans la vitesse et la direction des vents, les concentrations de glaces de mer, dans les transports de chaleur et d'humidité, les températures, les précipitations ainsi que dans l'intensité et le nombre de tempêtes (Hurrell et van Loon, 1997).

Compte tenu du fait que les modèles climatiques éprouvent de la difficulté à représenter les principaux patrons de tendances et de variabilité, l'objectif

principal de ce projet, dans le cadre de l'Année Polaire Internationale (API), était de vérifier si les différentes configurations du modèle canadien GEM étaient en mesure de représenter les patrons moyens de tendances et de variabilité atmosphérique en Arctique tels que ceux observés dans les réanalyses NCEP et ERA 40.

Ainsi, dans cette étude, une comparaison des différentes configurations du modèle GEM avec les réanalyses NCEP et ERA 40 dans l'Arctique a été réalisée pour la période 1978–2002. Pour la comparaison, nous nous sommes concentrés principalement sur la température de surface de l'air à 2m (SAT), la pression au niveau moyen de la mer (SLP) et les hauteurs du géopotential à 500 hPa (GZ). Ceci a permis entre autre :

- de tester le modèle GEM à différente résolution et selon différentes configurations
- d'analyser sur une base saisonnière et annuelle la structure des tendances et des anomalies
- d'évaluer les biais systématiques du model GEM
- d'extraire les informations existantes, particulièrement à propos des différents patrons de circulation
- de vérifier si le traitement de la physique dans le modèle est adéquat pour représenter les principales tendances et les patrons moyens de la variabilité atmosphérique observée

- d'identifier les variations du climat en fonction de la configuration de la grille

Dans la première partie, le modèle canadien GEM, les différentes configurations, et les réanalyses NCEP et ERA 40 ont été présentés. Le problème du manque de stations d'observation en Arctique a également été abordé. Dans la seconde partie, les résultats de la comparaison ont été présentés en fonction des moyennes annuelles et saisonnières. Ainsi, les tendances et les variances de SAT, de SLP et de GZ à 500 hPa ont été analysées. Les biais systématique de GEM par rapport aux réanalyses ont également été évalués. Dans la troisième et dernière section, les principaux patrons atmosphériques et les principaux modes d'oscillation ont été étudiés. Plusieurs points ont également été discutés, notamment les fortes tendances positives de SAT au printemps et à l'automne, les tendances négatives de SLP, les effets de l'oscillation arctique (AO) sur la glace de mer et les températures de surface de l'air (SAT) ainsi que les liens possible entre l'AO et le vortex polaire.

Ainsi, l'étude des différentes configurations de GEM montre que celles-ci sont généralement incapables de reproduire les principaux patrons de tendances et de variabilité atmosphérique sur l'Arctique. Ceci se traduit notamment par des différences relativement importantes d'une configuration à l'autre. Le fait que certaines différences persistent également

entre les réanalyses NCEP et ERA 40 rend également plus difficile la comparaison et l'identification des principaux patrons et processus.

Néanmoins, selon les différentes comparaisons qui ont été réalisées, il apparaît que les configurations de GEM s'entendent avec les réanalyses NCEP et ERA 40 pour simuler une plus forte variabilité de SAT, de SLP et de GZ à 500 hPa en hiver (DJF) sur l'Arctique. L'observation d'une plus forte variabilité au cours de l'hiver est admise par la communauté scientifique du fait que les différents modes de circulation atmosphérique sont surtout actifs au cours de cette saison. Par contre, les configurations GEM-LAM ont tendance à surestimer les variances de SLP et de GZ à 500 hPa sur l'Arctique au cours de l'hiver mais également au printemps et à l'automne.

Selon Trendberth et Hurrell (1994), les changements de circulation atmosphérique sur l'ouest de l'Arctique sont associés aux variations de la PNA et correspondent à une intensification et un déplacement vers l'est du système de basses pressions des Aléoutiennes. Bien que les réanalyses semblent montrer une intensification et un déplacement vers l'est de la dépression des Aléoutiennes durant l'hiver, seules les configurations GEM-VAR et GEM-LAM pilotée par ERA 40 sont en mesure de représenter les tendances négatives de SLP sur le nord du Pacifique au cours de cette saison. Les principales tendances positives et négatives de SAT sont par conséquent mal représentées. De plus, bien que les réanalyses montrent une baisse

significative des hauteurs du géopotential à 500 hPa en lien avec l'intensification de la dépression, seule la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 arrive à simuler des tendances négatives de GZ À 500 HPA durant l'hiver. Les différentes configurations de GEM éprouvent donc passablement de difficultés à représenter la PNA.

Il a été mis en évidence que certaines configurations de GEM éprouvent plus de difficultés par rapport à d'autres pour représenter les fortes tendances positives de SAT le long des côtes continentales au printemps et à l'automne. Ainsi, il a été déterminé que les anomalies de SAT observées le long du bassin arctique sont principalement produites par les advections de température de même que les variations et la fonte de la neige et de la glace de mer (Fu et al., 1999, cité par Overland et al., 2004; Overland et al., 2002). Par contre, l'augmentation des SAT en Europe et en Sibérie durant l'hiver est possiblement associée à l'intensification et l'extension vers le nord-est de la dépression islandaise (Polyakov et al., 2003) ainsi qu'à l'augmentation de la fréquence des cyclones provenant de l'Atlantique Nord (Skeie, 2000; Rogers et Mosley-Thompson, 1995). Ces cyclones arctiques qui traversent la mer de Barents et la mer de Kara produisent des anomalies de forts vents d'ouest/sud-ouest sur l'Europe et l'ouest de la Sibérie (Hurrell, 1995). Ces vents d'ouest/sud-ouest transportent de l'air maritime relativement chaud et pourraient être ainsi responsables des hausses de températures observées. Ces changements dans les tendances de SAT pourraient en fait être associés

au changement de polarité du patron de la NAO et de l'AO au cours des années 1980–1990. Le problème est que la majorité des configurations de GEM n'arrivent pas à reproduire les tendances et les variances de SLP et de SAT reliées à ces changements. En effet, même si la configuration GEM–LAM pilotée par ERA 40 arrive en partie à reproduire les tendances positives et négatives de SAT associées au changement de signe de la NAO (notamment les fortes tendances positives sur l'Europe et l'est de l'Arctique), elle n'est pas en mesure de représenter les changements de SLP qui leurs sont associés. Les différentes configurations de GEM n'arrivent donc pas à représenter les variations du patron de la NAO.

Les changements de l'indice AO vers de fortes valeurs positives au cours des années 1990 est aussi une solution possible pour expliquer les changements de SLP, de vent, de concentration de glace de mer et de SAT observés. Les réanalyses NCEP et ERA 40 montrent, tel que stipulé par Walsh, Chapman et Shy (1996) et Rigor et al. (2002), que les tendances des moyennes annuelles de SLP, pour la période 1978–2002, sont à la baisse sur l'ensemble de bassin arctique et ce, pour la majorité des saisons. Par contre, la majeure partie des configurations de GEM sont incapable des reproduire de telles tendances. Cette incapacité à simuler les tendances négatives de SLP sur l'océan Arctique se reflète également dans les tendances et variances de SAT et de GZ À 500 hPa. Néanmoins, la configuration GEM–LAM pilotée par ERA

40 semble le plus en mesure de simuler les tendances négatives de SLP sur une base annuelle et saisonnière.

Les configurations de GEM sont également incapables de reproduire l'intensification de l'anticyclone de Sibérie durant l'hiver tel qu'observé dans les réanalyses NCEP et ERA 40 et par Gong et Ho (2001). Par conséquent, celles-ci éprouvent de la difficulté à simuler les changements de vents et les advections de températures associées. En effet, les réanalyses montrent une intensification de l'anticyclone de Sibérie et par conséquent, des tendances négatives de SAT durant l'hiver. Par contre, l'inverse est observé pour le printemps et l'automne. Comme l'anticyclone de Sibérie se maintient la majeure partie de l'année, les variances de SLP, de GZ À 500 hPa et de SAT sont relativement faibles. Par contre, les variances de SAT montrent de plus fortes valeurs sur l'ouest de la Sibérie durant l'hiver, ce qui correspond à l'augmentation du passage des dépressions en provenance de la mer de Barents et des vents ouest/sud-ouest. Encore une fois, les configurations de GEM, à l'exception de la configuration GEM-LAM pilotée par ERA 40 n'arrivent pas à reproduire les tendances de SLP et de SAT durant l'hiver. Néanmoins, les configurations de GEM arrivent à simuler les principales tendances au printemps et à l'automne. Les plus faibles variances sont également bien représentées.

Finalement, il a été observé que les variances de SLP présentes dans les réanalyses NCEP et ERA 40 durant l'hiver correspondent relativement bien

avec celles du dipôle est Arctique/ouest Arctique proposées par Wu, Wang et Walsh (2006). Les anomalies de SAT dans la phase négatives coïncident aussi particulièrement bien avec celles générées par les réanalyses. Selon Thompson et Wallace (1998), les différentes anomalies observées durant l'hiver sont en fait contrôlées par la forte dynamique de l'atmosphère (ie. le vortex polaire). La récente intensification du vortex polaire au cours de l'hiver pourrait donc être reliée aux tendances négatives de SLP et de SAT observées sur le secteur ouest de l'Arctique durant l'hiver. Par conséquent, comme ces tendances négatives sont mal représentées par les configurations de GEM, il est fort possible que cela se répercute sur plusieurs patrons et processus de l'Arctique. En fait, selon Thompson et Wallace (1998), le réchauffement au dessus de l'Eurasie, le refroidissement sur l'ouest du Groenland, la persistance de l'anomalie cyclonique des vents de surface sur la mer de Beaufort (Walsh, Chapman et Shy, 1996) et l'augmentation de l'indice NAO vers des valeurs positives extrêmes (Hurrell, 1995) au cours des années 1980–1990 sont reliées à l'amplification du vortex polaire pendant l'hiver. Compte tenu des changements importants en Arctique en lien avec le vortex polaire durant l'hiver, il ne faut donc pas seulement considérer les processus radiatifs locaux mais également les processus des plus faibles latitudes qui forcent la circulation subarctique, en particulier via les gradients latitudinaux de température (Stenchikov et al., 2002, cité par Overland et al., 2004).

Ainsi, les différents modes internes de variabilité observés mettent donc l'emphase sur la difficulté de la détection et de l'attribution des changements climatiques en Arctique. Néanmoins, l'augmentation croissante d'observations par satellites facilitera sous peu l'étude de ces phénomènes. Il reste cependant beaucoup à faire, notamment en considérant le fait que les plus grandes incertitudes dans la modélisation du climat sont dus aux approximations dans les processus de fine échelle (4^e Rapport du GIEC, IPCC-2007) et à la présence de nuages et à leur réponse face au changement de l'albédo et de la radiation (Gates et al., 1996).

Finalement, le fait que les différentes configurations de GEM utilisaient des concentrations de glace de mer et des températures de surface de la mer (SST) interpolées à partir des moyennes mensuelles de l'analyse climatologique de PCMDI2/AMIP II pourrait être une source importante d'erreur. Il serait donc particulièrement intéressant de voir comment un modèle GEM couplé atmosphère-océan se comporterait par rapport aux modèle GEM actuel.

ANNEXES,
NOTES ET RÉFÉRENCES
ET
BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE 1 : Les grilles de type Arakawa-C

Les modèles à grilles représentent l'atmosphère sous forme de grilles cubiques tridimensionnelles (FIGURE 11-A1). La température, la pression et l'humidité (T , p et q) qui apparaissent au centre du cube, représentent les conditions moyennes dans tout le cube. De même, les vents est-ouest (u) et nord-sud (v) traversant les côtés du cube représentent la moyenne des composantes du vent entre le centre de ce cube et celui des cubes adjacents. Il en est de même aussi pour le mouvement vertical (w), représenté sur les faces supérieures et inférieures du cube. Autrement dit, les propriétés thermodynamiques moyennes à l'intérieur d'un cube de grille sont représentées au centre, alors que les vents sur les côtés correspondent à des flux qui entrent ou qui sortent du cube. Cet arrangement des variables à l'intérieur et autour du cube est appelé grille entrelacée ou décalée.

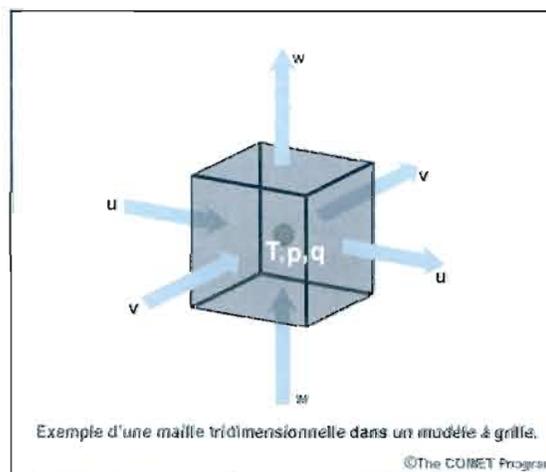


Figure 11-A1 : Exemple d'une maille dans un modèle à grille (The COMET program)

La [FIGURE 12-A2](#) montre un schéma dans lequel le cadre rouge représente la grille des u , le cadre vert, la grille de calcul de v décalée d'un demi-pas d'espace et le cadre bleu, la grille de calcul des scalaires, entrelacée entre la grille des u et des v .

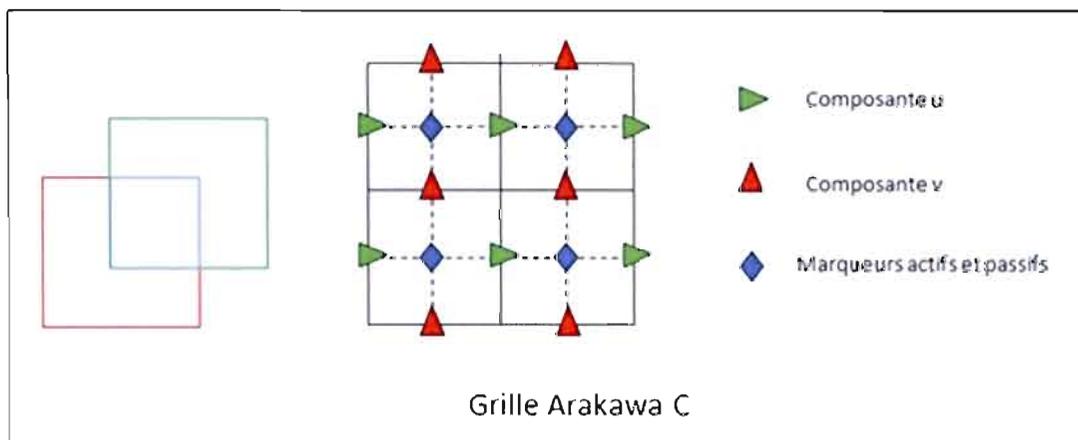


Figure 12-A2 : Schéma de grille décalée dans laquelle le cadre rouge représente la grille des u , le cadre vert, la grille de calcul de v décalée d'un demi-pas d'espace et le cadre bleu, la grille de calcul des scalaires, entrelacée entre la grille des u et des v

La grille Arakawa type C, basée sur ce principe, est utilisée pour calculer tous les paramètres dynamiques du modèle. Ainsi, le domaine du modèle est divisé également en n colonnes et m lignes pour un total de $n \times m$ cellules ([FIGURE 13-A2](#)). Les limites longitudinales et latitudinales correspondent aux sommets de la grille et non aux centres des cellules situées dans les quatre coins. Les conditions frontières doivent être spécifiées sur les côtés de la grille, plus particulièrement aux nœuds de u et v , mais aussi la valeur moyenne ζ de la maille.

ANNEXE 2 : Le schéma ISBA

Le type de végétation utilisé par le schéma ISBA en Amérique du Nord provient d'une base de données climatologiques du USGS (United States Geological Survey) sur une grille de 1 km par 1 km. Elle inclut 24 types de végétation. Les caractéristiques de la végétation, comme l'indice de surface foliaire, la fraction de végétation et la profondeur d'enracinement, changent de jour en jour dans le modèle selon un calendrier préétabli. Les variables de végétation sont moyennées de façon à fournir au modèle GEM des valeurs représentatives pour ses mailles.

Le schéma ISBA utilise un modèle de sol à deux couches. Une fois par jour, à 00Z, au moyen d'une technique appelée assimilation séquentielle, les valeurs de la température et de l'humidité relative au niveau de 2 mètres (le niveau de l'abri Stevenson) des prévisions GEM sont utilisées pour modifier le champ d'humidité du sol sur la grille du modèle. Des mesures réelles d'humidité du sol sont aussi utilisées dans ce processus.

Le modèle GEM calcule ensuite l'évaporation et l'évapotranspiration de la surface en fonction des caractéristiques d'humidité et de végétation du sol. Une description plus complète est disponible dans Bélair et al., 2003 a et b.

ANNEXE 3 : Assimilation des données, système d'assimilation et cycle d'assimilation

L'assimilation des données est le processus par lequel les observations entre dans le cycle de prévision du modèle. Ces observations fournissent une protection contre la croissance des erreurs dans le modèle.

Le but de l'assimilation des données est de fournir des conditions initiales qui permettront au modèle de produire la meilleure prévision possible. Elle doit donc créer une analyse qui tient compte des éléments numériques, de la dynamique, de la physique et de la résolution du modèle. Pour ce faire, elle utilise aussi une prévision à court terme (champ d'essai) comme base d'analyse et lui apporte une série de petites corrections basées sur les nouvelles informations fournies par les observations avant de les interpoler sur la grille du modèle.

Le système d'assimilation de données (ex : 3DVAR) prend ensuite les corrections basées sur les observations de tous les différents types d'observations, avec leurs caractéristiques d'erreurs et leur densité d'observation, et les convertit en un champ régulier de changements dans les variables de l'analyse (pronostique).

Le cycle d'assimilation de données comprend donc :

- l'ingestion des données
- le décodage des observations
- l'élimination des mauvaises observations
- le calcul des corrections reliées aux observations
- la comparaison et l'ajustement des données au champ d'essai
- l'interpolation des données sur la grille du modèle pour faire la prévision

Module COMET : Comprendre l'assimilation des données: Comment les modèles créent leurs conditions initiales

http://www.meted.ucar.edu/resource_modlist.php

ANNEXE 4 : Information générale sur l'analyse

L'analyse, ou le fichier contenant les conditions initiales, est un fichier contenant un certain nombre de champs de l'atmosphère et de la surface et utilisé par le modèle pour initialiser la simulation. Ces divers champs doivent notamment couvrir toute la région utilisée comme grille du modèle et les dates doivent correspondre avec la date du début de la simulation.

Champs atmosphériques

Les champs atmosphériques peuvent être représentés selon les niveaux du modèle ou selon les niveaux de pression (idéalement sur les mêmes niveaux que celui du modèle). Voici le minimum de champs requis pour initialiser la simulation :

Champs en fonction des niveaux de pressions ou des niveaux du modèle:

- température (TT)
- vents horizontaux (UU, VV)
- humidité (relative ou spécifique) (HR or HU)
- hauteurs du géopotentiel (GZ)
- si disponible, la quantité d'eau liquide et solide dans l'atmosphère (QC)

Champs de surface (pour le schéma ISBA)

I0 : température de la surface et du sol

I1 : contenu volumétrique de l'eau contenu dans le sol

I2 : contenu volumétrique de la glace contenu dans le sol

I3 : quantité d'eau retenue par la végétation

I4 : quantité d'eau contenue dans la neige

I6 : albédo de la neige¹

I7 : température de la glace de mer

I8 : épaisseur de la glace de mer

I9 : température des glaciers

SD : épaisseur de neige

DN : densité de la neige en kg m^{-3}

TM : température de surface de la mer

LG : fraction de glace de mer (GL dans la sortie du modèle)

ANNEXE 5 : Carte des régions de l'Arctique

- 1 : Océan Arctique
- 2: Mer de Barents
 - Archipel de Svalbard
 - Archipel François-Joseph
 - Nouvelle Zemble
- 3: Mer de Kara
 - Plaines de Sibérie septentrionale (secteur ouest)
- 4: Mer des Laptev
 - Plaines de Sibérie septentrional (secteur est)
- 5: Mer de Sibérie orientale
- 6: Mer des Tchouktches
- 7: Mer de Beaufort
- 8: Archipel canadien
- 9: Groenland (secteur nord)
 - Baie de Baffin
- 10: Mer du Groenland
 - Détroit de Fram
- 11: Pays scandinaves
 - Europe de l'Est
 - Russie
- 12: Plaines de Sibérie occidentale
- 13: Plateau de Sibérie centrale
- 14: Monts de Verkhoïansk
 - Plateau de l'Anadyr
 - Hauteurs de la Kolyma
 - Kamtchalka
- 15: Détroit et mer de Béring
- 16: Alaska
 - Yukon
- 17: Territoires du Nord-Ouest
 - Baie d'Hudson
- 18: Détroit de Davis
 - Groenland (secteur sud)
- 19: Mer de Norvège
 - Islande

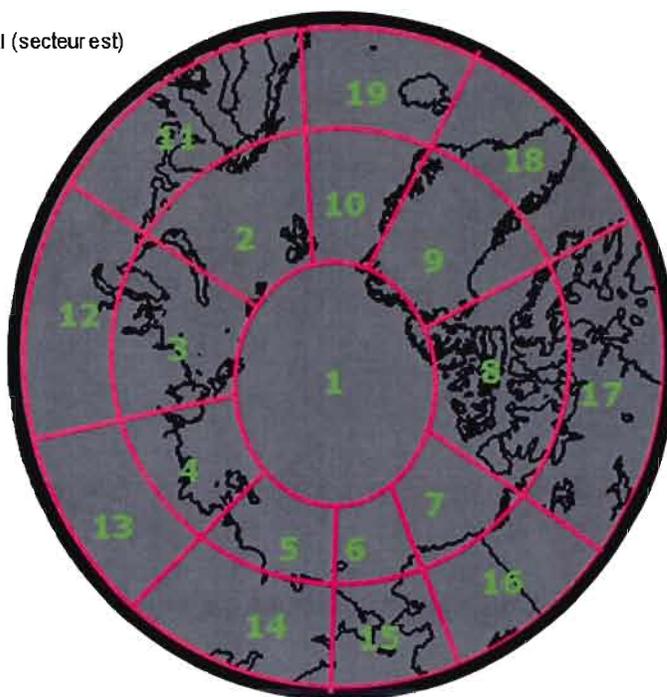


Figure 14-A5 : Carte des régions de l'Arctique

ANNEXE 6 : Grilles des configurations de GEM (version 3.3.0)

GEM-global (version 3.3.0)

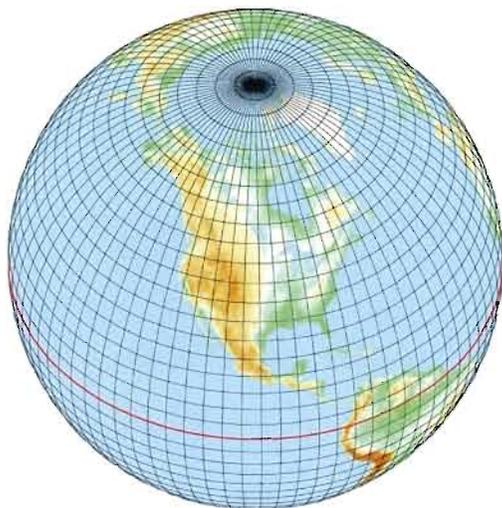


Figure 15-A6 : Configuration GEM-global (version 3.3.0)

Grd_typ_S	= 'G'		
Grd_ni	= 130	Grd_nj	= 130
Grd_dx	= 2.0	Grd_dy	= 2.0
Grd_dxmax	= 2.0	Grd_dymax	= 2.0

GEM-VAR sur l'Arctique (version 3.3.0)

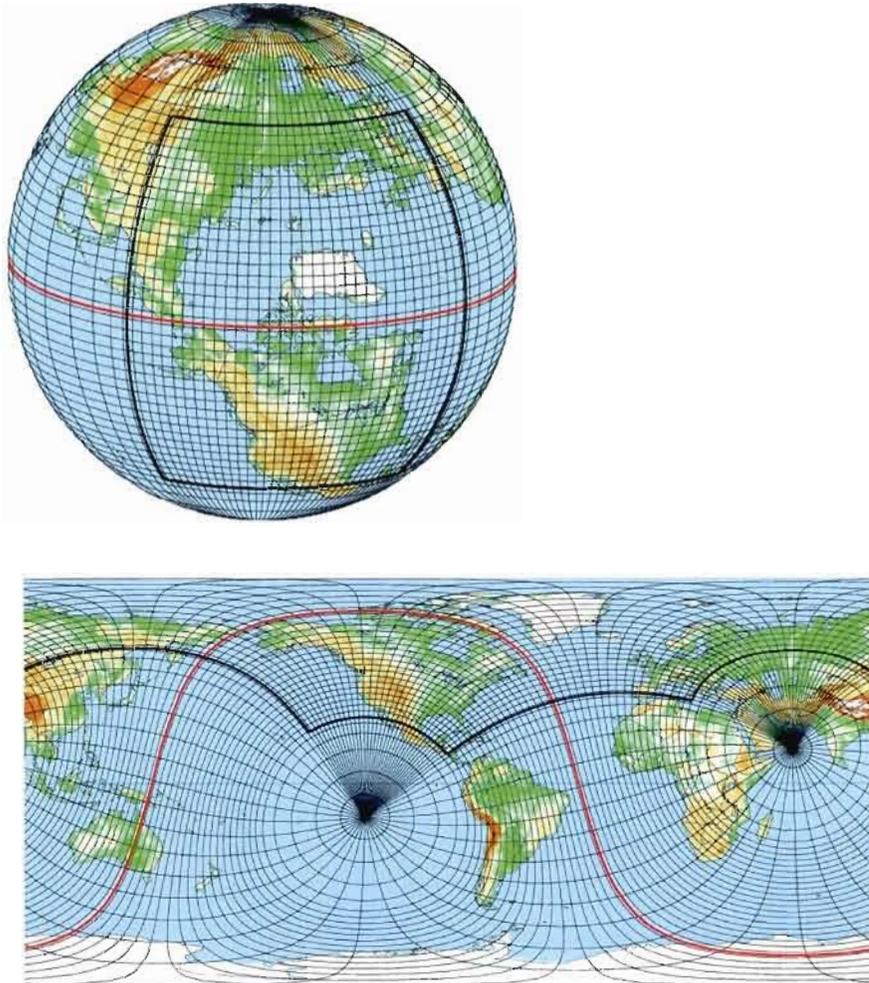


Figure 16-A6 : Configuration GEM-VAR (version 3.3.0)

Grd_typ_S	= 'GV'		
Grd_ni	= 325	Grd_nj	= 2044
Grd_nila	= 172	Grd_njla	= 188
Grd_dx	= 0.5	Grd_dy	= 0.5
Grd_dxmax	= 2.0	Grd_dymax	= 2.0
Grd_xlon1	= 72.00	Grd_xlat1	= -85.00
Grd_xlon2	= 30.00	Grd_xlat2	= -40.00

GEM-LAM pilotée par GEM et GEM-LAM piloté par ERA 40 sur l'Arctique
(version 3.3.0)

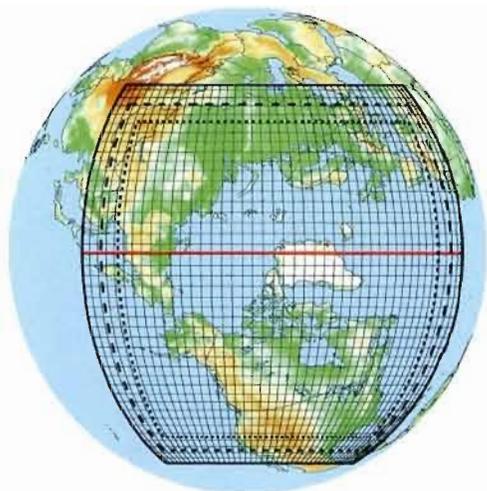


Figure 67-A6 : Configuration GEM-LAM (version 3.3.0)

Grd_typ_S	= 'LU'		
Grd_ni	= 216	Grd_nj	= 208
Grd_dx	= 0.5	Grd_dy	= 0.5
Grd_iref	= 3	Grd_jref	= 102
Grd_lonr	= 137.5	Grd_latr	= -10.00
Grd_xlon1	= 60.00	Grd_xlat1	= 90.00
Grd_xlon2	= -30.00	Grd_xlat2	= 0.00
Glb_pil	= 12	, Hblen	= 10

http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn/gem/gem-climate/Version_3.3.0/GEM_in_climate_mode.html

http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn/gem/gem-climate/Version_3.3.0/Recent_runs_grids.html#arctic_lam_v330_org

ANNEXE 7 : Organisation des figures

STATISTIQUE					
VARIABLE ANALYSEE (unité)					
	Moyenne annuelle	SON	DJF	MAM	JJA
GEM-VAR	FIGURE 1A	FIGURE 2A	FIGURE 3A	FIGURE 4A	FIGURE 5A
GEM-global	FIGURE 1B	FIGURE 2B	FIGURE 3B	FIGURE 4B	FIGURE 5B
GEM-LAM ppm global	FIGURE 1C	FIGURE 2C	FIGURE 3C	FIGURE 4C	FIGURE 5C
GEM-LAM Era 40	FIGURE 1D	FIGURE 2D	FIGURE 3D	FIGURE 4D	FIGURE 5D
ERA 40	FIGURE 1E	FIGURE 2E	FIGURE 3E	FIGURE 4E	FIGURE 5E
NCEP	FIGURE 1F	FIGURE 2F	FIGURE 3F	FIGURE 4F	FIGURE 5F

Figure 78-A7 : Organisation des figures

Chaque figure correspond à une lettre et un numéro. La lettre correspond à la période temporelle et le chiffre à la configuration du modèle ou la réanalyse utilisée. Un # sera utilisé pour faire référence à toutes les configurations et les réanalyses. Les lettres « T » pour tendances ou « V » pour variances précéderont le code de la figure :

- | | |
|----------------------------------|-----------------------|
| 1. GEM-VAR | Y. Moyennes annuelles |
| 2. GEM-global | A. Automne (SON) |
| 3. GEM-LAM piloté par GEM-global | H. Hiver (DJF) |
| 4. GEM-LAM piloté par ERA 40 | P. Printemps (MAM) |
| 5. Réanalyse ERA 40 | E. Été (JJA) |
| 6. Réanalyse NCEP | |

Exemple : La variance de SLP durant l'hiver de la configuration GEM-LAM piloté par ERA 40 sera définie comme la figure « SLP : FIGURE V-4H »

NOTES ET RÉFÉRENCES

1. Même si la vapeur d'eau est de loin le plus grand gaz à effet de serre, d'autres gaz, comme le gaz carbonique (CO_2), l'ozone (O_3), le méthane (CH_4) et les CFC, jouent aussi un rôle important dans le processus d'absorption du rayonnement infrarouge. L'absorption du rayonnement infrarouge par les gaz à effet de serre entraîne un réchauffement de la basse troposphère. Ceci se traduit par une augmentation de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère et donc, par une amplification du réchauffement initial. C'est ce qu'on appelle la rétroaction de la vapeur d'eau.
2. Les tendances dont le niveau de confiance est de 95% se situent entre -0.21 and 1.21 pour l'automne, entre -1.57 et -0.21 pour l'hiver, entre -0.01 et 1.11 pour le printemps et entre 0.71 et 1.73°C décennie⁻¹ pour l'été. Les tendances qui sont significatives avec un niveau de confiance de 95% sont marquées avec de petits points blancs; les tendances qui sont significatives à 99% sont identifiées avec de petits points noirs.
3. La théorie présentée ici se veut plus ou moins une synthèse des connaissances du modèle GEM, des différents schémas physiques/microphysiques pouvant être utilisés et des observations rapportées à propos des différentes configurations. Le modèle GEM étant en constant développement, il est difficile de maintenir cette synthèse à jour.
4. Voir ANNEXE 1: Les grilles de type Arakawa
5. En mathématiques, dans le domaine de l'analyse numérique, les méthodes de Galerkin sont une classe de méthodes permettant de transformer un problème continu (par exemple une équation différentielle) en un problème discret.
6. La partie dynamique du modèle décrit l'état général d'un fluide : l'atmosphère. Les calculs de la partie dynamique dépendent :
 - des caractéristiques de la géométrie horizontale choisie pour le modèle (globale, variable, limitée)
 - des coordonnées verticales choisies
 - des caractéristiques du relief résolues par la grille du modèle
 - des méthodes numériques (points de grille ou spectral, explicite ou semi-implicite, eulérien ou semi-lagrangien)
 - des variables retenues pour décrire l'état du modèle (variables d'état)
7. Les équations prognostiques sont résolues pour les composantes horizontales du vent, la température, l'humidité spécifique, le contenu en eau liquide et la pression de surface. Les modèles hydrostatiques, lesquels supposent un équilibre entre le poids de l'atmosphère et la force du gradient vertical de pression (sans accélération verticale – valable seulement pour les systèmes d'échelle synoptique et pour certains phénomènes de méso-échelle), utilisent l'équation de continuité pour calculer le mouvement vertical. Ils se servent de paramétrisations statiques pour exprimer les changements causés par les processus non-hydrostatiques. Les modèles non-hydrostatiques utilisent plutôt une combinaison de

divergence horizontale et de poussée pour déterminer les mouvements verticaux et les accélérations verticales.

8. Développé originairement par Noilhan and Planton (1989); voir ANNEXE 2: Le schéma ISBA
9. La physique d'un modèle cherche à évaluer l'effet des processus qui jouent un rôle significatif dans l'évolution du fluide atmosphérique mais qui ne sont pas pris en compte dans la partie dynamique. Autrement dit, l'ensemble des équations doit essayer de tenir compte des effets des processus qui ne peuvent être directement prévus par le modèle, soit à cause de la complexité des processus à simuler, soit parce qu'ils interviennent à une échelle trop petite pour pouvoir être inclus directement dans le modèle. Les effets des processus de la physique sur les variables d'état de la dynamique du modèle sont calculés dans des paramétrisations physiques (petit modèle souvent très simplifiés qui permettent d'évaluer l'effet moyen sur une maille des processus non résolu explicitement par la dynamique). L'ensemble des processus à paramétrer varie en fonction des objectifs de la prévision numérique (prévision climatique, modélisation de processus de fine échelle, prévision opérationnelle) et des choix faits dans la dynamique du modèle. La physique traite les échanges entre l'atmosphère et les autres composantes du système climatique (sol, océan, biosphère cryosphère). C'est aussi dans la physique que sont calculées les modifications des champs atmosphériques dues au bilan radiatif et qu'est évaluée l'influence des changements d'état de l'eau sur les particules du fluide atmosphérique. La physique du modèle permet ainsi de tenir compte de l'effet moyen sur une maille des processus (d'une échelle inférieure- sous maille – ou non) non résolus par la dynamique. La physique du modèle permet en particulier de calculer :
 - les termes d'échange de chaleur
 - la chaleur latente libérée ou utilisée dans les changements de phase de l'eau
 - l'effet moyen des flux turbulents associés aux processus non décrit à l'échelle de la maille
10. Des schémas de radiation aux courtes longueurs d'onde de Fouquart and Bonnel (1980) et aux longues longueurs d'onde de Garand and Mailhot (1990) sont utilisés pour la troposphère et la basse stratosphère (en dessous de 30 hPa) tandis qu'un schéma de radiation aux longues longueurs d'onde de Fomichev and Blanchet (1995) est utilisé pour la stratosphère au dessus de 30 hPa.
11. En anglais «deep and shallow moist convective processes»
12. En anglais «subgrid-scale orographic gravity-wave drag»
13. En anglais «low-level orographic blocking»
14. Un problème mathématique bien posé devrait avoir les propriétés suivantes :
 1. Une solution existe
 2. La solution est unique
 3. La solution dépend de façon continue des données

15. Voir ANNEXE 3 : Assimilation des données - système d'assimilation, cycle d'assimilation
16. L'état initial de l'atmosphère est calculé à partir de l'ensemble des observations disponibles et d'une prévision précédente valable pour cet instant (l'ébauche – apporte des informations dans les zones où il n'y a pas d'observations) dans un processus appelé assimilation des données. Dans un système d'assimilation variationnelle 3D-VAR, l'analyse est déterminée comme la solution d'un problème de minimisation entre l'analyse et l'ébauche et l'ébauche et l'observation sélectionnée. Le principe de base de l'assimilation variationnelle 4D-VAR est le même que celui du 3D-VAR mais en ajoutant le temps comme dimension de sorte que le processus de minimalisation se fait sur une fenêtre temporelle de quelques heures qui permet ainsi d'assimiler les observations asynchrones.
17. La technique des modèles à résolutions variables à été originalement proposée en 1977 par Schmidt pour les modèles spectraux. L'année suivante, Staniforth et Mitchell (1978) ont introduit cette idée aux modèles globaux à points de grille. Ce n'est officiellement qu'au milieu des années 1990 que cette méthode a officiellement pris son envol (sous la forme de configuration spectrale) via le modèle ARPEGE (Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle) de Météo-France.
18. [http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn/gem/gem-climate/Version 3.3.0/GEM in climate mode.html](http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn/gem/gem-climate/Version%203.3.0/GEM%20in%20climate%20mode.html)
19. [http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn/gem/gem-climate/Version 3.3.0/Recent runs grids.html#arctic lam v330 org](http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn/gem/gem-climate/Version%203.3.0/Recent_runs_grids.html#arctic_lam_v330_org)
20. La liste des données d'observation utilisée pour ERA 40 sont disponible dans la publication du ECMWF, The ERA-40 Archive, ERA-40 Project Report Series No. 17, pp 3 ainsi que dans l'annexe B de Uppala et al. (2005), partie B
21. Pour plus de détails, voir ERA-40 Report Series No. 4
22. Pour plus de détails voir ERA-40 Report Series No. 12
23. Des moyennes journalières et mensuelles sont également disponibles.
24. Pour plus de détails sur les sorties disponibles, voir Kalnay et al., 1996, section 6 ainsi que les appendices A-B-C
25. La liste des données d'observation utilisée NCEP/NCAR sont disponible dans la publication de Kalnay et al. (1996) pp 438.
26. Les couleurs rouge et plus chaude correspondent à des valeurs $> 0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$ tandis que les couleurs bleu foncé et plus froides correspondent à des valeurs $< -0.096^{\circ}\text{C an}^{-1}$. Ces valeurs serviront de référence pour la description des maximums de tendances de SAT.
27. Les couleurs bleu foncé et plus chaude correspondent à des valeurs $> 6^{\circ}\text{C}^2$. Cette valeur servira pour la description des zones de maximum de variances de SAT.

28. Par exemple, Semenov et Bengtsson (2003) associent les fortes variances de SAT observées durant l'hiver au dessus du nord de l'Europe et de l'Asie à la variabilité de la NAO.
29. En effet, l'indice PNA est passé de valeurs négatives à des valeurs fortement positives au début des années 1980. Par la suite, il est demeuré relativement stable et c'est seulement vers la fin des années 1990 et le début des années 2000 qu'il a commencé à redescendre vers des valeurs plus faibles (non montré). Le mode Pacifique-Nord-Amérique est relié au mode ENSO. Le changement de température de la surface de l'océan dans la partie tropicale du Pacifique entre les années La Nina (froid) et El Nino (chaud) produit un changement de localisation de la convection tropicale dans le Pacifique. La convection tropicale agit comme une source d'onde de Rossby dans la haute troposphère. Ces ondes peuvent se propager et causer des anomalies des hauteurs du géopotential à 500 hPa et de vitesses du vent à 200 hPa au dessus de l'Amérique du Nord. Le patron de distribution des hauteurs et des vitesses du vent dépend de la phase d'ENSO. C'est donc les fluctuations entre El Nino et La Nina qui sont principalement responsables du mode d'oscillation Pacifique-Nord-Amérique.
30. Il en va également de même pour les advections d'air froid sur les régions de l'ouest du Groenland, de l'Arctique canadien et du nord-ouest de l'Atlantique Nord.
31. Si cette hypothèse s'avère exacte, il apparait de manière relativement évidente que les différentes configurations de GEM sont aussi en mesure de reproduire les plus grandes variabilités de SLP et de SAT qui lui sont associées (SAT et SLP: FIGURE V-2A à FIGURE V-2D et FIGURE V-3A à FIGURE V-3D) puisque les conditions de glace de mer et les températures de surface de l'océan (SST) ont été utilisées pour piloter les données de surface.
32. Mysak et Venegas (1998) mentionnent entre autre que les changements de pression (et in extremis, de la direction des vents), notamment la diminution de la cellule de haute pression située sur la mer de Beaufort et l'amplification de la cellule de basses pressions sur l'Europe, sont considérés comme des facteurs importants pour expliquer la variabilité de la SAT observée.
33. L'anomalie cyclonique de SLP sur l'est de l'Arctique implique une augmentation de la divergence de la glace de mer et la formation de zones d'eau libre (Rigor et al., 2002). La quantité de glace de mer quittant ainsi la mer de Barents et la mer de Kara, de même que le nord du Canada et du Groenland (Wu, Wang and Walsh, 2006), devient donc plus importante, ce qui favorise les pertes de chaleur et les anomalies positives de SAT.
34. Le patron de circulation associé à la NAO (principalement du sud/sud-ouest) ne permet pas non plus d'expliquer le refroidissement observé sur la région située au sud de la mer de Kara (Overland et al., 2004). Les réanalyses NCEP et ERA 40 montrent en effet des tendances négatives de SAT durant l'automne, l'hiver et l'été ainsi que dans les moyennes annuelles (SAT : FIGURE T-#E et FIGURE T-#F).
35. Des changements dans la couverture de glace peuvent aussi venir altérer la haute pression de Sibérie et la basse pression des Aléoutiennes (Yamazaki, 1989, cité par Trenberth, 1990).
36. NCEP seulement

37. Overland et al. (2002) ont même noté que l'anomalie chaude en surface avait tendance à persister au cours du mois de mai.
38. En effet, les observations montrent une réduction significative de la glace de mer en accord avec le réchauffement au dessus de l'océan (Rigor et al, 2002)
39. Les contrastes terre-eau (dans les endroits où la mer est libre de glace) sont néanmoins beaucoup moins importants que durant l'hiver.
40. C'est pourquoi les tendances de SAT observées dans les réanalyses demeurent relativement nulles au cours de l'été (SAT : [FIGURE T-5E](#) et [FIGURE T-5F](#)).
41. Walsh, Chapman et Shy (1996) mentionnent notamment que puisque les tendances de SLP ont été négatives au cours des années 1980-1990, la vorticité cyclonique des vents a augmenté jusqu'à des valeurs extrêmes sur le bassin arctique comparativement aux dernières décennies.
42. La haute pression situ e sur la mer de Beaufort est donc plus faible et la circulation cyclonique sur le nord de la mer de Kara et la mer des Laptev plus forte (Rigor et al., 2002)
43. En fait, mars et avril apparaissent comme le moment de l'année où les conditions de la basse stratosphère sont le plus fortement reli es à celles près de la surface (les anomalies mensuelles de températures dans la troposphère tendent à être hors phase par rapport à celles de la basse stratosphère (Overland et al., 2002); autrement dit, les anomalies froides de température observ es dans la basse stratosphère sont accompagn es par des anomalies chaudes dans la basse troposphère).

RÉFÉRENCES

Alpert, P. and al., 1996: *The relative roles of lateral boundaries, initial conditions, and topography in mesoscale simulations of lee cyclogenesis*, Journal of Applied Meteorology, Vol. 35, pp. 1091–1099

Ambaum, M.H.P. and B.J. Hoskins, 2002: *The NAO troposphere-stratosphere connection*, Journal of Climate, Vol. 15, pp. 1969–1978

Arakawa, A., 1984: *Boundary conditions in limited-area models*, Proceedings of the Workshop on Limited-Area Numerical Weather Prediction Models for Computers of Limited Power, Short- and Medium- Range Weather Prediction Research Publication Series No. 13 (WMO/TD No. 19), World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, pp. 403–436

Arctic monitoring and assessment program (AMAP), 2006: *Arctic pollution issues – Acidifying pollutants, Arctic haze and acidification in the Arctic*, Oslo, Norway

Arctic monitoring and assessment program (AMAP), 1998: *Arctic pollution issues – Acidifying pollutants, Arctic haze and acidification in the Arctic*, Oslo, Norway

Arctic climate impact assessment (ACIA), 2005, Cambridge University Press, New-York, pp. 1020

Arctic climate impact assessment (ACIA), 2004: *Impacts of a warming Arctic*, Cambridge University Press, New-York, pp. 139

Barnet, T.P. 1978a: *Estimating variability of the surface air temperature in the Northern Hemisphere*, Monthly Weather Review, Vol. 106, pp. 1353–1367

- Baumhefner, D.P., and D.J. Perkey, 1982: *Evaluation of lateral boundary errors in a limited-domain model*, Tellus, Vol. 34, pp. 409-428
- Bélair, S. and al., 2005: *Boundary-layer and shallow cumulus clouds in a medium-range forecast of a large-scale weather system*, Monthly Weather Review, Vol.133, pp. 1938-1960
- Bélair, S. and al., 2003a: *Operational implementation of the ISBA land surface scheme in the Canadian regional weather forecast model. Part I: Warm season results*, Journal of Hydrometeorology, Vol. 4, pp. 352-370
- Bélair, S. and al., 2003b: *Operational implementation of the ISBA land surface scheme in the Canadian regional weather forecast model. Part II: Cold season results*, Journal of Hydrometeorology, Vol.4, pp.371-386
- Benoit, R., J. Côté and J. Mailhot, 1989: *Inclusion of a TKE boundary layer parameterization in the Canadian regional finite-element model*, Monthly Weather Review, Vol.117, pp.1726- 1750
- Benkovitz and al., 1995: *Gridded inventories of anthropogenic emissions of sulfur and nitrogen*, Journal of Geophysical Research, Vol. 101, pp. 29239
- Blanchet, J.-P., E. Girard and C. Jones, (2008): *Detection and Assessment of the Dehydration-Greenhouse Feedback in the Arctic: A contribution to the Hydrological Impact of Arctic Aerosols (HIAA) for the International Polar Year*, ESCER-UQAM
- Blanchet, J.-P. and E. Girard, 1994: *Arctic greenhouse cooling*, Nature, Vol. 371, pp. 383
- Bradley, R.S., and P.D. Jones, 1985: *Data bases for isolating the effects of the increasing carbon dioxide concentration, in detecting the climatic effects of increasing carbon dioxide*, edited by M. C. MacCracken and F. M. Luther, U.S. Dep. of Energy, Washington, D. C., pp. 29-53

- Caya, D., and R. Laprise, 1999: *A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model: The Canadian RCM*. Monthly Weather Review Vol. 127 (3), pp. 341–362
- Cess, R.D. and al., 1991: *Determining surface solar absorption from broadband satellite measurements for clear skies: Comparison with surface measurements*, Journal of Climate, Vol. 4, pp. 237–247
- Chapman, W.L. and J.E. Walsh, 1993: *Recent variation of sea ice and air temperature in high latitudes*, Bulletin of American Meteorological Society, Vol. 74, pp. 33–47
- Comiso, J.C., 2006: *Arctic warming signals from satellite observations*, Weather, Vol. 61, pp. 70–76
- Comiso, J.C., 2006: *Abrupt decline in the Arctic winter sea ice cover*, Geophysical Research Letters, Vol. 33, L18504
- Comiso, J.C., 2003: *Warming trends in the Arctic from clear sky satellite observations*, Journal of Climate, Vol. 16, pp. 3498–3510
- Côté, J. and al., 1998a: *The operational CMC-MRB global environmental multiscale (GEM) model. Part I: Design considerations and formulation*, Monthly Weather Review, Vol. 126, pp. 1373–1395
- Côté, J. and al., 1998b: *The operational CMC-MRB global environmental multiscale (GEM) model. Part II: Mesoscale results*, Monthly Weather Review, Vol. 126, pp. 1397–1418
- Da Silval, A.M. and R.S. Lindzen, 1993: *On the establishment of stationary waves in the Northern Hemisphere winter*, Journal of Atmospheric sciences, Vol. 50, pp. 43–61

Davis, R.E., 1976: *Predictability of sea temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean*, Journal of Physical Oceanography, Vol. 6, pp. 249-266

Deardorff, J.W., 1978: *Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation*, Journal of Geophysical Research, Vol. 83, pp. 1889-1903

Dorn, Wolfgang, Klaus Dethloff and A. Rinke, 2000: *Distinct circulation states of the Arctic atmosphere induced by natural climate variability*, Journal of Geophysical Research Letters, Vol. 105, No. D24, pp. 29659-29668

ECMWF, The ERA-40 Archive, ERA-40 Project Report Series No. 17, pp. 3

ERA-40 Report Series No. 4

ERA-40 Report Series No. 12

Fomichev, V.I. and J.-P. Blanchet, 1995: *Development of the New CCC/GCM longwave radiation model for extension into the middle atmosphere*, Atmosphere and Ocean, Vol. 33, pp. 513- 531

Fouquart, Y. and B. Bonnel, 1980: *Computations of solar heating of the Earth's atmosphere: A new parameterization*, Contributions to Atmospheric Physics, Vol. 53, pp. 35-62

Fox-Rabinovitz, M. and al., 2006: *Variable resolution circulation models: Stretched-grid model intercomparison project (SGMIP)*, Journal of Geophysical Research, Vol. 111, pp. 21

Fox-Rabinovitz, M. et al., 1997: *A finite-difference GCM dynamical core with a variable resolution stretched grid*, Monthly Weather Review, Vol. 125, pp. 2943-2968

Fu, C. and al., 1999: *Changes in atmospheric circulation over northern hemisphere oceans associated with the rapid warming of the 1920s*, International Journal of Climatology, Vol. 19, pp. 581–606

Garand, L. and J. Mailhot, 1990: *The influence of infrared radiation on numerical weather forecasts*, in Proceedings of the Seventh Conference on Atmospheric Radiation, July 23– 27 1990, San Francisco, pp. J146– J151, American Meteorological Society

Gates, W.L. et al., 1996: *Climate Models – Évaluation in climate change 1995: The Science of Climate Change*, J.T. Houghton et al. editions, Cambridge University Press, pp. 229–284

Gauthier, P. et al., 1996: *Implementation of a 3D variational analysis at the Canadian Meteorological Centre*, Preprints, 11th Conf. on Numerical Weather Prediction, Norfolk, Virginia, American Meteorological Society, Vol.XX, pp. 232–234

Gillett, N. P., Allen, M. R., and K. D. Williams, 2002: *The role of stratospheric resolution in simulating the Arctic Oscillation response to greenhouse gases*, Geophysical Research Letters, Vol. 29, pp. 1500

Gong, D.Y. et C.H. Ho, 2001: *The Siberian high and climate change over middle to high latitude Asia*, Theoretical and Applied Meteorology, Vol. 72, pp.1–9

Hansen, J. and al., 1999: *GISS analysis of surface temperature change*, Journal of Geophysical Research, Vol. 114, pp. 30997–31022

Hoerling, M.P., J.W. Hurrell, and T. Xu, 2001: *Tropical origins for recent North Atlantic climate change*, Science, Vol. 292, pp. 90–92

Holland, M. M., 2003: *The North Atlantic Oscillation–Arctic Oscillation in the CCSM2 and its influence on Arctic climate variability*, Journal of Climate, Vol. 16, pp. 2767–2781

Hurrell, J.W., 1996: *Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on Northern Hemisphere temperature*, Geophysical Research Letters, Vol. 23, pp. 665–668

Hurrell, J.W., 1995: *Decadal trends in the North Atlantic Oscillation regional temperatures and precipitation*, Science, Vol. 269, pp. 676–679

Hurrell, J.W. and H. van Loon, 1997: *Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation*, Climatic Change, Vol. 36, pp. 301–326

Intergovernmental Panel on Climate Changes (IPCC), 2007: *4^e Assessment Report of the Intergovernmental Panel of climate Change*

Intergovernmental Panel on Climate Changes (IPCC), 2001: *3^e Assessment Report of the Intergovernmental Panel of climate Change*

Jones, P.D. and al., 2001: *Adjusting for sampling density in grid box land and ocean surface temperature time series*, Journal of Geophysical Research, Vol. 106, pp. 3371–3380

Jones, P.D. and al., 1999: *Surface air temperature and its changes over the past 150 years*, Review of Geophysics, Vol. 37, pp. 173

Jones, P.D., and al., 1986: *Northern hemisphere surface air temperature variations, 1851–1984*, Journal of Climate Application to Meteorology, Vol. 25 pp. 161–179

Jones, R.G. and al., 1997: *Simulation of climate change over Europe using a nested regional–climate model. II: Comparison of driving and regional model responses to a doubling of carbon dioxide*, Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, Vol. 123, pp. 265–292

- Jones, R.G. and al., 1995: *Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries*, Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, Vol. 121, pp. 1413–1449
- Kahl, J.D.W. and al., 1993: *Absence of evidence for greenhouse warming over the Arctic Ocean in the past 40 years*, Nature, Vol. 361, pp. 335–337
- Kain, J.S. and J.M. Fritsch, 1990: *A one-dimensional entraining/detraining plume model and application in convective parameterization*, Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 47, pp. 2784–2802
- Kalnay, E. and al., 2001: *The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation*, Bulletin of American Meteorological Society, Vol. 82, pp. 247–268
- Kalnay, E. and al., 1996: *The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project*. Bulletin of American Meteorological Society, Vol. 77, pp. 437–471
- Kanamitsu, M. and al., 1991: *Recent change implemented into the global forecast system at NMC*, Weather Forecasting, Vol. 6, pp. 425–435
- Kanamitsu, M., 1989: *Description of the NMC global data assimilation and forecast system*, Weather Forecasting, Vol. 4, pp. 334–342
- Kelly, P.M. and al., 1982: *Variations in surface air temperatures: Part 2. Arctic regions, 1881–1980*, Monthly Weather Review, Vol. 110, pp. 71–83
- Kong, F.-Y., and M.K. Yau, 1997: *An explicit approach to microphysics in MC2*, Atmosphere-Ocean, Vol. 35, pp. 257–291
- Kuo, H.L., 1974: *Further studies on the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow*, Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 31, pp. 1232–1240

- Kwok, R., and D.A. Rothrock, 1999: *Variability of Fram Strait ice flux and North Atlantic oscillation*, Journal of Geophysical Research, Vol. 104, pp. 5177–5189
- Li, J. and H. Barker, 2005: *A radiation algorithm with correlated- k distribution. Part I: Local thermal equilibrium*, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 62, pp. 286–309
- Liang, X.-Z. and W.-C. Wang, 1995 : *A GCM study of the climatic effect of 1979–1992 ozone trend*, In Atmospheric Ozone as a Climate Gas, Édité par W.-C. Wang et I. Isaksen. NATO ASI Series, p. 259–288
- Liu, J. and al., 2005: *Comparison of surface radiative flux data sets over the Arctic Ocean*, Journal of Geophysical Research, Vol. 110, C02015
- Lorenz, P. and D. Jacob, 2005: *Influence of regional scale information on the global circulation: a two-way nesting climate simulation*, Geophysical Research Letters, Vol. 32, L14826
- Lott, F. and J.M. Miller, 1997: *A new subgrid-scale orographic drag parameterization: Its formulation and testing*, Q. J. R. Meteorological Society, Vol. 123, pp. 101–127
- Mailhot, J. and al., 2005: *The 15-km version of the Canadian regional forecast system*, Atmosphere–Ocean, Vol. 44, pp. 133–149
- Manabe, S., and R.J. Stouffer, 1994: *Multiple-century response of coupled ocean–atmosphere model to an increase of atmospheric dioxide*, Journal of Climate, Vol. 7, pp. 5–23
- Manabe, S. and al., 1965: *Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle*, Monthly Weather Review, Vol. 93, pp. 769–798

Maykut, G.A., 1978: *Energy exchange over young sea ice in the central Arctic*, Journal of Geophysical Research, Vol. 83, pp. 3646–3658

McFarlane, N.A., 1987: *The effect of orographically excited gravity-wave drag on the circulation of the lower stratosphere and troposphere*, Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 44, pp. 1175–1800

Mitchell, J.M., 1953: *On the causes of instrumentally observed secular temperature trends*, Journal of Meteorology, Vol. 10, pp. 244–261

Miyakoda, K., and A. Rosati, 1977: *One-way nested grid models: the interface conditions and the numerical accuracy*, Monthly Weather Review, Vol. 105, pp. 1092–1107

Monin, A.S. and A.M., Obukhov, 1954: *Basic laws of turbulence mixing in the ground layer of the atmosphere*, Tr. Geofiz. Inst. Akad. Nauk., Vol. 24, pp.163–187

Moritz, R.E., C.M. Bitz, and E.J. Steig, 2002: *Dynamics of recent climate change in the Arctic*, Science, Vol. 297, pp. 1497–1502

Mysak, L.A. and S.A Venegas, 1998: *Decadal climate oscillation in the Arctic: A new feedback loop for atmosphere–ice–ocean interactions*, Geophysical Research Letters, Vol. 25, pp. 3607–3610

Newman, P.A., E.R. Nash, and J.E. Rosenfield, 2001: *What controls the temperature of the Arctic stratosphere in spring?*, Journal of Geophysical Research, Vol. 106, pp. 19999–20010

Nigam, S., I.M. Held, and S.W. Lyons, 1988: *Linear simulation of the stationary eddies in a GCM. Part II: The “mountain” model*, Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 45, pp. 1433–1452

NOAA/NMC Development division, 1988: Documentation of the NMC global model. 244 pp. [Available from NOAA/NCEP Environmental Modeling Center, 5200 Auth Rd. Washinton, DC 20233

Noilhan, J. and S. Planton, 1989: *A simple parameterization of land surface processes for meteorological models*, Monthly Weather Review, Vol. 117, pp. 536–549

Olinger, J., and A. Sundström, 1978: *Theoretical and practical aspects of some initial boundary value problems in fluid dynamics*, Journal of Applied Mathematics, Vol. 35, pp. 419–446

Overland, J.E. and al., 2004: *Seasonal and Regional Variation of Pan-Arctic Surface Air Temperature over the instrumental record*, Journal of Climate, Vol. 17, pp. 3263–3282

Overland, J.E., M. Wang and N.A. Bond, 2002: *Recent Temperature Changes in the Western Arctic during spring*, Journal of Climate, Vol. 15, pp. 1702–1716

Overland, J.E., and P.S. Guest, 1991: *The Arctic snow and air temperature budget over sea ice during winter*, Journal of Geophysical Research, Vol. 96, pp. 4652–4662

Overland, J.E., J.M. Adams and N.A. Bond, 1997: *Regional variation of winter temperature in the Arctic*, Journal of Climate, Vol. 10, pp. 821–837

Overland, J.E. and P. Turet, 1994: *Variability of the atmospheric energy flux across 70N computed from the GFDL data set*, Nansen Centennial Volume, Geophysic Monography, No. 84, American Geophysics Union, pp. 313–325

Overpeck, J. and al., 1997: *Arctic environmental change of the last four centuries*, Sciences, Vol. 278, pp.1251–1256

- Parkinson, C.L. and al., 1999: *Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978-1996*, Journal of geophysical Research, Vol. 104, pp. 20837-20856.
- Pawson, S., and B. Naujokat, 1999: *The cold winters of the middle 1990s in the northern lower stratosphere*, Journal of Geophysical Research, Vol. 104, pp. 14209-14222
- Polyakov, I.V. and al., 2003: *Variability and trends of air temperature and pressure in the maritime arctic 1875-2000*, Journal of Climate, Vol. 16, pp. 2067-2077
- Przybylak, R., 2003: *The Climate of the Arctic*, Kluwer Academic, 270 pp.
- Przybylak, R., 2000: *Diurnal temperature range in the Arctic and its relation to hemispheric and Arctic circulation patterns*, International Journal of Climatology, Vol. 20, pp. 231-253
- Raisanen, J., 2002: *CO₂-induce changes in interannual temperature and precipitation variability in 19 CMIP2 experiments*, Journal of Climate, Vol. 15, pp. 2395-2411
- Rigor, I.G. and al., 2002: *Response of Sea Ice to the Arctic Oscillation*, Journal of Climate, Vol. 15, pp. 2648-2663
- Rigor, I.G., R.L. Colony, and S. Martin, 2000: *Variation in surface air temperature observations in the Arctic, 1979-1997*, American Meteorological Society, Vol. 13, pp. 896-914
- Robert, A. and E. Yakimiw, 1986: *Identification and elimination of an inflow boundary computational solution in limited area model integrations*, Atmosphere Ocean, Vol. 24, pp. 369-385
- Rogers, J. and M. J. McHugh, 2002: *On the separability of the North Atlantic Oscillation and the Arctic Oscillation*, Climate Dynamics, Vol. 19, pp. 599-608

- Rogers, J. and E. Mosley-Thompson, 1995: *Atlantic cyclones and the mild siberian winters of the 1980's*, Geophysical Research Letters, Vol. 22, pp. 799–802
- Rothrock, D.A. and al., 1999: *Thinning of the Arctic sea-ice cover*, Geophysical Research Letters, Vol. 26, pp. 3469–3472
- Scheinder, Edwin K., L Bengtsson and Z.Z. Hu, 2003: *Forcing of Northern Hemisphere Climate trends*, Journal of atmospheric sciences, Vol. 60, pp. 1504–1521
- Schmidt, F., 1977: *Variable fine mesh in the spectral global models*, Beiträge zur Atmosphärenphysik, Vol. 50, pp. 211–217
- Semenov, Vladimir A. and Lennart Bengtsson, 2003: *Modes of the wintertime Arctic temperature variability*, Geophysical Research Letters, Vol. 30, pp. 1781
- Serreze, M.C. and C.M. Hurst, 2000: *Representation of mean Arctic precipitation from NCEP-NCAR and ERA 40 reanalyses*, Journal of Climate, Vol. 13, pp. 182–201
- Serreze, M.C. and al., 1997: *Icelandic low cyclone activity: Climatological features, linkages with the NAO and relationships with recent changes in the Northern Hemisphere circulation*, Journal of Climate, Vol. 10, pp. 453–464
- Skeie, P., 2000: *Meridional flow variability over the Nordic seas in the Arctic Oscillation framework*, Geophysical Research Letters, Vol. 27, pp. 2569–2572
- Staniforth, A., 1997: *Regional modeling: A theoretical discussion*, Meteorology and Atmospheric Physics, Vol. 63, pp. 15–29
- Staniforth, A.N. and H.L. Mitchell, 1978: *A variable-resolution finite-element technique for regional forecasting with the primitive equations*, Monthly Weather Review, Vol. 106, pp. 439–447

- Steele, M. and T. Boyd, 1998: *Retreat of the cold halocline layer in the Arctic Ocean*, Journal of Geophysical Research, Vol. 103, pp. 10419–10435
- Sundqvist, H., E. Berge and J.E. Kristjansson, 1989: *Condensation and cloud parameterization studies with a mesoscale numerical weather prediction model*, Monthly Weather Review, Vol. 117, pp. 1641–1657
- Stenchikov, G. and al., 2002: *Arctic Oscillation response to the 1991 Mount Pinatubo eruption: Effects of the volcanic aerosols and ozone depletion*, Journal of Geophysical Research, Vol. 107, pp. 4803
- Thompson, David, W.J. and J.M. Wallace, 2001: *Regional climate impacts of the northern hemisphere annular mode*, Sciences, Vol. 293, pp. 85–89
- Thompson, David, W.J. and J.M. Wallace, 2000: *Annular modes in the extratropical circulation. Part II: Trends*, Journal of climate, Vol. 13, pp. 1018–1036
- Thompson, David, W.J. and J.M. Wallace, 1998: *The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature field*, Geophysical Research Letters, Vol. 25, No. 9, pp. 1297–1300
- Trenberth, K.E. and J.W. Hurrell, 1994: *Decadal atmospheric-ocean variations in the Pacific*, Climate Dynamics, Vol. 9, pp. 303–309
- Trenberth, K.E., 1990: *Recent observed interdecadal climate changes in the northern hemisphere*, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 71, pp. 988–993
- Uppala, S.M. and al., 2005: *The ERA 40 re-analysis*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 131, pp. 2961–3012
- Valdes, P.J. and B.J. Hoskins, 1991: *Nonlinear orographically forced planetary waves*, Journal of Atmospheric sciences, Vol. 48, pp. 2089–2106

- van Loon, H., and J.C. Rogers, 1978: *The seesaw in winter temperatures between Greenland and northern Europe. Part 1: General description*, Monthly Weather Review, Vol. 106, pp. 296–310
- Vichnevetsky, R. and L.H. Turner, 1991: *Spurious scattering from discontinuously stretching grids in computational fluid dynamics*, Journal of Applied Mathematics, Vol. 8, pp. 315–328.
- Vichnevetsky, R., 1987: *Wave propagation and reflection in irregular grids for hyperbolic equations*, Applied Numerical Mathematics, Vol. 2, pp. 133–166
- Von Storch, H., H. Langenberg and F. Feser, 2000: *A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes*, Monthly Weather Review, Vol. 128, pp. 3664–3673
- Vukicevic, T., and R. Errico, 1990: *The influence of artificial and physical factors upon predictability estimates using a complex limited-area model*, Monthly Weather Review, Vol. 118, pp. 1460–1482
- Wallace, J.M and D. Gutzler, 1981: *Teleconnections in the géopotential height field during the northern hemisphere winter*, Monthly Weather Review, Vol. 109, pp. 784–812
- Walsh, J.E., W.L. Chapman and T.L. Shy, 1996: *Recent decrease of sea pressure in the central Arctic*, Journal of Climate, Vol. 9, pp. 480–485
- Walsh, J. E., 1977: *The incorporation of ice station data into a study of recent Arctic temperature fluctuations*, Monthly Weather Review, Vol. 105, pp. 1527–1535
- Wang, X. and al., 2003: *Recent Trends in Arctic Surface, Cloud, and radiation properties from space*, Sciences, Vol. 299, pp.1725–1728

Waugh, D.W., and W.J. Randel, 1999: *Climatology of Arctic and Antarctic polar vortices using elliptical diagnostics*, Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 56, pp. 1594–1613.

Wu, B., J. Wang and J.E. Walsh, 2006: *Dipole Anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion*, Journal of Climate, Vol. 19, pp. 210–225

Wyser K. and C.G. Jones, 2005: *Aerosol and Clouds – Modeled and observed clouds during surface heat budget of Arctic Ocean (SHEBA)*, Journal of Geophysical Research, Vol. 110

Yakimiw, E., and A. Robert, 1990: *Validation experiments for a nested grid-point regional forecast model*, Atmosphere Ocean, Vol. 28, pp. 466–472

Yamazaki, K., 1989: *A study of the impact of soil moisture and surface albedo changes on global climate using the MRI GCM-I*, Journal of the Meteorological Society, Japan, Vol. 67, pp. 123–146

Yeh, K.-S. and al., 2002: *The CMCMRB global environment multiscale (GEM) model. Part III: Nonhydrostatic formulation*, Monthly Weather Review, Vol. 130, pp. 339–356

Zadra, A. and al., 2008: *The next Canadian regional climate model*, Physics in Canada, Vol. 64, pp. 75–83

Zadra, A. and al., 2003: *The subgrid-scale orographic blocking parameterization of the GEM model*, Atmosphere and Ocean, Vol. 41, pp. 155–170

Zakharov, Vladimir F., 1974: *The cooling of the Arctic*, Probl Arktiki Antarktiki, Vol. 45, pp. 13–20

Zhang, D.-L. et al., 1986: *A two-way interactive nesting procedure with variable terrain resolution*, Monthly Weather Review, Vol. 114, pp. 1330-1339

Zhang, D.-L. et al., 1986: *A two-way interactive nesting procedure with variable terrain resolution*, Monthly Weather Review, Vol. 114, pp. 1330-1339

Zhang, Y., J.M. Wallace and D.S. Battisti, 1997: *Enso like decadal variability 1900-93*, Journal of climate, Vol. 10, pp. 1004-1020

<http://svs.gsfc.nasa.gov/search/Keyword/Arctic.html>

http://data.ecmwf.int/data/d/era40_mnth/

<http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY28r1/index.html>

<http://www.cdc.noaa.gov/>

<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.derived.html>

<http://www.cdc.noaa.gov/Timeseries/>

http://nsidc.org/data/docs/daac/nsidc0066_avhrr_5km.gd.html

<http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/eps-pg/AVHRR/AVHRR-PG-OTOC.htm>

<http://psc.apl.washington.edu/POLES/satindex.html>

TENDANCE

«TEMPÉRATURE DE SURFACE DE L'AIR À 2M (°C an⁻¹)»

Moyenne annuelle

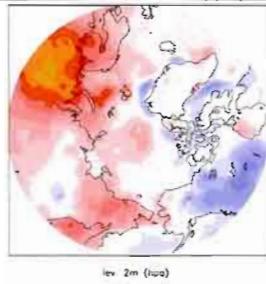
SON

DJF

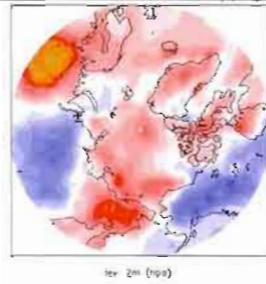
MAM

JJA

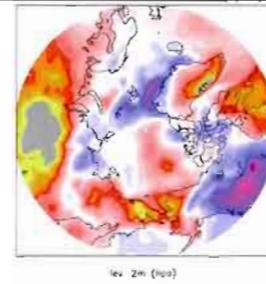
GEM
VAR



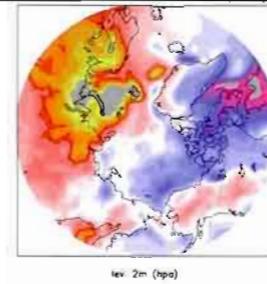
lev. 2m (hpa)



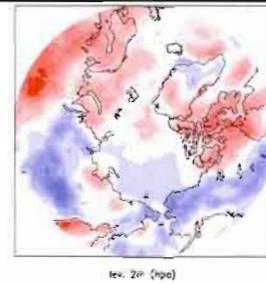
lev. 2m (hpa)



lev. 2m (hpa)

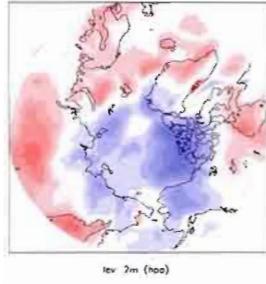


lev. 2m (hpa)

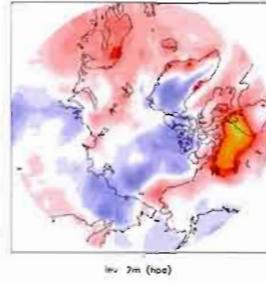


lev. 2m (hpa)

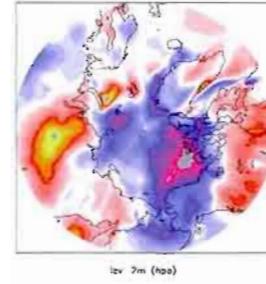
GEM
global



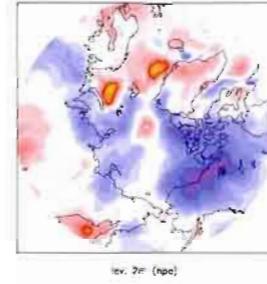
lev. 2m (hpa)



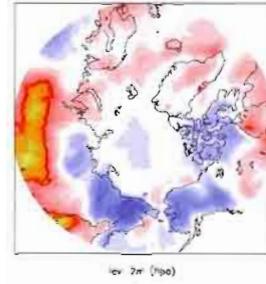
lev. 2m (hpa)



lev. 2m (hpa)

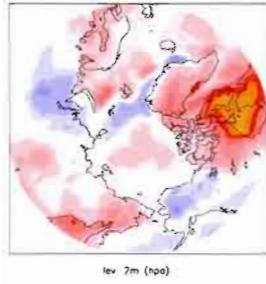


lev. 2m (hpa)

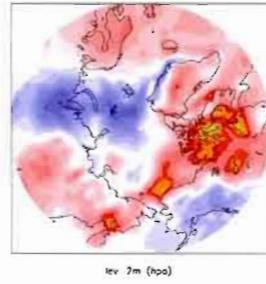


lev. 2m (hpa)

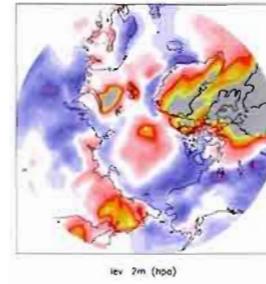
GEM-LAM
gem
global



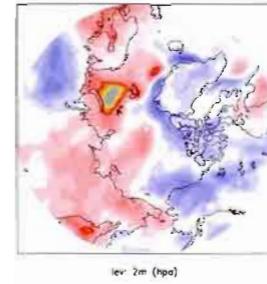
lev. 2m (hpa)



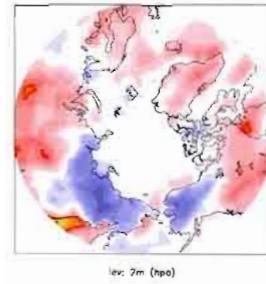
lev. 2m (hpa)



lev. 2m (hpa)

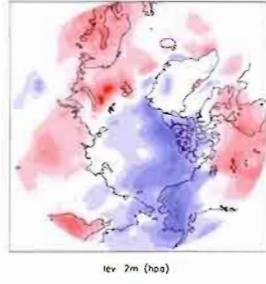


lev. 2m (hpa)

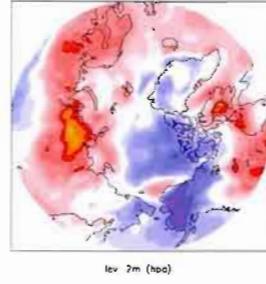


lev. 2m (hpa)

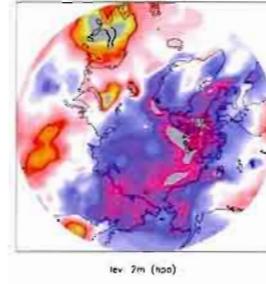
GEM-LAM
Era 40



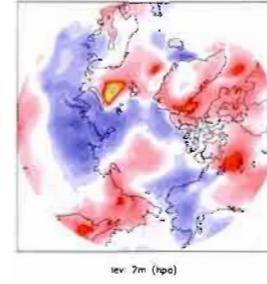
lev. 2m (hpa)



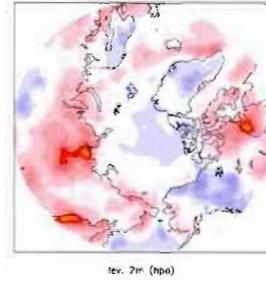
lev. 2m (hpa)



lev. 2m (hpa)

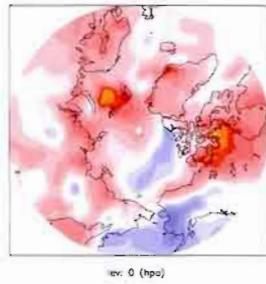


lev. 2m (hpa)

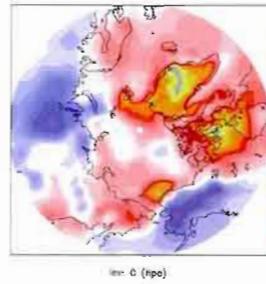


lev. 2m (hpa)

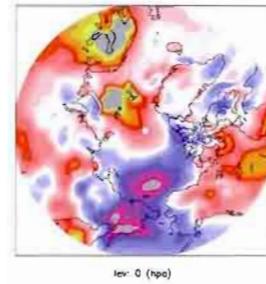
ERA 40



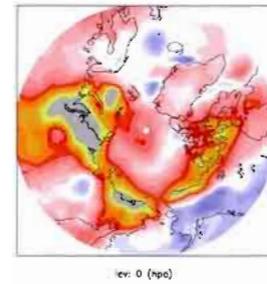
lev. 0 (hpa)



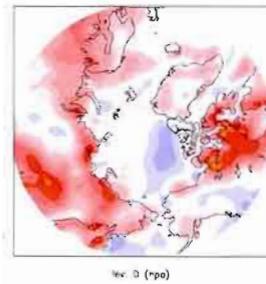
lev. 0 (hpa)



lev. 0 (hpa)

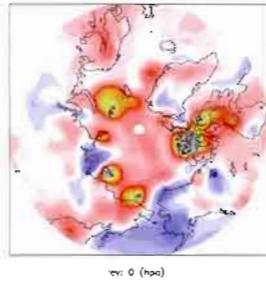


lev. 0 (hpa)

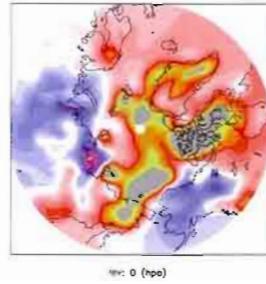


lev. 0 (hpa)

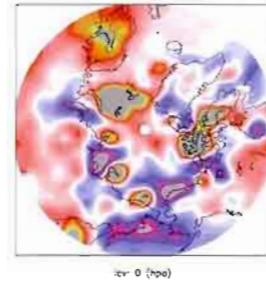
NCEP



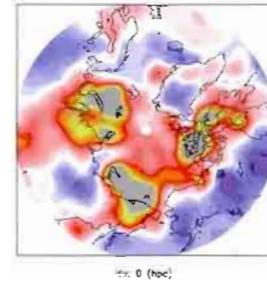
lev. 0 (hpa)



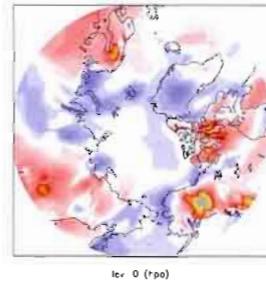
lev. 0 (hpa)



lev. 0 (hpa)



lev. 0 (hpa)



lev. 0 (hpa)

VARIANCE

«TEMPÉRATURE DE SURFACE DE L'AIR À 2M (°C²)»

Moyenne annuelle

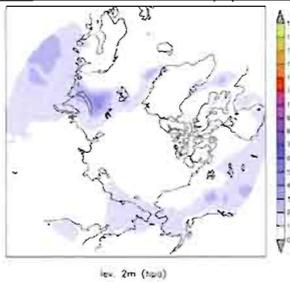
SON

DJF

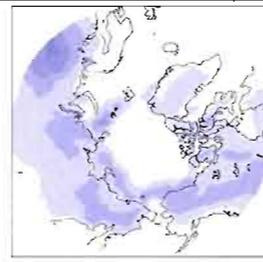
MAM

JJA

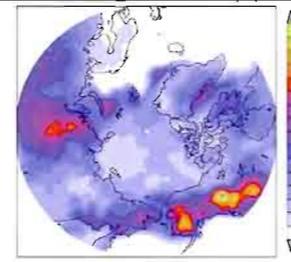
GEM
VAR



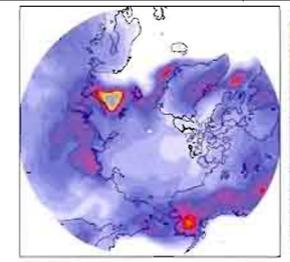
lev. 2m (hpa)



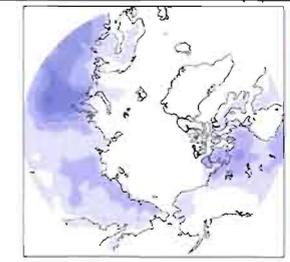
lev. 2m (hpa)



lev. 2m (hpa)

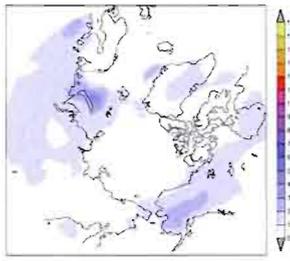


lev. 2m (hpa)

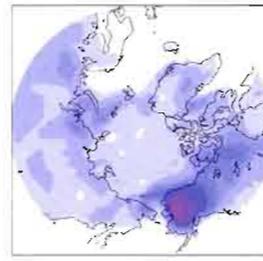


lev. 2m (hpa)

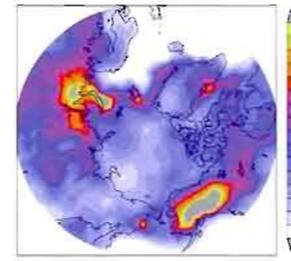
GEM
global



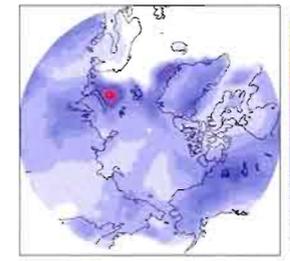
lev. 2m (hpa)



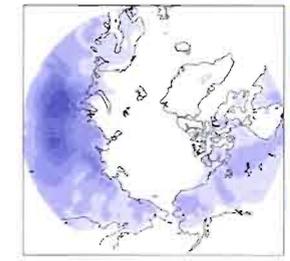
lev. 2m (hpa)



lev. 2m (hpa)

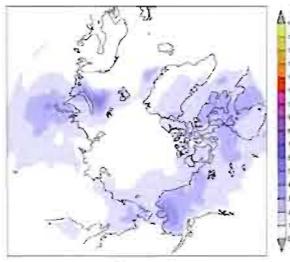


lev. 2m (hpa)

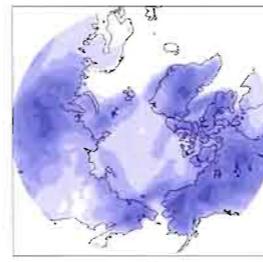


lev. 2m (hpa)

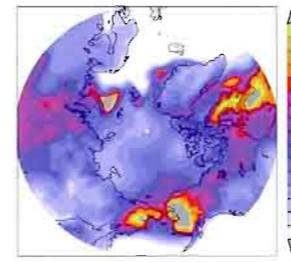
GEM-LAM
gem
global



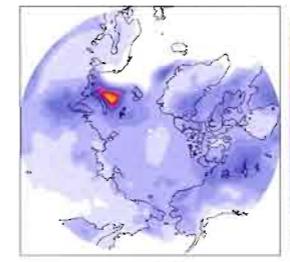
lev. 2m (hpa)



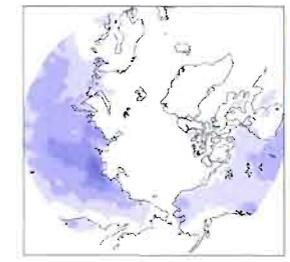
lev. 2m (hpa)



lev. 2m (hpa)

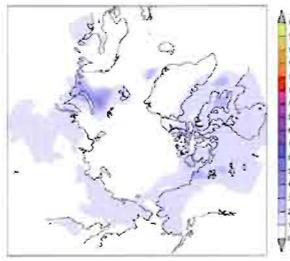


lev. 2m (hpa)

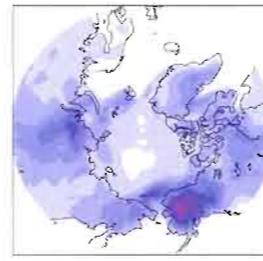


lev. 2m (hpa)

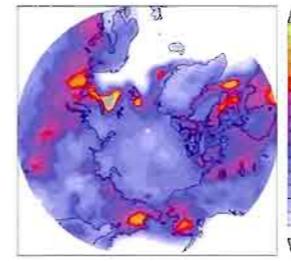
GEM-LAM
Era 40



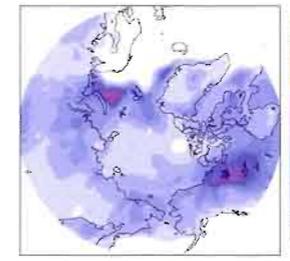
lev. 2m (hpa)



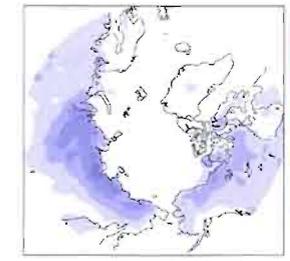
lev. 2m (hpa)



lev. 2m (hpa)

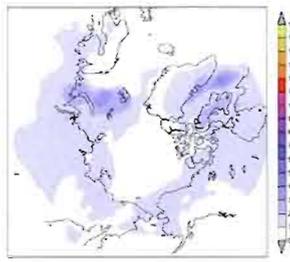


lev. 2m (hpa)

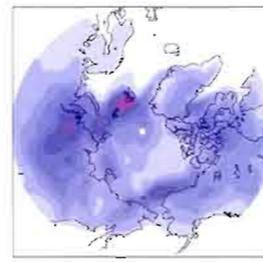


lev. 2m (hpa)

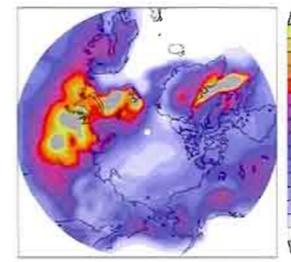
ERA 40



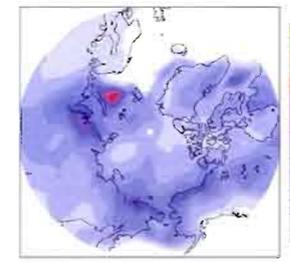
lev. 0 (hpa)



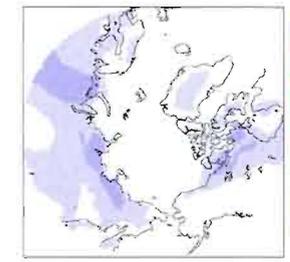
lev. 0 (hpa)



lev. 0 (hpa)

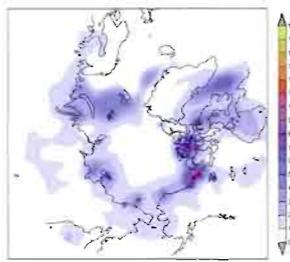


lev. 0 (hpa)

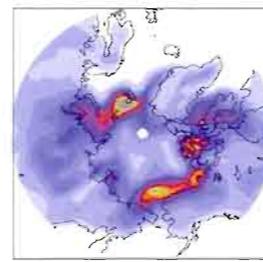


lev. 0 (hpa)

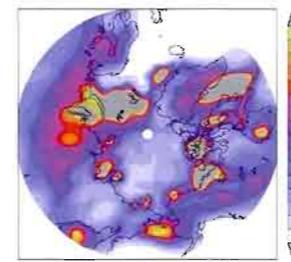
NCEP



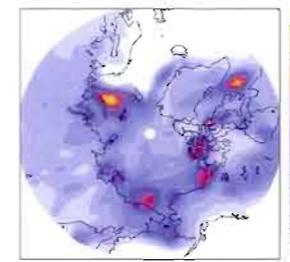
lev. 0 (hpa)



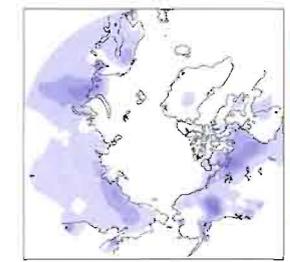
lev. 0 (hpa)



lev. 0 (hpa)



lev. 0 (hpa)



lev. 0 (hpa)

TENDANCE

«PRESSION AU NIVEAU MOYEN DE LA MER (hPa an⁻¹)»

Moyenne annuelle

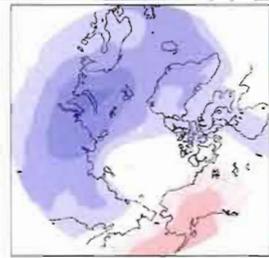
SON

DJF

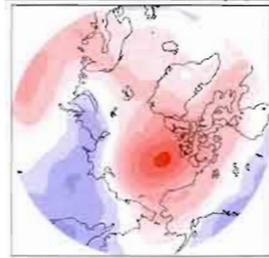
MAM

JJA

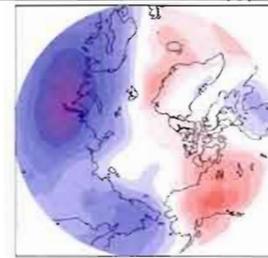
GEM
VAR



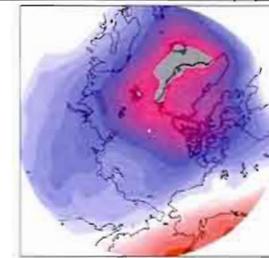
lev. SL (hpa)



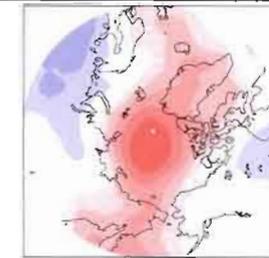
lev. SL (hpa)



lev. SL (hpa)

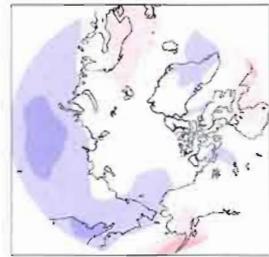


lev. SL (hpa)

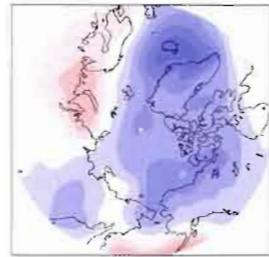


lev. SL (hpa)

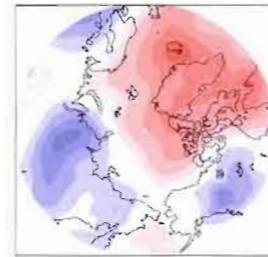
GEM
global



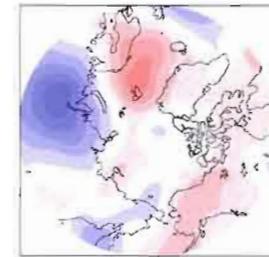
lev. SL (hpa)



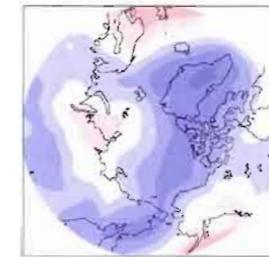
lev. SL (hpa)



lev. SL (hpa)

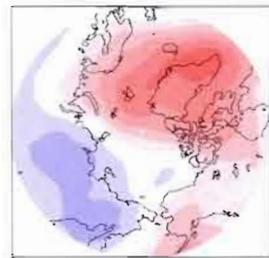


lev. SL (hpa)

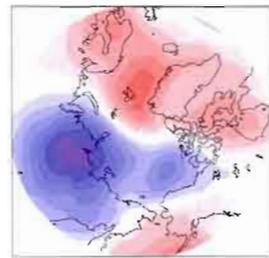


lev. SL (hpa)

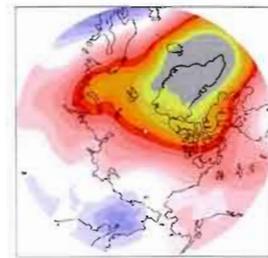
GEM-LAM
gem
global



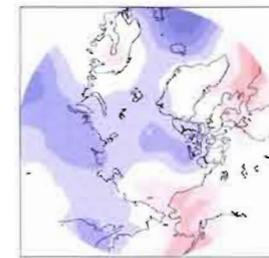
lev. SL (hpa)



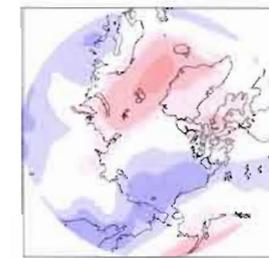
lev. SL (hpa)



lev. SL (hpa)

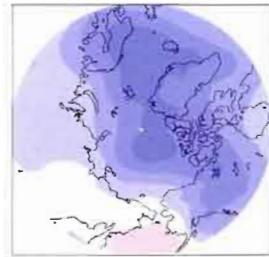


lev. SL (hpa)

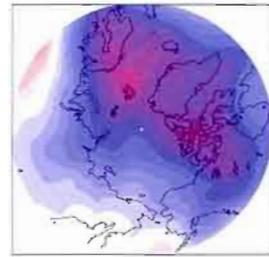


lev. SL (hpa)

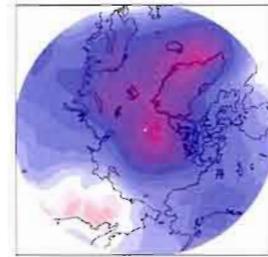
GEM-LAM
Era 40



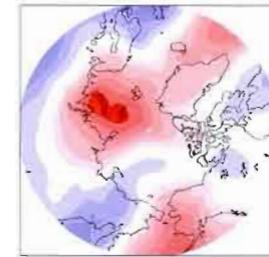
lev. SL (hpa)



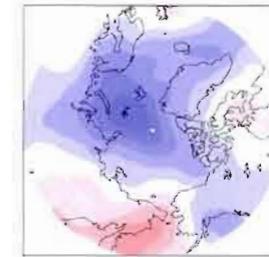
lev. SL (hpa)



lev. SL (hpa)

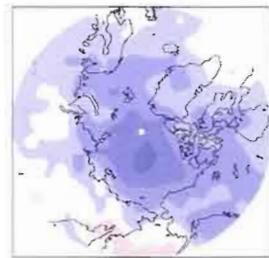


lev. SL (hpa)

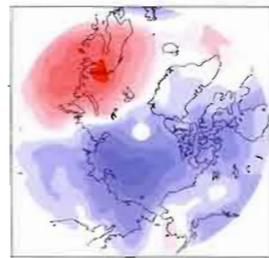


lev. SL (hpa)

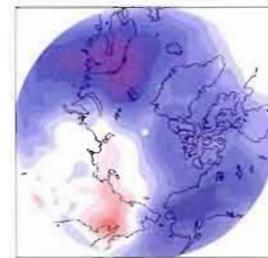
ERA 40



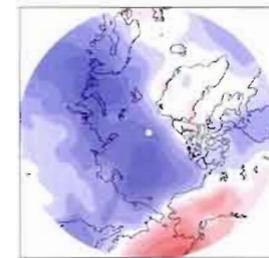
lev. SL (hpa)



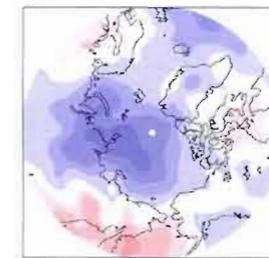
lev. SL (hpa)



lev. SL (hpa)

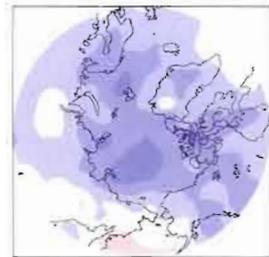


lev. SL (hpa)

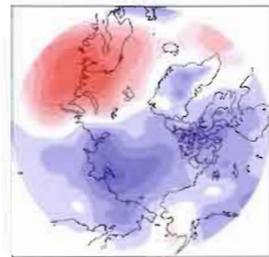


lev. SL (hpa)

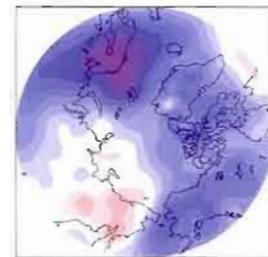
NCEP



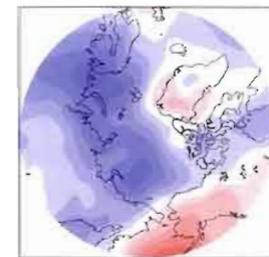
lev. SL (hpa)



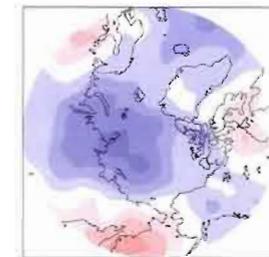
lev. SL (hpa)



lev. SL (hpa)



lev. SL (hpa)



lev. SL (hpa)

VARIANCE

«PRESSION AU NIVEAU MOYEN DE LA MER (hPa²)»

Moyenne annuelle

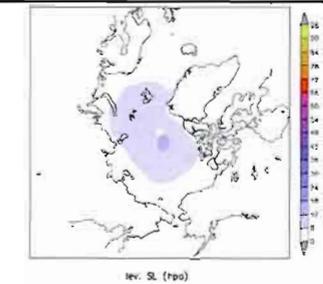
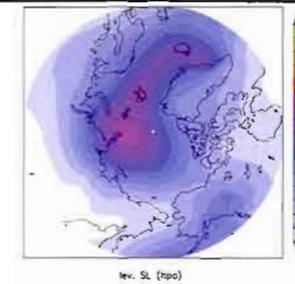
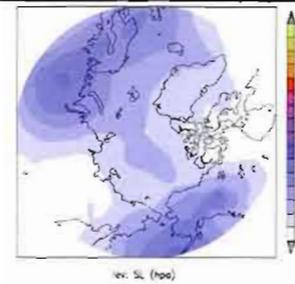
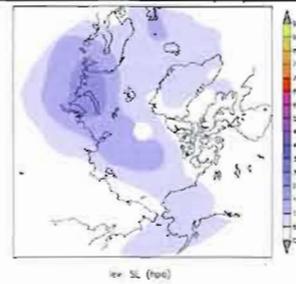
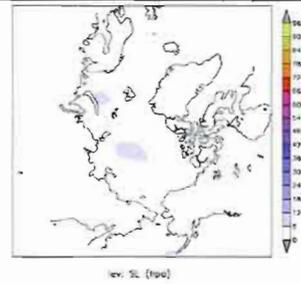
SON

DJF

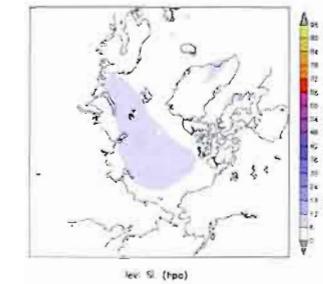
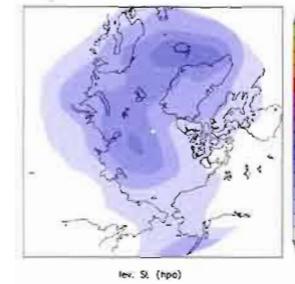
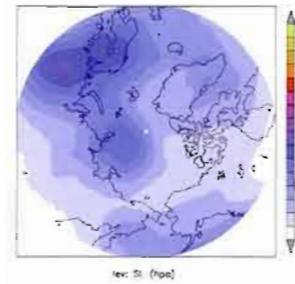
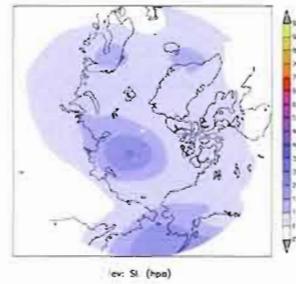
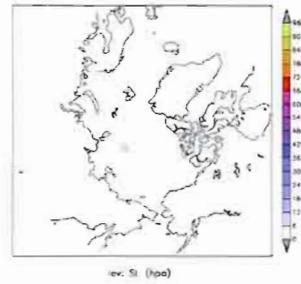
MAM

JJA

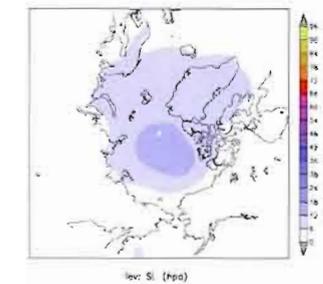
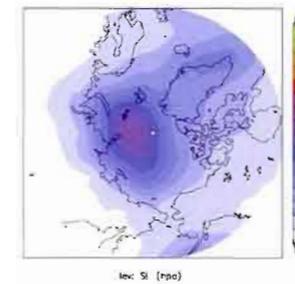
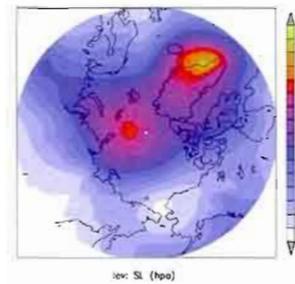
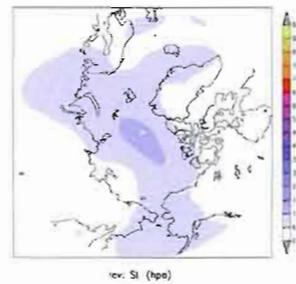
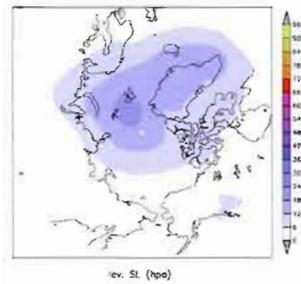
GEM
VAR



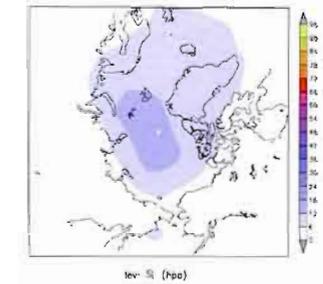
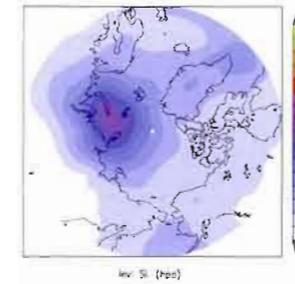
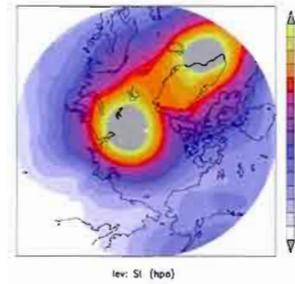
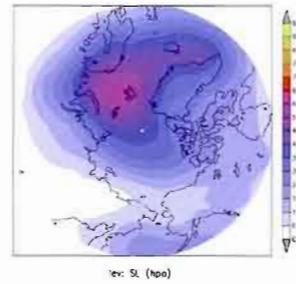
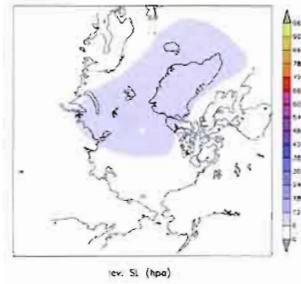
GEM
global



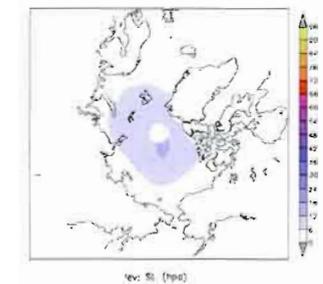
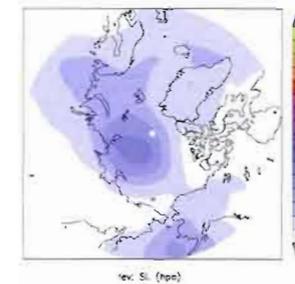
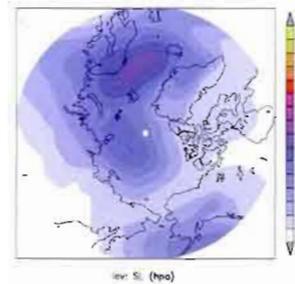
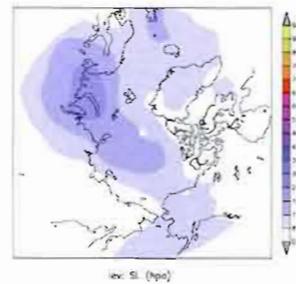
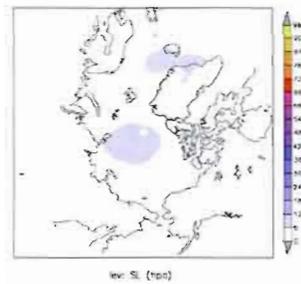
GEM-LAM
gem
global



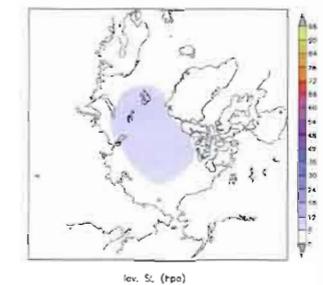
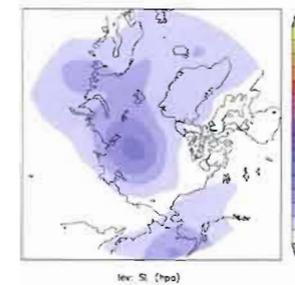
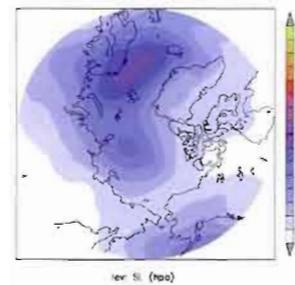
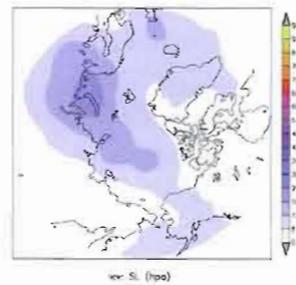
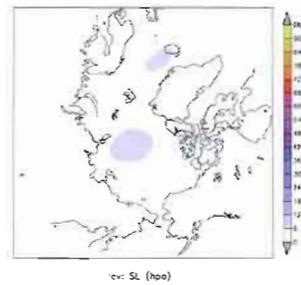
GEM-LAM
Era 40



ERA 40



NCEP



TENDANCE

«HAUTEURS DU GEOPOTENTIEL - 500 HPA (m an⁻¹)»

Moyenne annuelle

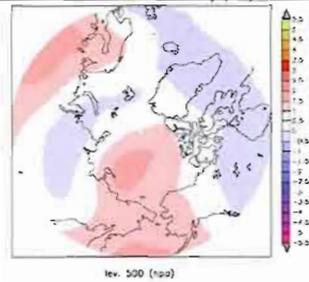
SON

DJF

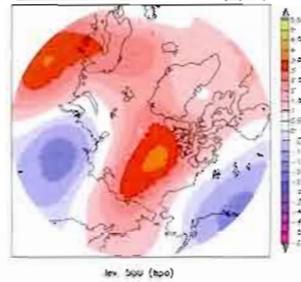
MAM

JJA

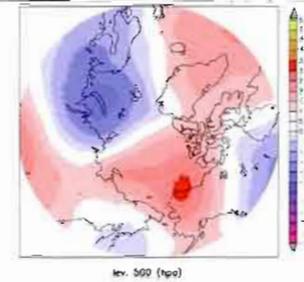
GEM
VAR



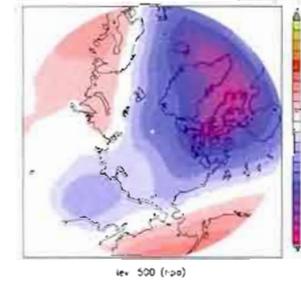
lev. 500 (hpa)



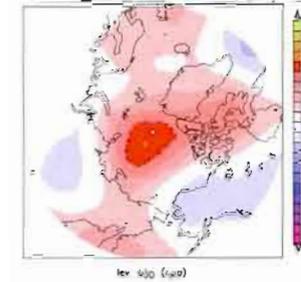
lev. 500 (hpa)



lev. 500 (hpa)

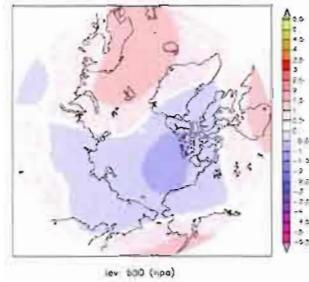


lev. 500 (hpa)

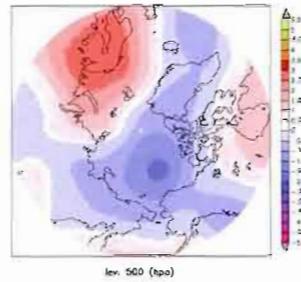


lev. 500 (hpa)

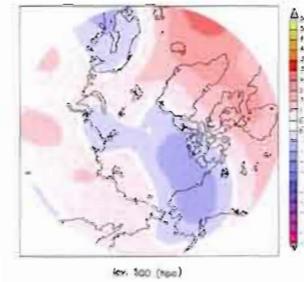
GEM
global



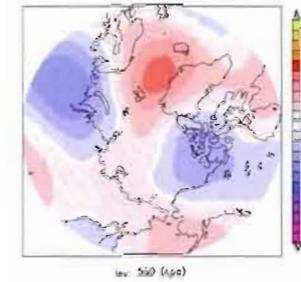
lev. 500 (hpa)



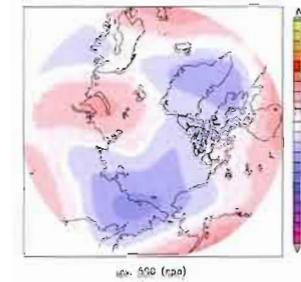
lev. 500 (hpa)



lev. 500 (hpa)

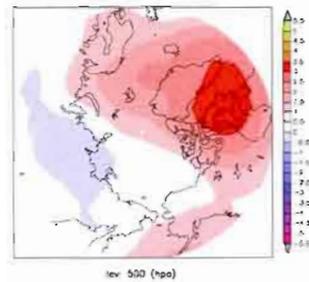


lev. 500 (hpa)

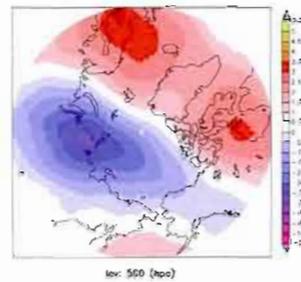


lev. 500 (hpa)

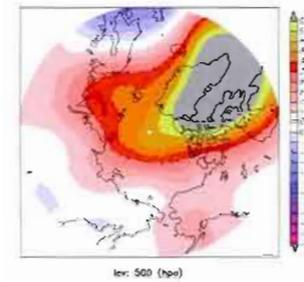
GEM-LAM
gem
global



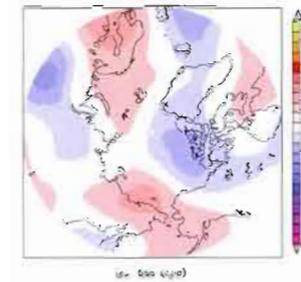
lev. 500 (hpa)



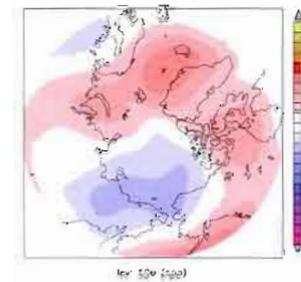
lev. 500 (hpa)



lev. 500 (hpa)

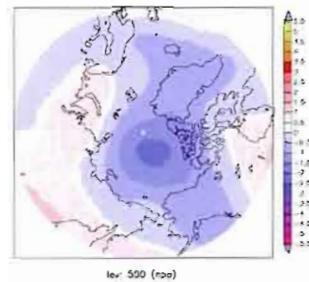


lev. 500 (hpa)

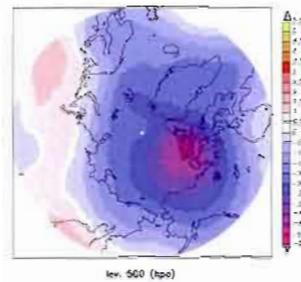


lev. 500 (hpa)

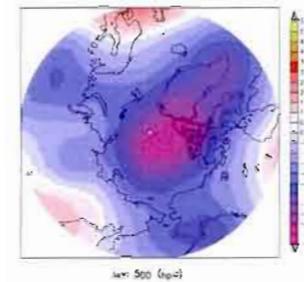
GEM-LAM
Era 40



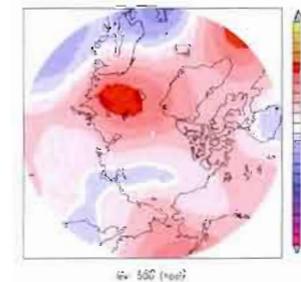
lev. 500 (hpa)



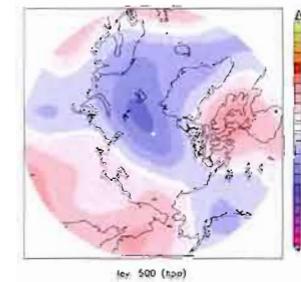
lev. 500 (hpa)



lev. 500 (hpa)

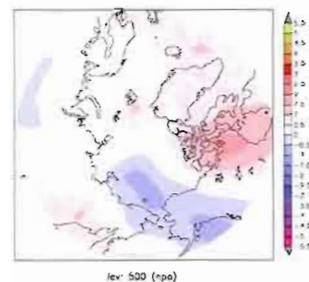


lev. 500 (hpa)

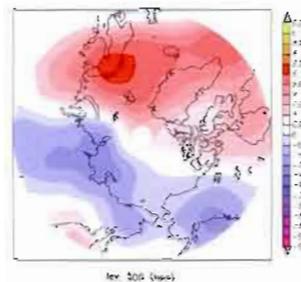


lev. 500 (hpa)

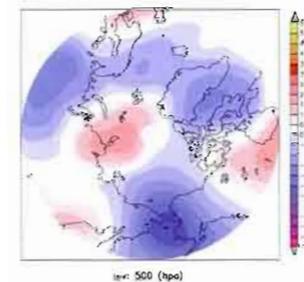
ERA 40



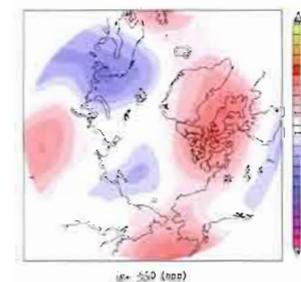
lev. 500 (hpa)



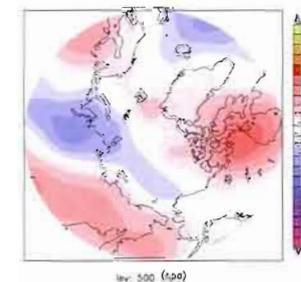
lev. 500 (hpa)



lev. 500 (hpa)

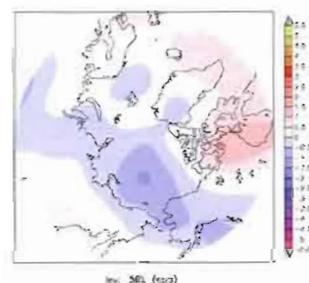


lev. 500 (hpa)

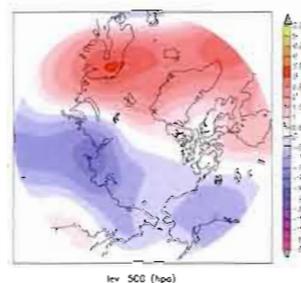


lev. 500 (hpa)

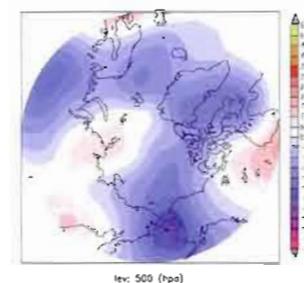
NCEP



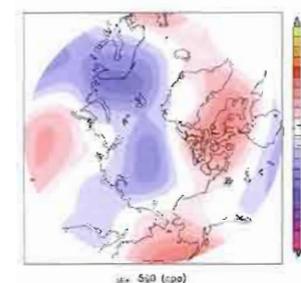
lev. 500 (hpa)



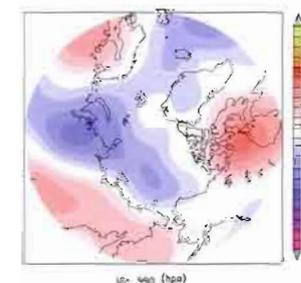
lev. 500 (hpa)



lev. 500 (hpa)



lev. 500 (hpa)



lev. 500 (hpa)

VARIANCE

«HAUTEURS DU GEOPOTENTIEL - 500 HPA (m²)»

Moyenne annuelle

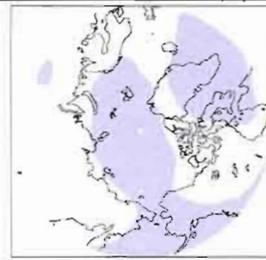
SON

DJF

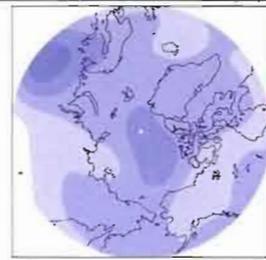
MAM

JJA

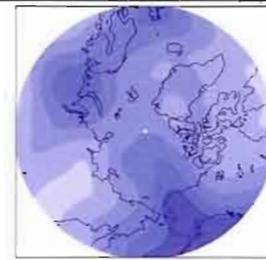
GEM
VAR



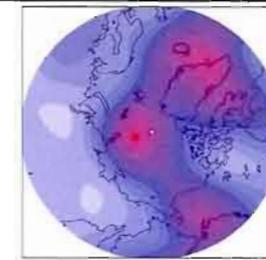
lev. 500 (hpa)



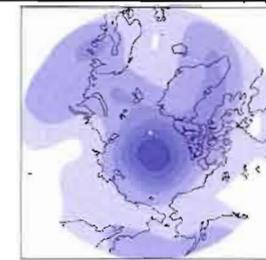
lev. 500 (hpa)



lev. 500 (hpa)

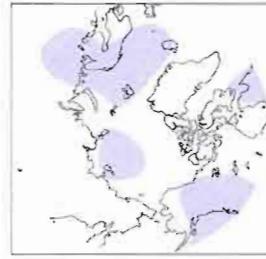


lev. 500 (hpa)

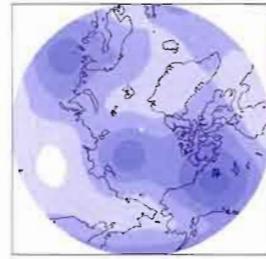


lev. 500 (hpa)

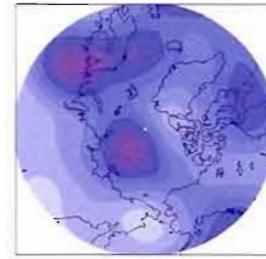
GEM
global



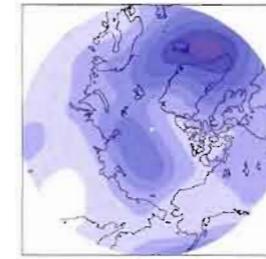
lev. 500 (hpa)



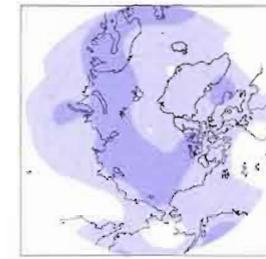
lev. 500 (hpa)



lev. 500 (hpa)

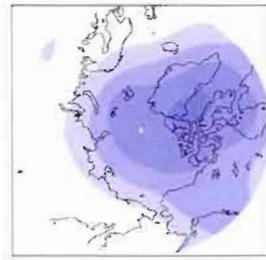


lev. 500 (hpa)

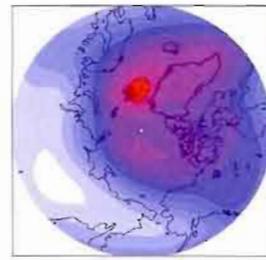


lev. 500 (hpa)

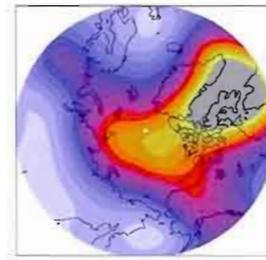
GEM-LAM
gem
global



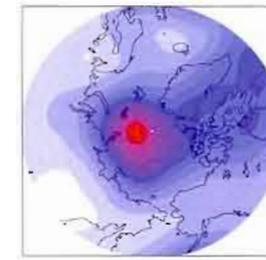
lev. 500 (hpa)



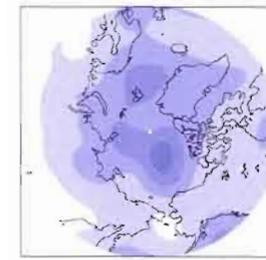
lev. 500 (hpa)



lev. 500 (hpa)

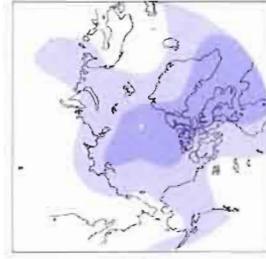


lev. 500 (hpa)

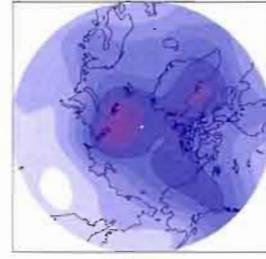


lev. 500 (hpa)

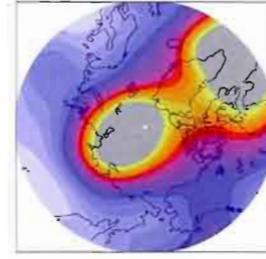
GEM-LAM
Era 40



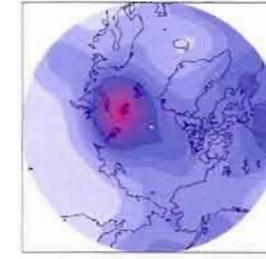
lev. 500 (hpa)



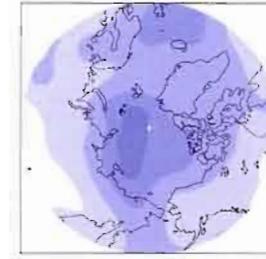
lev. 500 (hpa)



lev. 500 (hpa)

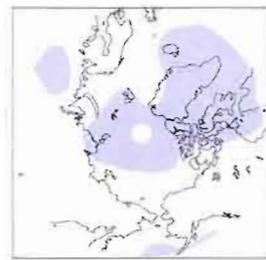


lev. 500 (hpa)

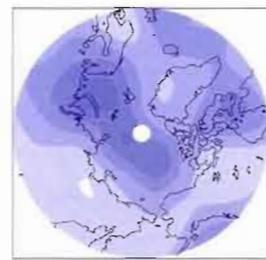


lev. 500 (hpa)

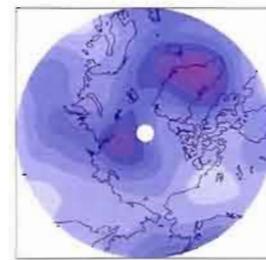
ERA 40



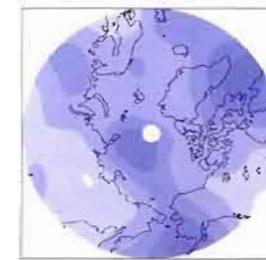
lev. 500 (hpa)



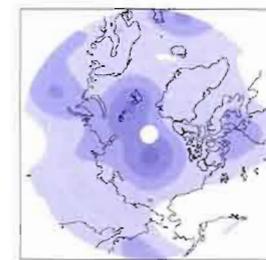
lev. 500 (hpa)



lev. 500 (hpa)

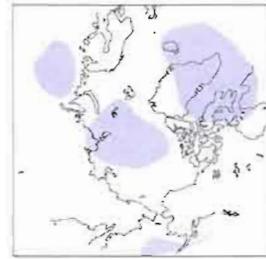


lev. 500 (hpa)

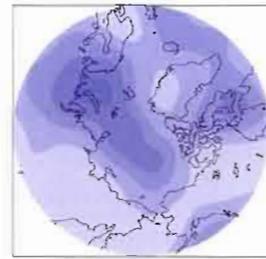


lev. 500 (hpa)

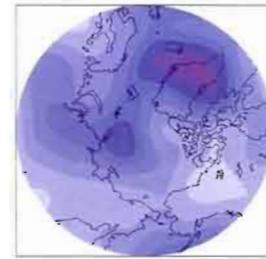
NCEP



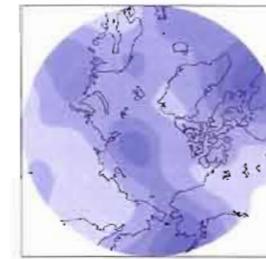
lev. 500 (hpa)



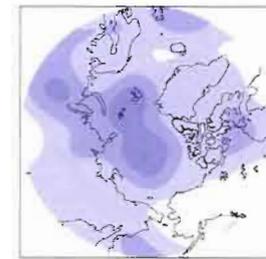
lev. 500 (hpa)



lev. 500 (hpa)



lev. 500 (hpa)



lev. 500 (hpa)