

Variabilité interannuelle et intra-saisonnière des précipitations en relation avec les deux régimes d'ondes d'Est en Afrique de l'Ouest

David MONKAM¹, André LENOUE^{1*} et Aminata NDIAYE²

¹*Département de Physique, Faculté des Sciences, Université de Douala. B. P. 24157 Douala, Cameroun*

²*Département de Géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal*

* Correspondance, courriel : lenouo@yahoo.fr

Résumé

L'étude de la variabilité inter-annuelle et intra-saisonnière des précipitations en relation avec les deux régimes d'ondes d'est est menée en Afrique de l'Ouest. La distribution spatiale des précipitations en relation avec ces ondes montre qu'elles contribuent à l'augmentation des précipitations dans la bande de latitude 7°N – 15°N, vers la zone de convergence inter tropicale (ZCIT), avec deux maxima près du Fouta-Djalon en Guinée et vers le Lac Tchad. Les ondes sont très actives en juillet et août où les précipitations sont abondantes et faibles en juin et septembre marquant le début et la fin de la saison des pluies. Elles sont aussi très actives (faibles) pendant les étés à forte (faible) pluviométrie.

Les deux régimes d'ondes d'Est sont différents et contribuent à accroître les précipitations de manières différentes. Pour l'onde de 6 – 9-jours, il existe une extension zonale des anomalies positives des précipitations dans la bande de latitude 7°N-15°N de l'Est à l'Ouest de la zone d'étude, avec deux maxima près du Fouta-Djalon en Guinée et vers le Lac Tchad. Dans ce régime, les maxima des anomalies positives des précipitations sont associés à de fortes anomalies de la composante zonale du vent, et l'accroissement des précipitations est lié à d'importantes modulations du jet d'est africain (AEJ).

Les deux maxima des anomalies positives des précipitations apparaissant vers le Fouta-Djalon et vers le Lac Tchad coïncident avec les maxima des composites des anomalies du flux zonal de vapeur d'eau associé à l'onde de 6 – 9-jours dans la couche 850–500 hPa (maxima de flux d'Ouest). Pour l'onde de 3 – 5-jours, il existe une forte extension méridienne des anomalies des précipitations dans la bande de latitude 5°N-15°N en relation avec l'extension méridienne de la structure de l'onde. Dans ce régime, il n'y a qu'un seul maximum, vers la Guinée, des composites des anomalies du flux zonal de vapeur d'eau (flux d'Ouest) dans la couche 850 – 500 hPa. Ainsi, les deux régimes d'ondes d'Est contribuent à l'accroissement des précipitations dans la région du Fouta-Djalon, tandis que le maximum des précipitations observé vers le Lac Tchad serait dû uniquement à l'onde de 6 – 9-jours.

Mots-clés : *onde de 6–9-jours, onde Africaine, structure spatiale, les anomalies des précipitations, flux de vapeur d'eau.*

Abstract**Inter-annual and intra-seasonal variability of rainfall in connection with the two regimes of easterly waves over West Africa**

The spatial distribution of rainfall in connection with the two regimes of easterly waves had been studied in the intra-seasonal and the inter-annual time scale over West Africa. The waves increase rainfall in the band of latitudes $7^{\circ}\text{N} - 15^{\circ}\text{N}$, around the inter tropical convergence zone (ITCZ) mean position in summer, with two maxima near the Fouta-Djalon in Guinea and towards the Lake Chad. The waves are active in July and August where rainfall mean height are large and weak in June and September corresponding to the beginning and the end of the rainy season. They are also active (weak) during summers of strong (weak) rainfall.

The two regimes of easterly waves are different and contribute to increase the rainfall in different manners: the 6 – 9-day waves are linked to a zonally extended rainfall anomalies over West Africa with two positive rainfall anomalies maxima near the Fouta-Djalon in Guinea and towards the Lake Chad. The rainfall anomalies are linked to the zonal wind anomalies and the increased in the rainfall is associated with the large modulations of the African Easterly jet (AEJ). The two positive rainfall anomalies maxima are located near Guinea and Chad coinciding with two maxima of the composite zonal water vapor flux anomalies in the 850-500 hPa layer (west-to-east flux). The 3 – 5-day waves are associated with a meridional extended positive rainfall anomalies between 5°N and 15°N , consistent with the meridional extension of the wave. In this regime, there is only one maximum, towards Guinea, of the west-to-east zonal water vapor flux anomalies in the 850-500 hPa layer. Therefore, the two regimes contribute to increase rainfall in the Fouta-Djalon zone, while the maximum rainfall amount in the Lake Chad could be related only the 6 – 9-day wave.

Keywords : *6 – 9-day wave, African wave, spatial pattern, rainfall anomalies, water vapour flux.*

1. Introduction

Les ondes Africaines de période 3 – 5 jours constituent l'une des caractéristiques principales du climat de l'Afrique de l'Ouest en été. Diverses études ont été menées sur ces ondes (Burpee 1972, 1974, 1975 [1 - 3]; Reed et al. 1971, 1977, 1988a, 1988b [4 - 7]; Lenouo et al. 2005 [8]; Lenouo et Mkankam 2008 [9], parmi d'autres) et ont permis notamment de déterminer leurs caractéristiques cinématiques. Elles se propagent vers l'ouest sur l'Afrique de l'Ouest et l'Atlantique tropicale nord, avec une vitesse de phase d'environ 7 m/s. Leur longueur d'onde est comprise entre 2500 et 3500 km. Elles apparaissent nettement à 850 et 700 hPa. Un autre type d'onde se propageant aussi vers l'ouest a été identifié dans cette zone. Viltard et de Félice (1979, 1982) [10 - 11], utilisant les données de GATE (GARP Atlantic Tropical Experiment) ont trouvé un pic important dans la bande de période 6 - 9 jours sur le spectre de puissance moyen de la pression en surface, sur 25 stations d'observations en Afrique de l'Ouest. De Félice et al. (1990, 1993) [12 - 13], utilisant les analyses du CEPMMT (Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme), ont montré que les ondes de 6 – 9-jours de la moyenne et basse troposphère se propagent vers l'ouest sur l'Afrique de l'Ouest et l'Atlantique tropical nord. A 700 hPa, elles ont une vitesse de phase de l'ordre de 7° de longitude par jour et une longueur d'onde d'environ 5000 – 6000 km. Elles sont différentes de l'onde Africaine et sont associées à d'importantes activités convectives.

Viltard et al. (1998) [14] ont établi un lien entre la structure de l'onde de 6 – 9-jours et les précipitations en Afrique de l'Ouest pendant l'été 1989 et montré que les précipitations étaient fortement modulées vers les latitudes $17,5^{\circ}\text{N}$ et $7,5^{\circ}\text{N}$. Monkam (2003) [15] a étudié l'influence de cette onde sur les précipitations en

Afrique de l'Ouest en été 1981 et montré que la modulation des précipitations était liée à l'amplitude de l'onde. Les résultats de ces auteurs ont été obtenus pour des années particulières (1989 et 1981) où les ondes de 6-9-jours étaient très actives. De plus les phénomènes de 6 – 9-jours sont intermittents. De Félice et al. (1993) ont trouvé un pic important dans la bande de 6 – 9 jours sur le spectre de puissance du vent zonal à 700 hPa à Dakar en été 1960. Par contre, sur les spectres des étés 1958, 1959, 1961, 1962 et 1963, ces auteurs n'ont pas trouvé de pic important dans la bande de 6–9 jours. Il serait alors intéressant de voir comment cette intermittence de l'onde de 6 – 9 jours pourrait influencer la distribution spatiale des précipitations dans la zone d'étude, en menant l'étude de la variabilité inter-annuelle. De plus, pour déterminer la structure de l'onde Viltard et al. (1998) [14] ont utilisé une méthode composite basée sur un découpage en secteurs de 7 à 8 ondes entre le 7 juillet et 28 août où ces ondes de 6 – 9-jours étaient régulières avec de fortes amplitudes. Ainsi, comme les ondes de 6 – 9-jours ne sont pas régulières et n'ont pas de fortes amplitudes sur la totalité de l'été, il serait intéressant de découvrir comment cela pourrait affecter la répartition spatiale des précipitations en Afrique de l'Ouest, en menant l'étude de la variabilité intra-saisonnière. D'autre part, les ondes Africaines sont observées en été et sont, elles aussi, associées à d'importantes activités convectives. Il serait alors nécessaire d'examiner comment l'activité de ces deux régimes d'ondes d'est influencerait la distribution spatiale des précipitations et de localiser en latitude et en longitude, les zones d'impact de chaque régime sur cette grandeur.

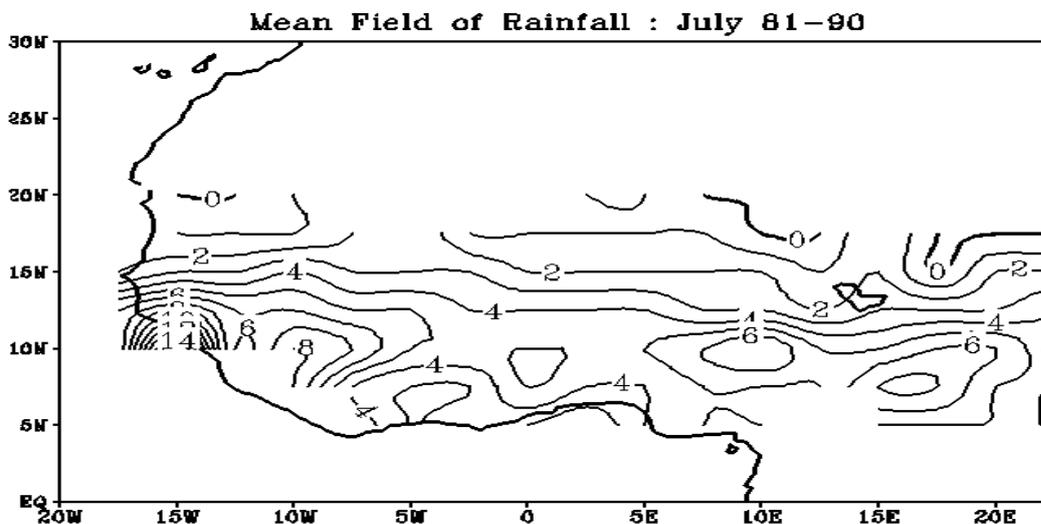
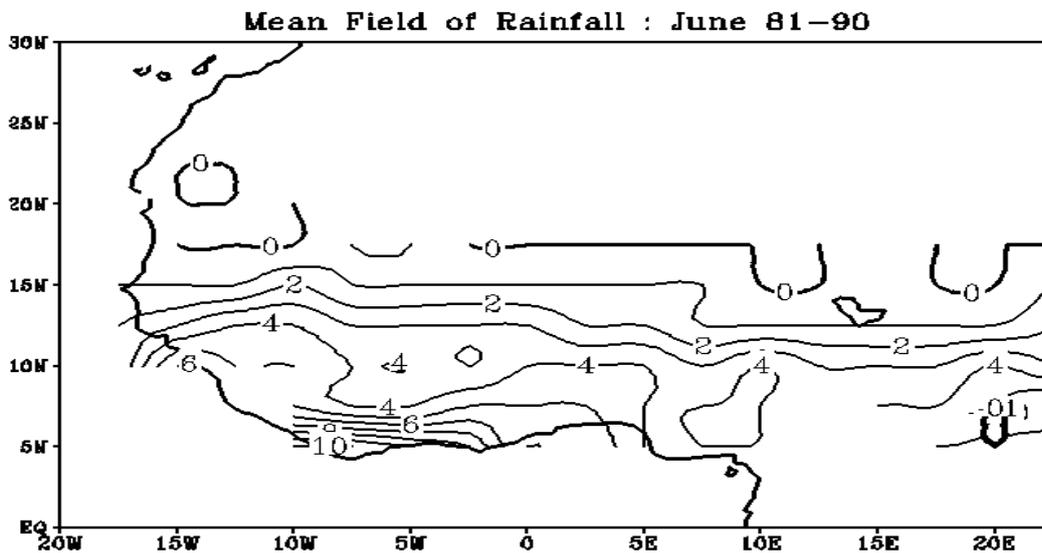
Dans le présent travail, nous nous proposons d'étudier et de comparer l'influence de l'onde de 6 – 9-jours et de 3 – 5-jours sur la répartition spatiale des précipitations à l'échelle inter-annuelle et intra-saisonnière. Ainsi, après une brève description des données utilisées, nous déterminons la structure spatiale des ondes. Nous menons ensuite l'étude de la variabilité inter-annuelle et intra-saisonnière des précipitations en relation avec ces ondes. Nous procédons enfin à une étude comparative des effets des deux régimes d'ondes d'est sur les précipitations en Afrique de l'Ouest.

2. Données et méthodes

2-1. Données

Pour cette étude, nous utilisons deux jeux de données indépendants fournis par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) et le NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research). L'IRD, en collaboration avec l'ASECNA (agence pour la navigation aérienne en Afrique et à Madagascar) et le CIEH (Comité Inter-Africain d'Etude Hydraulique), a pu élaborer une base de données pluviométrique importante sur le domaine de l'Afrique de l'Ouest. Elle est constituée des cumuls journaliers d'observations pluviométriques pour les stations réparties sur le continent entre 3°N et 20°N de latitude et s'étalant en longitude de 18°O à 25°E. La répartition spatiale des stations dans ce domaine est irrégulière avec très peu, voire aucune station de mesure sur les pays anglophones. La plus forte densité se trouve dans la bande de latitude 5°N – 15°N. Ces données quotidiennes sont disponibles pour la période 1954-1993, avec 1300 stations en moyenne pour la période 1968-1980, 700 à 800 pour la période 1981-1990 et moins de 250 stations après 1990. Compte tenu de la diminution du nombre de stations, nous n'utiliserons pas les données postérieures à 1990. Par ailleurs, la plupart des études menées sur les ondes de 6 – 9-jours et auxquelles nous faisons référence dans le présent travail ont été faites sur des années comprises entre 1981 et 1990. On peut citer entre autres, de Félice et al, 1990,1993 [12,13] ; Monkam, 1990, 2003, 2007 [16,15,17]; Viltard et al. 1997, 1998 [18,14] ; Oubuih et al.1999 [19]. Par conséquent, nous nous limiterons aux données de la période 1981-1990. Pour une bonne adéquation avec les différents jeux de données utilisées, les données quotidiennes ont été interpolées sur une grille de maille carrée de 2.5° de côté, identique à celles des ré-analyses de NCEP/NCAR décrites ci-dessous. Cette interpolation a été réalisée

en affectant comme valeur journalière de chaque point de grille, la moyenne des précipitations des stations les plus proches. La pluie est un phénomène irrégulier. Il serait commode d'utiliser des valeurs moyennes plutôt que des valeurs individuelles pour l'étudier. La **Figure 7** montre les champs moyens mensuels (juin, juillet, août et septembre) et saisonnier (sur l'été), calculés sur la période 1981-90 (10 ans). Les iso-lignes des hauteurs de précipitations sont approximativement zonales sauf sur la Guinée dans le sud-ouest de la zone d'étude, avec un gradient nord-sud. Le champ moyen pendant l'été correspondant à la saison pluvieuse au Sahel est caractérisé par une zone de fortes pluies dans bande de latitude 7°N - 16°N avec des hauteurs de l'ordre de 5-6 mm/jour à 8°N - 12°N vers la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT), puis un maximum de 14 mm/jour vers le Fouta Djallon en Guinée et une décroissance rapide vers le nord (1-2 mm/jour à 16°N). Les champs moyens mensuels des quatre mois ont la même tendance générale observée sur l'été. Le maximum en Guinée est autour 10, 16, 19 et 12 mm/jour en juin, juillet, août et septembre, respectivement. Les mois de juillet et août sont les plus pluvieux dans la zone d'étude. Il serait intéressant d'examiner la connexion avec l'activité des ondes de 6 - 9 jours et de 3 - 5 jours.



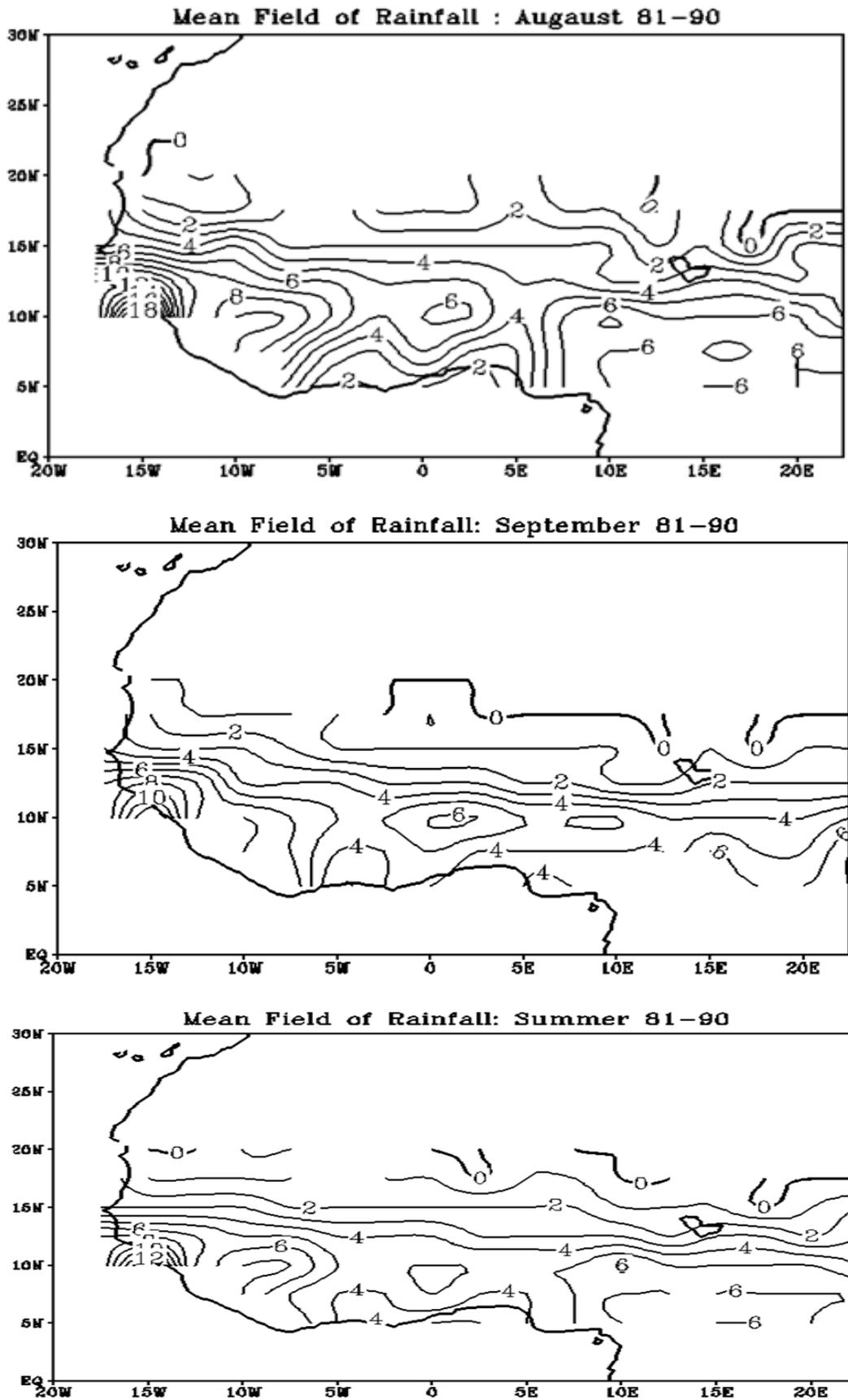


Figure 1: Champ moyen des hauteurs des précipitations en Juin, Juillet, Août, Septembre et sur l'été pour la période 1981-90; unité: mm/jour

Nous utilisons les réanalyses de NCEP/NCAR en été allant du 01 juin au 30 septembre, soit 122 jours, projetées en points de grille sur une maille carrée de $2,5^\circ$ de côté, toutes les 6 heures sur 17 niveaux de pression entre 1000 et 10 hPa (Kalnay et al., 1996) [20]. Ces ré-analyses sont les résultats d'une assimilation entre les mesures qui ont été faites par les stations en surface et en altitude, par les avions, les bateaux, les satellites, etc, et les prévisions à court terme (6 heures) des modèles de prévision, de sorte qu'elles constituent aujourd'hui, les meilleures estimations possibles des paramètres météorologiques. De nombreux travaux ont montré que ces ré-analyses sont très proches des radiosondages en Afrique de l'Ouest (Mounier et al., 2006) [21].

2-2. Méthodes

Pour mettre en évidence les ondes, nous avons calculé par la transformation de Fourier, les spectres de puissance des composantes zonale et méridienne du vent, de l'altitude géopotentielle, de la température et de l'humidité relative, pour les années 1981 à 1990, aux niveaux 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400 et 300 hPa, aux différents points de grille de la zone d'étude. Les pics de la bande 6 – 9 jours prédominent pendant les étés 1981, 1988 et 1989, principalement sur la composante zonale du vent à 700 hPa, à la latitude $12,5^\circ\text{N}$. Les pics de la bande 3 – 5 jours sont par contre réguliers et très nets à ce niveau, sur les spectres de la composante méridienne du vent.

Une méthode composite est utilisée pour déterminer la structure spatiale des ondes et leurs effets sur la distribution spatiale des différents paramètres. Cette méthode est décrite de manière détaillée par Monkam (2003) [15]. Pour les ondes de 6 – 9-jours, le vent zonal filtré, le niveau 700 hPa et la latitude $12,5^\circ\text{N}$ sont le paramètre, le niveau et la latitude de référence, respectivement. C'est sur ce paramètre à ce niveau et cette latitude que les phénomènes de 6 – 9 jours ont de fortes amplitudes. Ceci est en accord avec les résultats de De Félice et al. (1990, 1993) [12,13]. A chaque point de grille (point de référence) de cette latitude, nous sélectionnons les jours ou dates où l'amplitude du vent zonal filtré au niveau de référence, est supérieure ou égale à 0,5 m/s.

A partir des dates retenues à chaque point de référence, nous calculons à chaque point de grille de la zone d'étude, la moyenne d'une grandeur donnée ou de ses valeurs centrées (anomalies), sur les dates retenues à ce point de référence. Après avoir fait ceci pour tous les points de référence de la latitude de référence, nous calculons à chaque point de grille de la zone d'étude, la moyenne sur tous les points de référence. Ceci revient à calculer directement la moyenne en chaque point de grille par rapport à la totalité des dates retenues pour les différents points de la latitude de référence. En sélectionnant les ondes avec un seuil de 0,5 m/s d'amplitude, un grand nombre de cas est obtenu permettant d'avoir une onde composite moyenne très stable, sur les différents paramètres étudiés. Par exemple, nous avons obtenu 247 cas pendant l'été 1981 pour les 18 points de référence de 20°O à $22,5^\circ\text{E}$. Ainsi, sur l'onde composite moyenne, la valeur d'un paramètre donné, à chaque point de grille, est une moyenne de 247 valeurs pour l'été 1981. Le même procédé est utilisé pour l'onde Africaine. Le paramètre de référence est le vent méridien filtré dans la bande 3 – 5 jours à 700 hPa, à $12,5^\circ\text{N}$. C'est sur ce paramètre que l'onde Africaine est mieux détectée (Reed et al. 1971, 1977, 1988a [4 - 6]; Viltard et al. 1997 [18]).

3. Structure spatiale des ondes et précipitations

3-1. Structure spatiale de l'onde de 6 – 9-jours et précipitations

La **Figure 2** montre les champs des anomalies de vent, de l'altitude géopotentielle et des hauteurs des précipitations pour l'onde de 6 – 9-jours sur la période 1981-90. Il y a une forte modulation du vent zonal à l'ouest du méridien de Greenwich, avec une circulation de signe contraire de part et d'autre de l'AEJ située vers 10°N-15°N. Ceci apparaît clairement sur les champs de vent, avec une bonne coïncidence entre la circulation cyclonique (anticyclonique) et les anomalies négatives (positives) de l'altitude géopotentielle.

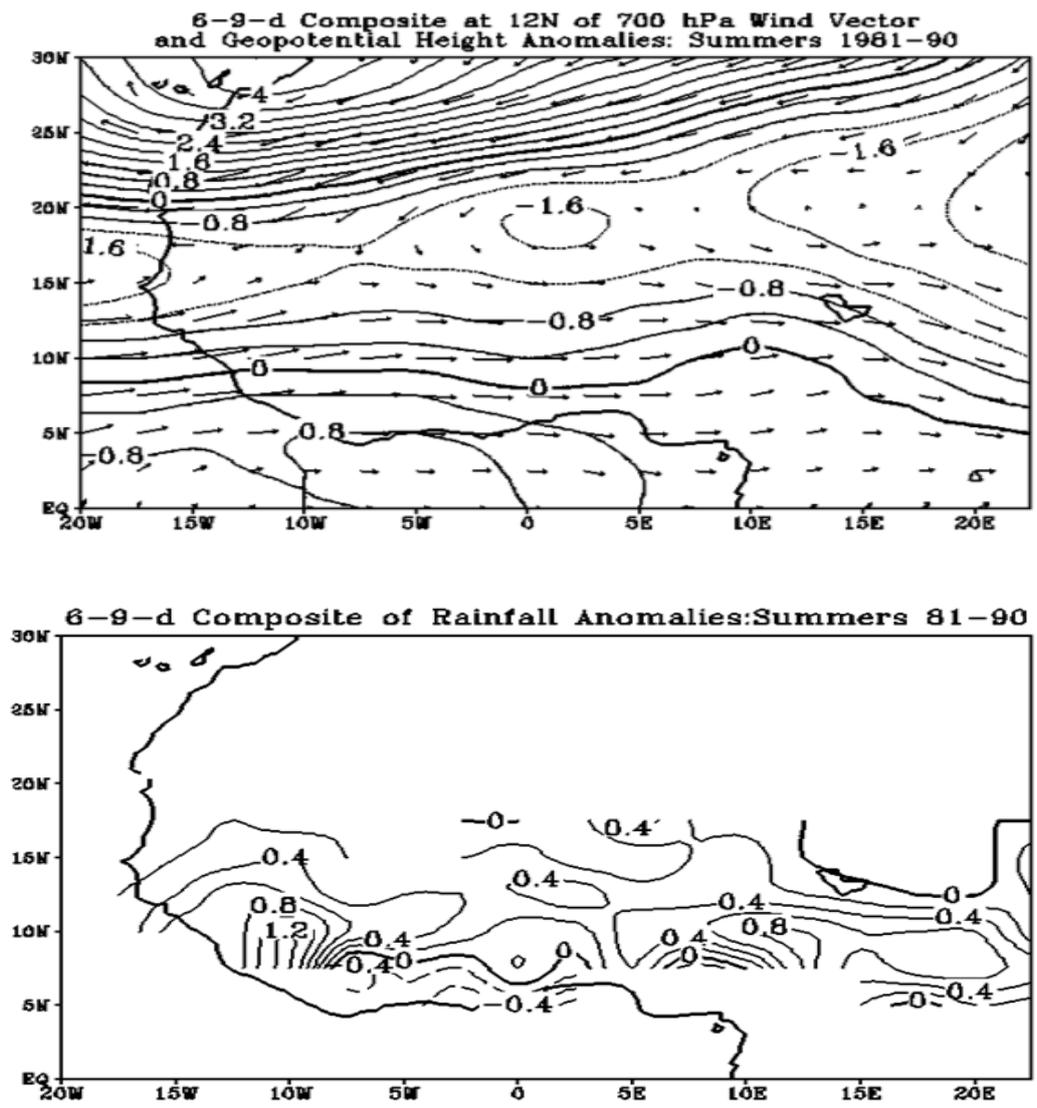


Figure 2 : Variabilité composite moyenne des anomalies du vent et de l'altitude géopotentielle à 700 hPa et des hauteurs des précipitations dans l'onde de 6 – 9-jours pour la période 1981-90.

Deux tourbillons cycloniques apparaissent vers la ZCIT à l'est de 10°E et à l'ouest de 10°O, avec leur centre vers 22,5°E et 20°O, respectivement, associés au minimum de l'altitude géopotentielle. Ce minimum apparaît vers 17,5°N de l'est à l'ouest de la zone d'étude. Cette latitude 17,5°N correspond la latitude de la

trajectoire moyenne de l'onde 6 – 9 jours (Diedhiou et al. 1999 [22]). A l'ouest du méridien de Greenwich, il existe un tourbillon cyclonique (anticyclonique) au sud (nord) de cette latitude. La **Figure 2** montre aussi le champ des anomalies des précipitations associées à l'onde de 6 – 9-jours pour la période 1981-90. Il y a une forte connexion avec la structure spatiale décrite par le champ de vent et l'altitude géopotentielle. Les anomalies positives des précipitations apparaissent vers la ZCIT entre 7°N et 15°N, avec une large extension zonale de l'est à l'ouest de la zone d'étude. On note un maximum d'environ 1,2 mm/jour vers la Guinée, associé simultanément aux fortes valeurs positives des anomalies du vent zonal, aux valeurs négatives des anomalies de l'altitude géopotentielle et à une circulation cyclonique.

Les valeurs des composites ont été calculées en sélectionnant les dates où le vent zonal filtré dans la bande de 6 –9-jours était maximal avec une amplitude supérieure ou égale à 0,5 m/s aux 18 points de référence de la latitude 12,5°N, entre les longitudes 20°O et 22,5°E à chaque été. Les séries centrées d'un paramètre donné sont calculées en chaque point de grille en soustrayant la moyenne de l'été considéré. Le cumul des valeurs centrées du paramètre est calculé pour les dates sélectionnées aux 18 points de référence de chaque été, puis sur les différents étés ; et finalement, la moyenne est calculée sur les dates sélectionnées sur les 10 années de la période d'étude. Ainsi 2460 cas ont été retenus pour la période 1981-90 ; la moyenne chaque quantité sur la figure est une moyenne de 2460 valeurs.

3-2. Structure spatiale de l'onde de 3 – 5-jours et précipitations

Plusieurs auteurs ont montré que l'onde Africaine apparaît nettement sur le spectre de puissance du vent méridien à 700 hPa, entre l'équateur et 20°N (Reed et al. 1971, 1977, 1988a [4 - 6] ; Viltard et al. 1997 [18]). Par conséquent pour déterminer sa structure spatiale, le vent méridien filtré dans la bande de 3-5 jours, le niveau 700 hPa et la latitude 12,5°N, sont le paramètre, le niveau et la latitude de référence, respectivement. Nous procédons comme dans le cas des ondes de 6 – 9-jours. Les dates sont sélectionnées avec un seuil de 0,5 m/s sur le vent méridien filtré dans la bande de 3-5 jours. La **Figure 3** montre le champ composite moyen des anomalies du vent et de l'altitude géopotentielle à 700 hPa et des anomalies des hauteurs de précipitations pour les étés 1981-90. Les anomalies négatives de l'altitude géopotentielle apparaissent vers 15°N, de l'est à l'ouest de la zone d'étude. Diedhiou et al.(1999) [22] ont montré que cette latitude correspond à la latitude de la trajectoire moyenne de l'onde de 3 – 5-jours.

On observe une forte modulation du vent méridien avec une large extension des anomalies positives de l'équateur à environ 15-20°N et un large tourbillon cyclonique de l'équateur à 20°N, associé (i) aux valeurs négatives des anomalies de l'altitude géopotentielle de l'ordre de -1,2 à -0,8 m autour de la ZCIT vers 5°E, et (ii) aux valeurs positives des anomalies des précipitations dont les plus élevées apparaissent autour de la ZCIT avec un maximum de l'ordre de 1,2 mm/jour vers la Guinée. Les anomalies positives de l'altitude géopotentielle s'observent au nord de 20°N et au sud de 7°N et sont associées aux valeurs négatives des anomalies des précipitations. Dans l'ensemble il y a une forte connexion entre le champ de vent et l'altitude géopotentielle, et la répartition spatiale des précipitations associées à l'onde 3 – 5-jour.

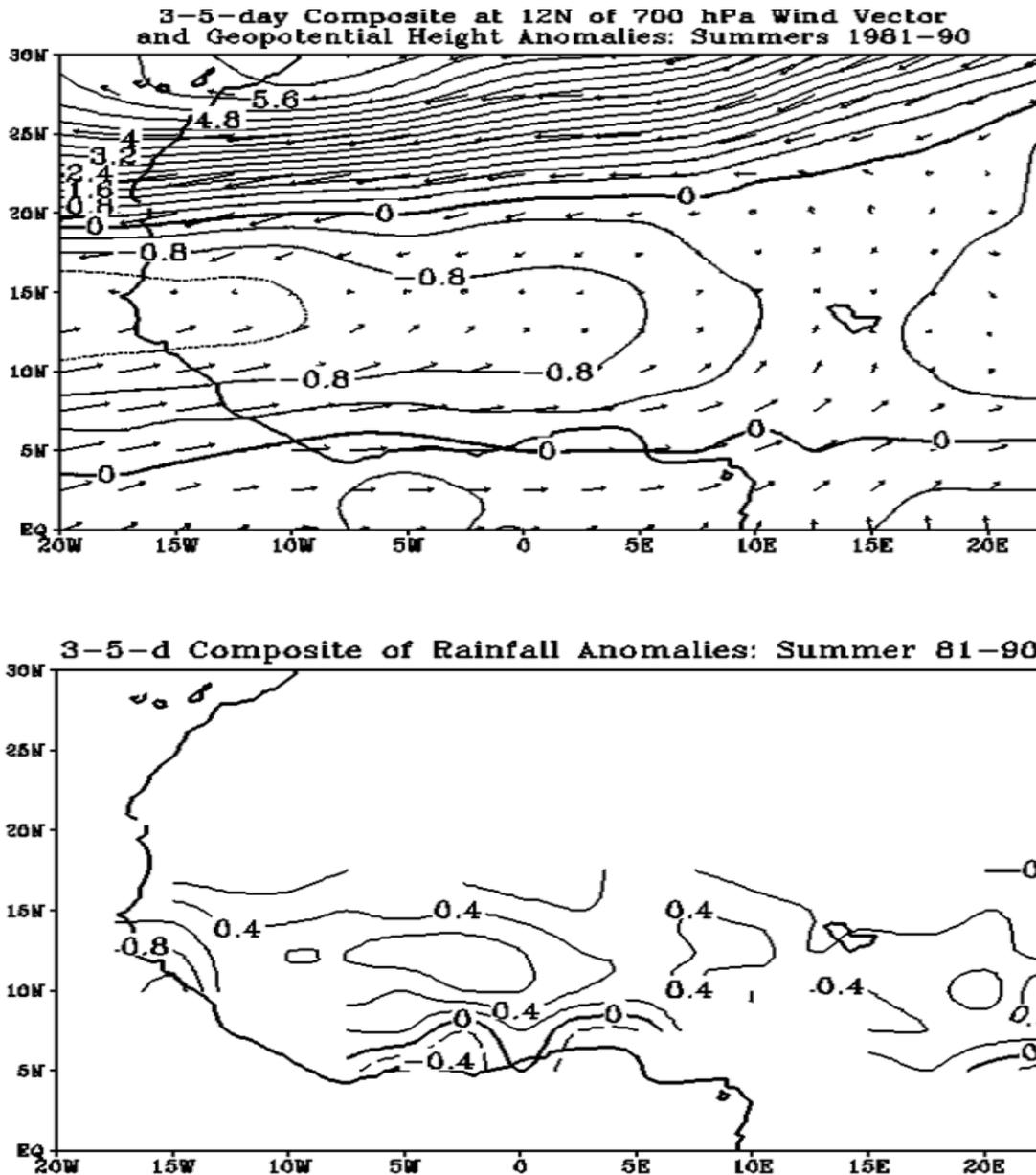


Figure 3 : Idem figure 2 mais pour l'onde de 3-5-jours, le paramètre de référence étant le vent méridien à 700 hPa filtré dans la bande de 3-5-jours à la latitude 12.5°N; les dates sont sélectionnées avec un seuil de 0,5 m/s ; 5300 cas ont été retenus.

4. Variabilité inter-annuelle des précipitations en relation avec les ondes

4-1. Variabilité interannuelle en relation avec l'onde de 6-9 jours

L'étude de la variabilité inter-annuelle des précipitations en relation avec l'onde de 6-9-jours a été faite en considérant les étés 1981 à 1990. La **Figure 4** montre la répartition spatiale des anomalies du vent, de l'altitude géopotentielle et des hauteurs de précipitations pendant l'été 1981. Le vecteur vent maximum est de 3.4 m/s. Il y a une forte modulation du vent zonal à l'ouest du méridien de Greenwich, avec une circulation de sens contraire de part et d'autre de l'AEJ, apparaissant clairement sur les lignes de courant, avec une bonne coïncidence entre la circulation cyclonique (anticyclonique) et les anomalies négatives

(positives) de l'altitude géopotentielle. Deux tourbillons cycloniques apparaissent vers la bande de latitude de la ZCIT à l'est de 10°E et à l'ouest de 10°O , avec leur centre vers 22.5°E et 20°O , respectivement, associés à des minima de l'altitude géopotentielle.

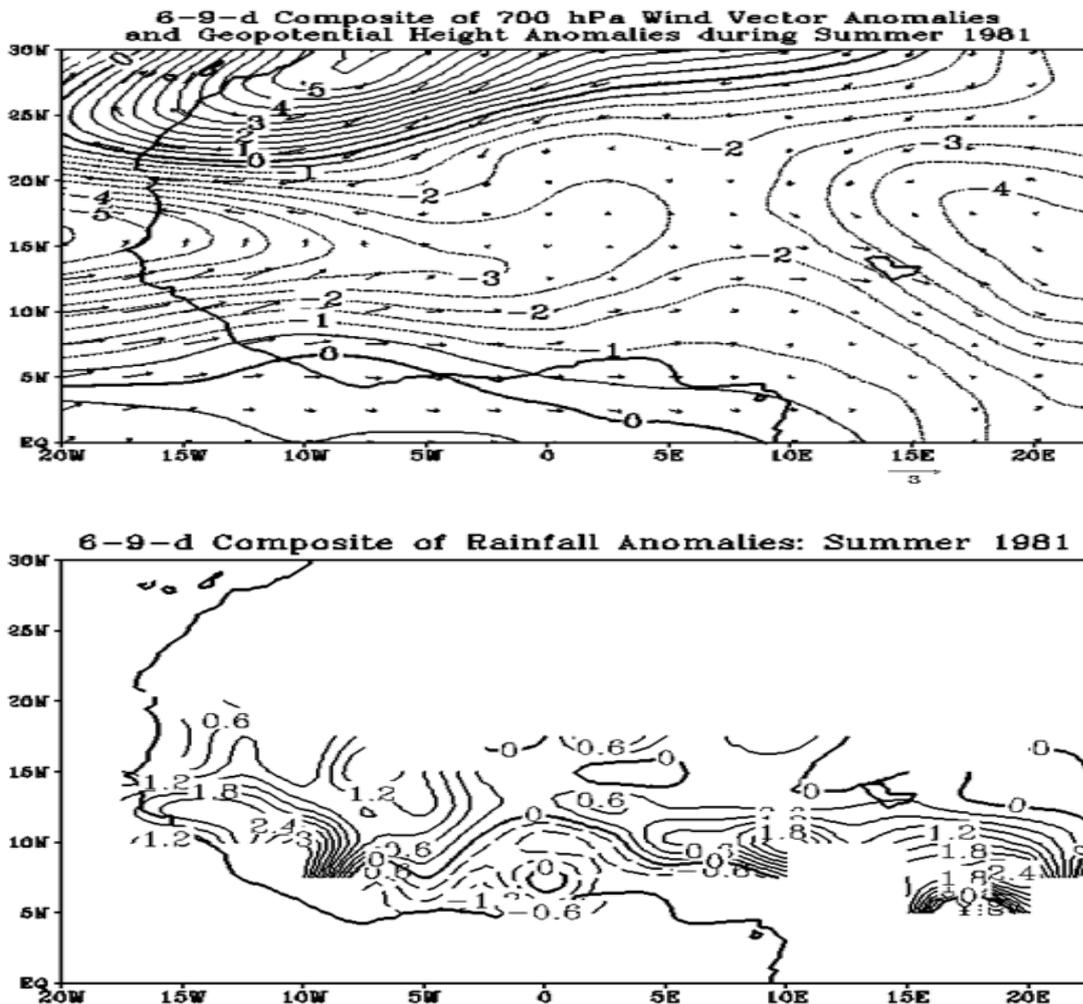


Figure 4 : Variabilité composite moyenne des anomalies du vent et de l'altitude géopotentielle à 700 hPa en été 1981 et des hauteurs des précipitations dans l'onde de 6 – 9-jours pour l'été 1981; les valeurs des composites ont été calculées comme à la figure 2 mais en considérant uniquement les occurrences de l'été 1981; environ 247 cas ont été retenus

Ces minima de l'altitude géopotentielle apparaissent vers $17,5^{\circ}\text{N}$ correspondant à la latitude de la trajectoire moyenne de l'onde de 6 – 9-jours (Diedhiou et al. 1999 [22]). Les anomalies positives des précipitations sont localisées vers la ZCIT entre 7°N et 15°N avec une forte extension zonale de l'est à l'ouest de la zone d'étude. Elles sont associées à une circulation cyclonique et coïncident avec les valeurs négatives des anomalies de l'altitude géopotentielle. On distingue deux zones de maximum de l'ordre de 3 mm/jours vers les deux tourbillons cycloniques observés sur le champ de vent. Les anomalies négatives des précipitations apparaissent au sud de 7°N , principalement entre 10°O et 10°E et sont associées à la circulation anticyclonique et aux valeurs positives des anomalies de l'altitude géopotentielle. Des résultats similaires ont été obtenus en 1988 et 1989 (figures non montrées) où l'onde était très active.

La **Figure 5** montre la répartition spatiale des anomalies des précipitations en relation avec l'onde de 6 – 9-jours durant l'été 1982. Les valeurs sur l'onde composite sont obtenues en sélectionnant les dates avec

un seuil 0,5 m/s sur le vent zonal filtré dans la bande de 6 –9 jours à 700 hPa à la latitude 12.5°N. Les valeurs positives des anomalies des précipitations apparaissent vers la ZCIT entre 7°N et 15°N avec une large extension zonale de l'est à l'ouest de la zone comme en été 1981. Mais les valeurs sont plus petites avec un maximum de 1,5 mm/jour vers 5°E au lieu de 3 mm/jour en 1981 où l'onde de 6 – 9-jours était très active. En 1983 (figure non montrée), les valeurs sont plutôt faibles. Le signal était faible en 1983 correspondant à une année sèche au Sahel.

Des résultats similaires ont été obtenus en 1987 correspondant aussi à une année sèche. Comparativement à l'été 1981, les ondes de 6 – 9-jours sont intermittentes et n'étaient pas très actives en 1982 et 1983 (de Félice et al. 1990, 1993 [12,13]; Monkam, 2003 [15]). On retrouve des résultats analogues pendant les étés 1984 et 1986 (figures non montrées) où ces ondes n'étaient pas très actives. Nous reviendrons sur l'activité des ondes par la suite.

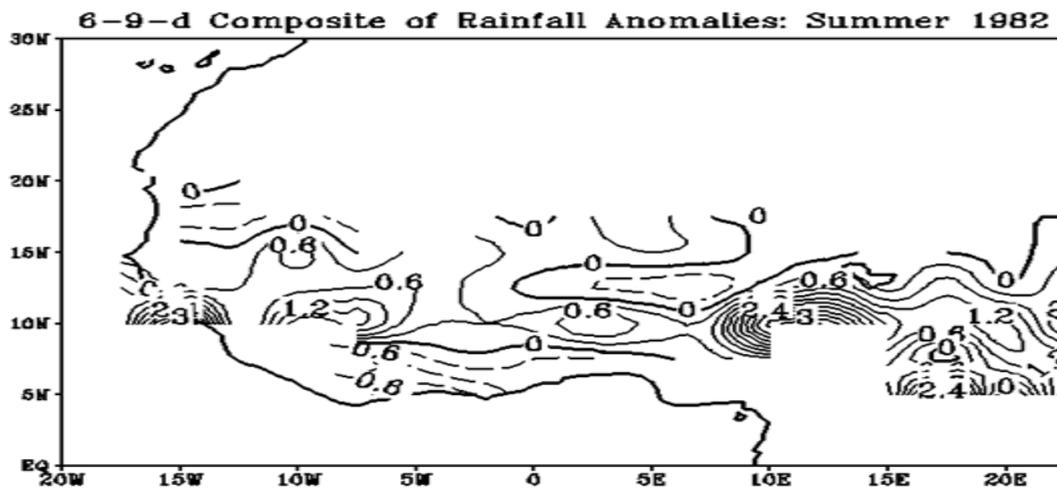


Figure 5 : Variabilité composite moyenne des anomalies des hauteurs des précipitations dans l'onde de 6 – 9-jours pour l'été 1982; les valeurs des composites ont été calculées comme à la Figure 2 mais en considérant uniquement les occurrences de l'été 1982; environ 233 cas ont été retenus

4.2. Variabilité inter-annuelle en relation avec l'onde de 3 – 5 jours

Comme dans le cas des ondes de 6 – 9-jours, nous avons mené l'étude de la variabilité inter-annuelle sur la période 1981-1990. Pour chaque été les valeurs des composites sont obtenues en sélectionnant les dates avec un seuil 0,5 m/s sur le vent méridien filtré dans bande de 3 – 5-jours à 700 hPa à la latitude 12.5°N. La **Figure 6** montre la structure spatiale de l'onde de 3 – 5-jours avec la répartition spatiale des anomalies du vent et de l'altitude géopotentielle et des anomalies des hauteurs de précipitations pendant l'été 1981. On observe deux tourbillons cycloniques avec une large extension méridienne de l'équateur jusqu'au 20-25°N, avec les centres vers 22,5°E et 10°O vers la bande de latitude 12-14°N coïncidant avec les valeurs négatives des anomalies de l'altitude géopotentielle.

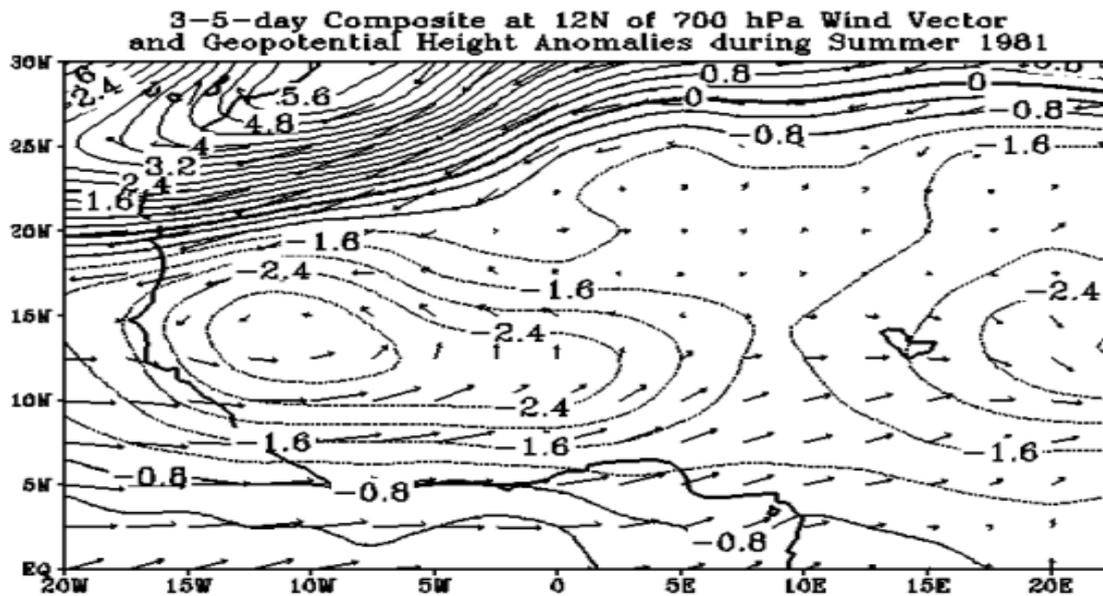
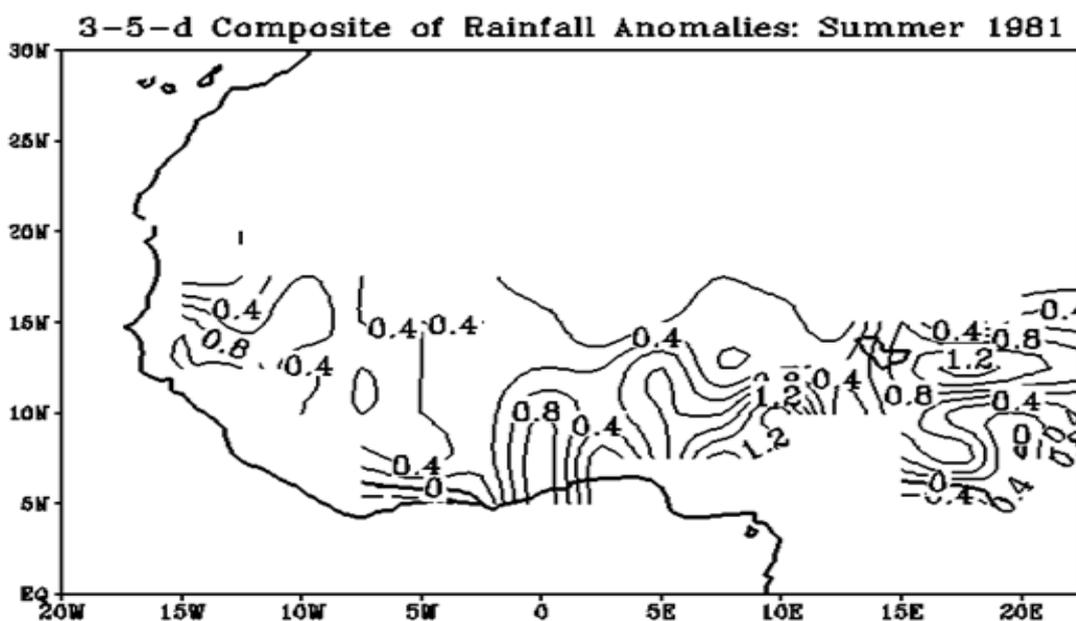


Figure 6 : *Idem figure 4 mais pour l'onde de 3–5-jours de l'été 1981; le paramètre de référence étant le vent méridien à 700 hPa filtré dans la bande de 3–5-jours à la latitude 12.5°N, en 1981; les dates sont sélectionnées avec un seuil de 0,5 m/s.*

Les anomalies des précipitations sont positives dans cette zone avec des maxima de 0,8 à 1,2 mm/jour, vers les centres des tourbillons cycloniques et les minima de l'altitude géopotentielle. Il y a une forte connexion entre la structure spatiale de l'onde et la distribution spatiale des précipitations, avec des anomalies positives des précipitations entre 5°N et 17,5°N, de l'est à l'ouest de la zone d'étude. Pour l'été 1982 (**Figure 7**), les anomalies positives des précipitations apparaissent uniquement au nord de 10°N.



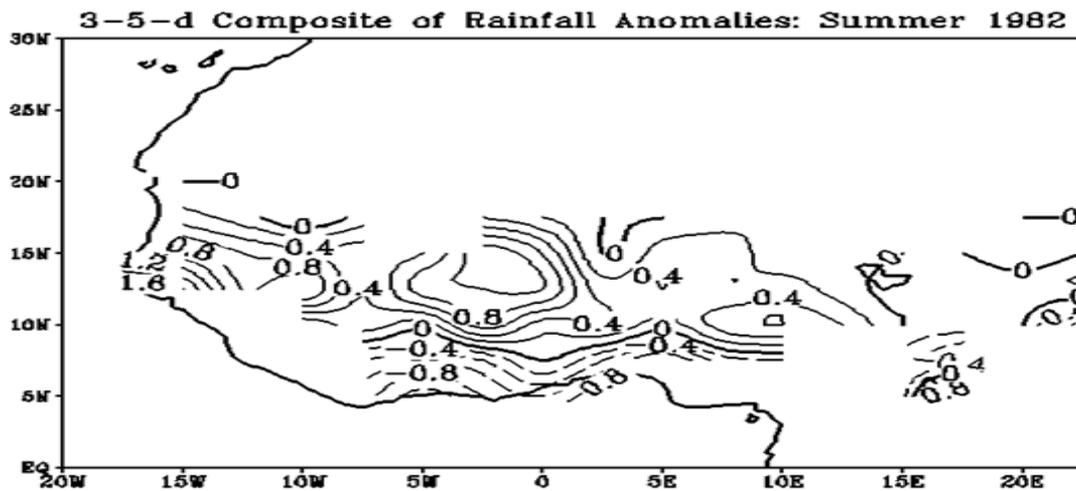


Figure 7 : Variabilité composite moyenne des anomalies des hauteurs des précipitations dans l'onde de 3 – 5-jours pour l'été 1982 ; les valeurs des composites ont été calculées comme à la Figure 6, le paramètre de référence étant le vent méridien à 700 hPa filtré dans la bande de 3 – 5-jours à la latitude 12.5°N en 1982.

De faibles valeurs sont observées en 1983 (figure non montrée) considérée comme une année sèche pendant laquelle ces ondes n'étaient pas très actives. Dans l'ensemble les valeurs positives des anomalies des précipitations apparaissent vers la ZCIT à chaque été. Ces résultats sont en accord avec ceux de Reed et al (1977) [5] qui ont trouvé des fortes modulations des précipitations par ces ondes de 3-5-jours vers la ZCIT.

5. Variabilité intra-saisonnière des précipitations en relation avec les ondes

5-1. Variabilité intra-saisonnière en relation avec l'onde de 6 – 9 jours

La **Figure 8** montre la répartition spatiale des anomalies des précipitations en relation avec l'onde de 6-9-jours des mois de juin, juillet, août et septembre sur la période 1981-90. Pour le mois de juin, les anomalies des précipitations sont négatives au nord de 7,5°N, de l'est à l'ouest de la zone tandis qu'en juillet et août elles sont positives. Les plus fortes valeurs apparaissent en août avec un maximum de l'ordre de 2 à 4 mm/jour vers le Fouta-Djalou et un autre au sud du Lac Tchad. Les ondes de 6 – 9-jours ont de fortes amplitudes pendant les mois de juillet et août. En juin et septembre, ces amplitudes sont plutôt faibles. De félice et al (1990, 1993) [12,13] ont choisi l'intervalle 7 juillet -28 août pour déterminer la structure de l'onde de 6 – 9-jours car c'est dans cet intervalle que l'onde avait des fortes amplitudes sur le paramètre de référence (le vent zonal à 700 hPa filtré à la latitude 12.5°N).

Partant des résultats de ces auteurs et compte tenu de la **Figure 8** pour les mois de juillet et août, nous voyons que quand les ondes de 6 – 9-jours sont très actives elles contribuent à augmenter les précipitations en Afrique de l'Ouest. Cette augmentation est liée à une forte modulation de la composante zonale du vent. Au contraire, les précipitations sont faibles notamment dans la bande de latitude de la ZCIT en juin et septembre où ces ondes ont de faibles amplitudes.

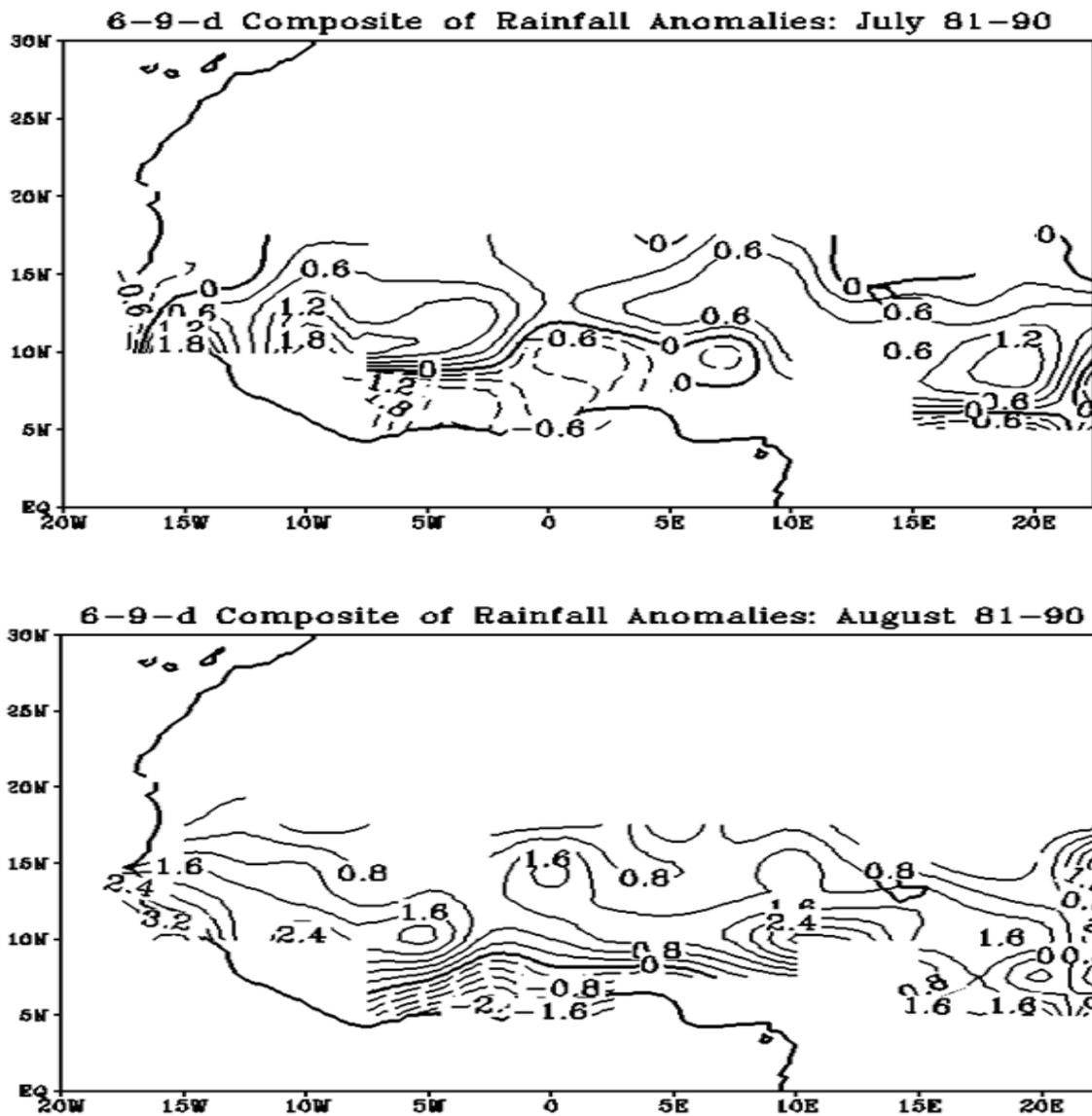
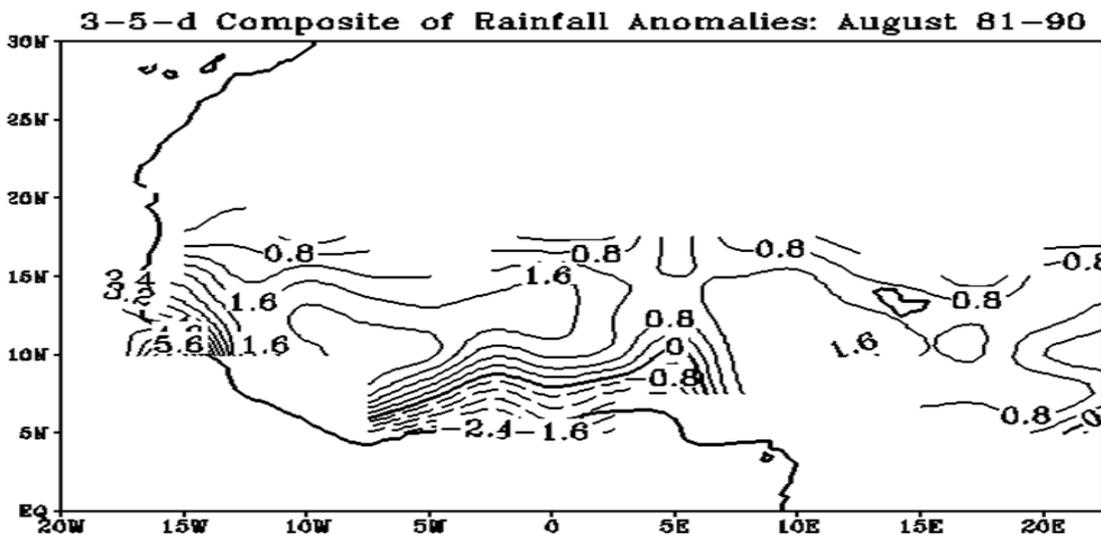
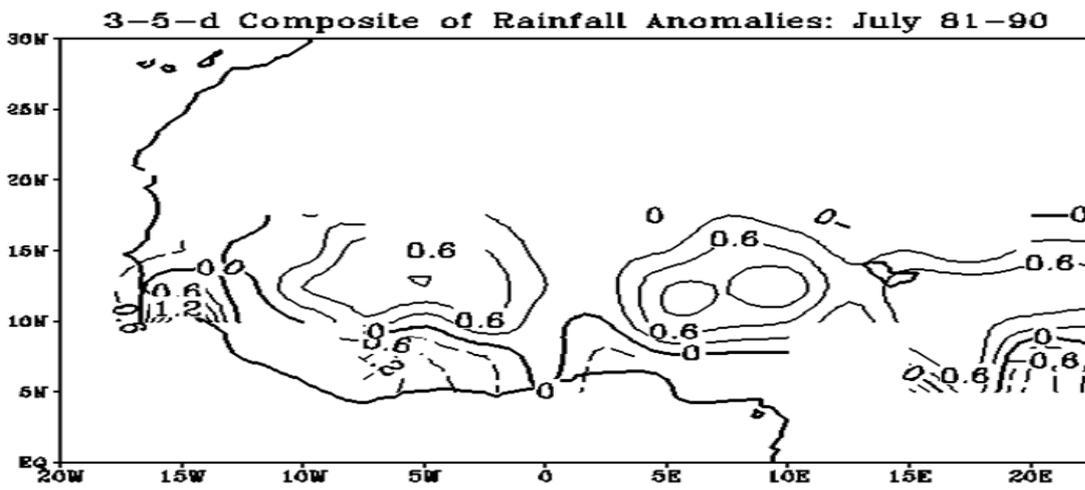
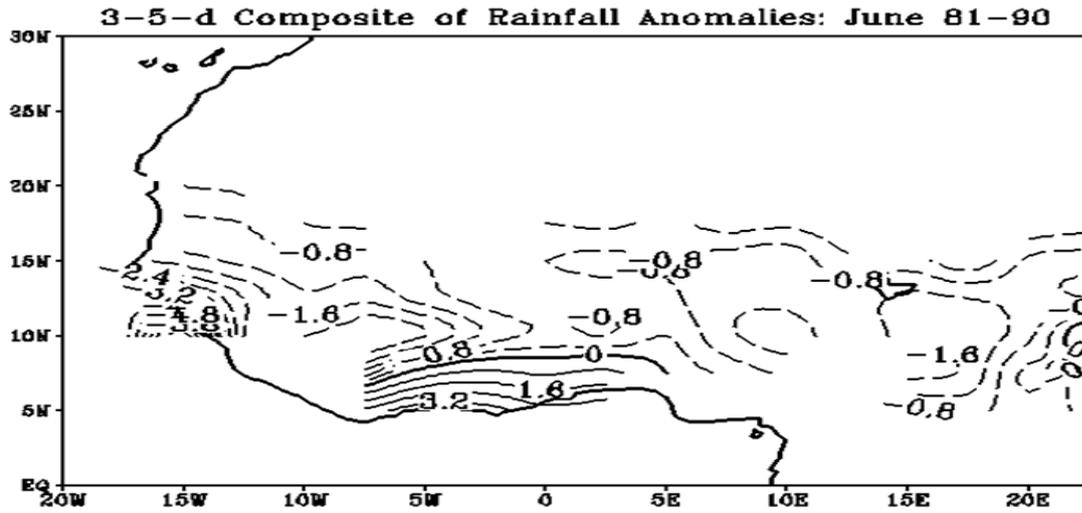


Figure 8 : Variabilité composite moyenne des anomalies des hauteurs des précipitations dans l'onde de 6 – 9-jours pour les mois de juin, juillet, août et septembre sur la période 1981-90 ; les valeurs des composites ont été calculées comme à la figure 2 mais en considérant les occurrences de chaque mois pour les 10 années.

5-2. Variabilité intra-saisonnière en relation avec l'onde de 3 – 5 jours

La **Figure 9** montre la répartition spatiale des anomalies des précipitations en relation avec l'onde de 3–5-jours des mois de juin, juillet, août et septembre sur la période 1981-90. En juin, ces anomalies sont négatives au nord de 5°N sur la quasi totalité de la zone d'étude. En juillet, les anomalies de précipitations sont positives au nord de 7°N, avec un maximum de 1,2 mm/jour vers la ZCIT. Cette zone de valeurs positives des anomalies des précipitations est plus large en août avec un maximum de l'ordre de 3 à 4 mm/jour. En septembre les anomalies des précipitations sont positives vers la bande de latitude de la ZCIT mais avec des valeurs plus petites qu'en août.



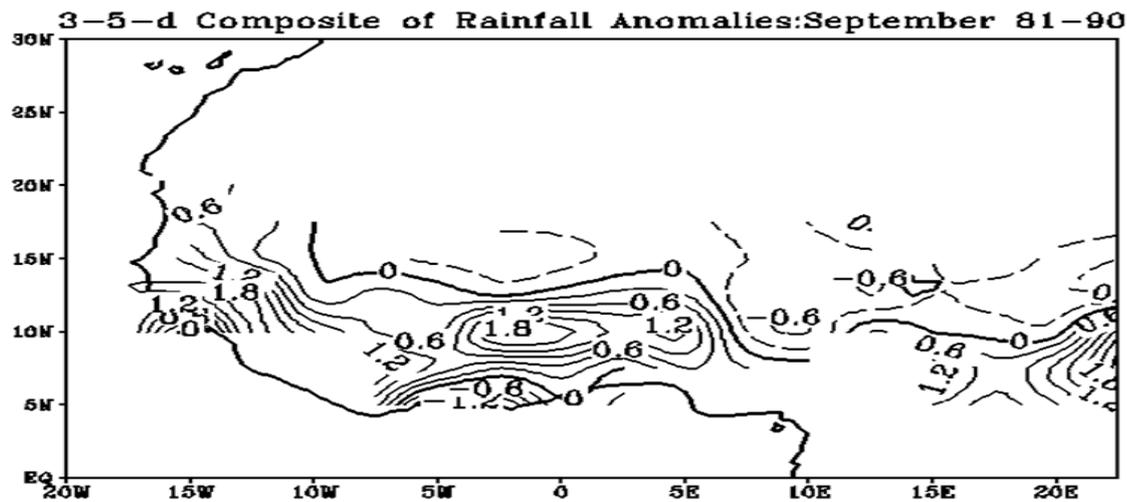


Figure 9 : *Idem Figure 8, mais pour l'onde de 3-5-jours*

6. Discussion

6-1. Influence de l'activité des ondes sur les précipitations

L'activité des deux régimes d'ondes d'est est évaluée en considérant l'amplitude du vent zonal (méridien) filtré dans la bande de 6 – 9 jours (3 – 5 jours) à 700 hPa à la latitude de référence 12,5°N pour l'onde de 6 – 9-jours (3-5-jours). Pour chaque point de grille de cette latitude, nous déterminons le nombre de dates où l'amplitude est maximale avec une valeur supérieure ou égale à 2 m/s. Ensuite, nous calculons le nombre total des dates retenues sur les 18 points de référence compris entre 20°O et 22,5°E pour chaque mois et chaque été de 1981 à 1990. Les valeurs apparaissent dans les **Tableaux 1 et 2**.

Tableau 1 : *Occurrences d'ondes de 6 – 9-jours avec un seuil de 2 m/s sur le zonal à 700 hPa hPa filtré dans la bande de 6-9 jours aux points de grille de la latitude 12.5°N, entre 20°O et 22,5°E*

Année	Juin	Juillet	Août	Septembre	Été
1981	16	42	80	24	162
1982	2	24	35	5	66
1983	34	21	37	24	116
1984	23	28	34	35	120
1985	11	23	71	14	119
1986	15	30	32	25	102
1987	24	29	25	10	88
1988	30	53	52	40	175
1989	16	50	72	30	168
1990	21	11	42	12	86
Total:1981-1990	192	311	480	219	1202
Pourcentage	16 %	26%	40%	18%	100%

Tableau 2 : Occurrences d'ondes de 3 – 5-jours avec un seuil de 2 m/s sur le vent méridien à 700 hPa filtré dans la bande de 3-5 jours aux points de grille de la latitude 12.5°N, entre 20°O et 22,5°E

Année	Juin	Juillet	Août	Septembre	Été
1981	1	55	44	17	117
1982	3	11	19	8	41
1983	14	28	27	6	75
1984	43	21	62	12	138
1985	20	46	26	45	137
1986	7	88	53	24	172
1987	1	6	73	11	91
1988	25	81	36	14	156
1989	33	46	42	40	161
1990	25	13	13	14	65
Total:1981-1990	172	395	395	191	1153
Pourcentage	15%	34%	34%	17%	100%

6-1-1. A l'échelle intra-saisonnière

Pour l'onde de 6 – 9-jours, 1202 cas sont obtenus pour les 10 étés avec 192, 311, 480 et 219 cas (*Tableau 1*) ou encore 16%, 26%, 40% et 18% en juin, juillet, août et septembre, respectivement. L'onde de 6 – 9 jours est très active en août (480 cas ou 40%), suivi de juillet (311 cas ou 26%), septembre (219 cas ou 18%) et juin (192 cas ou 16%). Les champs des composites des anomalies des précipitations décrits plus haut sont en accord avec ces chiffres, avec notamment des fortes valeurs des anomalies positives des précipitations en août, suivi de juillet et septembre, principalement dans la bande de latitude 8°N –16°N (*Figure 8*). Les valeurs des composites des anomalies des précipitations sont plutôt négatives en juin où le nombre de cas était faible.

Pour l'onde de 3 – 5-jours, 1153 cas sont obtenus au total pour les 10 étés avec 172, 395, 395 et 191 ou 15%, 34%, 34% et 17% en juin, juillet, août et septembre, respectivement (*Tableau 2*). Les ondes Africaines sont très actives en juillet et août. Les valeurs des composites des anomalies des précipitations sont en accord avec ces chiffres, avec notamment des fortes valeurs des anomalies positives des précipitations en août, suivi de juillet et septembre, principalement dans la bande de latitude 8°N –16°N (*Figure 9*). Les anomalies positives des précipitations restent faibles en juin où l'onde était peu active.

6-1-2. A l'échelle interannuelle

Pour l'onde de 6 – 9-jours, les étés 1981, 1988 et 1989 comptent le plus grand nombre de cas avec 162, 175 et 168, respectivement. Ces résultats sont en accord avec des travaux antérieurs qui montrent que l'onde de 6 –9-jours était très active pendant ces 3 années (de Félice et al. 1990, 1993 [12,13]; Viltard et al. 1998 [14]; Monkam 2003 [15]; Diedhiou et al. 1999, 2001 [22,23]). Les plus petits nombres de cas obtenus concernent les années 1982, 1987 et 1990 avec 66, 88 et 86, respectivement. L'onde de 6–9 jours était peu active pendant ces étés. Ceci est confirmé en comparant les anomalies positives des précipitations pour les étés 1981 et 1982 présentées plus haut (*Figures 4 et 5*). Nous avons calculé par la transformation de

Fourier discrète finie, le spectre moyen du vent zonal à 700 hPa, le long de la latitude $12,5^{\circ}\text{N}$, entre les longitudes 20°O et 5°E pour ces deux étés (*Figure 10*).

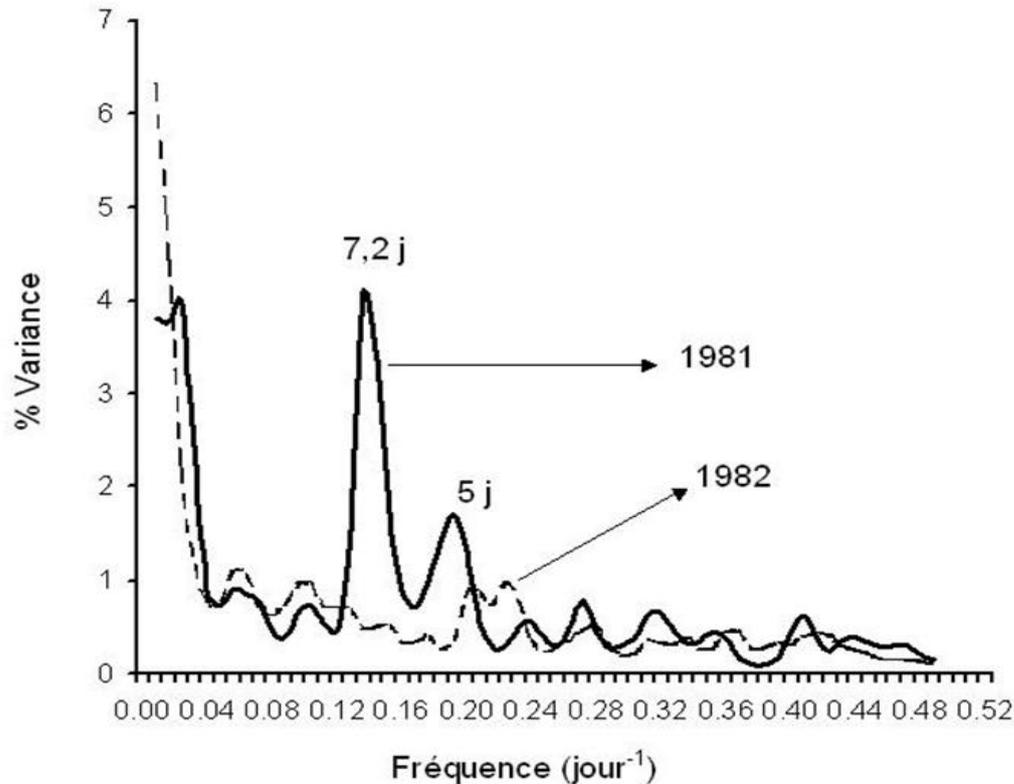


Figure 10 : Spectre moyen du vent zonal à 700 hPa, le long de la latitude $12,5^{\circ}\text{N}$, entre les longitudes 20°O et 5°E pour les étés 1981 (ligne continue) et 1982 (ligne discontinue); le pic de la bande 6 – 9-jours en été 1981 est significatif à 90% avec 34 degrés.

Le pic de la bande de 6 – 9-jours (significatif à 90% avec 34 degrés de liberté) est très net et centré à 7,2 jours en 1981. Par contre il n'y a pas de large pic dans la bande de 6 – 9 jours en 1982. On voit que la méthode utilisée pour évaluer l'activité des ondes en sélectionnant des seuils de 2 m/s sur le vent zonal filtré est en accord avec ces spectres. En 1981 les ondes étaient très actives et les valeurs des composites des anomalies des précipitations étaient positives sur la quasi totalité de la zone d'étude, avec un maximum supérieur à 3 mm/jour. Mais en 1982 où ces ondes étaient peu actives, les anomalies positives des précipitations restent faibles, avec des maxima inférieurs à 1,2 mm/jour. Ces ondes contribuent à augmenter les précipitations quand elles sont actives.

Pour l'onde de 3 – 5 jours, à partir des seuils de 2 m/s sur le vent méridien filtré, 117 et 41 cas sont obtenus pour les étés 1981 et 1982, respectivement. Les conséquences sur les précipitations sont similaires à celles des ondes de 6 – 9 jours. Les valeurs des composites des anomalies des précipitations sont positives sur toute la zone d'étude en 1981 où les ondes étaient très actives (*Figure 6*). Par contre en 1982 où ces ondes étaient faibles, les valeurs des composites des anomalies des précipitations sont négatives au sud de 10°N (*Figure 7*). Nous voyons que les ondes Africaines contribuent à augmenter les précipitations quand elles sont très actives.

6-2. Influence du transport de vapeur d'eau par les ondes sur les précipitations

Les flux zonal et méridien de vapeur d'eau sont calculés quotidiennement aux différents points de grilles de la zone d'étude dans les couches 1000- 850, 850-700, 700-500 et 500-300 hPa. Dans une couche donnée, les flux zonal et méridien entre les niveaux 1 et 2 sont déterminés respectivement par les relations (1) et (2) :

$$\begin{aligned} (P_1 - P_2)(U_1q_1 + U_2q_2)/2g & \quad (1) \\ (P_1 - P_2)(V_1q_1 + V_2q_2)/2g & \quad (2) \end{aligned}$$

où P_1 , q_1 , U_1 , et V_1 désignent la pression, l'humidité spécifique, les composante zonale et méridienne du vent au niveau 1, respectivement, et P_2 , q_2 , U_2 , et V_2 les mêmes paramètres au niveau 2 ; $g=10 \text{ m/s}^2$. Pour deux couches consécutives, le flux total est donné par la somme des deux couches. Les flux des couches 850-700 et 700-500 hPa présentent la même tendance générale. Pour cela nous considérons le flux total entre les niveaux 850 et 500 hPa où les deux régimes d'ondes d'est sont généralement bien visibles, en calculant la somme des flux des couches 850-700 et 700-500 hPa. La méthode composite décrite plus haut est utilisée pour déterminer la distribution spatiale des flux en relation avec les ondes.

La **Figure 11** montre le champ des composites du flux zonal de vapeur associé à l'onde de 6 – 9-jours dans la couche 850-500 hPa pour l'été 1981. Les fortes oscillations (environ -130 à -100 kg/ms) apparaissent vers 8° - 16°N , dans la bande de latitude de la ZCIT. Puisqu'il s'agit ici des composites des flux et non des anomalies, sur cette figure le flux zonal est d'est sur la quasi totalité de la zone d'étude.

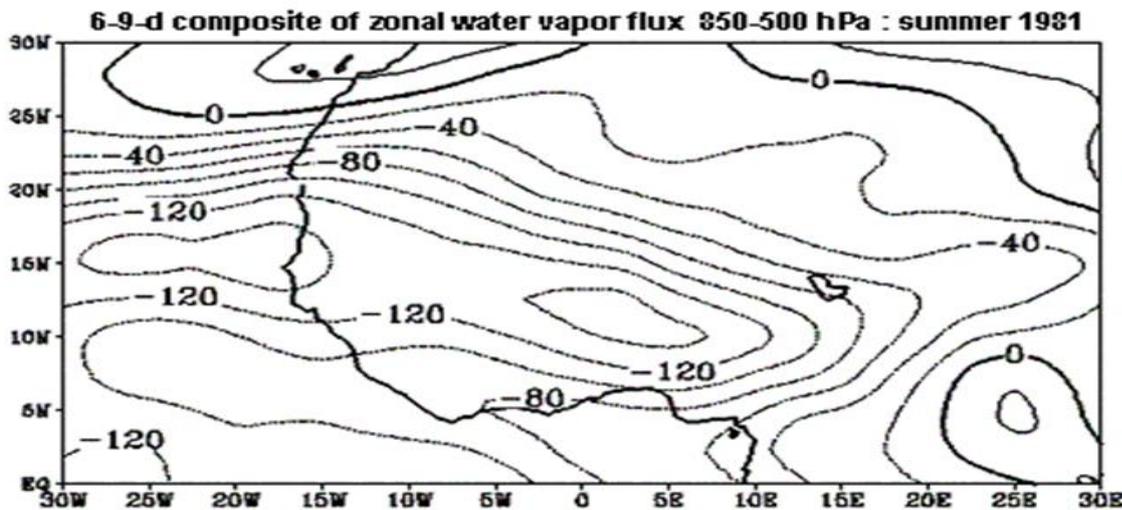


Figure 11 : Variabilité composite du flux zonal de vapeur d'eau dans les couches 850 – 500 hPa associé à l'onde de 6 – 9-jours en été 1981.

Les valeurs des composites ont été calculées comme à la **Figure 2**, mais en sélectionnant les dates où le vent zonal filtré à 700 hPa filtré dans la bande de 6 – 9-jours était maximal avec une amplitude supérieure ou égale à $0,5 \text{ m/s}$ aux 25 points de référence de la latitude $12,5^\circ\text{N}$, entre les longitudes 30°O et 30°E , en 1981 ; unité : kg/ms .

Des résultats similaires ont été obtenus pour l'onde de 3 – 5-jours (figure non montrée). Par contre sur les champs moyens des composites des anomalies du flux zonal de vapeur d'eau en relation avec l'onde de 6 – 9-jours (**Figure 12**), le flux zonal est d'est au nord de 15°N et d'ouest au sud de cette latitude.

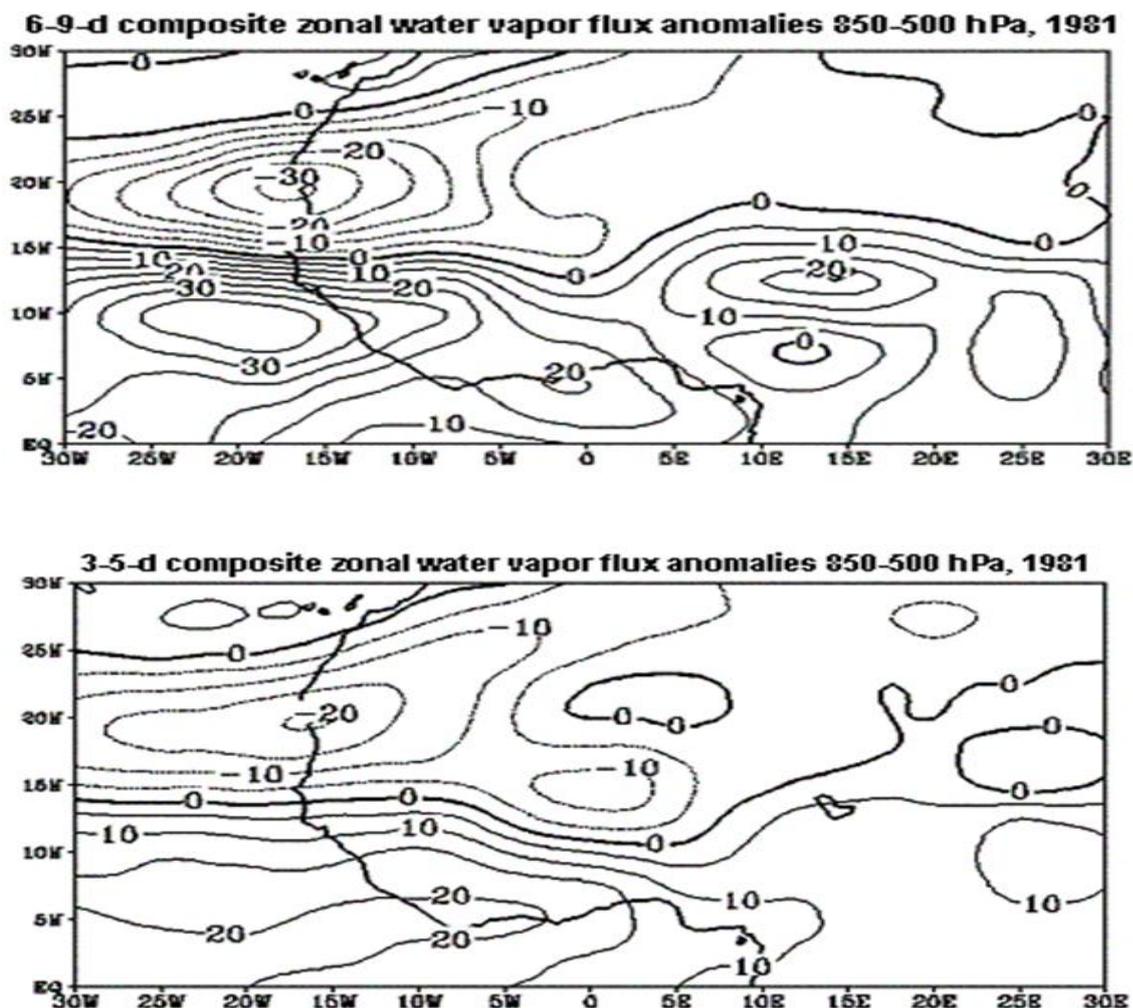


Figure 12 : Variabilité composite des anomalies du flux zonal de vapeur d'eau dans la couche 850 – 500 hPa associé à l'onde de 6 – 9-jours et de 3 – 5-jours pendant l'été en 1981. Pour l'onde 6 – 9-jours (3 – 5-jours) les valeurs des composites ont été calculées comme à la figure 11 mais sur des anomalies des flux, en sélectionnant les dates où le vent zonal (méridien) filtré à 700 hPa filtré dans la bande de 6-9 jours (3-5 jours) était maximal avec une amplitude supérieure ou égale à 0,5 m/s aux 25 points de référence de la latitude 12,5°N, entre les longitudes 30°O et 30°E, en 1981; Unité : kg/ms.

On observe un maximum de –30 kg/ms (flux d'est) au nord du Sénégal. Deux maxima (flux d'ouest) de l'ordre de 40 et 20 kg/ms apparaissent vers 6°N-13°N, 25°O-10°O près du Fouta-Djalon en Guinée et vers 10°N-15°N, 7°E-17°E autour du Lac Tchad, respectivement. C'est dans ces deux zones de maxima que des fortes hauteurs de précipitations sont observées au cours de l'été. Pour l'onde de 3-5 jours, les anomalies du flux zonal sont d'est (d'ouest) au nord (sud) de 15°N comme dans la cas de l'onde de 6 – 9-jours. Mais il

n'existe qu'un seul maximum (flux d'ouest) d'environ 20 kg/ms vers le Fouta-Djalou en Guinée. Les flux méridiens (figure non montrée) sont très inférieurs aux flux zonaux.

7. Conclusion

Dans ce travail nous avons utilisé une méthode composite pour déterminer la structure spatiale de l'onde Africaine et de l'onde d'est de 6 – 9-jours. Nous avons aussi examiné les influences de ses deux régimes d'ondes d'est sur la distribution spatiale des précipitations en Afrique de l'Ouest, à l'échelle inter-annuelle et intra-saisonnière. Pour les deux régimes, nous avons trouvé une bonne coïncidence entre la structure spatiale sur les champs de vent et de l'altitude géopotentielle et les précipitations. Les zones de fortes (faibles) précipitations sont associées à la circulation cyclonique (anticyclonique) et aux valeurs négatives (positives) des anomalies de l'altitude géopotentielle. Ces ondes contribuent à l'augmentation des précipitations dans la bande de latitude $7^{\circ}\text{N} - 15^{\circ}\text{N}$, autour de la ZCIT, avec un maximum vers le Fouta-Djalou en Guinée et vers le Lac Tchad. Elles contribuent à la diminution des précipitations au nord de 15°N et au sud de 7°N . Pour l'onde de 6 – 9-jours les anomalies des précipitations sont liées aux anomalies de la composante zonale du vent et l'augmentation des précipitations est associée à une forte modulation de l'AEJ.

Nous avons montré que pour les deux régimes, les variations des hauteurs des précipitations sont liées à l'activité des ondes. Cette activité a été évaluée à partir des amplitudes des paramètres de référence : le vent zonal (méridien) à 700 hPa, filtré dans la bande de 6-9 jours (3-5 jours) pour l'onde de 6 – 9-jours (3 – 5-jours) et à la latitude $12,5^{\circ}\text{N}$. Nous avons montré que le nombre d'occurrence de l'onde de 6 – 9-jours (3 – 5-jours) ayant une amplitude élevée, supérieure ou égale à 2 m/s par exemple, sur le vent zonal (méridien) filtré, est plus grand en juillet et août qu'en juin et septembre. Ainsi, pour les deux régimes, la modulation des précipitations est faible en juin et septembre où ces phénomènes sont peu amplifiés. Au contraire, ces ondes sont très actives en juillet et août où les amplitudes sont très élevées. Ces deux mois sont les plus pluvieux dans la zone d'étude.

Pour la variabilité inter-annuelle, l'onde de 6 – 9-jours est intermittente et la diminution ou l'augmentation des précipitations dépend de l'activité de l'onde. Nous avons montré que le nombre d'occurrence de l'onde de 6 – 9-jours ayant une amplitude supérieure ou égale à 2 m/s sur le paramètre de référence est élevé en 1981 (162 cas) où l'onde était très active qu'en 1982 (66 cas) où elle était faible. En 1981 les valeurs des composites des anomalies des précipitations sont positives sur la totalité de la zone d'étude avec un maximum de l'ordre de 3 mm /jour tandis qu'en 1982 le maximum est inférieur à 1,2 mm/jour. De plus les hauteurs des précipitations sont petites 1982 et élevées en 1981. Ainsi, quand l'onde de 6 – 9-jours est très active elle augmente les précipitations en Afrique de l'Ouest. Pour l'onde de 3 – 5-jours en utilisant un seuil de 2 m/s sur le vent méridien filtré, nous avons trouvé 117 et 41 occurrences en 1981 et 1982, respectivement. En 1981, les valeurs des composites des anomalies des précipitations sont positives sur toute la zone d'étude tandis qu'en 1982 elles sont négatives au sud de 10°N . Ainsi, l'onde Africaine contribue à accroître les précipitations en Afrique de l'Ouest quand elle est active.

Les deux régimes d'ondes d'est contribuent à accroître les précipitations en Afrique de l'Ouest quand elles sont très actives mais de différentes manières: pour l'onde de 6 – 9-jours, il existe une extension zonale des anomalies positives des précipitations dans la bande de latitude $7^{\circ}\text{N}-15^{\circ}\text{N}$ de l'est à l'ouest de la zone d'étude, avec deux maxima près du Fouta-Djalou en Guinée et vers le Lac Tchad. Les anomalies négatives apparaissent au nord de 15°N près du Soudan et au sud de 7°N vers la Côte d'Ivoire. Dans ce régime, les maxima des anomalies positives des précipitations sont associés aux anomalies de la composante zonale du

vent, et l'accroissement des précipitations est lié à une forte modulation de l'AEJ. Les deux maxima des anomalies positives des précipitations apparaissent vers le Fouta-Djalon et vers le Lac Tchad où les valeurs des composites des anomalies du flux zonal de vapeur d'eau dans la couche 850–500 hPa sont elles aussi maximales (maxima de flux d'ouest). Ainsi, les anomalies positives des précipitations sont probablement liées aux transports de vapeur par ce régime. Pour l'onde de 3 – 5-jours, il existe une forte extension méridienne des anomalies des précipitations dans la bande de latitude 5°N-15°N en relation avec l'extension méridien de la structure de l'onde. Dans ce régime, il n'y a qu'un seul maximum, vers la Guinée, des composites des anomalies du flux zonal de vapeur d'eau (flux d'ouest) dans la couche 850 – 500 hPa. Nous suggérons que les deux régimes d'ondes d'est contribuent à l'accroissement des précipitations dans la région du Fouta-Djalon, tandis que le maximum de précipitations observé vers le Lac Tchad serait dû uniquement à l'onde de 6 – 9-jours. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que l'onde de 6 – 9-jours a une grande longueur d'onde zonale favorisant ainsi le transport par un flux d'ouest, de la vapeur d'eau de l'Océan Atlantique jusqu'au Lac Tchad.

Pour les régimes, il y a une diminution des précipitations au nord de 15°N, associée à la circulation anticyclonique et aux valeurs positives des anomalies de l'altitude géopotentielle. Il serait intéressant d'examiner les effets, sur ces ondes, de l'action combinée des anticyclones de Libye au nord-est et des Açores au nord-ouest de la zone d'étude. Il serait également intéressant d'étude l'influence de la mousson africaine au sud de la zone d'étude.

Références

- [1] - Burpee R.W, 1972: The origin and structure of easterly waves in the lower troposphere of North Africa. *J Atmos Sci*; **29** : 77 - 90.
- [2] - Burpee R.W., 1974: Characteristics of North African easterly waves during the summers of 1968 and 1969. *J Atmos Sci*; **31**: 1556 - 1570.
- [3] - Burpee R.W., 1975: Some features of synoptic-scale waves based on compositing analysis of GATE data. *Mon Wea Rev*; **103**: 921 - 925.
- [4] - Reed R.J. and Recker E.E., 1971: Structures and properties of synoptic-scale wave disturbances in the equatorial western Pacific. *J Atmos Sci*; **28**: 1117 – 1133
- [5] - Reed R.J., Norquist D.C., Recker E.E., 1977: The structures and properties of African wave disturbances as observed during phase III of GATE. *Mon Wea Rev*; **105**: 317 – 333.
- [6] - Reed R.J., Hollingsworth A, Heckley WA, Delsol F.,1988: An evaluation of the performance of the ECMWF operational system in analysing and forecasting easterly wave disturbances over Africa and the tropical Atlantic. *Mon Wea Rev*; **116**: 825-865.
- [7] - Reed R.J., Klinder E, Hollingsworth A., 1988: The structure and characteristics of African easterly wave disturbances as determined from ECMWF operational analysis forecast system. *Meteor Atmos Phys*; **38**: 22 –33.
- [8] - Lenouo A., F Mkankam Kamga and E Yepdjuo, 2005, Weak interaction in the African easterly jet. *Annales Geophysicae*, **23**, 1637–1643
- [9] - Lenouo A., F Mkankam Kamga, 2008, Boundary layer damping of African easterly waves. *Annales Geophysicae*, **26**, (sous presse)
- [10] - Viltard A, de Félice P., 1979: Statistical analysis of wind velocity in an easterly wave over West Africa. *Mon Wea Rev*; **107**: 1320 – 1327.
- [11] - Viltard A, de Felice P., 1982 : Etude statistique d'ondes de grande échelle dans la troposphère de l'Afrique de l'Ouest. *La Météorologie*; (**29–30**): 121 – 127.

- [12] - De Félice P, Viltard A, Monkam D, Ouss C., 1990: Characteristics of North African 6-9 day wave during summer 1981. *Mon Wea Rev*; **118**: 2624 – 2633.
- [13] - De Félice P, Viltard A, Oubuih J., 1993: A synoptic scale wave of 6 – 9-day period in the Atlantic tropical troposphere during summer 1981. *Mon. Wea. Rev.* **121**: 1291 – 1298
- [14] - Viltard A, de Félice P, Oubuih J, Laurent H., 1998: Rainfall and 6 – 9-day wave – like disturbances in West Africa during summer 1989. *Meteorol Atmos Phys*; **66**: 229 – 234
- [15] - Monkam D., 2003: The 6 – 9-Day Wave and Rainfall Modulation in Northern Africa During Summer 1981. *J Geophys Res* 2003; 108 (D17), 4535, doi:10.1029/2002JD003215
- [16] - Monkam D., 1990 : Ondes troposphériques l'échelle synoptique en Afrique : caractérisation cinématique, structure et étude spatio-temporelle et comparative de deux systèmes d'ondes d'été au moyen de données l'analyse : Thèse de doctorat de l' Université Paris 6, 200p.
- [17] - **Monkam D., 2007**: Influence des deux régimes d'ondes d'est sur les flux de vapeur d'eau en Afrique de l'Ouest durant l'été 1981. *Sécheresse*, 18 (2) 89-95
- [18] - Viltard A., de Félice P, Oubuih J., 1997: Comparison of African and 6 – 9-day wave – like disturbance Patterns over West Africa and the tropical Atlantic during summer 1985. *Meteorol Atmos Phys*; **62**:91 – 99
- [19] - Oubuih J, de Félice P, Viltard A., 1999: Influence of the 6 - 9-day wave disturbances on the temperature, vorticity and cloud cover over the tropical Atlantic during summer 1985. *Meteorol Atmos Phys*; **69** (3-4): 137-144
- [20] - Kalnay E., Coauthors,1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437–471
- [21] - Mounier F, Kiladis GN,Janicot S (2007) Analysis of the Dominant Mode of Convectively Coupled Kelvin Waves in the West African Monsoon. *Journal of Climate* 20(8): 1487
- [22] - **Diedhiou A, Janicot S, Viltard A, de Félice P, Laurent H., 1999**: Easterly wave regimes and associated convection over West Africa and tropical Atlantic: results from the NCEP/NCAR and ECMWF reanalyses. *Clim Dyn*; 15: 795 – 822.
- [23] - **Diedhiou, A., S. Janicot, A. Viltard, and P. de Felice., 2001**: Composite pattern of easterly disturbances over West Africa and tropical Atlantic: a climatology from 1979-95 NCEP/NCAR reanalyses, *Clim. Dyn.*, 18, 241 – 253