

CARACTÉRISATION DES ÉPISODES SEC (1987) ET HUMIDE (1988) DE MOUSSON AFRICAINE A L'AIDE DU MODÈLE ATMOSPHERIQUE RÉGIONAL (MAR)

**Benjamin KOUASSI^{1*}, Adama DIAWARA¹, Paul ASSAMOI¹,
Guy SCHAYES², Fidèle YOROBA¹ et Anderson ADJON¹**

¹*Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides (LAPA-MF), UFR-SSMT, Université de Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

²*Institut d'Astronomie et de Géophysique Georges Lemaître (ASTR), 2 Chemin du cyclotron, 1348, Louvain-la-neuve- Belgique.*

(Reçu le 25 Juin 2009, accepté le 09 Octobre 2009)

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

RÉSUMÉ

Les conditions météorologiques des années 1987 et 1988 réputées respectivement années sèche et humide sur le Sahel, en terme de précipitation, ont été simulées à l'aide du Modèle Atmosphérique Régional (MAR). Le modèle a reproduit avec satisfaction les conditions atmosphériques de ces années, notamment les contrastes au niveau des composantes du système de mousson ouest africain (Jet d'Est Tropical, Jet d'Est Africain et vent dans le flux de mousson) et l'intrusion d'air sec extratropical au-dessus de l'Afrique de l'Ouest. En comparaison avec les travaux d'autres auteurs, les simulations ont montré que pour l'année humide (1988), le Jet d'Est Tropical et le vent dans le flux de mousson sont plus importants en terme d'intensité que ceux de l'année sèche (1987), et que dans la moyenne troposphère, la situation s'inverse pour le Jet d'Est Africain. En revanche, le modèle n'a pas pu rendre compte avec satisfaction de la distribution spatiale des précipitations, surtout à l'ouest de la zone d'étude, qui s'étend de 10°W à 10°E. Mais, le modèle a pu reproduire les différentes phases actives et sèches de la mousson.

Sur le Sahel (12°N à 14°N), l'analyse de l'évolution au cours de l'année de l'anomalie normalisée par rapport à la moyenne annuelle des conditions de surface (rapport de Bowen, flux d'Energie Statique Humide, humidité spécifique) et des précipitations ont permis d'établir l'indice de mousson (dates d'installation et de retrait de la mousson et de la saison des pluies). Cet indice a montré que la saison de mousson de 1987 a été précoce par rapport à celle de 1988 (début juin contre fin juin pour l'installation de la mousson) et

plus longue (171 jours contre 135 jours). Bien que plus longue, la mousson de 1987 a été peu intense que celle de 1988 en terme de pluie apportée.

Mots-clés : *Modèle climatique régional, Afrique de l'Ouest, mousson Africaine, précipitation.*

ABSTRACT

Characterization of dry (1987) and wet (1988) episodes of West African monsoon using the regional atmospheric model MAR

The weather conditions of dry (1987) and wet (1988) monsoon periods on the Sahel were simulated using the regional atmospheric model MAR. The model reproduced the atmospheric conditions of these years, in particular the contrasts on the components of the monsoon system (TEJ, AEJ and the monsoon flow in the low level of the atmosphere) and the intrusion of an extra tropical dry air in the middle level of the atmosphere. In comparison with works of other authors, simulations showed that for the wet year (1988), the intensities of the TEJ and the monsoon flow are higher than those of the dry year (1987), and in middle troposphere, the situation is reversed for the AEJ. On the other hand, the spatial distribution of the rainfall simulated by the model is not satisfactory on the west of the study zone (10°W-10°E). But the model reproduces the various active and dry phases of monsoon.

On the Sahel (12°N to 14°N), in the time-norm diagram, the analysis of the normalized anomaly with regard to the annual average of the surface variables (Bowen's ratio, ESH flux, specific moisture, etc.) and the precipitations allowed to establish the monsoon index (installation and withdrawal date of the monsoon and of the rainy season). This index showed that, for the monsoon season of 1987, the installation of the monsoon was early (at the beginning of June against end June for 1988). Also, the monsoon season of 1987 was longer than that of 1988 (171 days against 135 days). The rainy seasons for these two years had practically the same length (beginning May to end October).

Keywords : *Regional climate model, West Africa, monsoon, rainfall.*

I - INTRODUCTION

La sécheresse qui a touché l'Afrique de l'Ouest pendant les années 70-80 a eu des conséquences socio-économiques dramatiques sur la région, principalement au Sahel. Une installation durable de la tendance aux changements climatiques rend ces régions vulnérables. Une des priorités est certes de promouvoir des

politiques d'adaptation mais la compréhension des mécanismes à la base de ces épisodes secs et celle de la variabilité demeurent importantes. Ainsi, les investigations menées par Le Barbé et al. [1] ont montré que la baisse des précipitations observée dans la région sahélienne pendant la période 1971-1990, par rapport aux précipitations des années 1951-1970, est liée à une diminution dans la fréquence moyenne d'occurrence des événements convectifs, sans modification significative des hauteurs moyennes des précipitations par événement. Fontaine et al. [2] ont montré que le forçage de la pluviométrie ouest africaine par les températures de surface océanique (TSOs) a été modifié pendant les années 60 par la présence d'anomalie positive de TSOs dans le golfe de Guinée. D'autres recherches ont été menées sur l'importance du rôle des états de surface continentale sur la pluviométrie: Taylor et Lebel [3] avec les données d'observations, Zheng et Eltahir [4] se basant sur la modélisation, ont conclu que la dégradation des forêts et des savanes en zone guinéenne a eu des répercussions sur la circulation de mousson en réduisant l'énergie statique humide (ESH) dans les basses couches. Cette baisse de l'ESH réduit également l'intensité du flux de mousson et son potentiel pluviogène. Cependant, il faut relever que la compréhension de ces contrastes d'une année à l'autre reste difficile à partir de l'observation, à cause des multiples et complexes phénomènes impliqués et des déficits de données. L'outil de la modélisation est incontournable pour l'analyse de cette variabilité interannuelle de la mousson et de la pluviométrie. Ainsi, l'analyse de la mousson ouest africaine paraît plus appropriée avec un modèle climatique régional, surtout pour la caractérisation des années sèches et humides en terme de pluviométrie sur la région.

Dans cette optique, cette étude s'appuie sur le Modèle Atmosphérique Régional (MAR) pour caractériser deux périodes spécifiques de mousson dites sèche (1987) et humide (1988). Elle permettra d'évaluer les capacités du modèle MAR à simuler les conditions atmosphériques très contrastées entre ces deux années. Dans une première partie, nous présenterons le modèle MAR et les différentes simulations effectuées, et dans une deuxième partie, nous discuterons les résultats de ces simulations.

II - METHODOLOGIE

II-1. Présentation du modèle MAR

Le modèle MAR a été mis au point à l'Institut d'Astronomie G. Lemaître de l'Université Catholique de Louvain (UCL) par Gallée et Schayes [5]. Il a été utilisé avec succès dans différentes régions du globe, notamment pour l'étude des phénomènes nuageux dans la région du lac Victoria en Afrique de l'Est (Brasseur [6]), la simulation des cyclogenèses sur l'Europe (Brasseur [7]), la simulation climatique à haute résolution sur l'Afrique de l'ouest (Mouffoua

[8]), le saut de mousson (Ramel et al. [9]) et la variabilité du climat ouest africain (Vanvyve et al. [10]). Le modèle MAR est un modèle à aire limitée et hydrostatique, qui utilise la coordonnée verticale normalisée σ . Pour la description détaillée des équations dynamiques du MAR, l'on pourra se référer aux travaux de Gallée et Schayes [5].

II-2. Conditions d'intégration du modèle

Le *Tableau 1* résume les options physiques et numériques, ainsi que les différents schémas de paramétrisation utilisés dans nos simulations.

Tableau 1 : Options physiques et numériques, et schémas du modèle MAR utilisés dans nos simulations.

CATEGORIES	OPTIONS UTILISEES
Equation de base du modèle	3D, hydrostatique au point de grille, compressible
Coordonnée verticale	Coordonnée σ normalisée
Type de projection	Stéréographique oblique
Grille horizontale	Fixe 40 km×40 km
Conditions aux limites latérales	Relaxation dynamique avec une zone tampon de 7 points de grille à la périphérie du domaine
Conditions aux limites au sommet du modèle	Couches d'absorption
Conditions aux limites à la surface du sol	$u, v=0$; $T=T_s(t)$; $q_s = q_s(t)$
Schéma numérique d'advection	Schéma de Leapfrog
Schéma de turbulence	Schéma E- \mathcal{E} de fermeture d'ordre 1.5
Schéma de transfert radiatif	Celui du Centre Européen (CEPMMT)
Schéma de microphysique des nuages	Représentation explicite du cycle hydrologique
Schéma de convection	Schéma en flux de masse de Bechtold [11]
Schéma de surface	SISVAT

Le forçage en surface se fait avec les températures de surface océanique (TSOs) prescrites de Reynolds [12] issues de la banque de données de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). La classification de la végétation est basée sur celle de l'IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) mais adaptée au module sol de SISVAT (Soil Ice Snow Vegetation Atmosphere Transfer). Les propriétés de la végétation (indice foliaire LAI et fraction de sol nu) sont obtenues à partir des données de NDVI AVHRR (Normalized Difference Vegetation Index; Advanced Very High Resolution Radiometer), à 8 km de résolution pour les années 1983 à 1992. Ces informations sont répertoriées dans le **Tableau 2**.

Le modèle MAR s'imbrique dans les champs météorologiques du Centre Européen pour la Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT), que sont les ré-analyses ERA-40 ou ERA-15. Ce forçage aux frontières latérales se fait toutes les 6 heures en imposant des valeurs de température, de pression, d'humidité et de vent interpolées linéairement. Pour nos simulations, nous avons utilisé les ré-analyses ERA-40.

L'intégration du modèle a porté sur les années 1987 et 1988 allant du 1er janvier au 31 décembre, avec l'année 1986 temps de mise en régime du modèle (« spin up » en anglais).

Tableau 2 : Champs de forçage surfacique et latéral du modèle MAR

CATEGORIES	CHAMPS
Forçage latéral	Imbrication unidirectionnelle dans les ré-analyses ERA-40
Végétation	LAI dérivé des NDVI (8 km de résolution) de la classification IGBP
TSO	TSO prescrite de Reynolds (hebdomadaire)
Sol	Données de la FAO
Topographie	GTOPO30 du centre EROS

III - RESULTATS ET DISCUSSION

III-1. Composantes du système de mousson Ouest Africaine

La mousson ouest africaine est caractérisée par un système à quatre composantes : le Jet d'Est Tropical (JET), le Jet d'Est Africain (JEA), le flux de mousson et le Jet d'Ouest SubTropical (JOST). Sur l'Afrique de l'Ouest, on

note dans les basses couches atmosphériques le flux de mousson et au-dessus de ce flux, l'organisation d'un régime de vent d'Est dans la moyenne et haute troposphère:

- Le JEA de la moyenne troposphère (700hPa à 500hPa), centré sur la latitude 15°N, est dû au gradient thermique existant dans les basses couches atmosphériques entre le Sahara et le golfe de Guinée et au renversement de ce gradient méridien en altitude.

- Le JET de la haute troposphère (200hPa), centré autour de la latitude 5°N, tire son origine de l'établissement de la mousson indienne au mois de juin.

Dans une analyse composite, aux mois de juin à septembre, pendant la phase intense de la mousson, sur les années sèches (1982-85) et humides (1952-61) sur l'Afrique de l'Ouest, avec les ré-analyses NCEP (National Center for Environmental Prediction), Grist et Nicholson [15] ont montré que : (i) le JET des années humides est supérieur (en terme d'intensité) au JET des années sèches, (ii) le JEA des années humides est légèrement plus faible (en terme d'intensité) que le JEA des années sèches, (iii) la composante zonale du vent (en norme) dans le flux de mousson est plus élevée que celle pendant les années humides.

Les résultats de cette analyse sont donnés dans le **Tableau 3**, ainsi que ceux de nos simulations numériques. Notons que les moyennes zonales pour le modèle MAR ont été effectuées sur la bande 10°W-10°E contre 10°W-20°E pour les ré-analyses NCEP. Les sorties MAR indiquent qu'effectivement, le JET est plus important en 1988 qu'en 1987. Le JEA de 1988 est plus faible que celui de 1987 aux mois de juillet et août, c'est-à-dire pendant la période la plus pluvieuse. A l'inverse, pendant les mois de juin et septembre, le modèle MAR simule un JEA plus intense en année humide (1988) qu'en année sèche (1987). Enfin, le MAR indique que, dans les basses couches, la composante zonale du vent est plus importante en 1988 qu'en 1987. Alors qu'en année humide, le MAR sous-estime plutôt le vent de mousson (6 m/s contre 8 à 12 m/s pour les ré-analyses NCEP). On peut affirmer que le modèle MAR reproduit correctement les observations faites par Grist et Nicholson [15].

Les positions des différents axes de vents forts sont également bien représentées par le modèle MAR (**Figure 1**) : la position moyenne du cœur du JET se situe autour de 5°N ; celui du JEA migre de 10°N à 15°N, en moyenne pour les deux années. Le cœur du flux de mousson se situe autour

de 10°N. Mais l'épaisseur du flux de mousson, qui atteint le niveau 500hPa aux mois de juillet et août pour les années humides dans les ré-analyses NCEP, est assez mal simulée par le modèle MAR. Cette épaisseur, pour le modèle MAR, se limite autour de 700hPa. La position du second cœur du jet de la moyenne troposphère (JEA), qui s'observe pour les années sèches, dans les ré-analyses NCEP (voir Grist et Nicholson [15]), aux mois d'août et de septembre, autour de 5°S, n'apparaît pas clairement dans nos résultats, à cause de la proximité de la limite sud de notre domaine modélisé (7°S). Néanmoins, le MAR simule un cœur de jet de 2 m/s à 5°S, au cours du mois d'août de l'année sèche 1987, contre 6 m/s dans les ré-analyses NCEP.

Dans la haute troposphère, autour de 200hPa, le modèle montre que le JET est plus intense en 1988 qu'en 1987 (*Figure 1 et Tableau 3*).

Tableau 3 : *Intensités du JET, du JEA et du vent de mousson pour les périodes humides (données MAR 1988 et ré-analyses NCEP 1952-1961) et les périodes sèches (données MAR 1987 et ré-analyses NCEP 1982-1985). Les intensités des vents des ré-analyses NCEP sont tirées de Grist et Nicholson [15].*

	Période	JET (m/s)		JEA (m/s)		Vent de mousson (m/s)	
		humide	sèche	humide	sèche	humide	sèche
MAR	Juin	16	12	12	8	6	4
	Juillet	20	16	10	14	8	6
	Août	22	16	8	10	6	6
	Sept.	14	8	10	8	6	6
MAR	Juin	16	6	10	12	8	2
	Juillet	26	14	10	12	10	2
	Août	28	16	10	10	12	2
NCEP	Sept.	20	10	10	12	8	2

Cependant, il faut noter qu'en année sèche, le MAR surestime légèrement le vent de mousson (6 m/s contre 2 m/s pour les ré-analyses du NCEP). L'écart entre les JETs des deux années est de 4 à 6 m/s aux mois de juillet et août. Ces mois constituent la période de saison des pluies sur le Sahel, avec la remontée de la ZCIT (Zone de Convergence Inter Tropicale) à sa deuxième position d'équilibre, autour de 10°N (Sultan et Janicot [13]). Ces résultats sont confirmés par des études antérieures réalisées avec le même modèle MAR (Mouffouma [8]) dans le cadre d'une étude de modélisation du climat Ouest Africain. Les investigations de Druyan et Hall [14], sur les années 1987 et 1988, à l'aide du modèle de NASA/GISS (Goddard Institute Space Studies) forcé par les données d'observations de températures de surface des

océans (TSOs), ont souligné cette différence entre les deux années et montré une circulation divergente associée au JET au même niveau (200hPa). Ces auteurs ont lié les contrastes atmosphériques entre les années 1987 et 1988 aux différences entre les TSOs à l'échelle globale, c'est-à-dire aux oscillations australes des TSOs (phénomènes ENSO: El Niño et Southern Oscillation) et suggéré que l'excès des précipitations enregistrées en 1988 était associé à une importante circulation sud-nord dans les basses couches atmosphériques, qui a apporté plus d'humidité au Sahel. Le MAR reproduit assez bien cette circulation des basses couches aux mois de juillet avec des valeurs de 8 m/s pour 1988 contre 6 m/s pour 1987 en moyenne (**Tableau 3**).

III-2. Conditions de surface

L'analyse des conditions de surface s'inspire des travaux de Eltahir [16]. Elle est basée sur un mécanisme de rétroaction positive fondé sur le bilan d'énergie à la surface du sol. Ce mécanisme contrôle l'albédo de surface et le rapport de Bowen par le biais de l'humidité du sol.

Les résultats du calcul de l'indice de mousson, pour les années 1987 et 1988, sont donnés par la **Figure 2**. Celle-ci indique l'évolution au cours de l'année des valeurs d'anomalies normalisées par rapport à la moyenne annuelle des grandeurs suivantes : rapport de Bowen, précipitations, humidité spécifique et flux d'énergie statique humide (ESH). Ces variables ont été moyennées sur la fenêtre 10°W-10°E, au Sahel (12°N-14°N), dans le flux de mousson (de la surface du sol au niveau 850hPa).

Cette figure indique, de janvier à avril, une anomalie positive du rapport de Bowen. Pour l'année 1987, la valeur maximale est de 9 et est centrée sur la fin du mois d'avril et le début du mois de mai. Pour l'année 1988, elle est de 10 et est centrée sur la deuxième quinzaine du mois d'avril. Ces valeurs indiquent que l'énergie sensible est largement supérieure à l'énergie latente en période d'Harmattan sur le Sahel.

De mai à juin, la région sahélienne enregistre une décroissance rapide de l'anomalie du rapport de Bowen et une croissance des anomalies de l'humidité spécifique, des précipitations et du flux d'ESH, pour les deux années. Cette période marque la transition entre deux saisons (sèche et pluvieuse). La décroissance rapide du rapport de Bowen met en évidence la transition brutale entre les deux saisons et indique le saut de la ZCIT de sa première position d'équilibre autour de 5°N à sa deuxième position d'équilibre autour de 10°N (Sultan et Janicot [13]). Ce déplacement méridional de la ZCIT marque l'installation du régime de mousson aux latitudes soudano-sahéliennes et peut donc être considéré comme la mise en place de la mousson sur ces régions.

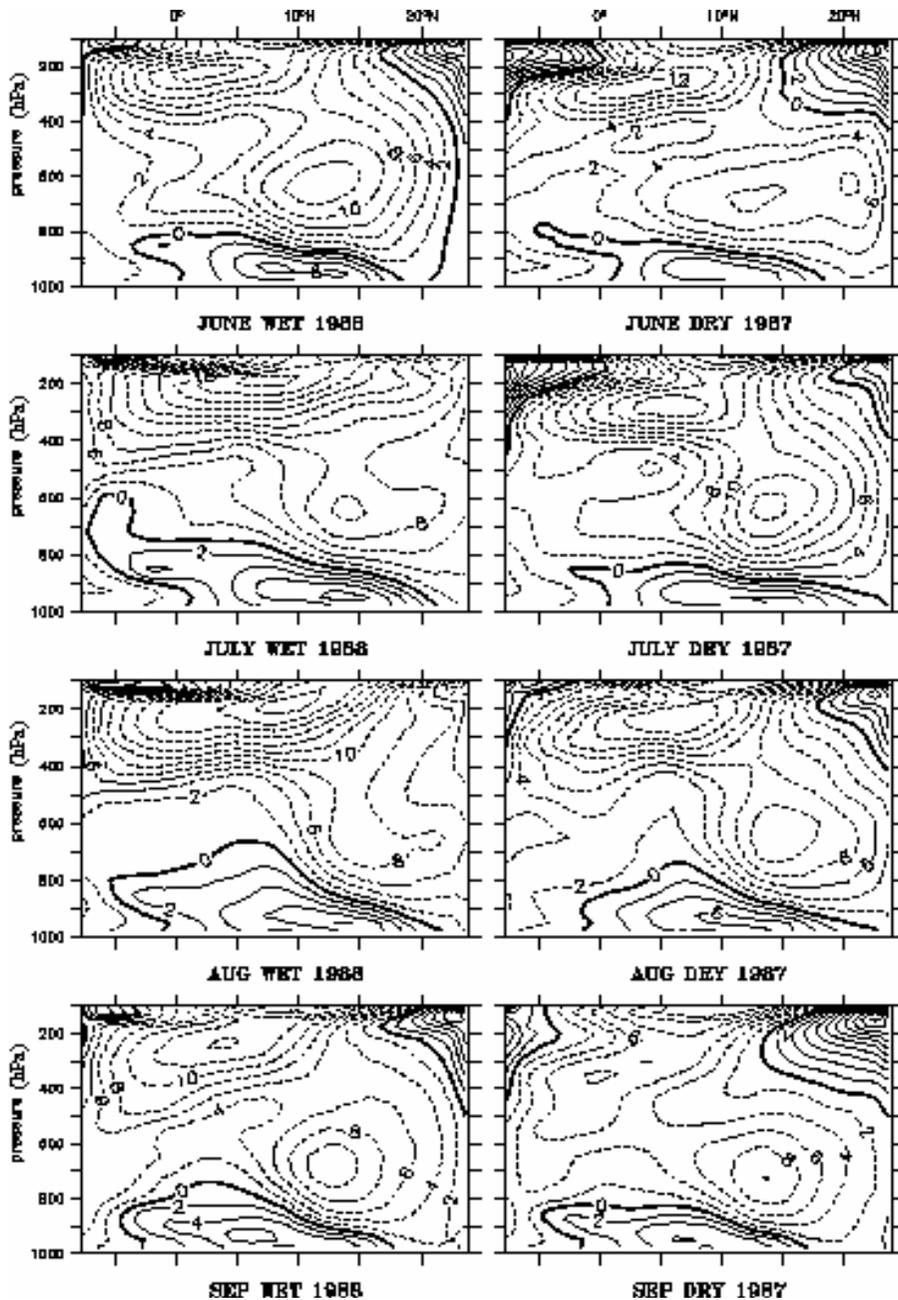


Figure 1. Composante zonale de vent issue du modèle MAR, pour les mois de juin, juillet, août et septembre. A gauche : année 1988 (humide). A droite : année 1987 (sèche). (Ecart entre les iso lignes: 2 m/s)

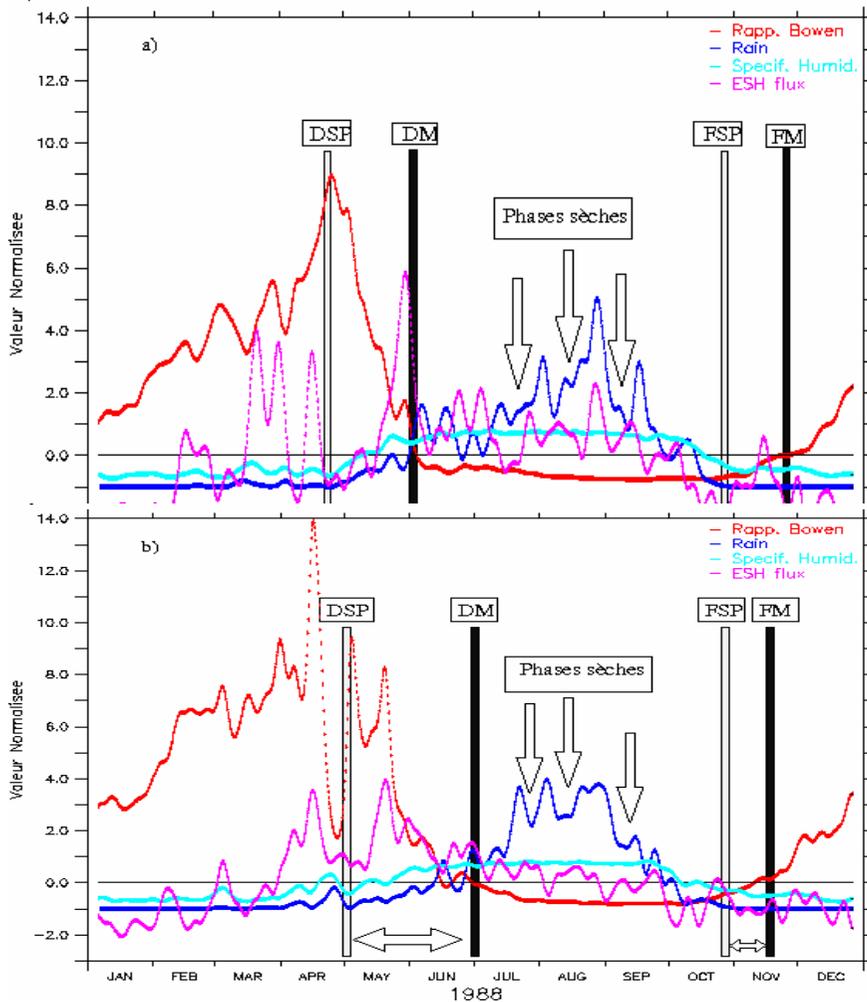


Figure 2 : Anomalies normalisées du rapport de Bowen (rouge), des précipitations (bleu), de l'humidité spécifique (cyan) et du flux d'ESH (rose) pour les années 1987 (a) et 1988 (b), sur le Sahel. Les phases sèches sont indiquées avec les flèches verticales et les doubles flèches indiquent les « pré » et « post » saison de mousson. Les dénominations DSP, DM, FSP et FM indiquent respectivement le début de la saison des pluies (DSP), le début de la mousson (DM), la fin de la saison des pluies (FSP) et la fin de la mousson (FM). Toutes ces anomalies ont été moyennées sur la fenêtre 10°W-10°E; 12°N-14°N.

La période juillet-septembre est marquée par une anomalie négative du rapport du Bowen, qui a alors une valeur moyenne de -1 pour les deux années. Cette anomalie négative signifie que l'énergie latente disponible pour la formation des perturbations est plus importante et plus abondante que

l'énergie sensible. Cette période est celle d'intenses activités convectives sur le Sahel, avec une anomalie positive des précipitations. La valeur maximale enregistrée pour l'anomalie des précipitations est de 5 à la fin du mois août, pour l'année 1987, et de 4 pour l'année 1988, au début du mois d'août. Cette saison d'intenses activités convectives est marquée par des séquences sèches et humides dans les champs des précipitations, pour chacune des deux années. Ces séquences sèches et humides correspondent respectivement aux phases d'affaiblissement et d'intensification de la mousson sur la région.

Avec l'analyse spectrale appliquée aux indices pluviométriques régionaux sur le Sahel, Sultan et Janicot [17] ont mis en évidence l'existence d'un signal intra-saisonnier qui s'exprime à deux échelles de temps distinctes de 15 jours et de 40 jours. Ainsi, ils enregistrent deux séquences sèches de 15 jours à la mi-juillet et fin septembre et une séquence sèche plus longue de 40 jours centrée sur le mois d'août. Le modèle MAR reproduit assez bien ces trois séquences sèches (*voir courbe en bleu, phases sèches sur la Figure 2*), pour les deux années, mais avec des périodes moyennes de 15 jours aux mois de juillet, août et septembre.

III-2-1. Dates d'installation et de retrait de la mousson : cas du Sahel

Balme et al. [18] ont défini des critères de démarrage de la saison des pluies sur le Sahel, à partir des données pluviométriques provenant d'un réseau de 30 pluviographes sur Niamey (Niger) et couvrant une période de 12 années (1990-2001). Le critère « climatique » d'installation de la saison des pluies, englobant toute la zone d'étude, prend comme dates de démarrage et de fin de la saison des pluies les dates des premiers et derniers événements pluvieux. Ces dates indiquent l'apparition et la disparition d'une convection organisée sur la région. Lié aux différentes stations pluviométriques et fondé sur un seuil de pluie tombée, le critère « agronomique » suggère que, pour chaque station, la date de démarrage de la saison des pluies est postérieure au 1er mai, avec au moins 20 mm de pluies sur 3 jours, sans épisode sec excédant 7 jours dans les 30 jours qui suivent (pour éviter les faux départs), et que la date de fin de la saison des pluies se situe après le 1er septembre, avec 20 jours consécutifs sans pluies. Ces critères ont été appliqués aux sorties du modèle.

Moins restrictif, le critère « climatique » de détection des dates de démarrage et de fin de la saison des pluies peut s'appliquer aux champs de précipitations du modèle, en se basant sur le palier -1 de l'anomalie des précipitations. En effet, l'anomalie des précipitations prend la valeur -1 quand le cumul des précipitations, à une date quelconque, est nul. Le palier de valeur -1 correspond à la valeur minimale que l'anomalie des précipitations peut

prendre. Ainsi, la date de début de la saison des pluies coïncidera avec le décollage du palier -1 de la courbe de l'anomalie des précipitations. Cette date indique l'apparition des premières pluies sur le Sahel, mais pas la date du début de la saison des pluies en tant que telle. Pour distinguer les séquences humides isolées de début de la saison des pluies de la saison des pluies proprement dite, on ajoute la condition de non retour de l'anomalie des précipitations au palier -1 sur une durée d'au moins 1 mois (30 jours) pour éviter un faux départ. La date de fin de la saison des pluies quant à elle, va coïncider avec le retour définitif au palier -1 de l'anomalie des précipitations. Cette condition s'apparente au critère « agronomique ». Le critère d'établissement et de déclin de mousson peut être déterminé avec le rapport de Bowen.

Les dates de l'installation et du retrait de la mousson vont correspondre respectivement aux dates de changement de signe de l'anomalie normalisée du rapport de Bowen, c'est-à-dire aux dates où l'anomalie est nulle au passage de la valeur positive vers la valeur négative (pour l'installation) et de la valeur négative vers la valeur positive (pour le retrait). Les séquences de mousson ou d'harmattan seront celles où l'anomalie du rapport de Bowen garde sa valeur négative ou positive, respectivement sur au moins 30 jours (1 mois), pour éviter un faux départ.

Le début de la saison des pluies (DSP) a lieu dans la troisième décennie du mois d'avril et début mai pour les années 1987 et 1988 respectivement, soit avec un écart de 15 jours entre les deux années. La date du 1er mai pour le démarrage de la saison des pluies dans le cas du critère « agronomique » (Balme et al. [18]), est respectée pour l'année 1988. Dans le cas de ce critère, on observe un retard de 10 jours pour l'année 1987. Le début de la mousson (DM) a lieu en début juin et fin juin pour les mêmes années, respectivement. Le DSP et le DM ne coïncident pas. Cela signifie qu'il y a une période de transition dite de « pré saison », entre le démarrage de la mousson et celle de la saison des pluies sur le Sahel. Cette période a une durée de 1,5 mois (45 jours) et 2 mois (60 jours), respectivement, pour les années 1987 et 1988. Par rapport à la date moyenne (24 juin) du saut de mousson, qui ne tient pas compte des premières pluies sur le Sahel, l'établissement de la mousson de 1987 a été précoce, tandis que celui de l'année 1988 est normal.

La fin de la saison des pluies (FSP) et celle de la mousson (FM) coïncident pour les deux années. Elles se situent en octobre et en novembre, respectivement. Contrairement à l'écart DSP-DM, l'écart FSP-FM est faible. Il est de 15 jours pour l'année 1988 (FSP: fin octobre et FM: mi novembre) et 20 jours pour l'année 1987 (FSP: fin octobre et FM: 3e décennie de novembre).

Les dates de mi-septembre et de 1er octobre sont celles trouvées par Balme et al. [18] pour la fin de la saison des pluies (FSP) avec les critères « climatique » et « agronomique », respectivement. La période entre la FSP et la FM marque une transition dite de « post-saison » annonçant le début de la période d'harmattan sur le Sahel. La descente de l'anomalie des précipitations vers le palier -1 s'amorce progressivement depuis le mois de septembre jusqu'aux mois d'octobre et de novembre pour les deux années, respectivement.

Entre le DM et la FSP se trouve la phase active de la mousson, qui se caractérise par une anomalie de rapport de Bowen négative. La durée de la saison de mousson (DM à FM) fait en moyenne 5,7 et 4,5 mois, soit 171 et 135 jours, respectivement, pour les années 1987 et 1988. Balme et al. [18] sur une moyenne de 12 années (1990-2002), Lavaysse [19] sur la période 1968-1990, avec des données pluviométriques, ont trouvé, respectivement, une durée moyenne de la période de mousson sur le Sahel de 151 jours et 155 jours. Les valeurs trouvées pour 1988 sont proches de celles observées par Balme et al. [18] et Lavaysse [19] dans la mesure où elles ne tiennent pas compte de la phase stationnaire de 10 jours précédant le DM au mois de juin. La saison de mousson de l'année 1987 sur le Sahel a été plus longue que celle de l'année 1988 (171 jours contre 135 en moyenne) mais elle a connu des déficits pluviométriques sur la région, en général, pour les observations, et sur la fenêtre CATCH, pour le modèle MAR. Lavaysse [19] a montré qu'au cours de la période 1968-1990, la variabilité interannuelle du cumul des pluies pour les années humides est plus liée à une intensification des pluies journalières et très peu à un élargissement de la période de la saison des pluies.

Sur la **Figure 3** donnant la différence des précipitations observées du CRU (Climate Research Unit) entre les années 1988 et 1987, moyennées sur la bande 10°W-10°E, entre mars et décembre, on note un excès pluviométrique sur le Sahel de 1 à 1,5 mm/jour pour 1988 et un déficit sur le golfe de Guinée (littoral) de la même valeur. Sur le Sahel, le modèle MAR simule cet excès pluviométrique de 1 à 1,5 mm/jour pour 1988 à l'est et un déficit de 1 à 1,5 mm/jour pour la même année à l'ouest. Sur le golfe de Guinée, le déficit est également observé avec le modèle. Ce contraste entre les années 1987 et 1988 est mal simulé par le modèle notamment à l'ouest du domaine modélisé.

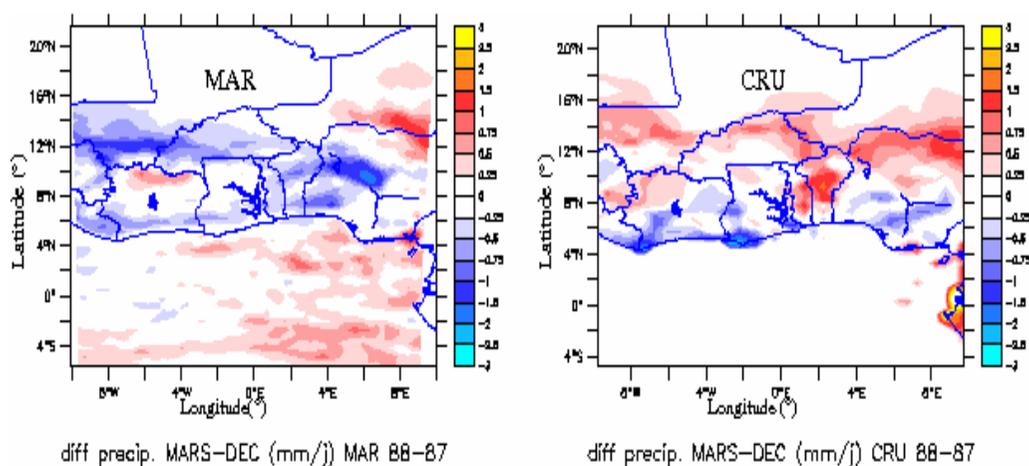


Figure 3 : Différence des précipitations moyennes (mm/jour) entre les années 1988 (humide) et 1987 (sèche), de mars à décembre, sur 10°W-10°E. A gauche les sorties du modèle MAR (1988-1987) et à droite les observations CRU (1988-1987).

III-3. Intrusion d'air sec dans la moyenne troposphère

Les investigations de Roca et al. [20], dans un travail de reconstruction du champ d'humidité issu des ré-analyses du NCEP (National Center for Environmental Prediction), dans la moyenne troposphère sur l'Afrique de l'Ouest, ont montré que les systèmes convectifs organisés, rapides et de longue durée de vie, sont plus probables dans les régions où l'on enregistre la présence d'air sec extratropical. Cette étude suggère que cet air sec extratropical module les occurrences et la durée des systèmes convectifs et donc le mode de variabilité des précipitations sur l'Afrique de l'Ouest et ce, pendant la période de mousson. La **Figure 4** représente, suivant le méridien, l'énergie statique humide (ESH), pour le mois de juillet. On peut observer la ZCIT qui correspond aux fortes valeurs de l'ESH dans les basses couches, la moyenne et la haute troposphère. Au nord de cette zone, c'est-à-dire au delà de 12°N, autour de 600hPa, se trouve une zone d'air sec. Pour l'année 1988, cette zone est plus épaisse suivant la verticale (900 à 500hPa contre 750 à 500hPa pour l'année 1987) et s'observe à partir de 15°N (trait vertical discontinu sur la **Figure 4**) pour 1988, contre 12,5°N pour 1987. Notons que l'ESH des basses couches, c'est-à-dire dans le flux de mousson, est plus importante (5 kJ/kg) en 1987 qu'en 1988. Cette différence d'ESH crée un gradient méridien plus important en 1987 qu'en 1988, pour le mois de juillet. Cette structure de l'atmosphère dans les moyennes couches pourrait expliquer le déficit pluviométrique enregistré au Sahel pendant l'année 1987, par le

maintien de la ZCIT et donc des systèmes convectifs plus au sud, sans réduction de l'intensité de l'ESH.

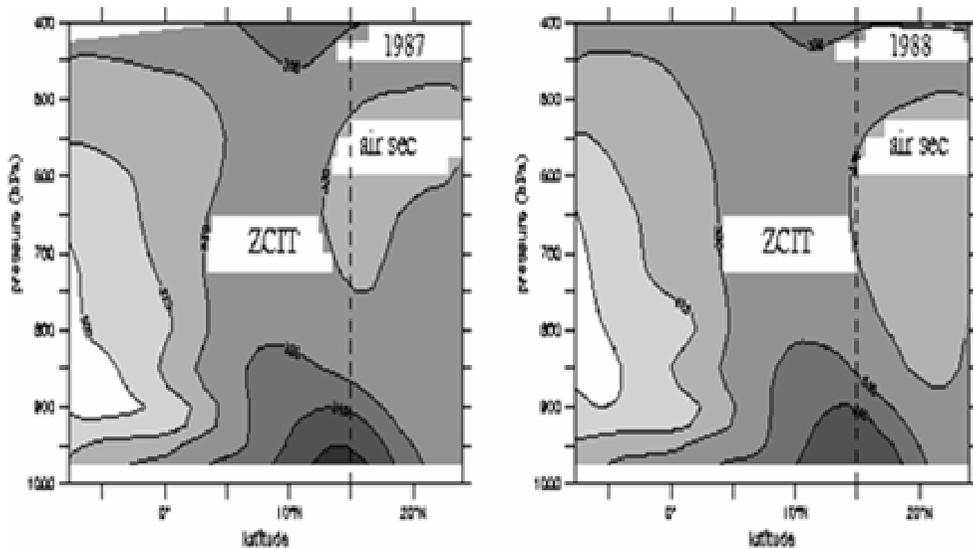


Figure 4. : *Energie statique humide (ESH) issue du modèle MAR, en kJ/kg, dans le diagramme latitude – altitude, au mois de juillet. A gauche 1987 (sèche) et à droite 1988 (humide).*

IV - CONCLUSION

L'intégration du modèle climatique régional MAR a permis d'analyser ses capacités à reproduire les caractéristiques du climat ouest africain ainsi que les contrastes atmosphériques entre les années sèche (1987) et humide (1988). Les indices de mousson impliquant le rapport de Bowen, le flux d'ESH, l'humidité spécifique et les précipitations ont permis de montrer que la période de mousson de l'année 1987 a été précoce et plus longue que celle de l'année 1988.

La dynamique du modèle semble plus adéquate dans l'exercice d'analyse des contrastes atmosphériques intra-saisonniers et interannuels. Quant à la répartition des précipitations annuelles, le modèle semble moins performant, surtout à l'ouest de la zone d'étude (10°W-10°E), pour l'année 1988 supposée humide.

Pour ces deux années, le modèle a pu simuler une intrusion d'air sec extratropical beaucoup plus au sud pour l'année 1987, par rapport à l'année 1988. Cela pourrait être à la base du déficit pluviométrique de 1987 sur le Sahel.

Il semble que le déficit pluviométrique enregistré en 1987 sur le Sahel soit aussi dû à une dépression thermique renforcée sur le Sahara, qui s'est étendue vers le sud. Ce creusement important de la dépression thermique saharienne dans la couche limite et l'intrusion d'air sec ont eu pour effet d'empêcher la progression

de la ZCIT (et donc la circulation de Hadley à laquelle cette dernière est directement liée) vers les latitudes plus élevées, sans réduction de l'intensité de l'ESH. Ce qui a entraîné le maintien des précipitations sur le golfe de Guinée.

RÉFÉRENCES

- [1] - L. LE BARBÉ, T. LEBEL, and D. TAPSOBA, *J. Climate* 15 (2002), 187-202
- [2] - B. FONTAINE, S. TRAZAASKA and S. JANICOT, *Climate Dynamics* 14 (1998), 353-368
- [3] - C. TAYLOR and T. LEBEL, *Mon. Wea. Rev.* 126 (1998), 1597-1607
- [4] - X. ZHENG and E. A. B. ELTAHIR, *J. Climate* 11 (1998), 2078-2096
- [5] - H. GALLÉE and G. SCHAYES, *Mon. Wea. Rev.* 122 (1994), 671-685
- [6] - O. BRASSEUR, Ph. D. thesis, Université Catholique de Louvain, Belgique (1999)
- [7] - O. BRASSEUR, *Mon. Wea. Rev.* 129 (2001), 5-25
- [8] - W. MOUFOUMA-OKIA, Ph. D. thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, France (2003)
- [9] - R. RAMEL, H. GALLÉE and C. MESSEAGER, *Climate Dynamics* 26 (2006), 429-440
- [10] - E. VANVYVE, N. HALL, C. MESSEAGER, S. LEROUX and J-P.E. VAN YPERSELE, *Climate Dynamics* 30 (2008), 191-202
- [11] - P. BECHTOLD, E. BAZILE, F. GUICHARD, P. MASCART and E. RICHARD, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 127 (2001), 869-886
- [12] - R. REYNOLDS and W. SMITH, *J. Climate* 8 (1995), 1571-1583
- [13] - B. SULTAN and S. JANICOT, *Geoph. Res. Lett.* 00 (2000), 3353-3356
- [14] - L. M. DRUYAN and T.M. HALL, *J. Appl. Meteor.* 35 (1996), 1000-1010
- [15] - J. P. GRIST and S. E. NICHOLSON, *Mon. Wea. Rev.* 130 (2002), 212-225
- [16] - E. A. B. ELTAHIR, *Water Resources Research* 34 (1998), 765-776
- [17] - B. SULTAN and S. JANICOT, *Sécheresse* 15 (2004)10
- [18] - M. BALME, S. GALLE and T. Lebel, *Sécheresse* 16 (2005), 15-22
- [19] - C. LAVAYSSE, Ph. D. thesis, Institut National Poly-technique de Grenoble, France (2006)
- [20] - R. ROCA, J. P. LAFORE, C. PIRIOU and J. L. REDELSPERGER, *J. Atmos. Sci.* 62 (2005), 390-407