

ÉVALUATION DE LA RÉPONSE D'UN MODÈLE CLIMATIQUE RÉGIONAL PILOTE PAR LES SORTIES DU MÊME MODÈLE : EXPÉRIENCE DOUBLE-NESTING

F. YOROBA^{1*}, P. ASSAMOI¹, A. DIAWARA¹, G. SCHAYES²,
K. B. KOUASSI¹ et A. A. KOUASSI¹

¹Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides,
Université de Cocody-Abidjan, UFR des Sciences des Structures de la Matière et
de Technologie, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

²Institut d'Astronomie et de Géophysique G. Lemaître, Université Catholique de
Louvain, Chemin du Cyclotron 2, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

(Reçu le 20 Juin 2009, accepté le 13 Octobre 2009)

* Correspondance et tirés à part, e-mail : yorofidele@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Cette étude analyse la réponse d'un modèle régional de climat (MRC) piloté à ses frontières latérales par les sorties du même modèle. Cette technique de double-imbrication permet d'évaluer l'habileté de raffinement du MRC piloté et de vérifier quelles sont les variables dont les corrélations présentent de bonnes valeurs. Un climat de référence a été obtenu sur un grand domaine à partir d'un MRC à haute résolution, piloté par les réanalyses ERA-40 du Centre Européen (CEPMMT). Les sorties du MRC sur le grand domaine ont été ensuite utilisées pour piloter une autre simulation du même MRC, avec une résolution plus fine et sur un domaine plus petit, situé à l'intérieur du grand domaine précédent. Les statistiques climatiques du MRC piloté sont comparées à celles du MRC pilote, sur le petit domaine. Les résultats obtenus sur la région de l'Afrique de l'Ouest, montrent que les champs simulés par les deux modèles sont fortement corrélés.

Mots-clés : *Modèle climatique régional, Afrique de l'Ouest, précipitations.*

ABSTRACT

Evaluation of the response of regional climate model driven by the outputs of the same model: double-nested experience

This study analyzes the response of a regional climate model (RCM) driven by the outputs of the same model. This double-nested method allows

assessing the refinement ability of the driven RCM and checking what are variables whose correlations are better. A reference climate has been obtained from a RCM high resolution driven by ECMWF reanalyses ERA-40 over large domain. The RCM outputs over big domain were then used to drive the same RCM simulation, with fine resolution and over small domain including in the big one. The climate statistics of driven RCM are compared to those of the RCM pilot, over the small domain. The results obtained on the West Africa domain are satisfactory.

Keywords : *Regional Climate Model, West Africa, precipitations.*

I - INTRODUCTION

Plusieurs techniques ont été développées pour parvenir à réduire la maille des modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCGA). Malheureusement la puissance des ordinateurs étant limitée, il est difficile de raffiner la résolution spatiale des MCGAs. Or l'étude des impacts du changement climatique à l'échelle régionale nécessite une résolution spatiale inférieure à 50 km. L'information à cette échelle peut être obtenue en réalisant des simulations avec un modèle régional de climat (MRC) à haute résolution piloté par des données de faible résolution provenant d'un modèle de circulation générale (MCG). L'application d'un MRC uniquement sur la région d'intérêt permet d'utiliser une résolution spatiale beaucoup plus fine que le MCG, sans augmenter les coûts en temps calculs. Par ailleurs, les travaux réalisés par certains auteurs [1-4] sur diverses régions du monde ont montré les intérêts de ce type de simulation : le MCG simule la réponse de la circulation générale aux forçages à grandes échelles alors que le MRC simule les effets locaux des forçages méso-échelles. Ces auteurs montrent également que la représentation (localisation, variabilité annuelle et interannuelle) des principales structures est meilleure avec le MRC par rapport au MCG.

La fine résolution du MRC lui permet une meilleure représentation des forçages de surface (topographie, contrastes terre-mer) et des caractéristiques de la surface.

En 2000, le « World Climate Research Programme » (WCRP), dans son rapport annuel [5], a souligné l'importance de développer une méthode permettant de valider la capacité d'un MRC à simuler correctement les petites échelles. En réponse à cette demande, Denis et al [6] ont développé un protocole expérimental nommé « Expérience Grand Frère » (EGF), qui a permis d'évaluer l'habileté de raffinement d'un MRC piloté unidirectionnellement, ainsi que les erreurs dues à ce processus de pilotage. L'EGF propose comme climat de référence un climat résultant d'une

simulation d'un MRC à haute résolution effectuée sur un grand domaine. Cette simulation est appelée « Grand Frère » (GF). Les sorties du GF sont ensuite dégradées, à l'aide d'un filtre, vers une résolution similaire à celle d'un MCG ou des analyses objectives mondiales. Ces données de faible résolution sont ensuite utilisées pour piloter une autre simulation MRC, à la même haute résolution que celle du GF, mais sur un domaine plus petit. La simulation sur le petit domaine est appelée « Petit Frère » (PF). Les statistiques climatiques du PF sont comparées à celles du GF. Comme les deux simulations (GF et PF) ont la même haute résolution et utilisent le même modèle, les différences entre les deux climats sont attribuables aux erreurs associées à la technique de pilotage et non à d'autres erreurs du modèle. Par ailleurs, des travaux similaires [7,8] ont montré que les champs générés par la circulation de grande échelle sont simulés par le PF avec un haut degré de fidélité. De même pour les petites échelles, les coefficients de corrélation présentent de très bonnes valeurs, particulièrement pour les régions ayant un forçage orographique important. Les études présentées ci-dessus suscitent d'autres voies d'expérimentation pour évaluer la réponse d'un MRC de résolution spatiale plus fine que celle du MRC pilote forcé avec les réanalyses ERA-40 du Centre Européen pour la Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT). Ainsi, l'objectif de cette étude est d'évaluer la réponse d'un MRC piloté par les sorties du même MRC générées par une simulation à résolution moins fine. Nous cherchons à identifier les types d'erreurs que peut engendrer un tel procédé et à savoir quelles sont les variables affectées par ces erreurs. Ce travail exploite une démarche similaire à celle de Denis et al [6]. Cependant les sorties du MRC pilote ne sont pas relaxées vers une résolution similaire à celle des analyses objectives mondiales ou d'un MCG.

De même, la résolution horizontale du MRC pilote est moins fine que celle du MRC piloté. Le domaine d'étude est l'Afrique de l'Ouest et le MRC utilisé pour les simulations est le modèle climatique régional MAR [9], dont les performances ont été évaluées sur l'Afrique de l'Ouest dans les travaux de [3, 10-14].

Le travail s'organise en quatre principales sections. La section 1 est consacrée à l'introduction. Dans la section 2, nous faisons une brève description du modèle régional MAR et nous donnons les détails du protocole expérimental utilisé et qui permet d'évaluer la réponse du modèle régional MAR. La section 3 présente les résultats des simulations et les discussions qui s'en suivent. Enfin dans la section 4 nous présentons les conclusions et les perspectives.

II - METHODOLOGIE

II-1. Description du modèle régional MAR

Le modèle climatique régional MAR [9] est un modèle hydrostatique, à équations primitives, dans lequel la coordonnée verticale est la pression normalisée σ définie par :

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t} \quad (1)$$

où p est la pression ; p_t et p_s sont respectivement ses valeurs au sommet du modèle et en surface. Cette coordonnée permet une meilleure prise en compte du relief et une résolution plus précise de l'équation hydrostatique. Les variables pronostiques sont la pression, la température, les composantes horizontales du vent, l'humidité spécifique et la teneur en eau des nuages.

Le MAR utilise le schéma de turbulence k-e décrit dans Duynkerke et al [15], avec deux équations pronostiques: une équation pour l'énergie cinétique turbulente (éq. 2) et une autre équation pour la dissipation (éq. 3).

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -u \frac{\partial E}{\partial x} - v \frac{\partial E}{\partial y} - \frac{\partial E}{\partial \sigma} - \overline{u'w'} \frac{\partial u}{\partial z} - \overline{v'w'} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{g}{\theta_0} \overline{w'\theta'} - \frac{\partial(\overline{E'\theta'})}{\partial \sigma} - \varepsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} - v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} - \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} - \frac{\partial(\overline{\varepsilon'\theta'})}{\partial \sigma} + \frac{\varepsilon}{E} (c_1 (\frac{g}{\theta_0} \overline{w'\theta'} - u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} - v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y}) - c_2 \varepsilon) \quad (3)$$

où u , v , w sont respectivement les composantes du vent dans le système de coordonnées x , y , z ; g est la gravité, θ la température potentielle, $c_1=1.5$ et $c_2=2$.

La paramétrisation de la convection nuageuse, qui fournit de bonnes performances avec le MAR, repose sur le schéma en flux de masse de Bechtold et al [16]. Ce schéma de convection a été évalué dans une étude d'intercomparaison de modélisation d'une ligne de grains observée durant TOGA-COARE [17]. Le cycle hydrologique du MAR est décrit en détail dans Gallée [18]. Il comprend un modèle de microphysique nuageuse avec des équations de conservation (éq. 4) pour l'eau nuageuse non précipitante (q_w), la pluie (q_r), la glace non précipitante (q_i) et la neige (q_s).

$$\frac{\partial q_\alpha}{\partial t} = -u \frac{\partial q_\alpha}{\partial x} - v \frac{\partial q_\alpha}{\partial y} - \frac{\partial q_\alpha}{\partial \sigma} + F_{q_\alpha} + P_{q_\alpha} \quad (4)$$

où $F_{q\alpha}$ est la divergence du flux turbulent de l'hydrométéore

$q_{\alpha} = (q_w, q_r, q_i, q_s)$ et $P_{q\alpha}$ le terme source.

La représentation de la microphysique nuageuse est principalement basée sur la paramétrisation de type Kessler [19]. La partie atmosphérique du modèle MAR est couplée au schéma de transfert unidimensionnel SVAT (Soil Vegetation Atmosphere Transfer) de De Ridder et Schayes [20], qui a été validé en zone sahélienne [21]. Le SISVAT est un schéma multicouche constitué d'une couche de végétation et de 7 couches de sol avec une fine résolution près de la surface.

Le schéma de transfert radiatif du modèle MAR traite les rayonnements solaire et infrarouge. Le schéma de radiation solaire est adapté de celui de Fouquart et Bonnel [22] et le schéma de rayonnement infrarouge suit une formulation large bande de l'équation de transfert radiatif (RTE) élaborée pour l'utilisation dans les MCGA [23]. Les propriétés des nuages sont prises en compte dans les schémas de rayonnements solaire et infrarouge en calculant la quantité d'eau liquide présente à chaque niveau du modèle.

II-2. Protocole expérimental et simulation

Le protocole expérimental utilisé (*Figure 1*) propose le résultat d'une simulation MAR à haute résolution (40 km) sur l'Afrique de l'Ouest (*Figure 2*) pilotée par les champs de réanalyses ERA-40 du CEPMMT et effectuée sur un grand domaine, comme climat de référence. Les sorties du MAR à 40 km de résolution horizontale sur le grand domaine sont ensuite utilisées pour piloter toutes les 6h une autre simulation MAR à 20 Km de résolution sur un domaine plus petit situé à l'intérieur du grand domaine. La simulation MAR sur le grand domaine est appelée "Grand MAR" et celle sur le petit domaine est appelée "Petit MAR". Les statistiques climatiques du "Petit MAR" sont évaluées et comparées à celles du "Grand MAR". Puisque les deux simulations utilisent le même modèle (paramétrisations physiques identiques), il y a une certaine compatibilité, mais leurs rendements ne seront pas nécessairement les mêmes car l'optimisation d'un paramétrage dépend fortement de la résolution spatiale utilisée.

Par ailleurs, la résolution spatiale (fonction des phénomènes à étudier) et le domaine d'intégration (fonction du coût en temps calcul) doivent être bien ajustées. Jones et al [24] soulignent qu'un domaine trop petit tend à limiter considérablement le développement des phénomènes de fine échelle. De façon similaire, les frontières latérales doivent être suffisamment éloignées de la zone d'intérêt, pour éviter une réponse irréaliste face aux forçages internes [25].

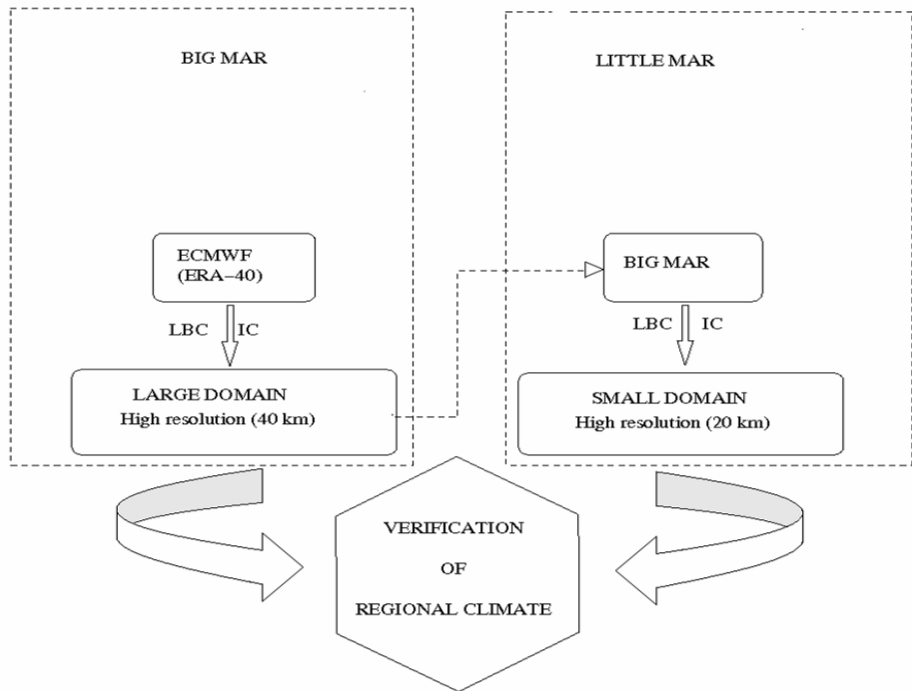


Figure 1 : *Protocole expérimental de raffinement du modèle régional MAR.*

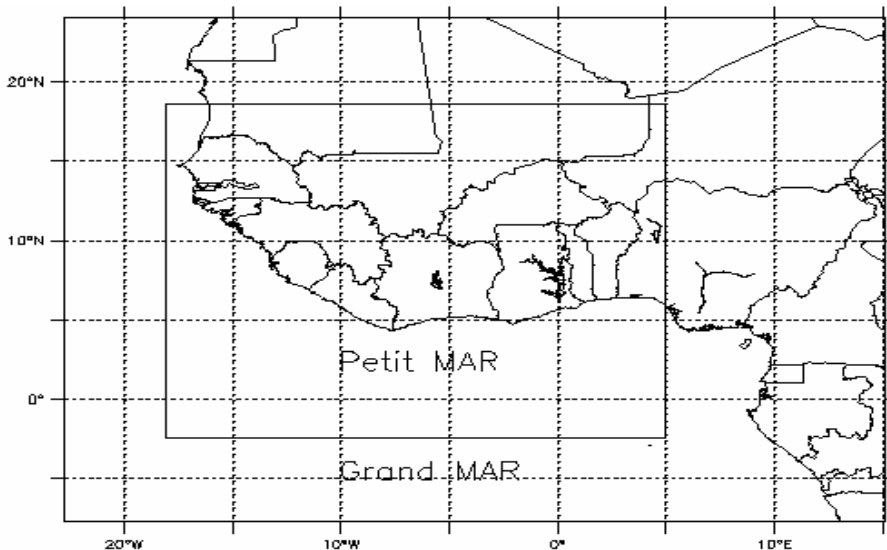


Figure 2 : *Domaines d'intégration de Petit MAR et de Grand MAR.*

Les conditions aux limites latérales (LBC) et les conditions initiales (IC) pour le grand domaine Grand MAR, sont obtenues des réanalyses européennes ERA-40, alors que celles du petit domaine (Petit MAR) proviennent de la simulation de référence Grand MAR. Les statistiques climatiques sont évaluées sur le domaine du Petit MAR après avoir exclu la zone éponge (i.e zone de relaxation) (*Figure 1*).

Deux intégrations du modèle régional MAR (*Tableau 1*) ont été réalisées: une simulation portant sur l'année 1992, à 40 km de résolution spatiale, avec comme champs de forçage les réanalyses ERA-40 du CEPMMT, et une autre simulation à 20 km de résolution, sur la période JJAS de l'année 1992, à partir de conditions aux frontières latérales fournies par la première simulation. L'objectif de cette approche consiste à réduire les incohérences associées au changement brutal des résolutions spatiales entre le MCGA et le MRC, puis à évaluer un possible raffinement du MRC. La validation de ce procédé a été conduite sur le mois de septembre de l'année 1992 considérée comme une année normale en terme de cumul annuel pluviométrique.

Tableau 1 : *Caractéristiques de référence des simulations Grand MAR et Petit MAR.*

CONFIGURATION	SIMULATION GRAND MAR	SIMULATION PETIT MAR
Initialisation	ERA-40, le 01/12/1991 à 00h TU	Grand MAR, le 01/06/1992 à 00h TU
Forçage latéral	ERA-40, toutes les 6h	Grand MAR, toutes les 6h
Domaine	22.72°W-15.09°E 07.73°S-24.08°N 100x90 points de grille	18.05°W-5.00°E 02.45°S-18.58°N 124x118 points de grille
Résolution spatiale	40 km de résolution horizontale 40 niveaux verticaux	20 km de résolution horizontale 40 niveaux verticaux
Pas de temps	180 s	90 s
Durée d'intégration	13 mois	4 mois

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

III-1. Champs atmosphériques

III-1-1. Profils verticaux

Les *Figures 3, 4, 5 et 6* présentent les structures verticales des moyennes zonales (entre 10°W et 4°E) de la température, de l'humidité, du vent zonal et du vent méridien simulées par "Grand MAR" et "Petit MAR", pendant le mois de septembre de l'année 1992. Nous remarquons que pour cette période, "Petit MAR" restitue convenablement les structures verticales de température, d'humidité, de vent zonal et de vent méridien de "Grand MAR". Les structures atmosphériques présentes dans les sorties de "Grand MAR" sont parfaitement régénérées par "Petit MAR". Cela est un résultat encourageant dans la mesure où il permet de constater l'importance de choisir des paramétrisations physiques identiques pour "Petit MAR" et "Grand MAR". Ainsi, Leduc et Laprise [26] ont souligné une certaine compatibilité entre un MRC et son pilote dans le cas d'un paramétrage physique identique. Par ailleurs, le régime de vents d'Est en altitude (*Figure 5*), avec deux axes de vents forts, notamment le jet d'Est africain (JEA) situé autour de 14°N, entre 600 et 800 hPa, et le jet d'Est tropical (JET) localisé autour de 8°N, entre 100 et 200 hPa, présent dans la simulation "Grand MAR" est parfaitement régénéré par "Petit MAR". Leurs intensités (14 m/s pour le JET et 10 m/s pour le JEA) sont bien reproduites par "Grand MAR" et "Petit MAR". Dans les basses couches atmosphériques, "Petit MAR" simule correctement l'épaisseur et l'extension méridienne du flux de mousson. Mais on note une importante sous-estimation (de 3 m/s) des vents d'Ouest, à 950 hPa, entre 6°N et 8°N, par "Petit MAR", comparé à "Grand MAR". Ce comportement pourrait résulter des forçages de surface exercés par "Grand MAR" sur "Petit MAR", qui modifient les vents en surface. Cela aura un effet sur le champ de précipitation simulé par "Petit MAR" : Diaconescu et al [27] ont souligné qu'une mauvaise évaluation de la direction du vent peut engendrer une fausse représentation du champ de précipitation, puisque ce dernier dépend fortement de l'advection de vapeur d'eau dans le domaine de simulation.

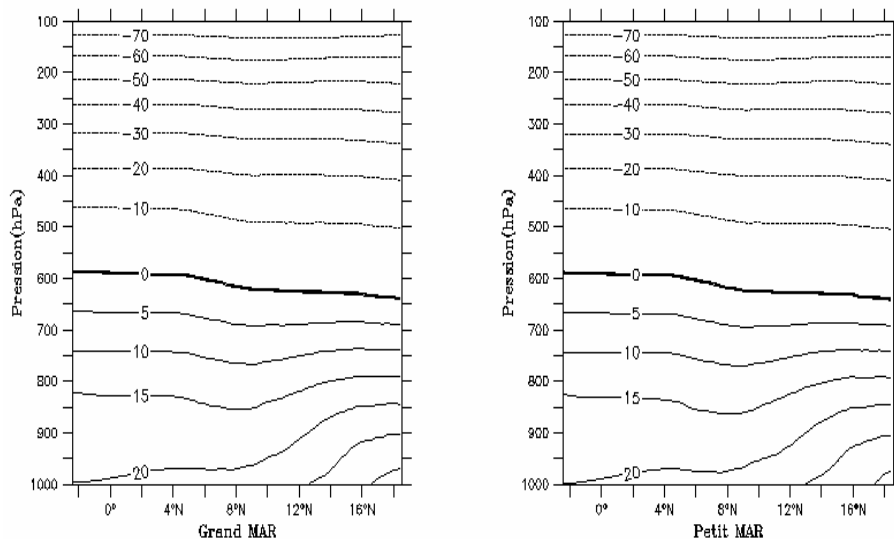


Figure 3 : Profils verticaux de température (°C) moyennée sur la zone 10°W-4°E des simulations Grand MAR (à gauche) et Petit MAR (à droite), pour le mois de septembre 1992. L'intervalle entre les températures négatives est de 10°C et celui entre les températures positives est de 5°C. L'isotherme 0°C définit la limite entre les valeurs négatives et les valeurs positives.

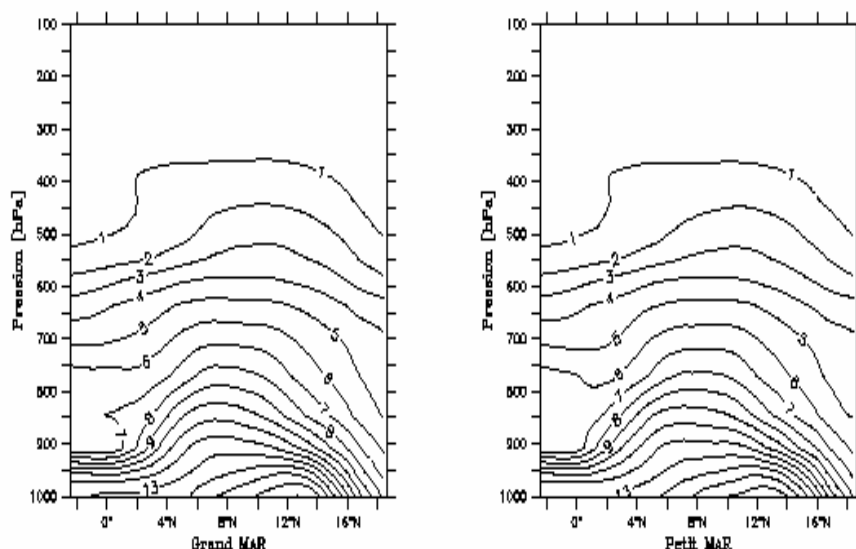


Figure 4 : Profils verticaux d'humidité spécifique (g/kg) moyennée sur la zone 10°W-4°E des simulations Grand MAR (à gauche) et Petit MAR (à droite), pour le mois de septembre 1992. L'intervalle entre les isolignes est de 1 g/kg.

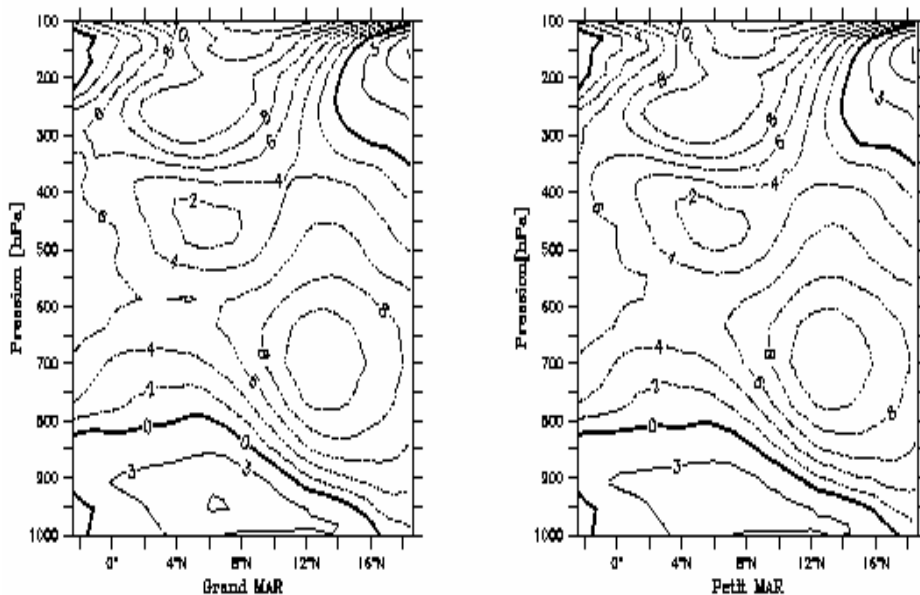


Figure 5 : Profils verticaux de vent zonal (m/s) moyenné sur la zone $10^{\circ}\text{W}-4^{\circ}\text{E}$ des simulations Grand MAR (à gauche) et Petit MAR (à droite), pour le mois de septembre 1992. L'intervalle entre les valeurs négatives est de 2 m/s et celui entre les valeurs positives est de 3 m/s.

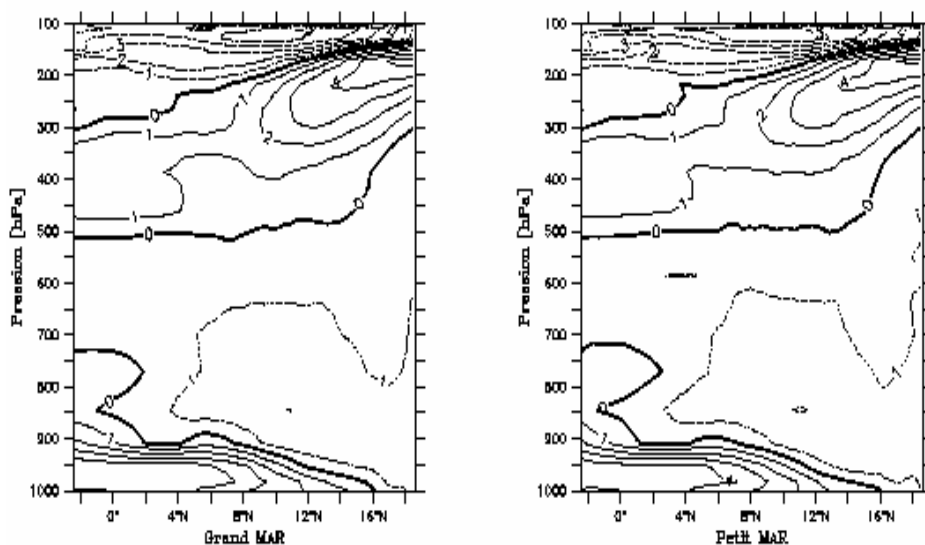


Figure 6 : Profils verticaux de vent méridien (m/s) moyenné sur la zone $10^{\circ}\text{W}-4^{\circ}\text{E}$ des simulations Grand MAR (à gauche) et Petit MAR (à droite), pour le mois de septembre 1992. L'intervalle entre les isolignes est de 1 m/s. Les valeurs négatives sont en trait tiré et les valeurs positives en trait continu.

III-1-2. Température, humidité et vent à 200 hPa, 700 hPa et 850 hPa

Les *Figures 7, 8 et 9* présentent les évolutions temporelles de la température, de l'humidité et de la norme du vent horizontal aux niveaux 200 hPa, 700 hPa et 850 hPa, simulées par "Grand MAR" et "Petit MAR", pendant le mois de septembre 1992. Ces figures permettent de comparer les champs régénérés par "Petit MAR" et ceux simulés par "Grand MAR", et localiser par la suite les meilleures valeurs de corrélations temporelles enregistrées pour les variables sélectionnées.

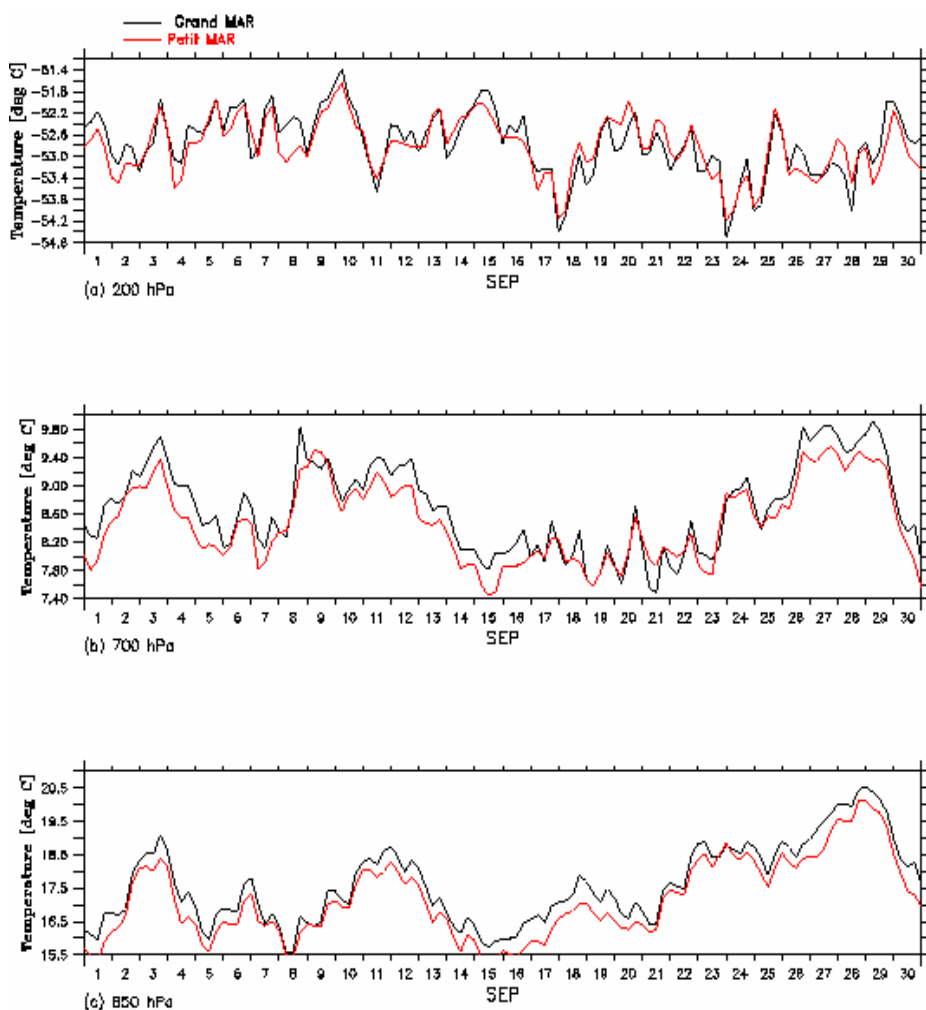


Figure 7 : Evolutions temporelles de la température simulées par *Grand MAR* et *Petit MAR*, sur le domaine de *Petit MAR*, aux niveaux 200 hPa, 700 hPa et 850 hPa, pendant le mois de septembre 1992.

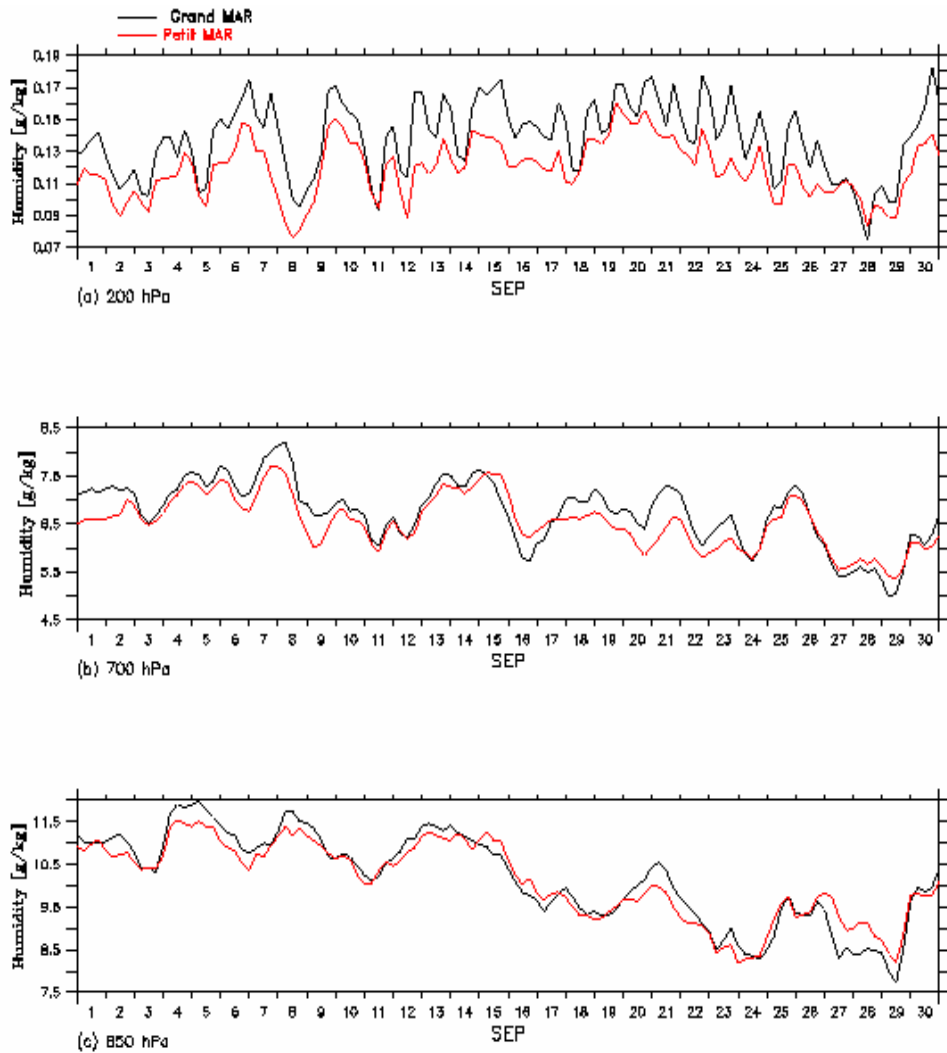


Figure 8 : Evolutions temporelles de l'humidité simulées par Grand MAR et Petit MAR, sur le domaine de Petit MAR, aux niveaux 200 hPa, 700 hPa et 850 hPa , pendant le mois de septembre 1992.

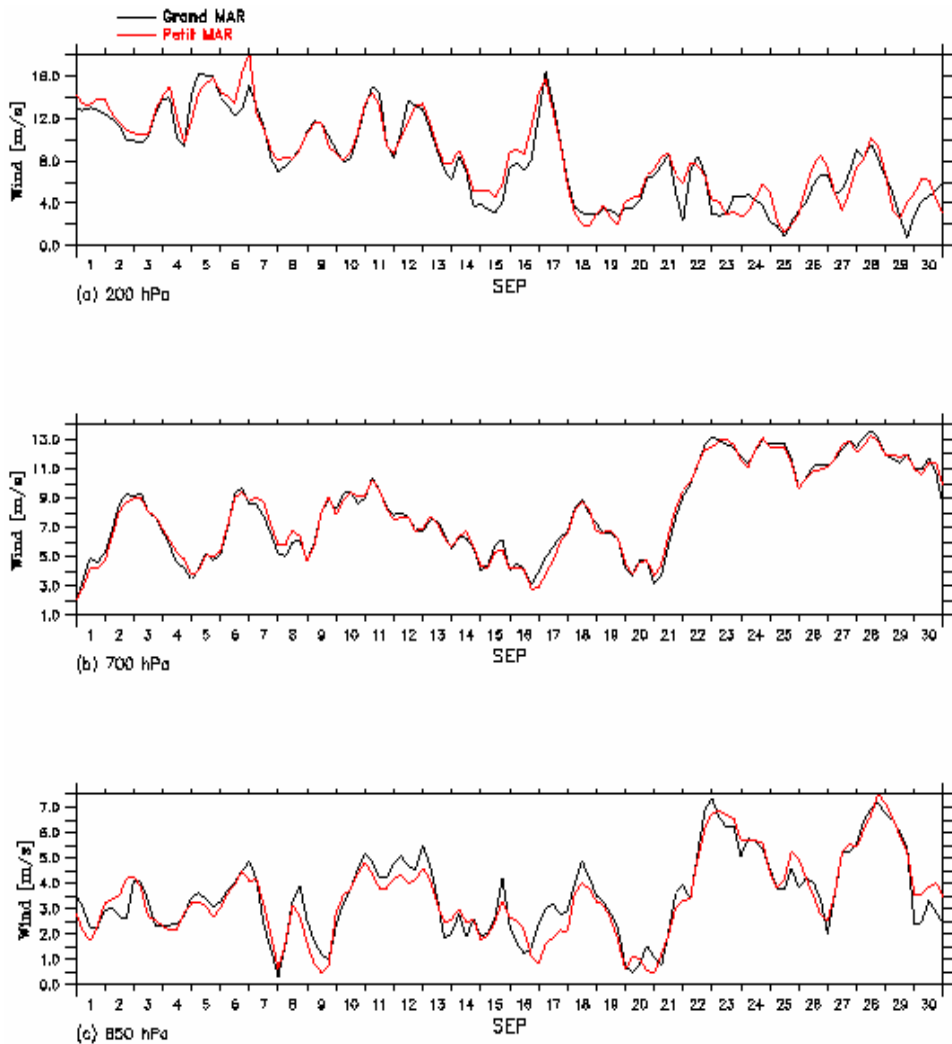


Figure 9 : Evolutions temporelles de la norme du vent horizontal simulées par Grand MAR et Petit MAR, sur le domaine de Petit MAR, aux niveaux 200 hPa, 700 hPa et 850 hPa, pendant le mois de septembre 1992.

Les évolutions temporelles de la température, de l'humidité et du vent sont similaires pour les deux simulations (*Figures 7, 8, 9 et Tableau 2*) : par exemple, au plus bas niveau (850 hPa), les biais de "Petit MAR" par rapport à "Grand MAR" sont de -0.44 °C pour la température, -0.07 g/kg pour l'humidité et -0.09 m/s pour le vent. L'écart entre les champs "Petit MAR" et "Grand MAR" est faible. Cette faiblesse d'écart s'explique par le fait que les

erreurs contenues dans les champs pilotes influencent faiblement la réponse de "Petit MAR". Ce constat est connu en modélisation du climat avec les MRCs imbriqués. En effet, dans certains cas, le modèle régional corrige partiellement les erreurs contenues dans les champs pilotes, notamment les champs fortement influencés par les forçages de surface [27]. Pour les trois variables (température, humidité, vent), et aux trois niveaux (200 hPa, 700hPa, 850 hPa), les champs simulés par "Petit MAR" présentent de très bonnes corrélations avec les sorties de "Grand MAR". Au plus bas niveau (850 hPa), le coefficient de corrélation R est de 98.54% pour la température, 96.41% pour l'humidité et 93.47% pour le vent. La relative faiblesse de R dans le cas du vent, peut s'expliquer par le fait que cette variable est plus sensible aux forçages de surface. Il faut noter que, pour éviter l'influence des bords latéraux du domaine modélisé, la zone de relaxation a été soustraite des calculs statistiques.

Tableau 2 : Coefficient de corrélation temporelle (R) et biais moyen entre les simulations Petit MAR et Grand MAR. Les valeurs sont calculées pour le vent, la température et l'humidité, à 200 hPa, 700 hPa et 850 hPa, sur le domaine de Petit MAR.

Niveaux	Vent		Température		Humidité	
	Coef. Corr. R (%)	Biais (m/s)	Coef. Corr. R (%)	Biais (°C)	Coef. Corr. R (%)	Biais (g/kg)
200 hPa	95.35	0.38	87.21	- 0.06	85.60	- 0.02
700 hPa	99.06	- 0.01	94.94	- 0.19	90	- 0.21
850 hPa	93.47	- 0.09	98.54	- 0.44	96.41	- 0.07

III-2. Champs de précipitation

Contrairement à la température, l'humidité et le vent, qui sont des variables forcées aux bords latéraux du modèle régional, les précipitations sont le résultat de processus physiques et dynamiques complexes et par conséquent non cohérents entre eux. La **Figure 10** indique la répartition spatiale des hauteurs de pluies moyennes sur l'Afrique de l'Ouest, au mois de septembre 1992 et la **Figure 11** montre les évolutions des cumuls pluviométriques journaliers simulées par "Petit MAR" et "Grand MAR", pendant le même mois. Les résultats indiquent une certaine similitude pour la répartition spatiale. Cependant, on note quelques sous-estimations du cumul pluviométrique de la part de "Petit MAR", notamment au Nord de la Côte

d'Ivoire. Par contre "Petit MAR" régénère les structures pluviométriques du nord-ouest de la Guinée avec plus de détails. Il semble que "Petit MAR" représente les forçages orographiques mieux que "Grand MAR". L'évolution temporelle (*Figure 11*) obtenue en moyennant les champs de précipitations sur le domaine de "Petit MAR", indique un coefficient de corrélation temporelle de 85.72%, avec des biais moyens de l'ordre de -0.97 mm/j. Les différences dans les pics sont plus prononcées dans la première quinzaine du mois de septembre, avec des périodes de 6 jours. Les forçages de la surface semblent plus faibles pendant cette période. Dans la deuxième quinzaine, les différences entre les pics pluviométriques de "Petit MAR" et "Grand MAR" sont moins importantes. A partir du 26 septembre, "Petit MAR" génère plus de pluies que "Grand MAR".

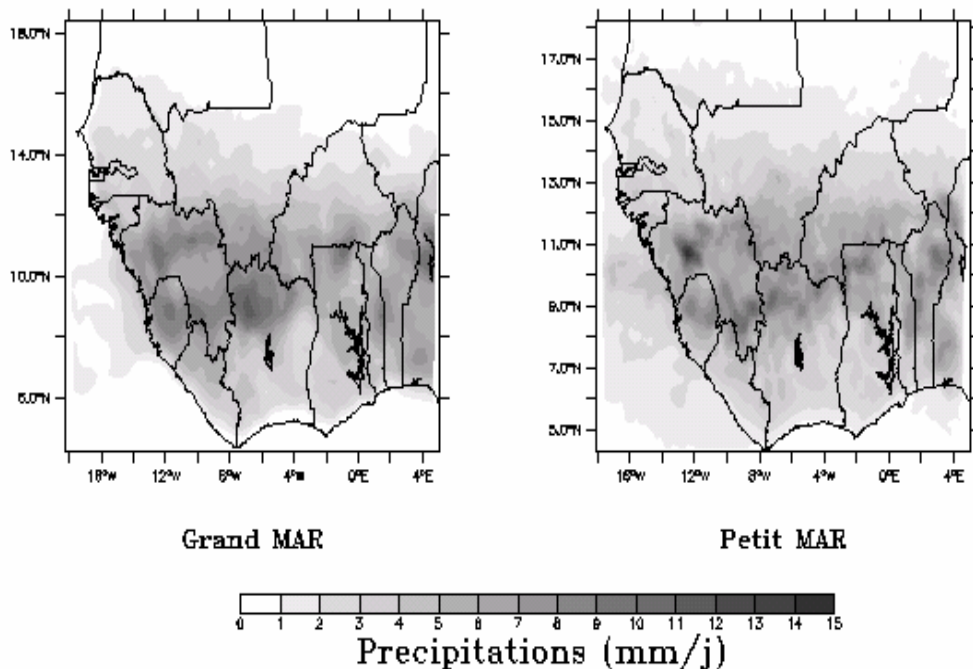


Figure 10 : Précipitations moyennes (mm/j) simulées par Grand MAR (à gauche) et Petit MAR (à droite), pendant le mois de septembre 1992.

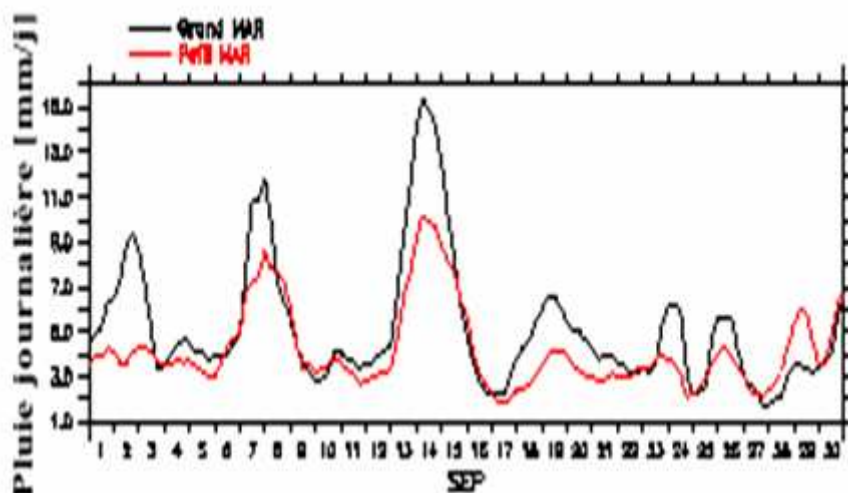


Figure 11. Evolutions temporelles des précipitations (mm/j) simulées par Grand MAR et Petit MAR, sur le domaine de Petit MAR, pendant le mois de septembre 1992.

V - CONCLUSION

Notre étude a montré que les paramétrages physiques identiques entre un modèle régional et son pilote, joue un rôle critique dans la modélisation climatique régionale. Le climat simulé par "Petit MAR" est proche de celui de "Grand MAR". La température, l'humidité et le vent, qui font partie des champs de forçage aux bords latéraux de "Petit MAR", sont parfaitement reproduits par celui-ci. Les coefficients de corrélation temporelle ont de bonnes valeurs pour ces variables, à 200 hPa, 700 hPa et 850 hPa. Par contre les champs de précipitations présentent une certaine perte de corrélation temporelle due aux forçages de surface.

Dans ce travail, l'analyse a porté sur un mois. Une étude future élargira notre investigation sur plusieurs années entières. Cela permettra d'évaluer la capacité du modèle régional MAR à régénérer les phénomènes atmosphériques simulés par son modèle pilote, avec plus de détails que ce dernier.

RÉFÉRENCES

- [1] - O. B. CHRISTENSEN, M. A. GAERTNER and J. A. PREGO, *Climate Dynamics*, 17 (2001) 875-887
- [2] - C. G. MENÉNDEZ, C. SAULO and Z-X. LI, *Climate Dynamics*, 17 (2001) 219-231
- [3] - O. W. Moufouma, Institut national polytechnique de Grenoble. Thèse de Doctorat France (2001)

- [4] - D. Caya and S. Biner, *Climate Dynamics*, 22 (2004) 33-46
- [5] - CAS/JSC WGNE, *WMO/TD-NO. 1024, World Meteor Org*, 29 (2000)
- [6] - B. Denis, R. Laprise, D. Caya and J. Côté, *Climate Dynamics*, 18 (2002b) 627-646
- [7] - S. Antic, R. Laprise, B. Denis and R. De Elia, *Climate dynamics*, 26 (2006) 305-325
- [8] - M. DIMETRIJEVIC and R. LAPRISE, *Climate Dynamics*, 25 (2005) 555-580
- [9] - H. GALLÉE and G. SCHAYES, *Monthly Weather Review*, 122(1994)671-685.
- [10] - H. GALLÉE, O. W. MOUFOUMA, P. BECHTOLD, O. BRASSEUR, I. DUPAYS, P. MARBAIX, C. MESSENGER, R. RAMEL and T. LEBEL, *Journal of Geophysical Research*, (2004) 109
- [11] - R. Ramel, Université Joseph Fourier de Grenoble, Thèse de Doctorat France (2005)
- [12] - R. RAMEL, H. GALLÉE and C. MESSENGER, *Climate Dynamics*, 26 (2006) 429-440.
- [13] - E. VANVYVE, Université catholique de Louvain-ASTR, Thèse de Doctorat (Belgique) (2007)
- [14] - E. VANVYVE, N. HALL, C. MESSENGER, S. LEROU and J. P. VAN YPERSELE, *Climate Dynamics*, 30 (2008) 191-202.
- [15] - P. G. DUYNKERE and F. T. M. NIEUWSTADT, *Applied Science Research*, 46 (1989) 25-43.
- [16] - P. BECHTOLD, E. BAZILE, F. GUICHARD, P. MASCART and E. RICHARD, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 127 (2001) 869-886.
- [17] - P. BECHTOLD, J. L. REDELSPERGER, I. Beau, M. BLACKBURN, S. BRINKOP, J. Y. GRAND-PEIX, A. GRANT, D. GREGORY, F. GUICHARD, C. HOFF and E. IOANNIDOU, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 126 (2000) 865-889.
- [18] - H. GALLÉE, *Monthly Weather Review*, 123 (1995) 2051-2069.
- [19] - E. KESSLER, *American Meteorological Society*, 10 (1969)
- [20] - K. DE RIDDER and G. SCHAYES, *Journal of Applied Meteorology*, 36 (1997) 167-182.
- [21] - G. DERIVE, Institut National Polytechnique de Grenoble, Thèse de Doctorat France, (2003)
- [22] - Y. FOUQUART and B. BONNEL, *Beitraege Physical Astmospheric*, 53 (1980) 35-52.
- [23] - J. J. MORCRETTE, Université des Sciences et Technologie de Lille, Thèse de doctorat (France), (1984)
- [24] - R. JONES, J. MURPHY and M. NOGUER, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 121 (1995) 1413-1449
- [25] - A. SETH and F. GIORGI, *Journal of climate*, 11 (1998) 2698-2712.
- [26] - M. LEDUC and R. LAPRISE, *Climate Dynamics*, 32 (2009) 833-854
- [27] - E. P. DIACONESCU, R. LAPRISE and L. SUSHAMA, *Climate Dynamics*, 28 (2007) 333-350