

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

**ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ INTERNE
DES MODÈLES PILOTÉS : APPLICATION DE LA TECHNIQUE
D'ENSEMBLE AU MODÈLE RÉGIONAL CANADIEN DE CLIMAT**

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

**PAR
ADELINA ALEXANDRU**

NOVEMBRE 2006

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.»

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

**A STUDY OF THE INTERNAL VARIABILITY
OF NESTED MODELS: APPLICATION OF AN ENSEMBLE TECHNIC
FROM THE CANADIAN REGIONAL CLIMATE MODEL**

**THESIS SUBMITTED
IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE MASTER'S DEGREE**

**BY
ADELINA ALEXANDRU**

NOVEMBER 2006

REMERCIEMENTS

Je tiens particulièrement à remercier mon directeur de recherche, M. René Laprise, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce projet. Je le remercie également pour la confiance qu'il m'a accordée et pour tout son appui au cours de toute cette période. Je vous remercie Monsieur le Professeur !!!

Je suis également reconnaissante envers mon codirecteur, M. Ramon de Elia, pour tous ses conseils scientifiques et ses encouragements tout au long de ce projet.

Je tiens aussi à adresser ma gratitude à toute l'Équipe de Simulations Climatiques d'Ouranos et à son directeur Daniel Caya pour toutes les discussions qui ont enrichi mon activité de recherche.

Un grand merci à ma famille qui m'a encouragée et donné le soutien moral.

TABLE DE MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES ACRONYMES	ix
LISTE DES SYMBOLES.....	x
RÉSUMÉ	xii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I.....	9
ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ INTERNE DES MODÈLES PILOTÉS : APPLICATION DE LA TECHNIQUE D'ENSEMBLE AU MODÈLE RÉGIONAL CANADIEN DE CLIMAT	9
Internal Variability in Regional Climate Downscaling at the Seasonal Scale.....	10
Abstract.....	11
1. Introduction	12
2. The CRCM and Experimental Design	17
2.1. Model Description.....	17
2.2. Simulation Set-Up.....	18
2.3. Evaluation Methods	18
3. Results and Analysis.....	21
3.1. Ensemble Size Experiment	21

8 3.2. Geographical Distribution and Time Evolution of the Internal Variability.....	22
3.3. Influence of the Domain Size on the RCM Internal Variability.....	23
3.4. Clustering of Solutions on Different Attractors.....	26
Conclusions.....	27
Acknowledgements.....	29
CONCLUSION	51
RÉFÉRENCES	54

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1	CRCM computational domains and topography (m).....	31
2	Five members of CRCM runs with a delay of 24 hours in their IC (0000 UTC 1 May 1993-0000 UTC 5 May 1993) for the 850-hPa geopotential height (dam) (left-side panel) and for the precipitation (mm/day) (right-side panel) valid at 0000 UTC 25 July 1993.....	32
3	Ensemble-size experiment: Time evolution of domain-averaged variability ($\sqrt{\sigma_{en}^2}$) for 10 different two-member ensembles for the precipitation (mm/day) (left-side panel) and for the 850-hPa geopotential height (m) (right-side panel).....	33
4	Ensemble-size experiment: Time-averaged variability ($\sqrt{\sigma_{en}^2}$) of the 850-hPa geopotential height (m) for 10 different two-member ensembles.....	34
5	Ensemble-size experiment: Time evolution of domain-averaged variability ($\sqrt{\sigma_{en}^2}$) for three ensembles composed of 10 (green), 15 (red) and 20 (blue) members for the precipitation (mm/day) (left-side panel) and for the 850-hPa geopotential height (m) (right-side panel)...	35
6	Ensemble-size experiment: Time-averaged variability ($\sqrt{\sigma_{en}^2}$) of three ensembles composed of 10, 15 and 20 members for the precipitation (mm/day) (upper panels) and 850-hPa geopotential height (m) (lower panels).....	36
7	Ensemble-size experiment: Variability of the seasonal mean ($\sqrt{\sigma_s^2}$) of three ensembles of 10, 15 and 20 members for the precipitation (mm/day) (upper panels) and for the 850-hPa geopotential height (m) (lower panels).....	37
8	Internal variability experiment (domain 120×120): Four-day time evolution of ensemble-mean precipitation (mm/day) (in red contour) and 850-hPa geopotential height variability ($\sqrt{\sigma_{en}^2}$) (dam) (colour). The coloured arrow indicates the trajectory of $\sqrt{\sigma_{en}^2}$ displacement along the storm track.....	38
9	Internal variability experiment (domain 120×120): weekly-averaged variability ($\sqrt{\sigma_{en}^2}$) corresponding to four weeks of summer season for the precipitation (mm/day) (left-side panels) and for the 850-hPa geopotential height (m) (right-side panels).....	39

- 10 Internal variability experiment (20-member ensembles on a set of different model domain sizes): Time-averaged variability ($\sqrt{\sigma_{en}^2}$) computed for each domain size for the precipitation (mm/day) (left-side panels) and for the 850-hPa geopotential height (m) (right-side panels)..... 40
- 11 Internal variability experiment (20-member ensembles on a set of different model domain sizes): Four day time evolution (0000 UTC 18 July - 0000 UTC 21 July) of precipitation ensemble mean (mm/day) (color) and 850-hPa geopotential height ensemble mean (dam) (red contour) over the common area to domains 120×120 (left-side panels), 110×110 (middle panels, and 100×100 (right-side panels)... 41
- 12 Internal variability experiment (20-member ensembles on a set of different model domain sizes): Variation of the domain-average time-averaged internal variability ($\sqrt{\sigma_{en}^2}$) with the domain size..... 42
- 13 Internal variability experiment (20-member ensembles on a set of different domain sizes): Variability of the seasonal-mean ($\sqrt{\sigma_s^2}$) computed for each domain size for the precipitation (mm/day) (left-side panels) and for the 850-hPa geopotential height (m) (right-side panels)..... 43
- 14 Variability with domain size of the ensemble mean seasonal mean, computed from ensembles of 20 simulations on different model domain sizes: Precipitation inter-domain variability ($\sqrt{\sigma_b^2}$) (mm/day) (left-side panel) and precipitation coefficient of variation (I_D) (%) (right-side panel). Statistics were computed over the diagnostic area... 44
- 15 Variability with domain size of the seasonal ensemble mean, computed from ensembles of 20 simulations on different model domain sizes: 850-hPa Geopotential height $\sqrt{\sigma_b^2}$ (m). Statistics were computed over the diagnostic area..... 45
- 16 Bimodal solutions (20-member ensemble, domain 140×140): The 20 members of the ensemble appeared to separate into a group of six simulations (left-side panels) and 14 simulations (middle panels) during the integration of 850-hPa geopotential height (dam); the inter-member variability $\sqrt{\sigma_{en}^2}$ (dam) (right-side panels) for this particular case (valid at 0000 UTC 11 July 1993-0000 UTC 13 July 1993). 46
- 17 Bimodal solutions (20-member ensemble, domain 120×120): The 20 members of the ensemble appeared to separate into a group of five simulations (left-side panels) and 15 simulations (middle panels) during the integration of 850-hPa geopotential height (dam); the inter-member variability $\sqrt{\sigma_{en}^2}$ (dam) (right-side panels) for this particular case (valid at 0000 UTC 19 July 1993-0000 UTC 22 July 1993). 47

18	Bimodal solutions (20-member ensemble, domain 120×120): Particular case of one extreme deviation (blue) detected in the time evolution of the 850-hPa geopotential height (dam) (left-side panel) and the inter-member variability $\sqrt{\sigma_{en}^2}$ (dam) (right-side panel) corresponding to this case (valid at 0000 UTC 25 July 1993).....	48
19	Bimodal solution experiment: RMSD time series for the 850-hPa geopotential height (m) (left-side panels) and “zoom” of the main RMSD time series maximum (right-side panels) computed for 140×140 , 120×120 , 110×110 , 100×100 and 80×80 domains.....	49
20	Bimodal solutions experiment: The group of five simulations (up left-side panel) and the group of fifteen simulations (up-middle panel) detected as a bimodal solution in the time evolution of the 850-hPa geopotential height ensemble (dam) on the 120×120 domain behave similarly on the 100×100 -domain (down left-side and down-middle panels). Ensemble-mean precipitation (mm/day) (in red contour) and 850-hPa geopotential height variability $\sqrt{\sigma_{en}^2}$ (dam) (colour) (right-side panels).....	50

LISTE DES ACRONYMES

CI	Conditions initiales
CRCM	Canadian Regional Climate Model
GCM	General Circulation Model
IC	Initial Conditions
LBC	Lateral Boundary Conditions
MCG	Modèle de Circulation Générale
MRC	Modèle Régional de Climat
MRCC	Modèle Régional Canadien de Climat
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
RCM	Regional Climate Model
SST	Sea Surface Temperature
UQÀM	Université du Québec à Montréal
US	United States

LISTE DES SYMBOLES

I	precipitation coefficient of variation
I_D	inter-domain coefficient of variation
M	number of ensemble members
N	number of domains
NT	total time-steps available ($NT = 369$)
NT'	total time-steps corresponding to one week of integration ($NT' = 28$)
$RMSD$	spatial root-mean-square differences
$-xy$	operator refers to a spatial average over the domain
$\langle X \rangle(i, j, k, t)$	ensemble mean
$X_m(i, j, k, t)$	value of the variable X on grid point (i, j, k) at time t for the member m of the ensemble
$\overline{\langle X \rangle}_n^t(i, j, k)$	seasonal ensemble mean of the simulated field on the domain n
$\overline{X}_m^t(i, j, k)$	seasonal average of each ensemble member
$\overline{\langle X \rangle}^t(i, j, k)$	seasonal average of the ensemble mean
$[\overline{\langle X \rangle}^t(i, j, k)]$	average of the n seasonal ensemble means ($n=1$ to 5 corresponding to five different domain sizes)
$\sqrt{\sigma_{en}^2}^{xy}$	square root of spatially averaged variance
$\sqrt{\sigma_{en}^2}^t$	square root of seasonal variance
$\sqrt{\sigma_{en}^2}^{t'}$	square root of weekly variance
$\sqrt{\sigma_s^2}$	square root of variance between individual member seasonal

	averages
$(\sqrt{\sigma_D^2})$	square root of inter-domain variance
$[\overline{X}]_{(i,j,k)}$	average of the n seasonal ensemble means ($n=1$ to 5 corresponding to five different domain sizes)

RÉSUMÉ

À cause des non-linéarités dans les processus atmosphériques, les modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCG) sont sensibles aux conditions initiales (CI). Autrement dit, les MCG peuvent générer plusieurs solutions de la circulation atmosphérique si un petit changement affecte les CI du modèle. La divergence de ces solutions devient importante en quelques jours de simulations en limitant de cette façon l'habilité des prévisions atmosphériques à une période limitée de temps. Comme une conséquence de l'existence de la variabilité interne, n'importe quel climat peut être décomposé en deux termes : le signal, associé au forçage externe, qui est indépendant des CI, et le « bruit » dû à la variabilité interne qui est générée par cette sensibilité du modèle aux CI. Contrairement aux MCG qui couvrent entièrement le globe et qui possèdent une large variabilité interne, les Modèles Régionaux de Climat (MRC) sont limités et pilotés à leurs frontières latérales par les données qui proviennent d'un MCG. La variabilité interne sera influencée dans ce cas par toutes les contraintes et les conditions qui définissent les MRC comme par exemple, les conditions aux frontières latérales (CFL), la taille ou la position géographique du domaine.

Cette étude analyse la variabilité interne du Modèle Régional Canadien de Climat (MRCC) et les possibles conséquences sur les analyses statistiques des simulations saisonnières. Dans ce but, des ensembles de 20 simulations qui diffèrent légèrement dans leurs CI ont été générés avec le MRCC pour différentes tailles du domaine sur une période saisonnière de trois mois. Le degré de variabilité interne du modèle a été apprécié selon le degré d'écart entre les simulations durant la période d'intégration. Les résultats montrent que la variabilité interne du MRCC, estimée statistiquement comme la variance entre les 20 simulations de l'ensemble, dépend fortement des événements synoptiques. Cette dépendance est notamment observée dans les variations de la variance enregistrées durant la période d'intégration. Selon notre étude, ces variations ont une distribution géographique qui dépend de la variable étudiée. L'évolution temporelle des patrons synoptiques montre que les maximums des variances pour les deux champs étudiés, la précipitation (le maximum au sud des États-Unis) et la hauteur du géopotential à 850 mb (le maximum vers le nord-est du domaine) sont reliés entre eux. Les événements de forte précipitation du sud des États-Unis (qui correspondent au maximum de l'écart entre les simulations de la précipitation) engendrent aussi un écart des simulations du champ de la hauteur du géopotential. Cet écart entre les simulations du champ de la hauteur du géopotential

se développe dans les circulations cycloniques et atteint son maximum vers le nord-est (où la variance est maximale), avant de quitter le domaine.

Utilisée comme une mesure de la variabilité interne à l'échelle saisonnière, la variance entre les moyennes saisonnières des membres de l'ensemble montre des valeurs importantes pour la statistique saisonnière du champ simulé sur les grands domaines. Cela suggère qu'une seule simulation pourrait produire des erreurs significatives dans l'estimation de la moyenne saisonnière du champ simulé, spécialement pour le champ de la précipitation. Notre expérience montre que les réductions de la taille du domaine diminuent la variabilité interne du modèle dans les aires convectives trouvées comme des aires de forte variabilité interne, mais une importante variation dans la distribution géographique et l'amplitude de la variabilité interne a été détectée à l'intérieur du domaine avec les réductions successives du domaine.

Finalement, certains de nos résultats sont reliés au comportement complexe des simulations de l'ensemble durant la période d'intégration, en relevant l'habileté du modèle à générer des solutions bimodales des champs simulés sur les grands domaines d'intégration. La division de l'ensemble en deux groupes différents de simulations a généré pour une période courte de simulation deux estimations différentes du même champ simulé. Les résultats ont montré que cette division de l'ensemble coïncide avec la période durant laquelle la variabilité interne du modèle est maximale.

Mots clés : modèle régional de climat, ensemble de simulations, variabilité interne.

ABSTRACT

Due to nonlinearities in the atmospheric processes, General Circulation Models (GCMs) are sensitive to initial conditions (IC). In other words, a GCM can generate several atmospheric circulation solutions for small perturbation to the IC. The large variance of these solutions over just a few days of simulation limits the atmospheric forecasts for a short period of time. Due to the presence of internal variability, any simulated climate can be decomposed into two components: signal, associated with external forcing, and the "noise" or internal variability reflecting the sensitivity of the model to IC. Contrary to GCMs, which cover the entire globe and exhibits a large internal variability, Regional Climate Models (RCMs) are limited-area models controlled and supplied at their lateral boundaries by GCM data. The internal variability will be influenced in this case by all constraints and conditions which define RCMs such as domain size, domain location, type of lateral boundary conditions (LBC).

This study analyzes the internal variability of Canadian Regional Climate Model (CRCM) and possible consequences on seasonal statistics of simulations. To accomplish this goal, a set of five 20-simulation ensembles (differing slightly in their IC) was generated with the CRCM for different domain sizes over the summer period of 1993. The degree of internal variability of the model was assessed by extent of the spread among the ensemble simulations during the integration period. Results show that the CRCM internal variability, estimated statistically as variance between 20-member ensemble simulations, depends strongly on synoptic events. This dependence is clearly observed in the pulsating behaviour of the time evolution of variance during the period of integration. According to our study, the geographical distribution of these pulsations depends on examined variable. The time evolution of synoptic patterns shows that maxima of the variance for the 850-hPa geopotential height are linked to precipitation variance maxima. Results show that strong precipitation events from convective areas (e.g., Southern United States), which correspond to largest spread of precipitation ensemble simulations, are also suspected to be a triggering mechanism for the 850-hPa geopotential height ensemble spread which occurs concurrently. This spread between 850-hPa geopotential height simulations develops along the storm track and reaches its maximum towards the northeast of the domain.

The influence of the CRCM internal variability at the seasonal scale was evaluated statistically by computing the variance between individual member seasonal averages of the ensemble. The large values suggest the influence of the internal variability on seasonal average of the simulated field in the case when the downscaling would be performed with one simulation. The study reveals that successive reductions of the domain size induce a general decrease in the internal variability of the model, but an important variation in its geographical distribution and amplitude was detected.

Finally, some results of our study are related to the complex behavior of the ensemble simulations during the integration period. The division of the ensemble in two groups of simulations on the large domains of integration generated two different evaluations of the simulated field for a short period of integration. The results showed that this division of the ensemble coincides with the period during which the internal variability of the model is maximized.

Keywords: regional climate model, ensemble of simulations, internal variability.

INTRODUCTION

Conçus pour simuler le plus fidèlement possible le climat, les modèles de la circulation générale de l'atmosphère (MCG) sont des modèles d'un haut degré de complexité, basés sur les principes physiques qui représentent les mouvements de l'atmosphère dans sa structure tridimensionnelle. Malgré leur complexité, la résolution grossière des MCG, d'environ 350 km, limite la représentation adéquate de certains processus climatiques, en particulier les processus hydrologiques (IPCC, 1992 et 2001). Afin d'améliorer la qualité du climat simulé, une approche complémentaire, basée sur un modèle de haute résolution couvrant une région limitée du globe a été développée. Ces modèles à aire limitée, appelés communément modèles régionaux de climat (MRC), sont « alimentés » à leurs frontières latérales avec des données météorologiques fournies par un MCG ou avec des analyses d'observations disponibles. Conditionnés de cette façon à leurs frontières latérales, les MRC sont basés sur les mêmes principes physiques que les MCG mais leur résolution de 10 à 30 fois plus élevée (de 10 à 50 km) leur permet de mieux représenter les processus physiques à l'échelle régionale qu'un MCG.

Étant donné que les processus atmosphériques sont non-linéaires, ces modèles climatiques (mondiaux et régionaux) sont sensibles aux conditions initiales (CI). Cette sensibilité basée sur la dynamique et physique du modèle qui simule les processus atmosphériques consiste en fait dans l'habileté du modèle climatique de générer plusieurs solutions pour un petit changement dans ses CI. Dans le cas du MCG, la divergence de ces solutions devient assez importante après quelques jours de

simulations [i.e., von Storch, 2005], qu'elle peuvent être considérées comme des solutions complètement différentes du modèle, et en limitant de cette façon l'habileté des prévisions atmosphériques à une période courte de temps. Dans le cas du MRC, les estimations des simulations climatiques montrent aussi que les mêmes conditions des frontières latérales (CFL) ne déterminent pas une solution unique à l'intérieur du domaine d'intégration. Toutefois, contrairement au MCG, la divergence des solutions à l'intérieur du domaine semble être limitée par les conditions imposées au MRC (i.e., CFL, la taille ou la position géographique du domaine). Nous pouvons parler dans ce cas d'une divergence « intermittente » des solutions à l'intérieur du domaine [von Storch, 2005].

Comme conséquence, n'importe quel climat simulé peut être décomposé en deux termes :

- i) le signal reproductible qui est associé au forçage externe;
- ii) « le bruit » ou la variabilité interne du modèle qui reflète la sensibilité du modèle aux CI.

En principe, les deux termes, le signal et le bruit, pourraient être séparés en utilisant un ensemble de simulations générées par un MRC avec le même forçage externe, mais en utilisant des CI différentes. Lorsque toutes les simulations de l'ensemble sont absolument identiques, sauf pour les conditions par lesquelles ces simulations sont initialisées, le degré d'éloignement entre les simulations montre le degré de variabilité interne du modèle. Autrement dit, cet écart entre les simulations pendant la période d'intégration montre l'importance de la variabilité interne du modèle qui a généré les simulations. Afin de mesurer les différences entre les solutions du modèle à l'intérieur de son domaine, les outils statistiques souvent utilisées sont l'écart type entre les simulations de l'ensemble et la racine carrée des différences quadratiques moyennes des paires de simulations (RMSD).

Une évaluation de la variabilité interne du MRC est requise, parce que dans certaines conditions, cette variabilité pourrait moduler ou même cacher les signaux du modèle. Comme un exemple de son importance, les différences enregistrées dans l'évolution d'un événement météorologique donné, pourraient être interprétées comme une réponse aux changements dans le forçage, quand en fait c'est une manifestation de la variabilité interne du modèle [i.e., Giorgi et Bi, 2000; Caya et Biner, 2004]. L'expérience montre aussi que dans le cas d'un changement intervenu dans l'un des paramètres du modèle, la connaissance de la magnitude de la variabilité interne du modèle permet une appréciation quantitative objective de l'importance de la réponse au changement dans le paramètre respectif [i.e., Weisse et al., 2000].

Due à son importance sur la qualité des simulations réalisées avec les MRC, la variabilité interne a été traitée dans de nombreuses études de sensibilité. Les résultats obtenus ont montré la complexité de cet aspect de la modélisation régionale, mais aussi la nécessité d'approfondir les connaissances actuelles sur la variabilité interne des MRC. Pour avoir une image plus claire sur la notion actuelle de la variabilité interne des MRC, une brève présentation des résultats et des conclusions de certaines études précédentes est réalisée dans les pages suivantes.

Weisse et al. [2000] ont remarqué l'influence de la variabilité interne sur les interprétations des résultats des MRC, pendant une étude de sensibilité d'un modèle à aire limitée au paramètre de rugosité de la surface. Leur étude consiste en fait dans une comparaison des résultats de deux expériences réalisées pour la même année 1993 avec deux ensembles de simulations qui diffèrent seulement par la manière de définir le paramètre de rugosité choisi. Ils ont observé que les différences les plus importantes entre les deux ensembles arrivent lorsque la variabilité interne du modèle devenait importante. Ils ont conclu que la différence des résultats ne peut pas être attribuée exclusivement à la sensibilité du modèle au paramètre de rugosité, mais

aussi à la variabilité interne du modèle. Toutefois, la difficulté de distinguer entre la réponse du modèle atmosphérique au paramètre de rugosité modifié et la variabilité interne du modèle, qui peut moduler le vrai signal, rend nécessaire, selon les auteurs de cette étude, une évaluation préliminaire de la variabilité interne du modèle.

Une étude de la variabilité interne a été aussi réalisée par Giorgi et Bi [2000] en utilisant des perturbations aléatoires pour les CI et les CFL des simulations réalisées par un MRC au-dessus de l'est de l'Asie pendant l'automne de 1994 et l'hiver, le printemps et l'été de l'année 1995. Une comparaison entre les simulations perturbées du modèle et les simulations originales (sans perturbations) a permis une analyse de la réponse du modèle aux perturbations, qui est en fait une mesure de la variabilité interne du modèle. Les résultats montrent que la réponse du modèle est indépendante de la source et de la magnitude des perturbations, mais une dépendance significative des conditions synoptiques et de la saison a été détectée. Les valeurs obtenues diffèrent pour les deux saisons : le maximum de la variabilité interne a été enregistré pendant l'été, quand la circulation zonale est plus faible et l'activité convective est importante dans cette région, tandis que le minimum a été trouvé en hiver quand le courant jet plus fort « transporte » les systèmes météorologiques plus vite hors du domaine. Le contrôle plus fort en hiver qu'en été exercé par les CFL explique encore le comportement différent de la variabilité interne pendant les deux saisons. Une influence significative de la variabilité interne sur les solutions journalières du modèle, spécialement pour le champ de la précipitation pendant la saison d'été, et sur la fréquence d'occurrence des événements de forte précipitation a été aussi trouvée dans le cadre de la même expérience.

Une attention particulière à ce sujet est donnée par l'étude de Christensen et al. [2001]. Ils ont généré un ensemble de six simulations de l'année 1982 en utilisant deux MRC avec des CFL identiques. Les deux MRC ont la même résolution et

couvrent des sections différentes de la région méditerranéenne. Pour les deux expériences, l'estimation de la variabilité interne a été faite par une analyse et une comparaison des moyennes mensuelles des six simulations de l'année 1982. D'après leurs résultats, la variabilité interne dépend des particularités du MRC utilisé, de la variable simulée et de la région d'intégration. De plus, l'influence de la taille du domaine sur la variabilité interne a aussi été étudiée. L'étude montre que la variabilité interne a la même magnitude dans les deux MRC utilisés, mais la distribution géographique peut varier considérablement. Une comparaison des résultats des MRC avec ceux d'un MCG montre une dépendance de variable. Par exemple, pour la température de l'air à la surface, le MRC montre une variabilité interne beaucoup plus petite que celle du MCG, tandis que pour l'évaporation et la précipitation le modèle développe pendant l'été une variabilité interne comparable à celle du MCG. Les auteurs de cette étude concluent que la connaissance de la variabilité interne du modèle permet une meilleure estimation qualitative des simulations réalisées par les MRC.

Une étude de la variabilité interne du MRC a été aussi réalisée par Rinke et al. [2004] sur les simulations au-dessus de la région Arctique pour une année (septembre 1997 – septembre 1998). Les résultats obtenus pour cette région particulière du globe montrent le caractère complexe de la variabilité interne et confirment encore une fois son importance dans les interprétations des simulations réalisées avec les MRC. Leur expérience montre que la variabilité interne, mesurée par les différences entre les moyennes saisonnières et mensuelles des pairs de simulations (générées par des petites perturbations dans les conditions initiales et de frontière), est significativement plus large que celle qui a été notée pour les domaines aux latitudes moyennes du globe. Les résultats confirment l'indépendance de la réponse du modèle du type et de la source de perturbation, trouvée par Giorgi et Bi [2000] aux latitudes moyennes, mais une dépendance particulière de la saison a été trouvée. Contrairement aux

résultats de Giorgi et Bi [2000], la variabilité interne du MRC au-dessus du domaine Arctique atteint son maximum pendant la saison automne-hiver, tandis que son minimum se trouve en été. Les résultats montrent aussi qu'une réduction de la taille du domaine diminue les valeurs de la variabilité interne. En considérant l'importance de leurs résultats, les auteurs de cette étude tiennent à souligner les implications que la variabilité interne pourrait avoir sur la qualité des simulations climatiques du MRC. Ils considèrent qu'une variabilité interne large, comme celle qui a été trouvée sur le domaine Arctique, nécessite, afin d'avoir une estimation climatique fiable, un large ensemble de simulations pour chaque expérience réalisée avec le MRC.

Trois simulations d'une année avec des CI atmosphériques et de surface différentes, mais qui partagent les mêmes CFL, sont comparées dans une étude de la variabilité interne du MRC Canadien (MRCC) réalisé par Caya et Biner [2004]. Pour les différentes variables étudiées, les résultats montrent que les simulations sont très semblables pendant la saison d'hiver, ce que dénote le niveau bas de variabilité interne, tandis qu'en été les différences entre les simulations deviennent importantes, ce que dénote une variabilité interne élevée du modèle, mais aussi un contrôle plus faible exercé par les frontières latérales à l'intérieur du domaine. L'expérience montre aussi que même si l'évolution des différents systèmes météorologiques peut être bien différente pendant l'été, les moyennes climatiques annuelles de chaque simulation sont similaires.

Girard et Bekcic [2005] ont réalisé deux ensembles de simulations d'un mois au-dessus du domaine Arctique avec un MRC dont la résolution horizontale est de 50 kilomètres et de 100 kilomètres. Leurs résultats montrent qu'une augmentation de la résolution de 100 à 50 kilomètres augmente la capacité du modèle de développer sa propre circulation. Dans le cas de la résolution de 50 km, la variabilité interne pour toutes les variables examinées est généralement plus grande, particulièrement au delà

des frontières des glaces de mer et du Groenland. La glace de mer et la meilleure résolution de la topographie semble augmenter d'une manière significative la variabilité interne du modèle au delà de ces superficies du domaine, en accord avec l'hypothèse formulée par Rinke et Dethloff [2000]. L'étude a également montré une petite variabilité interne sur l'Europe du Sud et la mer de Beaufort, où le contrôle exercé par les CFL sur les simulations du domaine est plus fort.

L'influence de la taille du domaine sur la qualité des simulations du MRC a été aussi étudiée par Vannitsem et Chome [2005]. Sept tailles différentes du domaine au-dessus de l'ouest de l'Europe ont été choisies dans le cadre d'une expérience de sensibilité de quarante jours réalisée avec le MRC Eta. Les résultats montrent qu'un petit changement dans les CI ou de surface ne change pas significativement la solution du modèle pour les petits domaines, ce qui suggère que la variabilité autour de l'attracteur de la solution pour les CFL imposées est aussi très petite dans ce cas. Contrairement aux petits domaines, l'expérience révèle pour les grands domaines une influence importante des CI sur la qualité des simulations. Les différences significatives entre les trajectoires des simulations initialisées différemment montrent une large variabilité des solutions. Les auteurs de cette étude concluent finalement que la relation entre la qualité du modèle et la taille de son domaine est une relation assez importante pour qu'elle soit prise en compte dans les expériences de sensibilité des MRC.

Une étude focalisée principalement sur l'influence de la taille du domaine sur la variabilité interne a été réalisée par Lucas-Picher et al. [2007] pour le MRCC. Leur expérience est basée sur un ensemble de deux simulations de cinq ans (initialisées avec un décalage d'un mois entre elles) qui a été reproduit pour différentes configurations du MRCC. Les résultats montrent qu'un changement de la position du domaine de l'est à l'ouest sur le même parallèle dans la région des latitudes

moyennes est associé à une variabilité interne (mesurée par les différences entre les deux simulations) un peu plus élevée dans la partie de l'ouest du domaine. Le changement de la taille du domaine a montré une basse variabilité interne pour le petit domaine, tandis qu'une grande variabilité interne a été trouvée dans le cas du grand domaine. Contrairement aux études précédentes [Caya et Biner, 2004, Christensen et al., 2001, Giorgi et Bi, 2000], le maximum de la variabilité interne a été trouvé pour le grand domaine pendant la saison d'hiver.

Les études présentées ci-haut suggèrent la nécessité d'une étude plus approfondie de cet aspect important de la modélisation régionale. La présent mémoire continue la recherche dans cette direction, en donnant une attention particulière à l'influence de la dimension du domaine sur la distribution géographique de la variabilité interne du MRCC. La méthodologie adoptée est basée sur un ensemble de 20 simulations qui a été reproduit pour différentes tailles du domaine pendant la saison d'été de l'année 1993. La variabilité interne du MRCC a été principalement mesurée par l'écart type entre les simulations de l'ensemble, pour chaque taille du domaine. La recherche a débuté par une analyse détaillée de l'ensemble utilisé dans l'expérience afin de trouver le nombre minimal de simulations nécessaires pour une estimation fiable de la variabilité interne. Dans la deuxième partie, la magnitude et la distribution géographique de la variabilité interne ont été investiguées pour une taille donnée du domaine. Par la suite, nous avons étudié dans quelle mesure un changement de la taille du domaine pourrait affecter cette distribution géographique de la variabilité interne.

CHAPITRE I

ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ INTERNE DES MODÈLES PILOTÉS : APPLICATION DE LA TECHNIQUE D'ENSEMBLE AU MODÈLE RÉGIONAL CANADIEN DE CLIMAT

Ce chapitre, présenté sous forme d'un article rédigé en anglais, est focalisé principalement sur les analyses et les interprétations des résultats obtenus dans une étude réalisée sur la variabilité interne du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC). Le chapitre contient aussi des informations sur le MRCC, la configuration de l'expérience et la méthodologie appliquée.

Internal Variability in Regional Climate Downscaling at the Seasonal Scale

Adelina Alexandru¹, Ramon de Elia^{1,2} and René Laprise¹

¹ Université du Québec à Montréal

² Ouranos Consortium

Submitted to Monthly Weather Review

September 2006

Corresponding author address:

Adelina Alexandru
Département des Sciences de la Terre et de l'Atmosphère, UQAM-Ouranos
550 rue Sherbrooke Ouest, 19e étage, Tour Ouest
Montréal, Québec
Canada H3A 1B9
Tel.: +1 (514) 282-6464 ext. 432
Fax: +1 (514) 282-7173
e-mail: adelina@sca.uqam.ca

Abstract

In order to study the internal variability of the model and its consequences on seasonal statistics, large ensembles of 20 three-month simulations of the Canadian Regional Climate Model (CRCM), differing only in initial conditions (IC), were generated over different domain sizes in eastern North America for a summer season.

The degree of internal variability was measured as the spread between the individual members of the ensemble during the integration period. Results show that the CRCM internal variability depends strongly on synoptic events, as seen by the pulsating behaviour of the time evolution of variance during the period of integration. The geographical distribution of variance depends on the variables; precipitation shows maximum variance in the South of the United States, while 850-hPa geopotential height exhibits maximum variance in the northeast part of the domain. Results suggest that strong precipitation events in the South of the United States may act as triggering mechanism for the 850-hPa geopotential height spread along the storm track, which reaches its maximum towards the northeast of the domain.

The study reveals that successive reductions of the domain size induce a general decrease in the internal variability of the model, but an important variation in its geographical distribution and amplitude was detected. The influence of the CRCM internal variability at the seasonal scale was evaluated statistically by computing the variance between individual member seasonal averages of the ensemble. Large values of internal variability suggest possible repercussions of internal variability on seasonal statistics.

1. Introduction

It is already well established that due to the chaotic and nonlinear nature of atmospheric processes, Global Climate Models (GCMs) are sensitive to initial conditions (IC) [e.g., Griffies and Bryan, 1997; von Storch, 2005]. GCMs generate solutions of the atmospheric circulation that become significantly different after a few days of simulation when run with slightly different IC.

Regional Climate Models (RCMs) are limited-area models that are driven at their lateral boundaries by reanalyses or GCM-generated data. Their higher resolution when compared to GCMs allows fine-scale details to be added upon the driving large-scale flow. Despite the fact that RCMs are constrained by lateral boundary conditions (LBC), internal variability has been reported several times [e.g., Christensen et al., 2001]. RCM's sensitivity to IC appears to vary as a function of season, domain size and geographical location [e.g., Caya and Biner, 2004; Rinke et al., 2004].

As a consequence of the presence of internal variability, one may decompose any simulated climate into two components: (i) a reproducible signal associated with the external forcing (surface and LBC), (ii) a noise component due to internal variability reflecting the sensitivity to IC. In principle, the two components, signal and noise, could be separated using an ensemble of RCM simulations performed under identical conditions, except only for the conditions by which the model is initialized: deviations between such runs would reflect the degree of the internal variability of the model.

The presence of internal variability can obscure physically forced signals. For example, differences noted in simulations of a given weather event could be

interpreted as a response to changes in forcing when in reality it could be only a manifestation of the model's internal variability [e.g, Caya et Biner, 2004]. In the case of a change in one of the model's parameters, the information about the magnitude of the model's internal variability may allow to assess the sensitivity of the response to the change of the respective parameter [e.g., Weisse et al., 2000, Christensen et al., 2001].

The investigation of RCMs internal variability began only a few years ago, and some of the recent findings are summarised here. Weisse et al. [2000] studied the sensitivity of a limited-area model to a sea state-dependent roughness parameter by comparing two sets of experiments. They noticed that the most important differences between the two experiments occurred concurrently with episodes of high internal variability. They also found a statistically significant impact of the sea state-dependent roughness on the atmospheric circulation when the internal variability was small; the rest of the time, the impact of the sea state-dependent roughness on the atmospheric circulation appeared to be hidden by the internal variability of the model. Consequently, the authors recommended that model internal variability should be taken into account in the sensitivity test.

Giorgi and Bi [2000] analyzed RCM's sensitivity to initial and boundary conditions over eastern Asia for a 12-month period. They added random perturbations to IC and LBC of the simulations and compared the model results from the perturbed runs with those from the original simulation without perturbation. Results showed that RCM's internal variability is insensitive to the amplitude and the type of the perturbations in the IC. However, the RCM internal variability seemed to be linked to synoptic conditions, season (maximum response in summer and minimum in winter), region and model configuration. They also noted that, while the day-to-day model solutions were affected, the domain-wide statistics were not. The authors concluded

that the internal variability is a factor that should be considered in the design, analysis and interpretation of RCM tests.

Christensen et al. [2001] studied internal variability using two RCMs for generating an ensemble of one-year simulations with the same LBC in different areas of the Mediterranean region. Their study shows that internal variability has similar magnitude in the two regional models, but geographical distributions may vary significantly. The comparison between internal variability of RCMs with that of a GCM shows a strong dependence on the variable; for example, surface air temperature shows a much lower internal variability in an RCM than in a GCM, while evaporation and precipitation exhibit, during the European summer, comparable internal variability. The authors of this study consider that the knowledge of the internal variability enables a better assessment of the RCM simulations.

A study about the importance of the internal variability was also performed by Rinke et al. [2004] for a one-year simulation with a pan-Arctic RCM. The magnitude of the internal variability was measured by the monthly and seasonal-mean pattern differences and the root mean square differences (RMSD). For this particular region, results show an internal variability generally larger than that reported earlier with mid-latitude domains. Their results show that model response to a perturbation does not depend strongly on the type and magnitude of perturbation, in agreement with results obtained by Giorgi and Bi [2000] for mid-latitude domains. Unlike Giorgi and Bi [2000] however, results show that the maximum response was found in autumn/winter and smaller variability in summer. They explained this behaviour of the internal variability by the Arctic atmospheric circulation and planetary waves activity being weaker during the summer. During the winter and autumn, large-scale Arctic circulation is dominated by a strong zonally symmetric flow that hinders the migration of the weather systems out of the circumpolar domain. The authors

conclude that the pronounced magnitude of internal variability must be taken into account when discussing the climate signal in Arctic RCMs.

Caya and Biner [2004] performed a three-member ensemble of one-year simulations with the CRCM over a large mid-latitude domain with the aim of studying internal variability over an annual cycle and possible effects for climate analysis. The CRCM internal variability shows two distinct seasonal behaviours: in winter all simulations exhibited very weak internal variability, while in summer large differences are noted between pairs of simulations. Over mid-latitudes in summer, the slower upper tropospheric winds appear to reduce the control exerted by LBC on the simulations within the domain. In addition, the stronger local processes (such as convection) could explain higher values of the internal variability in summer. The authors also remarked that, although the evolution of the various weather systems can be quite different, the seasonal means of each simulation were similar.

Girard and Bekcic [2005] performed two ensembles of 1-month simulations with a limited-area numerical climate model at a horizontal resolution of 50 km and 100 km over a pan-Arctic domain. Their results show that increasing the resolution from 100 to 50 km increases the ability of the model to develop its own circulation. In the case of smaller resolution, the internal variability for all examined variables is generally larger over most of the domain, especially over sea ice borders and Greenland. The sea ice and better resolution of topography seems to increase significantly the internal variability of the model over these areas of the domain, in agreement with the hypothesis formulated by Rinke and Dethloff [2000]. The study also showed small internal variability over southern Europe and Beaufort Sea, where the strong forcing by the driving observation analysis intensifies the control exerted by LBC on the simulations within the domain.

Vannitsem and Chomé [2005] investigated the impact of domain size on RCM simulations. Seven domain sizes centred over western Europe were chosen for a forty-day sensitivity test with the Eta RCM. Results show that small perturbations in the IC and the surface fields do not change significantly the model solution for small domains, suggesting that the variability around the attractor of the solution for a given set of LBC is very small. The experiment for larger domains, however, revealed significant differences among the trajectories of simulations, suggesting a large variability of model solutions.

Lucas Picher et al. [2007] also tested the influence of domain size on internal variability. Based on results of a five-year two-member ensemble for three different domain sizes covering eastern North America and part of the Atlantic Ocean, they found that internal variability has low values for the small domain. Contrary to previous results however [Giorgi and Bi, 2000; Christensen et al., 2001; Caya and Biner, 2004], they found that large internal variability occurred during winter season for the large domain.

The purpose of this work is to assess the characteristics of the internal variability in a nested RCM, giving a special emphasis to its geographical variations. The first step consists in the evaluation of the number of ensemble members required to obtain a robust estimation of internal variability. Later, we use this finding to describe the main features of the time evolution and geographical distribution of internal variability at an instantaneous and seasonal scale and its sensitivity to domain size. Finally, we focus on a particular case where there seems to exist two attractors of the RCM solution for a set of LBC.

The work is organised as follows. Section 2 briefly describes the CRCM, simulation set-up and evaluation methods. Results are presented in Section 3, and the concluding remarks are discussed in Section 4.

2. The CRCM and Experimental Design

2.1. Model Description

The model used in the present study is Version 3.6.1 of the Canadian RCM [CRCM, Caya and Laprise, 1999]. The CRCM is a limited-area model based on the fully compressible Euler equations solved by a semi-implicit and semi-Lagrangian numerical scheme [Bergeron et al., 1994; Laprise et al., 1997]. The model uses the physical parameterization package of the second-generation CGCM [GCMii, McFarlane et al., 1992] except for the Bechtold-Kain-Fritsch deep and shallow convective parameterization [Kain and Fritsch, 1990; Bechtold et al., 2001]. The computational points are fixed on a three-dimensional staggered grid projected onto polar-stereographic coordinates in the horizontal and Gal-Chen terrain-following levels in the vertical [Gal-Chen and Somerville, 1975].

To define the initial state, the CRCM requires information of the following atmospheric fields: horizontal winds, vertical motion, temperature, surface pressure, and specific humidity. These atmospheric fields are also required at each timestep at the lateral boundaries of the model domain. Nudging is applied on the horizontal wind components over a relaxation zone of 10 grid-points near the lateral boundary where the CRCM-simulated winds are relaxed toward the values of the driving data [Davies, 1976]. In the present study, the necessary atmospheric IC and LBC are provided by NCEP data available every 6 hours. Fields provided at the boundaries are

linearly interpolated in time for each timestep [Kalnay et al., 1996]. In addition, the CRCM requires IC for the following land-surface variables: surface temperature, liquid and frozen soil water fraction, and snow amount and snow age. Ocean-surface variables are prescribed from AMIP data [Fiorino, 1997].

Figure 1 presents the domains and topography used for the CRCM simulations in the present study. Five model domains cover eastern North America and part of the Atlantic Ocean at approximately 45-km resolution with sizes varying from 140×140 to 80×80 grid points. In the vertical, 18 Gal-Chen levels are distributed from the ground to the model's lid at 30 km. The CRCM uses a 15-minute timestep.

2.2. Simulation Set-Up

Ensembles of 20-member simulations were performed over five different domain sizes. All integrations started with IC one day apart between the 0000 UTC 1 May 1993 and the 0000 UTC 20 May 1993; all simulations ended on 0000 UTC 1 September 1993, so that the 20 simulations overlap for the three months June-July-August 1993, with a spin-up period varying from 11 to 30 days. The integrations share exactly the same LBC for atmospheric fields and the same prescribed SST and sea-ice coverage for the ocean surface; the only difference consists in a delay of 24 hours in the beginning of each run of the ensemble.

2.3. Evaluation Methods

Internal variability of the model will be measured by the spread among the ensemble members during the integration period, using the standard deviation ($\sqrt{\sigma_{en}^2}$)

between the 20 members in the ensemble of simulations, where σ_{en}^2 is the variance estimated as

$$\sigma_{en}^2(i, j, k, t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (X_m(i, j, k, t) - \langle X \rangle(i, j, k, t))^2. \quad (1)$$

The term $X_m(i, j, k, t)$ refers to the value of a variable X on grid point (i, j, k) at time t for member m in the ensemble and M is the total number of ensemble members. The term $\langle X \rangle(i, j, k, t)$ is the ensemble mean defined as

$$\langle X \rangle(i, j, k, t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M X_m(i, j, k, t), \quad (2)$$

A measure of the domain-averaged internal variability during the course of the model integration is provided by the square root of the spatially averaged variance ($\sqrt{\overline{\sigma_{en}^2}^{xy}}$), where $\overline{\sigma_{en}^2}^{xy}$ is computed as

$$\overline{\sigma_{en}^2}^{xy}(k, t) = \frac{1}{I \times J} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sigma_{en}^2(i, j, k, t), \quad (3)$$

with I and J the number of grid points along x and y over the domain of interest.

The 3-month time average of internal variability and its spatial distribution in the domain for the entire season is provided by the square root of the time-averaged variance ($\sqrt{\overline{\sigma_{en}^2}^t}$), where $\overline{\sigma_{en}^2}^t$ is defined as

$$\overline{\sigma_{en}^2}^t(i, j, k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \sigma_{en}^2(i, j, k, t), \quad (4)$$

where N refers to the number of archived timesteps in the period of interest ($N = 369$ timesteps for three summer months at 6-h intervals). We also use in our estimations spatially-averaged time-averaged internal variability defined as the square root of the domain-averaged time-averaged variance $\sqrt{\overline{\sigma_{en}^2}^{t\sigma}}$, where $\overline{\sigma_{en}^2}^{t\sigma}$ is provided by

$$\overline{\sigma_{en}^2}^{xy}(k) = \frac{1}{I \times J \times N} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^N \sigma_{en}^2(i, j, k, t). \quad (5)$$

In order to appreciate the influence of internal variability at the seasonal scale by the variation of the seasonal-mean field, the spread between seasonal averages of the ensemble members were estimated as the square root of the variance between individual member seasonal averages ($\sqrt{\sigma_s^2}$), where σ_s^2 is computed as

$$\sigma_s^2(i, j, k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left(\overline{X}_m'(i, j, k) - \overline{\langle X \rangle}'(i, j, k) \right)^2, \quad (6)$$

where $\overline{X}_m'(i, j, k)$ is the seasonal average of member m , and $\overline{\langle X \rangle}'(i, j, k)$ is the seasonal average of the ensemble mean. The relative importance of internal variability on the seasonal mean is provided by the coefficient of variation (I) computed as

$$I(i, j, k) = \frac{\sqrt{\sigma_s^2(i, j, k)}}{\overline{\langle X \rangle}'(i, j, k)}. \quad (7)$$

This measure will be particularly useful for the precipitation field.

A measure for the domain-averaged departure of the individual simulations from the ensemble mean is obtained by computing root-mean-square differences (*RMSD*) as:

$$RMSD(k, t) = \sqrt{\left(X_m(i, j, k, t) - \langle X \rangle(i, j, k, t) \right)^2}^{xy}. \quad (8)$$

These statistics will be evaluated excluding the spin-up period and removing the 10-point relaxation zone. The study will focus on precipitation and 850-hPa geopotential height.

3. Results and Analysis

In this section we summarize our findings and discuss our results obtained by using ensembles of simulations. We will begin by evaluating the number of members required for a stable estimate of internal variability (Section 3.1). The spatial pattern and temporal variation of internal variability will be investigated in Section 3.2 and its sensitivity to domain size will be discussed in Section 3.3. At the end of this section we will present a particular case of a bimodal solution (Section 3.4).

3.1. Ensemble Size Experiment

Figure 2 shows an example of five ensemble members valid for 0000 UTC 25 July 1993. It can be noticed that, in certain areas, especially towards the centre of the domain, the model produces different solutions for the same set of boundary conditions.

Due to computational cost, several earlier studies of internal variability were based on small ensembles, generally with two to four members [e.g., Giorgi and Bi, 2001; Caya and Biner, 2004]. One of the first aims of our study was to investigate the impact of a small ensemble on the estimation of the CRCM internal variability. Hence, the model's internal variability is first estimated using ten different sets of two members taken from the 20-member ensemble for a 120×120 grid-point domain (which is a conventional domain size). Figure 3 shows the time evolutions of $\sqrt{\sigma_m^2}$ (as defined in (3)) for ten different two-member ensembles, for precipitation and 850-hPa geopotential height. Significant differences can be noted between these ten time series, in both the amplitude and timing of domain-averaged variability. Particularly telling is the variety of maxima on geopotential height towards the end of July. The

differences in the geographical distribution of the internal variability from these ten two-member estimations persist even after their averaging for the entire season, as shown in Fig. 4 for $\sqrt{\sigma_{en}^2}$ (as defined in (4)) of the 850-hPa geopotential height. While the maximum is located towards the northeast of the domain in all cases, significant differences in magnitude and geographical distribution are clearly visible among the estimates.

In order to evaluate the uncertainty in the estimation of the internal variability, the ensemble size was increased progressively. Figure 5 shows the time evolutions of $\sqrt{\sigma_{en}^2}$ obtained from ensembles composed of 10, 15 and 20 members. Similarities in timing and amplitude of internal variability are noted during the entire 3-month period. Good agreement in time-averaged internal variability ($\sqrt{\sigma_{en}^2}$) (Fig. 6) and in variability of the seasonal mean ($\sqrt{\sigma_s^2}$) (as defined in (6)) (Fig. 7) is also noted for the three ensemble sizes. Twenty members appear to provide a fairly robust estimate of internal variability. A larger ensemble size would have undoubtedly improved the estimation of internal variability, especially on an instantaneous basis, but this would have limited our computing ability to perform tests with different domain sizes, as reported in Section 3.3.

3.2. Geographical Distribution and Time Evolution of the Internal Variability

It is informative to study a specific event of internal variability. Figure 8 shows the ensemble-mean precipitation and the variability of the 850-hPa geopotential height $\sqrt{\sigma_{en}^2}$ (as defined in (1)) during four days of July (0000 UTC 21 July 1993-0000 UTC 24 July 1993). On 21 July 1993, large 850-hPa geopotential height $\sqrt{\sigma_{en}^2}$ values (5 dam) are noticed in the northeast part of the domain. That

spread among 850-hPa geopotential height simulations had been developing along the storm track four days before (18 July 1993) concurrently to heavy precipitation in the Southern US (not shown). On 21 July 1993, a new maximum of variability could also be seen over Georgia and South Carolina and collocated with it there was a region of heavy precipitation that had begun a day earlier. In the following days that maximum variability centre intensified and moved northeastward (as indicated by the blue arrow on Fig. 8). On 24 July 1993 a new centre of geopotential variability developed over Alabama, associated with another heavy precipitation event there. These cases suggest that large geopotential height internal variability could be found downstream of regions of heavy precipitation. Although this pattern was repeated a few times and tended to dominate the seasonal average, other mechanisms were present too.

The magnitude and geographical distribution of internal variability appear to vary greatly during the three months of this study. As an illustration, Figure 9 shows weekly-mean values for four specific weeks of the summer season. During the first week of June, very little internal variability in the precipitation is registered, while geopotential height is more active towards the northeast. The last week of June resembles partially the strong activity of late July, although the internal variability did not seem to propagate downstream as in July. The strong signal over the Mississippi valley during the August week was caused by a slow-moving hurricane-like system that achieves various levels of intensity in the different members (the large variability of the weeks 13-19 July (not shown) and 20-26 July (Fig. 9) contribute heavily to the three-month mean variability shown earlier in Fig. 6).

3.3. Influence of the Domain Size on the RCM Internal Variability

Experiments have been performed with five different domain sizes to study the influence of the domain size on internal variability. Given the apparent role of the

convection in the Southern US in triggering internal variability, all domains are defined keeping the southwest corner fixed (Fig. 1).

Figure 10 shows the time-averaged internal variability ($\sqrt{\overline{\sigma_{en}^2}}$) (as defined in (4)) for the precipitation and 850-hPa geopotential height, for various domain sizes. In general, larger domains lead to larger internal variability, although the increase in magnitude is not monotonic at each geographical location. For example, the 100×100 domain exhibits more intense internal variability of precipitation and geopotential height over the ocean East of Florida than the larger 110×110 or 120×120 domains. A detailed synoptic analysis of the simulations reveals that the 100×100 domain size developed a tropical storm in that region that lasted about four days, whereas it did not develop for the other domain sizes (Fig. 11). Excluding these four days, the simulations on the different domain sizes were rather similar. Yet the influence of these four days is non negligible in the 3-month time average of internal variability ($\sqrt{\overline{\sigma_{en}^2}}$).

Figure 12 shows the variation of domain-averaged time-averaged internal variability ($\sqrt{\overline{\sigma_{en}^2}}$) (as defined in (5)) with domain size. The aforementioned general increase of internal variability with domain size is noted, although the increase is not quite monotonic and is rather different for different variables. This absence of monotonic growth of internal variability with domain size might just be the result of sampling noise. A study with a larger number of summer seasons may confirm this hypothesis.

The influence of the domain size on the variability of seasonal mean ($\sqrt{\sigma_s^2}$) (as defined in (6)) is shown in Figure 13. As for $\sqrt{\overline{\sigma_{en}^2}}$, the $\sqrt{\sigma_s^2}$ tends to increase with domain size, but not uniformly.

A quantitative estimation of the uncertainty associated with the arbitrary choice of domain size can be obtained from the square root of inter-domain variance ($\sqrt{\sigma_D^2}$), where σ_D^2 is estimated as

$$\sigma_D^2(i, j, k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\overline{\langle X \rangle}_n'(i, j, k) - \left[\overline{\langle X \rangle}'(i, j, k) \right] \right)^2, \quad (9)$$

where the term $\overline{\langle X \rangle}_n'(i, j, k)$ refers to the ensemble-mean seasonal average of a simulated field on domain n ; the term without the subscription $\overline{\langle X \rangle}'(i, j, k)$ refers to the average of the N domains, hence

$$\left[\overline{\langle X \rangle}'(i, j, k) \right] = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \overline{\langle X \rangle}_n'(i, j, k), \quad (10)$$

where N is the number of domains (in our case, five different domains with sizes between 140×140 and 80×80 grid points, cf Fig. 1). We also estimated, for the precipitation field, the inter-domain coefficient of variation (I_D) as

$$I_D(i, j, k) = \frac{\sqrt{\sigma_D^2(i, j, k)}}{\left[\overline{\langle X \rangle}'(i, j, k) \right]}. \quad (11)$$

For this study, even though the integrations are performed using different domain sizes, the statistics are evaluated only over a diagnostic area corresponding to that of the smallest domain.

Figure 14 shows that the largest domain-size source of uncertainty in the precipitation mean is located over the Tennessee area, where the $\sqrt{\sigma_D^2}$ (as defined in (9)) reaches 2 mm/day with a corresponding inter-domain coefficient of variation I_D (as defined in (11)) about 36%. In the case of the 850-hPa geopotential height (Fig.

15), the $\sqrt{\sigma_b^2}$ maximum (about 10 m) is however found towards the northeast corner of the diagnostic area.

3.4. Clustering of Solutions on Different Attractors

Close synoptic inspection of the time evolution of each member in the ensemble has revealed a tendency for subsets of the members' solutions to cluster around some distinct states, which we will refer to as attractors. Figure 16 illustrates the particular case of bimodal solutions noted during the simulations of the 850-hPa geopotential height on the 140×140 domain for three consecutive days. The division of the ensemble into two groups occurs during the three days of July (11-13 July) and corresponds to a maximum of internal variability (shown on the right-side panels of Fig. 16).

Figure 17 shows the case of bimodal behaviour of the solutions in the time evolution of the 850 hPa-geopotential height on the 120×120 domain. The separation of the members into two groups has been made subjectively. During four days of July (19-22 July), the model's internal variability ($\sqrt{\sigma_{en}^2}$) was quite large (4.8 dam). The 20 members appeared to separate quite naturally into a group of five members and another group of 15 members. The low-pressure system off the East Coast appears to have two distinct preferred locations, a distance of some 600 km from one another. The clustering of the solutions has an effect on $\sqrt{\sigma_{en}^2}$ values (shown on the right-side panels of Fig. 17), which show distinct maxima (4.8 dam) around the "attractor". At a later time (0000 UTC 25 July 1993), one member stands out from the rest of the ensemble (Fig. 18, Fig. 19 for the 120×120 domain). In our study, such separation around different attractors did not occur for domains of 100×100 and smaller (Fig. 19).

In addition, our study shows that during the period when the 20-member ensemble divides into two groups on the 120×120 domain, the 20 members of the ensemble on the 100×100 domain behaved as a single group, simulating a low-pressure centre over the ocean (Fig. 20).

It is worthy to note that timestep values of internal variability are labeled in decameters (1-5 dam) in the areas of high internal variability (e.g., Fig. 8). The reduced scale (meters) is required in certain figures (e.g., Fig. 3, Fig. 5) since the results are derived by averaging over the entire domain $\sqrt{\sigma_n^2}$ (as defined in (3)), including areas where the internal variability is near zero or over the entire season $\sqrt{\overline{\sigma_n^2}}$ (as defined in (4)), including periods of the season where the internal variability is negligible (e.g., Fig. 4, Fig. 6).

4. Conclusions

The purpose of this work was to describe and assess the importance of the internal variability in a nested regional climate model (RCM). To this aim, ensembles of 20 simulations were performed over five different domain sizes. Each of the 20 simulations was driven by the same set of time-dependent lateral boundary conditions (LBC) taken from NCEP reanalyses using prescribed SST. The different members of the ensembles were initialized at one-day interval; the simulations were performed with the Canadian RCM (CRCM) for one summer season over the East Coast of North America.

Internal variability is defined as a measure of the spread between the members during the integration period. The results show that internal variability depends strongly on synoptic events, as seen by the pulsating behaviour of its time evolution.

Internal variability displays a preferential region within the domain, depending on the variable. For example, precipitation variability shows the largest values in the southeast United States, where large convective precipitation occurs, while the 850-hPa geopotential height variability is largest in the northeast part of the domain corresponding to the downstream region. Evaluation of the time evolution of the synoptic patterns suggests that the maxima of variability in precipitation and 850-hPa geopotential height may be linked: the former, mostly located in the southeast United States, acting as a triggering mechanism for the latter, which continues to develop along the storm track and reaches its maximum towards the northeast of the domain. This study confirms earlier results that internal variability increases with domain size. The study also shows that changes of domain size may alter considerably the geographical distribution of the internal variability.

The repercussions of internal variability are also felt on seasonal-mean quantities. This suggests that one-season statistics of simulated fields, especially precipitation, may be poorly estimated from a single simulation. Our results indicate that a minimum number of 10 members are required for a robust estimation of a seasonal-mean value for mid-latitude summer in certain areas where larger internal variability develops with large domains. The study suggests that a reduction of the domain size generally results in a significant reduction of the differences between the members statistics. There remain, however, regions with substantial internal variability magnitude, even at the seasonal scale.

A closer look at the evolution of the members in the ensembles reveals the occasional occurrence of bimodal solutions for the largest domains, during episodes of large internal variability. Model bimodal solutions could be the consequence of dynamical conditions that favour certain states, or simply the effect of poor sampling of the distribution with only 20 members. In any case, it is clear that undersampling

may have important consequences in the estimation of internal variability, as shown in the case of a strong low-pressure system detected by only one member of the 20-member ensemble. The presence of bimodal solutions and of extreme cases far from the rest of the solutions suggests that patterns of internal variability may behave in a non-Gaussian way.

Considering the magnitude and complex behaviour of internal variability, we conclude that it is a factor that should be considered in all analyses of RCM simulations.

Acknowledgements

This research was done as a project within the Canadian Regional Climate Modelling Network (CRCM), financially supported by the Canadian Foundation for Climate and Atmospheric Sciences (CFCAS) and the Ouranos Consortium on Regional Climatology and Adaptation to Climate Change. We are also thankful to Dr. Daniel Caya for useful discussions and collaboration, and to Claude Desrochers for maintaining a user-friendly computing environment.

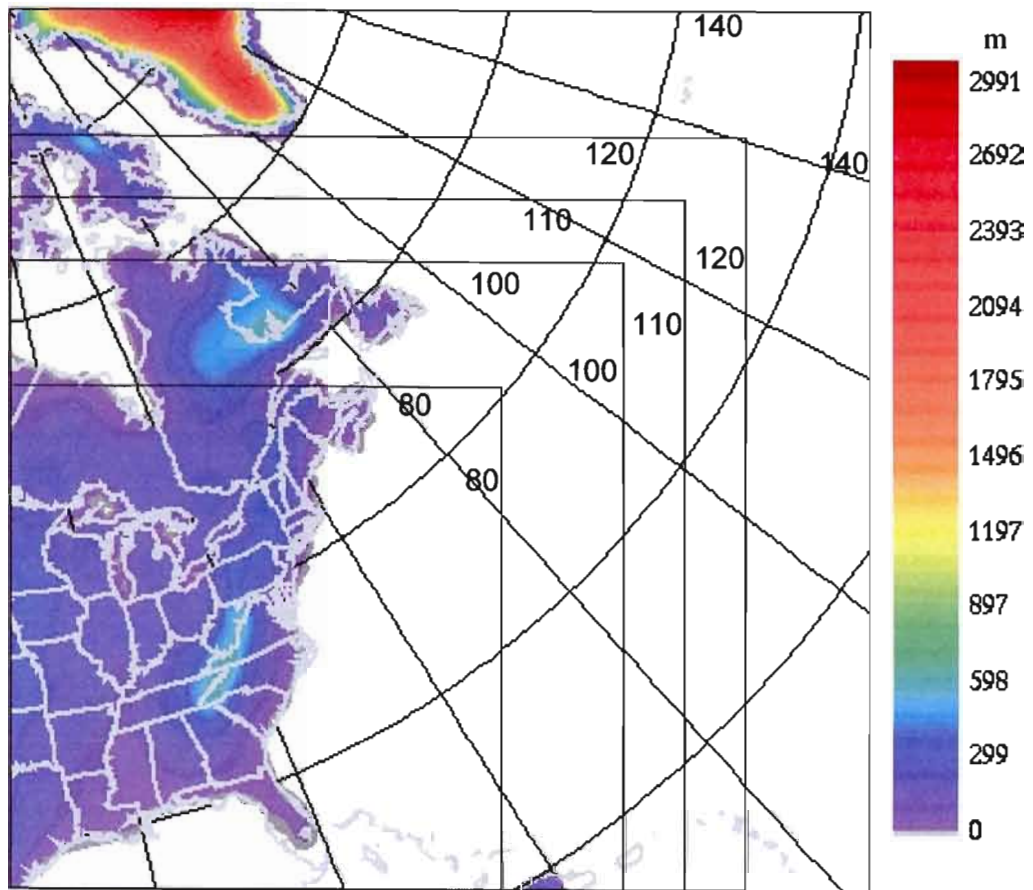
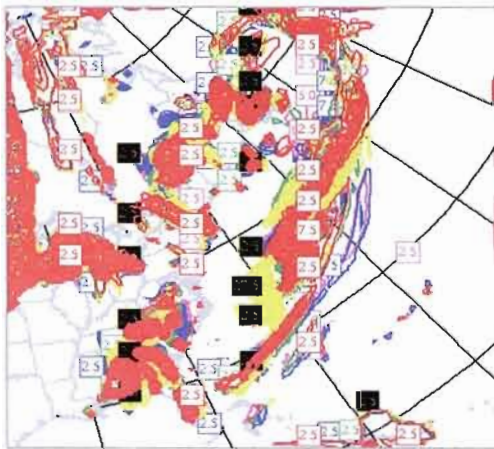


Figure 1. CRCM computational domains and topography (m).

Precipitation



850-hPa Geopotential height



Figure 2. Five members of CRCM runs with a delay of 24 hours in their IC (0000 UTC 1 May 1993-0000 UTC 5 May 1993) for the 850-hPa geopotential height (dam) (left-side panel) and for the precipitation (mm/day) (right-side panel) valid at 0000 UTC 25 July 1993.

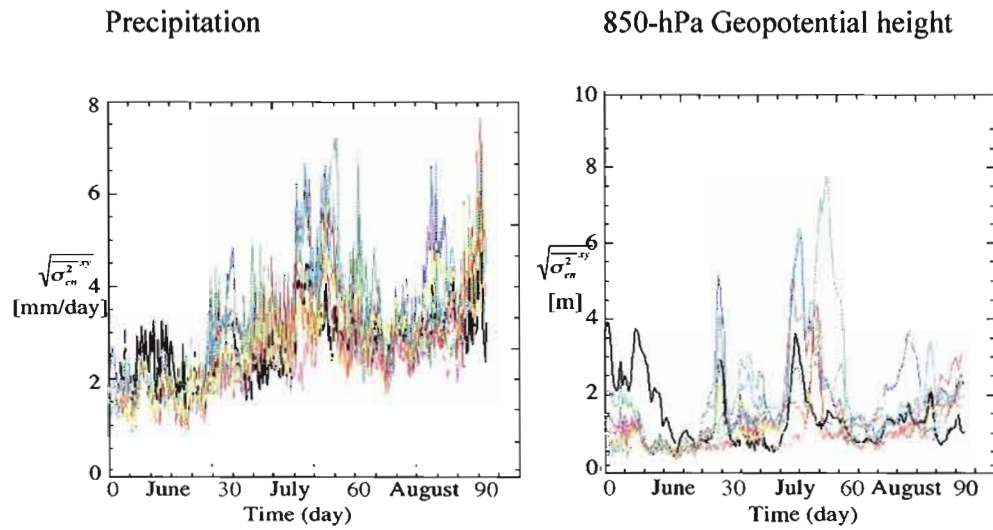


Figure 3. Ensemble-size experiment: Time evolution of domain-averaged variability ($\sqrt{\sigma_{en}^2}$) for 10 different two-member ensembles for the precipitation (mm/day) (left-side panel) and for the 850-hPa geopotential height (m) (right-side panel).

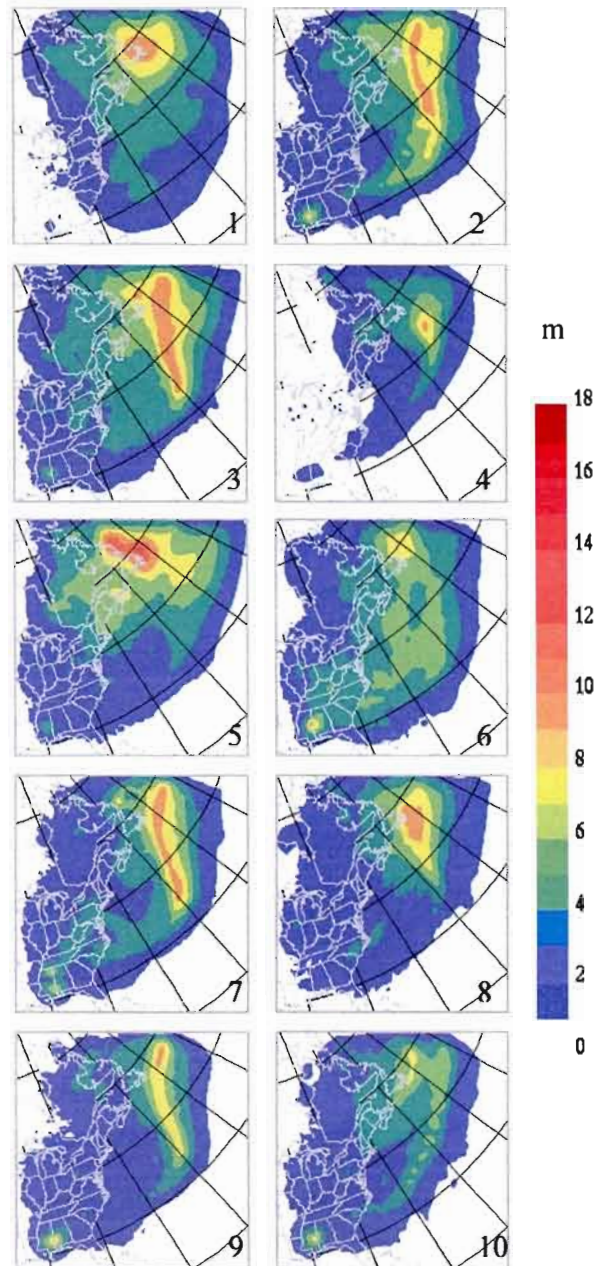


Figure 4. Ensemble-size experiment: Time-averaged variability ($\sqrt{\sigma_{en}^2}$) of the 850-hPa geopotential height (m) for 10 different two-member ensembles.

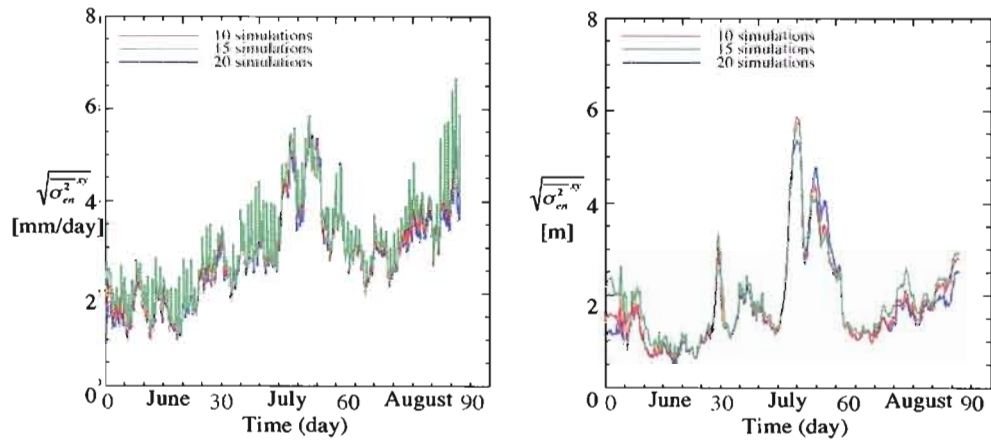


Figure 5. Ensemble-size experiment: Time evolution of domain-averaged variability ($\sqrt{\sigma_{en}^{2,xy}}$) for three ensembles composed of 10 (green), 15 (red) and 20 (blue) members for the precipitation (mm/day) (left-side panel) and for the 850-hPa geopotential height (m) (right-side panel).

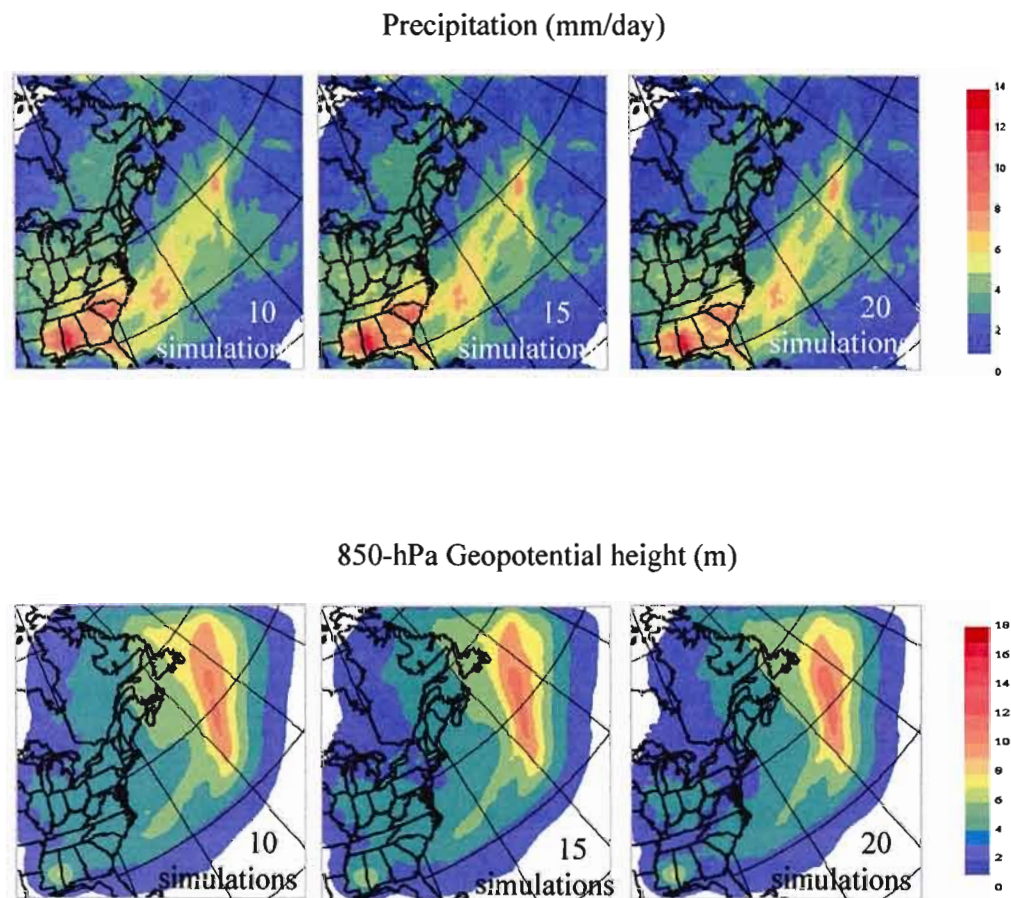


Figure 6. Ensemble-size experiment: Time-averaged variability ($\sqrt{\sigma_{en}^2}$) of three ensembles composed of 10, 15 and 20 members for the precipitation (mm/day) (upper panels) and 850-hPa geopotential height (m) (lower panels).

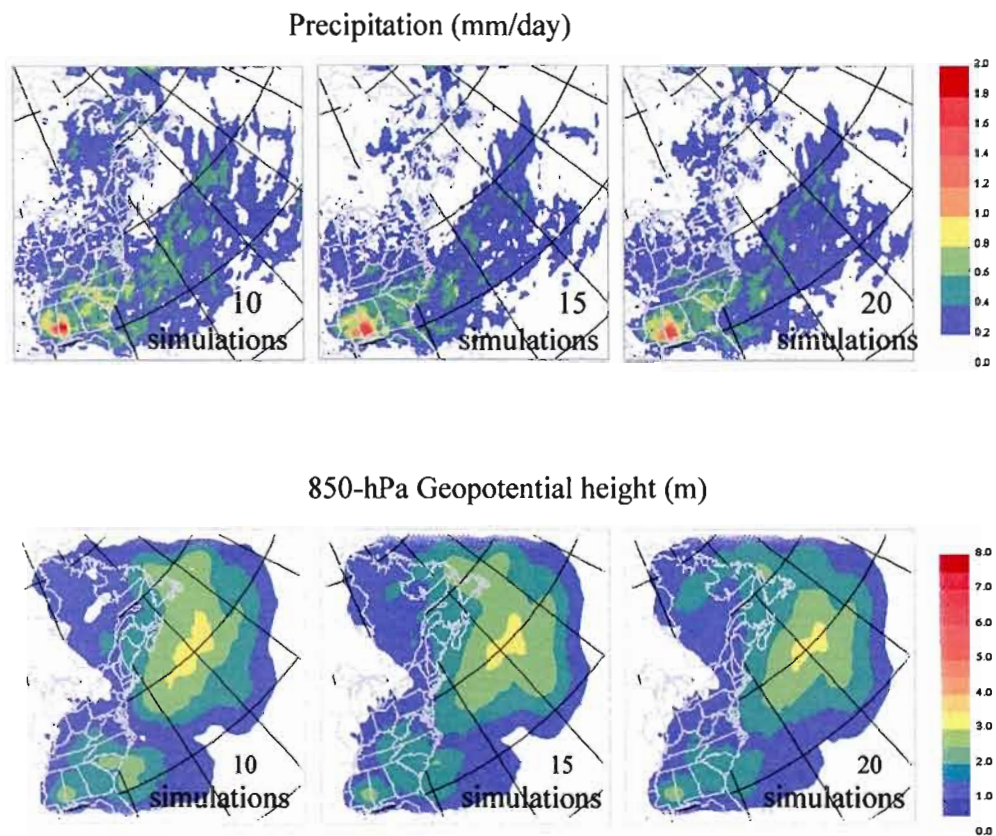


Figure 7. Ensemble-size experiment: Variability of the seasonal mean ($\sqrt{\sigma_s^2}$) of three ensembles of 10, 15 and 20 members for the precipitation (mm/day) (upper panels) and for the 850-hPa geopotential height (m) (lower panels).

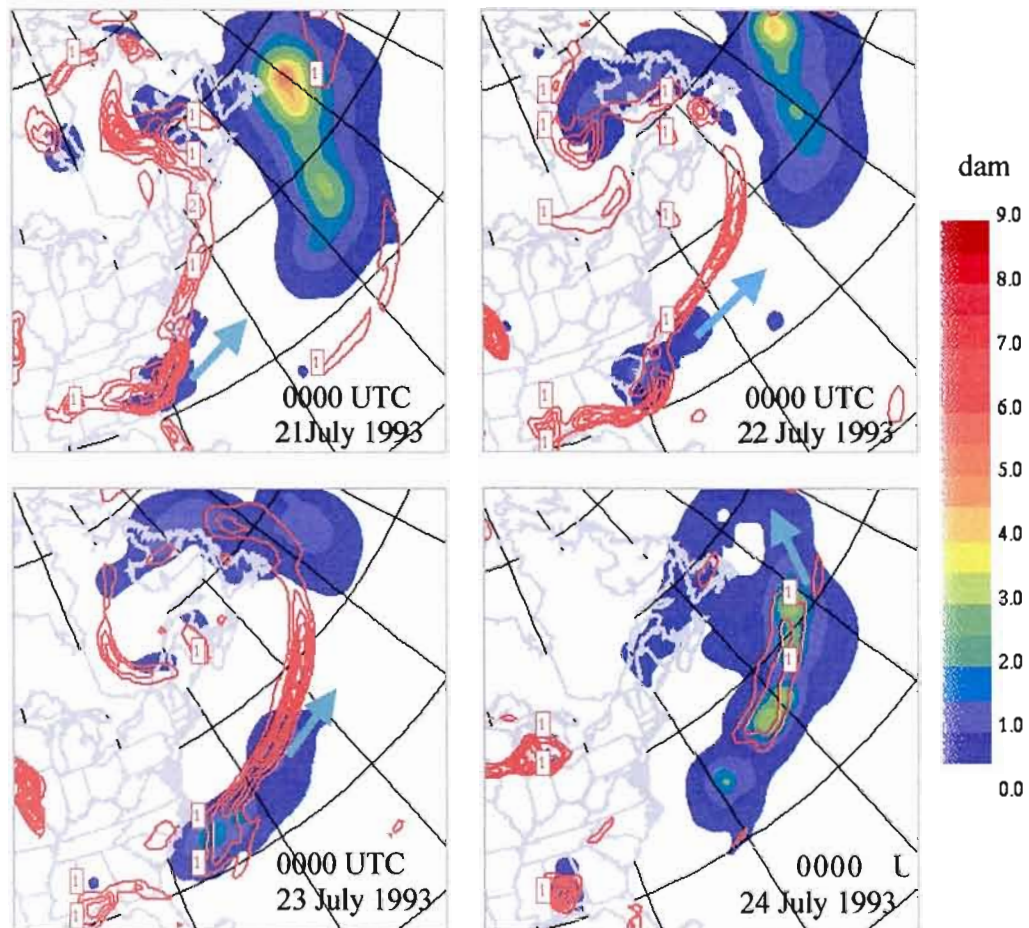


Figure 8. Internal variability experiment (domain 120×120): Four-day time evolution of ensemble-mean precipitation (mm/day) (in red contour) and 850-hPa geopotential height variability ($\sqrt{\sigma_m^2}$) (dam) (colour). The coloured arrow indicates the trajectory of $\sqrt{\sigma_m^2}$ displacement along the storm track.

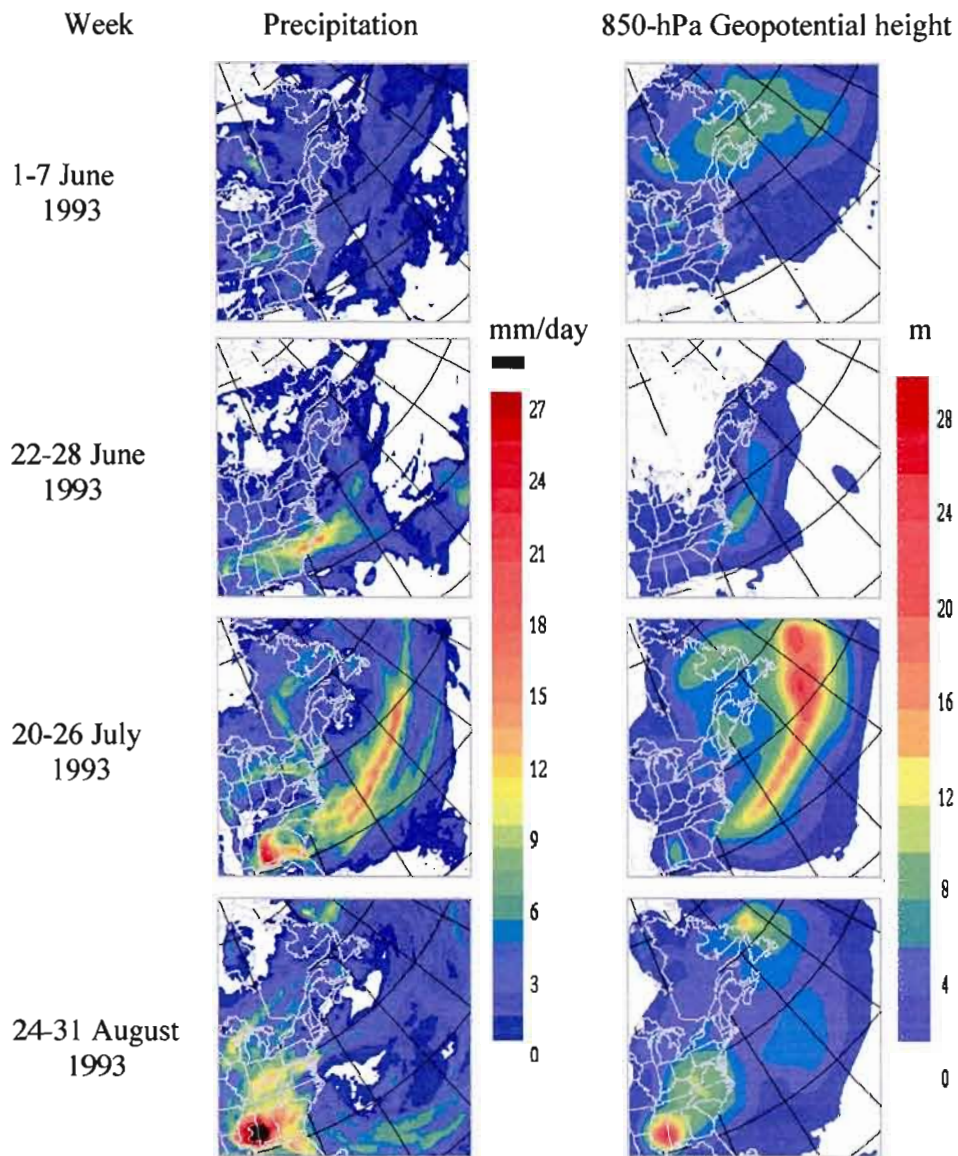


Figure 9. Internal variability experiment (domain 120×120): weekly-averaged variability ($\sqrt{\sigma_m^2}$) corresponding to four weeks of summer season for the precipitation (mm/day) (left-side panels) and for the 850-hPa geopotential height (m) (right-side panels).

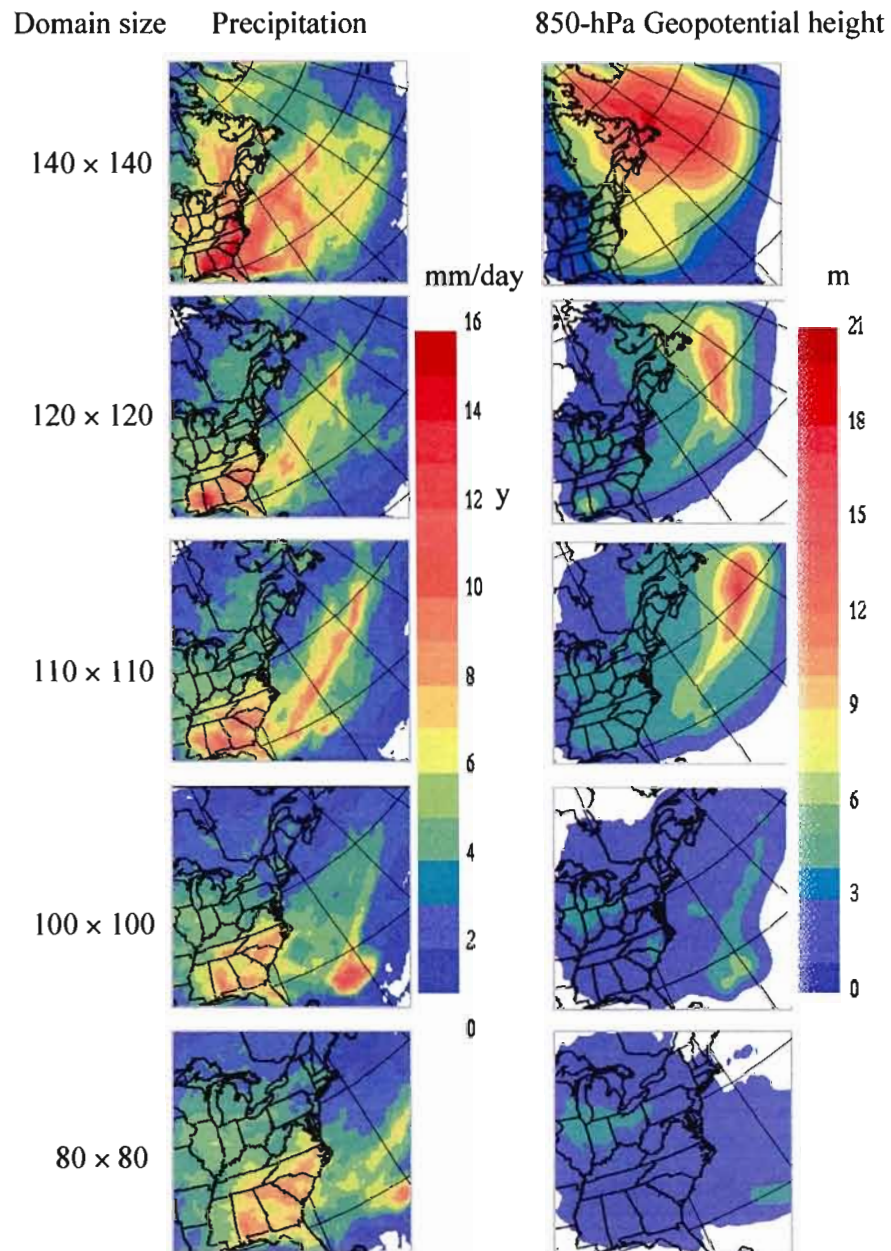


Figure 10. Internal variability experiment (20-member ensembles on a set of different model domain sizes): Time-averaged variability ($\sqrt{\sigma_{en}^2}$) computed for each domain size for the precipitation (mm/day) (left-side panels) and for the 850-hPa geopotential height (m) (right-side panels).

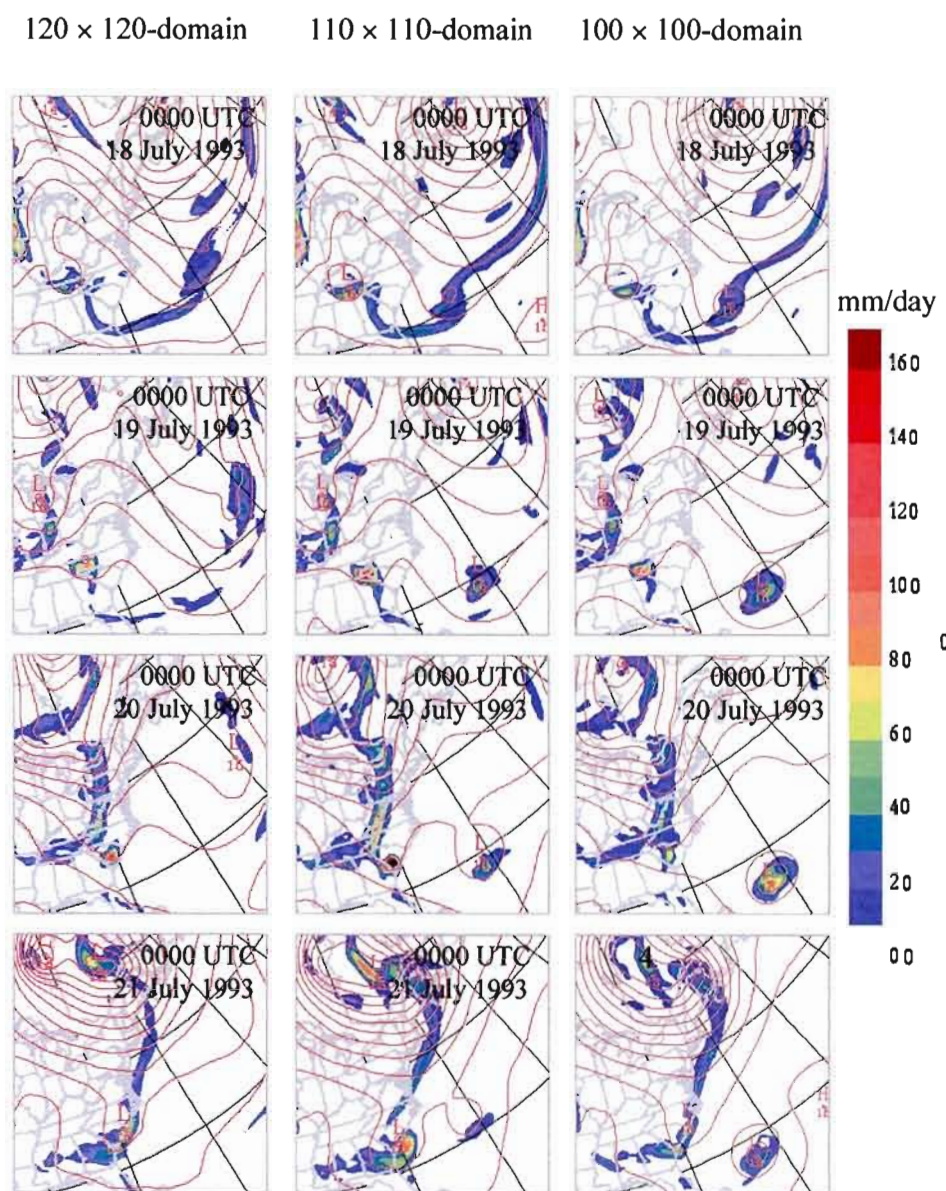


Figure 11. Internal variability experiment (20-member ensembles on a set of different model domain sizes): Four day time evolution (0000 UTC 18 July - 0000 UTC 21 July) of precipitation ensemble mean (mm/day) (color) and 850-hPa geopotential height ensemble mean (dam) (red contour) over the common area to domains 120 × 120 (left-side panels), 110 × 110 (middle panels, and 100 × 100 (right-side panels).

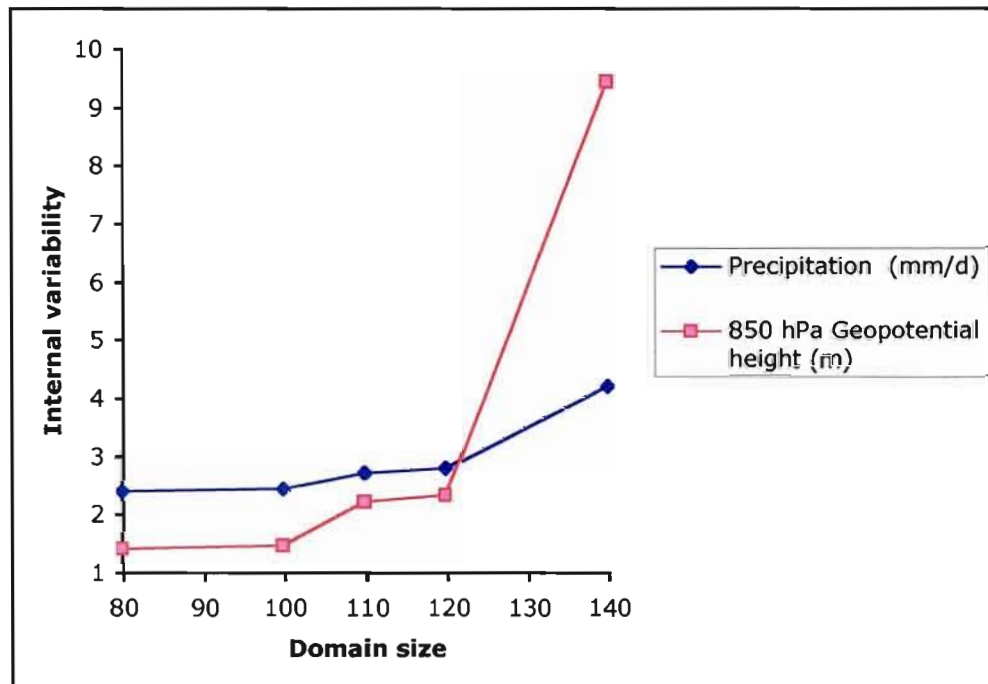


Figure 12. Internal variability experiment (20-member ensembles on a set of different model domain sizes): Variation of the domain-average time-averaged internal variability ($\sqrt{\overline{\sigma_n^2}}$) with the domain size.

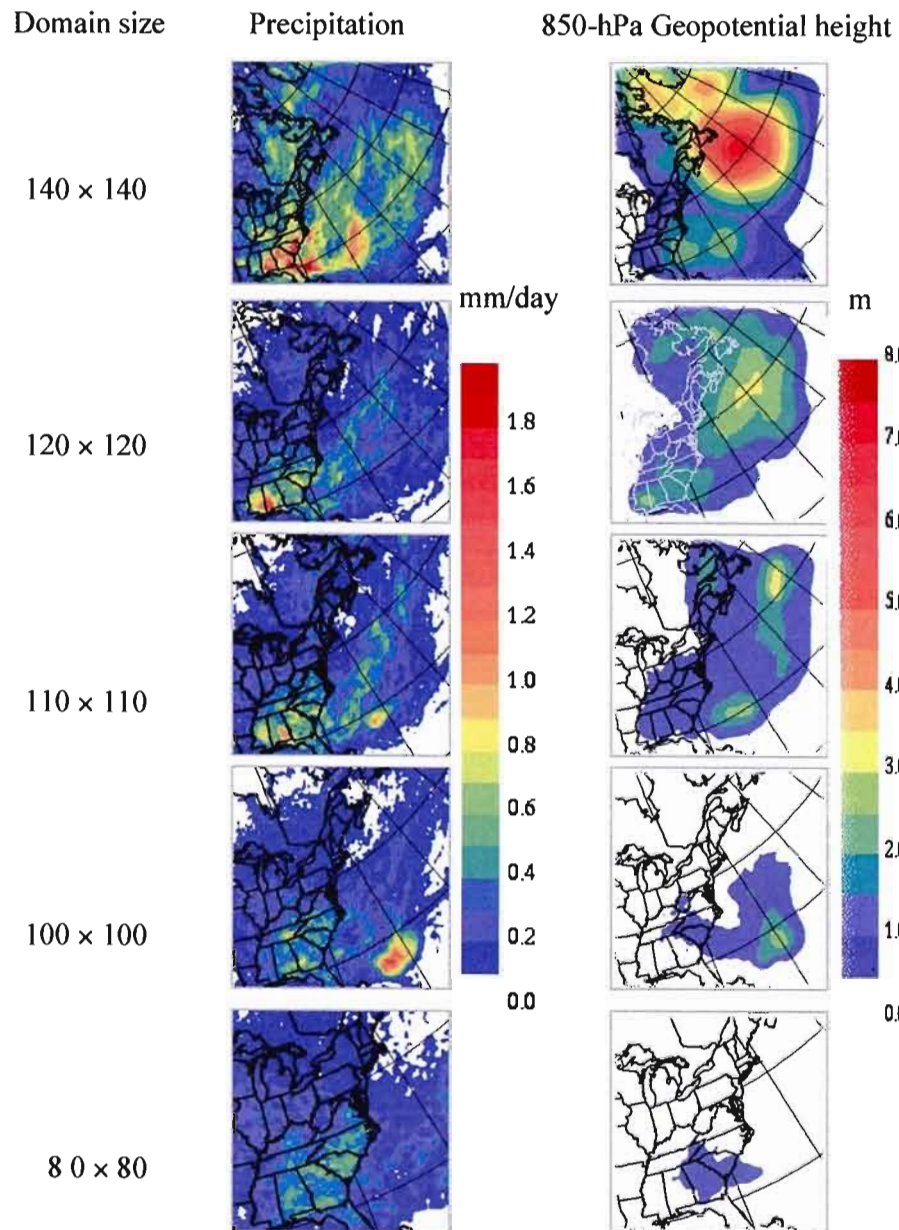


Figure 13. Internal variability experiment (20-member ensembles on a set of different domain sizes): Variability of the seasonal-mean ($\sqrt{\sigma_s^2}$) computed for each domain size for the precipitation (mm/day) (left-side panels) and for the 850-hPa geopotential height (m) (right-side panels).

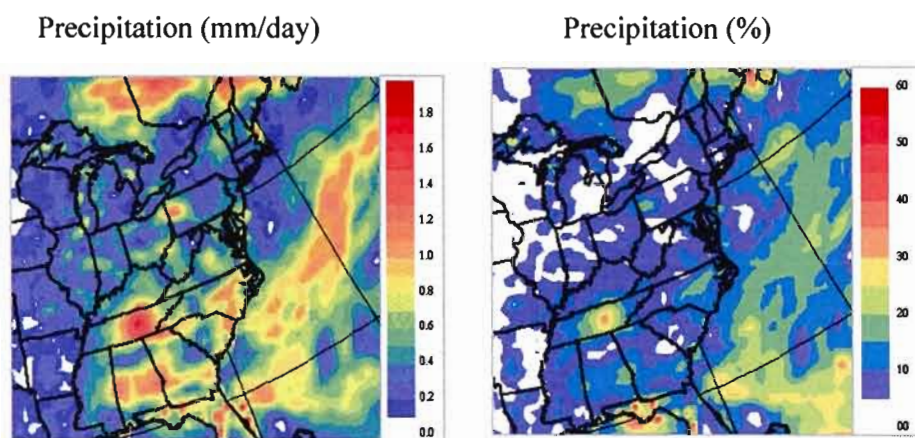


Figure 14. Variability with domain size of the seasonal ensemble mean, computed from ensembles of 20 simulations on different model domain sizes: Precipitation inter-domain variability ($\sqrt{\sigma_D^2}$) (mm/day) (left-side panel) and precipitation coefficient of variation (I_D) (%) (right-side panel). Statistics were computed over the diagnostic area.

850-hPa Geopotential height (m)

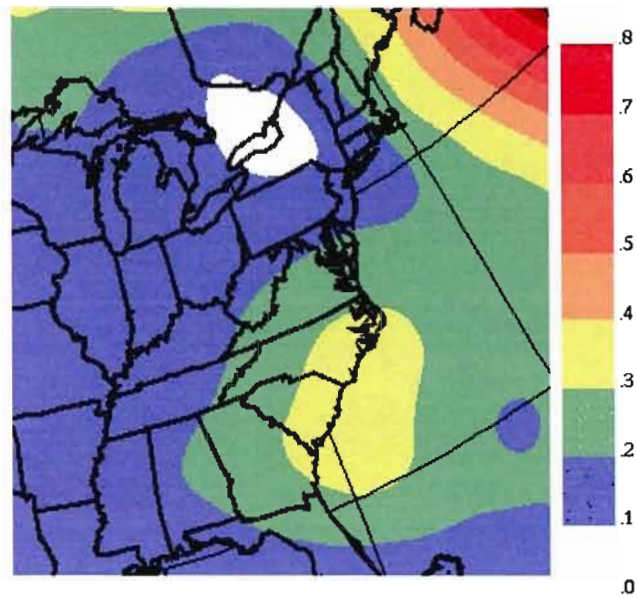


Figure 15. Variability with domain size of the seasonal ensemble mean, computed from ensembles of 20 simulations on different model domain sizes: 850-hPa Geopotential height $\sqrt{\sigma_b^2}$ (m). Statistics were computed over the diagnostic area.

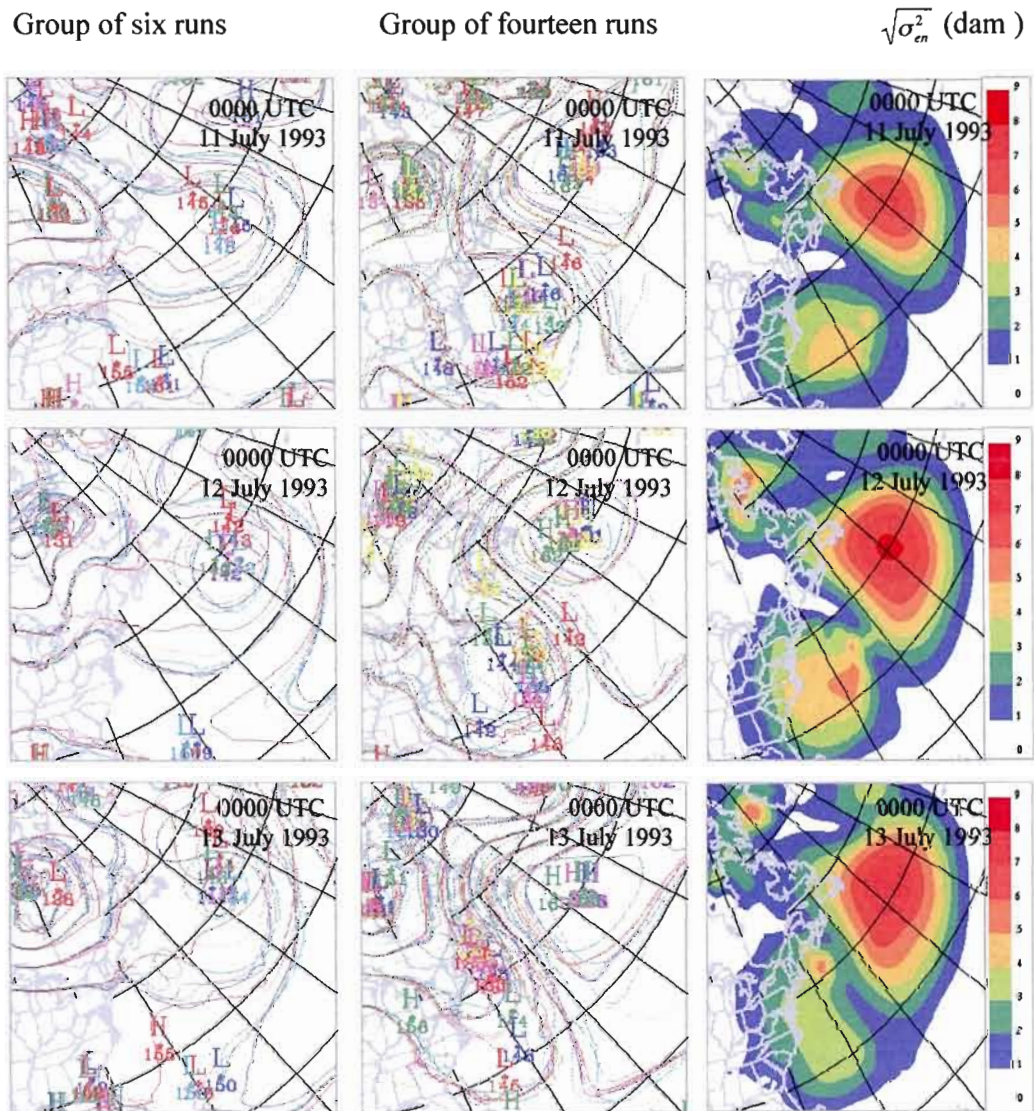


Figure 16. Bimodal solutions (20-member ensemble, domain 140×140): The 20 members of the ensemble appeared to separate into a group of six simulations (left-side panels) and 14 simulations (middle panels) during the integration of 850-hPa geopotential height (dam); the inter-member variability $\sqrt{\sigma_{cn}^2}$ (dam) (right-side panels) for this particular case (valid at 0000 UTC 11 July 1993-0000 UTC 13 July 1993).

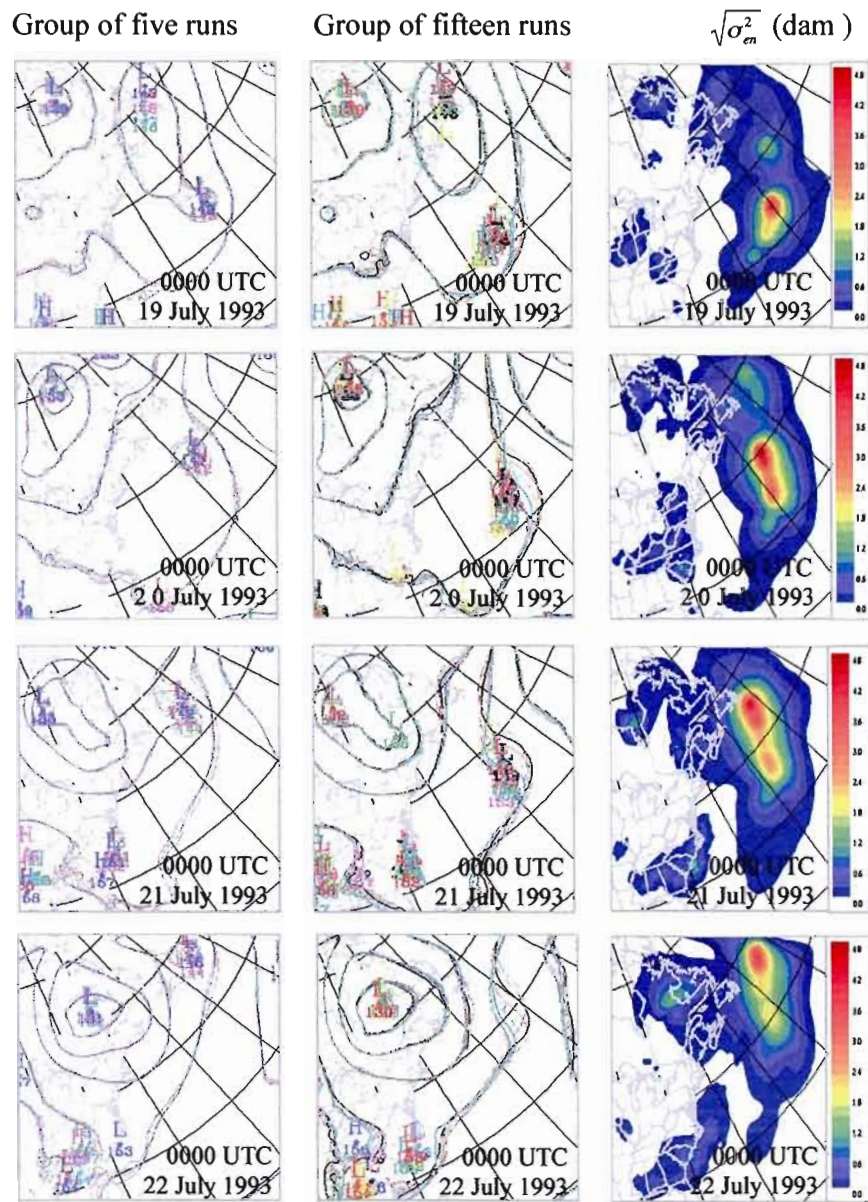


Figure 17. Bimodal solutions (20-member ensemble, domain 120×120): The 20 members of the ensemble appeared to separate into a group of five simulations (left-side panels) and 15 simulations (middle panels) during the integration of 850-hPa geopotential height (dam); the inter-member variability $\sqrt{\sigma_{em}^2}$ (dam) (right-side panels) for this particular case (valid at 0000 UTC 19 July 1993-0000 UTC 22 July 1993).

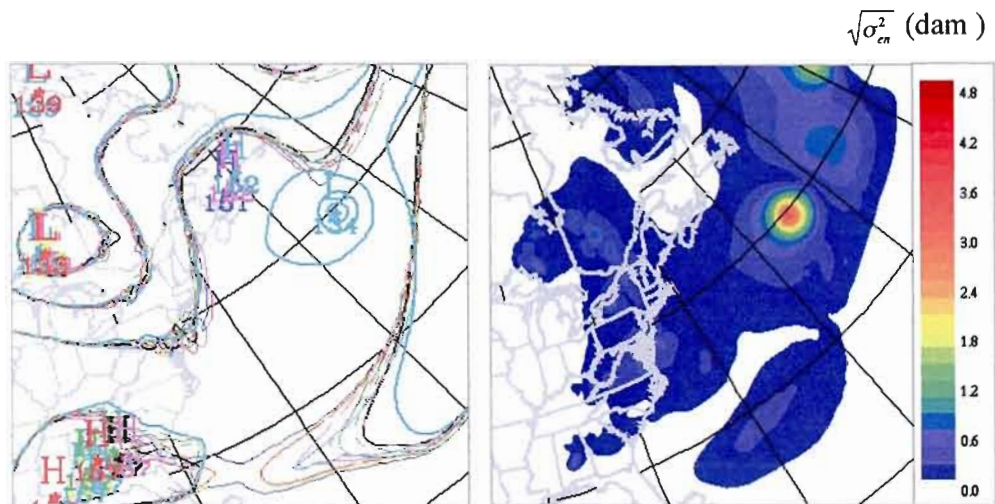


Figure 18. Bimodal solutions (20-member ensemble, domain 120×120): Particular case of one extreme deviation (blue) detected in the time evolution of the 850-hPa geopotential height (dam) (left-side panel) and the inter-member variability $\sqrt{\sigma_n^2}$ (dam) (right-side panel) corresponding to this case (valid at 0000 UTC 25 July 1993).

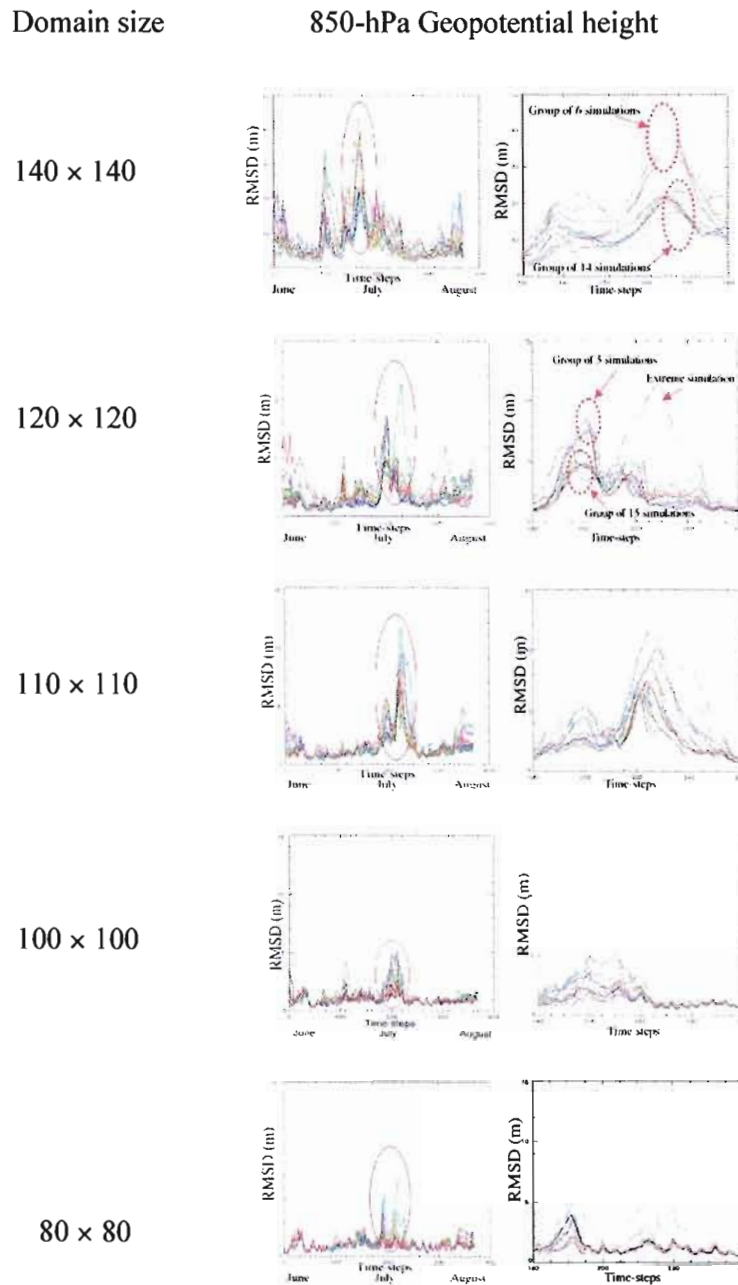


Figure 19. Bimodal solution experiment: RMSD time series for the 850-hPa geopotential height (m) (left-side panels) and “zoom” of the main RMSD time series maximum (right-side panels) computed for 140×140 , 120×120 , 110×110 , 100×100 and 80×80 domains.

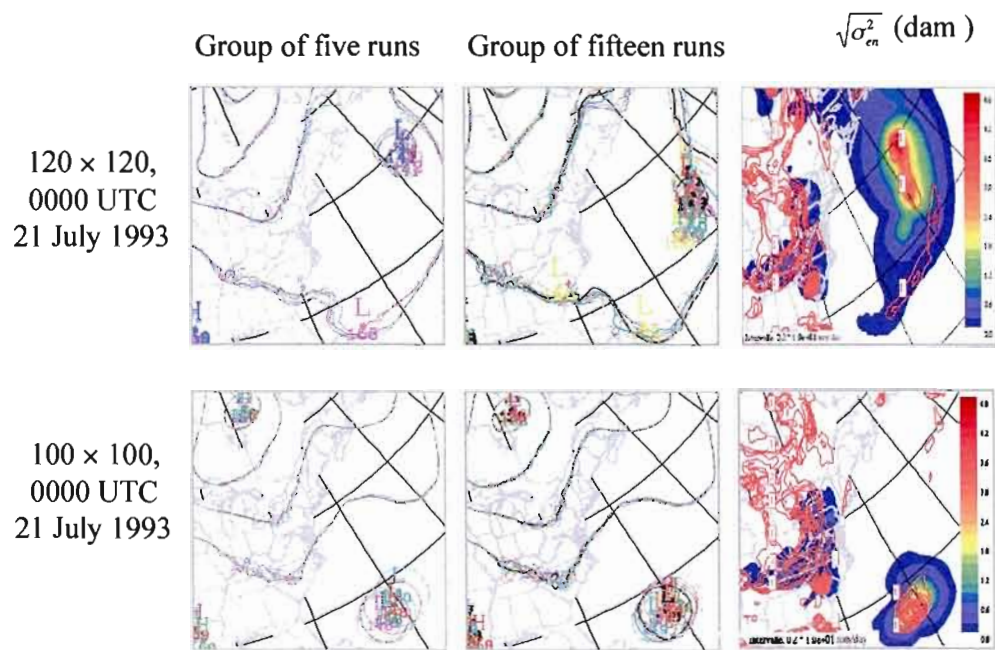


Figure 20. Bimodal solutions experiment: The group of five simulations (up left-side panel) and the group of fifteen simulations (up-middle panel) detected as a bimodal solution in the time evolution of the 850-hPa geopotential height ensemble (dam) on the 120×120 domain behave similarly on the 100×100 -domain (down left-side and down-middle panels). Ensemble-mean precipitation (mm/day) (in red contour) and 850-hPa geopotential height variability $\sqrt{\sigma_{en}^2}$ (dam) (colour) (right-side panels).

CONCLUSION

L'objectif de ce projet était d'étudier la variabilité interne d'un modèle régional de climat (MRC) en appliquant la technique d'ensemble de simulations. L'étude a été principalement focalisée sur l'amplitude et la distribution géographique de la variabilité interne du MRC Canadien (MRCC) et sur l'influence qu'un changement de la taille du domaine d'intégration pourrait avoir sur la variabilité interne. Pour y arriver, un ensemble de 20 simulations, initialisées à des moments différents (24 heures entre leurs moments de départ), a été reproduit pour cinq tailles différentes du domaine pendant la saison d'été 1993. Pour chaque expérience, la variabilité interne a été mesurée par les différences entre les simulations de l'ensemble estimées statistiquement par l'écart type entre les 20 simulations (série temporelle) et, aussi, par l'écart type entre les 20 moyennes saisonnières des simulations.

Pour une certaine taille du domaine d'intégration, les résultats ont montré des différences significatives entre les simulations du champ de précipitation. Pour la hauteur du géopotential à 850 hPa, les différences entre les simulations sont plus grandes autour des dépressions importantes. Une analyse détaillée et une comparaison de l'évolution temporelle des écarts type entre les simulations de l'ensemble pour les deux variables ont montré que l'écart entre les précipitations devient le plus grand pendant les périodes où l'écart entre les champs de la hauteur du géopotential à 850 hPa atteint aussi son maximum. Les résultats montrent que la liaison entre les deux maximums est basée sur les événements de forte précipitation du sud-est des États-

Unis qui induisent une divergence des simulations du champ de la hauteur du géopotential à 850 mb. Cette divergence se développe en suivant la trajectoire de la circulation générale et atteint son maximum vers le nord-est du domaine dans une région caractérisée par une haute fréquence des cyclones. L'importance de ce maximum enregistré dans l'évolution temporelle de l'écart type de chaque variable simulée se retrouve dans la moyenne saisonnière. Les résultats montrent que la moyenne saisonnière de l'écart type entre les simulations de la précipitation est maximale au sud-est des États-Unis, tandis que, pour la hauteur du géopotential à 850 mb, le maximum est localisé vers le nord-est du domaine.

Les résultats montrent qu'une réduction de la taille du domaine est associée à une réduction de la variabilité interne dans les régions où le modèle développe une importante variabilité interne (i.e., le sud-est des États-Unis). Toutefois, malgré cette réduction générale, une nouvelle aire de forte variabilité interne a été détectée pendant les réductions successives du domaine.

Pour étudier l'influence de la variabilité interne sur les statistiques saisonnières des champs simulés, nous avons calculé l'écart type entre les moyennes saisonnières des simulations de l'ensemble. Si la moyenne saisonnière d'une simulation de l'ensemble est considérée comme une estimation saisonnière possible du champ simulé pour la période étudiée, alors les différences entre les 20 estimations saisonnières vont mesurer l'importance de la variabilité interne à l'échelle saisonnière. Les résultats montrent des valeurs plus petites, par rapport aux résultats précédents, mais encore importantes pour les estimations saisonnières des champs simulés, sur les grandes domaines de l'expérience. Cela suggère la possibilité d'avoir une erreur importante dans la statistique saisonnière de la variable simulée dans le cas d'une seule simulation. Les différences significatives entre les moyennes saisonnières des simulations dans certaines régions (i.e., le sud des États-Unis) imposent

l'utilisation d'un ensemble de simulations afin d'obtenir une estimation fiable du champ météorologiques simulé. Les résultats montrent aussi qu'une réduction de la taille du domaine réduit significativement les valeurs de la variabilité interne au niveau saisonnier. Malgré cette réduction générale causée par les réductions successives du domaine, les résultats montrent la persistance de la nouvelle aire de variabilité interne, même à l'échelle saisonnière. Les différences encore importantes entre les moyennes saisonnières des simulations dans cette région peuvent influencer la qualité de l'estimation saisonnière du champ simulé.

Une étude détaillée des évolutions temporelles des 20 simulations pendant toute la période d'intégration a montré la présence des solutions bimodales du champ simulé sur les grandes domaines d'intégration. La division de l'ensemble en deux groupes produit deux estimations différentes du même champ simulé. Les résultats ont montré que cette division de l'ensemble coïncide avec la période durant laquelle la variabilité interne du modèle est maximale.

À la fin de cette étude, en considérant le caractère complexe de la variabilité interne et son impact sur la qualité des simulations climatiques des MRC, nous apprécions que la variabilité interne du modèle est un facteur assez important pour qu'il soit pris en compte dans les estimations et les analyses de chaque expérience réalisées avec un MRC. Nous soulignons non seulement l'importance d'une évaluation préliminaire de la variabilité interne, mais aussi la nécessité d'utilisation des ensembles de simulations dans les régions reconnues comme des régions de forte variabilité interne.

RÉFÉRENCES

- Caya, D., and S. Biner, 2004: Internal Variability of RCM Simulations over an Annual Cycle. *Climate Dyn.*, **22**,33-46.
- Caya, D., and R. Laprise, 1999: A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model: The Canadian RCM. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 341-362.
- Christensen, O. B., M.A. Gaertner, J. A. Prego, and J. Polcher, 2001: Internal variability of regional climate models. *Climate Dyn.*, **17**, 875-887.
- Davies, H.C., 1976: A lateral boundary formulation for multilevel prediction models. *Quart J. Roy. Meteor. Soc.*, **102**, 405-418.
- Denis, B., R. Laprise, D. Caya, and J. Côté, 2002: Downscaling ability of one-way nested regional climate model; the big-brother experiment. *Climate Dyn.*, **18**, 627-646.
- Griffies, S. M., and K. Bryan, 1997: A predictability study of simulated North Atlantic multidecadal variability. *Climate Dyn.*, **13** (7-8), 459-487
- Gal-Chen, T., R.C.J. Somerville, 1975: On the use of a Coordinate transformation for the the Solution of the Navier-Stokes Equations. *J. Comput. Phys.*, **17**, 209-228.
- Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Clim.*, **3**, 941-963
- Giorgi, F., and L. O. Mearns, 1999: Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *J. Geophys. Res.*, **104**, 6335-6352.
- Giorgi, F., and X. Bi, 2000: A study of internal variability of regional climate model. *J. Geophys. Res.*, **105**, 29503-29521.
- Fiorino, M., 1997: AMIP II sea surface temperature and sea ice concentration observations
- http://www.pcmdi.llnl.gov/amip/AMIP2EXPDSN/BCS_OBS/amip2_bcs.htm.

- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins and others 1996: The NCEP-NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. American Meteorological Society*, **77** (3), 437-471
- Kunkel, E. K., K. Andsager, X. Z. Liang, R. W. Arritt, E. S. Takle, W. J. Gutowski Jr. and Z. Pan, 2002: Observations and regional climate model simulations of heavy precipitation events and seasonal anomalies: a comparison. *J. Hydro.* **3**, 322-334.
- Lorenz, E., 1963: Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmospheric Sciences*, **20**, 130-141.
- Lorenz, E., 1969: Three approaches to atmospheric predictability. *Bull. American Meteorological Society*, **50**, 345-349.
- Picher-Lucas, Ph., D. Caya and S. Biner 2007: Influence of domain size and location on RCM's internal variability and warnings for RCM using large domain (in preparation).
- Miguez-Macho, G., G. L. Georgiy, and A. Robock, 2003: Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate model simulations. *J. Geophys. Res.*, **109**, D13104.
- Pan, Z., J. H. Christensen, R. W. Arritt, W. J. Gutowski, E. S. Takle, and F. Otieno, 2001: Evaluation of uncertainties in regional climate change simulations. *J. Geophys. Res.*, **106**, 17735-17751.
- Rinke, A., P. Marbaix, and K. Dethloff, 2004: Internal variability in Arctic regional climate simulations: case study for the Sheba year. *Climate Res.*, **27**, 197-209.
- Seth, A., and F. Giorgi, 1998: The effects of domain choice on summer precipitation simulation and sensitivity in a regional climate model. *J. Climate*, **11**, 2698-2712.
- Vannitsem, S., and F. Chomé, 2005: One-Way Nested Regional Climate Simulations and Domain Size. *J. Clim.*, **18** (1), 229-233.
- Weisse, R., and H. von Storch, 2000: Sensitivity of a regional atmospheric model to a sea state dependent roughness and the need of ensemble calculations. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3631-3642.
- Wu, W., A. H. Lynch, A. Rivers, 2005: Estimating the uncertainty in a regional climate model related to initial and boundary conditions. *J. Clim.*, **18**, 917-933.