

## **Approche composite de la variabilité synoptique atmosphérique en Afrique de l'ouest et relation avec les précipitations**

**ARONA DIEDHIOU**

*LMD(CNRS)-PRAO(ORSTOM), Ecole Polytechnique, F-91128, Palaiseau Cedex, France*  
e-mail: diedhiou@info11.polytechnique.fr

**HENRI LAURENT**

*PRAO(ORSTOM), 911 Avenue Agropolis, BP 5045, F-34032 Montpellier Cedex 1, France*

**SERGE JANICOT & ALAIN VILTARD**

*LMD(CNRS), Ecole Polytechnique, F-91128 Palaiseau Cedex, France*

**Résumé** Dans ce travail, on étudie les phénomènes ondulatoires d'échelle synoptique en Afrique de l'ouest à l'aide des réanalyses du NCEP/NCAR de 1979 à 1995. Une analyse spectrale sur cette période nous montre qu'il existe régulièrement et distinctement dans le vent méridien à 700 hPa une périodicité entre 3 et 5 jours et une autre entre 6 et 9 jours. Un filtrage numérique est alors effectué pour isoler ces deux phénomènes ainsi qu'une analyse composite afin de cerner les structures moyennes des ondes associées. Ensuite, aux dates de passage de ces perturbations, nous essayons de voir comment certaines variables liées à la convection sont modulées. L'onde 6-9 jours semble être un autre régime d'onde d'est avec une cinématique différente de celle de l'onde 3-5 jours. Elle est caractérisée par son intermittence. Par ailleurs, nous avons trouvé des interactions différentes entre ces deux perturbations et les précipitations observées par l'ORSTOM.

### **INTRODUCTION**

Nous nous proposons ici d'aborder l'étude de la variabilité des perturbations atmosphériques en Afrique de l'ouest à l'échelle synoptique à l'aide des réanalyses du NCEP/NCAR (*National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research*) sur la période 1979-1995. Une présentation de ces données a été faite par Kalnay *et al.* (1996). Quatre réseaux par jour sont disponibles sur une grille de  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ; nous travaillons parfois sur la moyenne quotidienne. L'objectif est de mieux cerner les caractéristiques des ondes 6-9 jours et des ondes 3-5 jours et par ailleurs, de contribuer à la compréhension des liens entre ces perturbations synoptiques et les précipitations.

Les ondes d'est africaines sont des perturbations qui se propagent vers l'ouest en Afrique de l'ouest. Ce sont des éléments importants du climat dans les régions africaines et atlantiques et peuvent aussi affecter loin à l'ouest les îles Caraïbes. Ces ondes sont particulièrement importantes sur l'Atlantique parce qu'elles peuvent se transformer en cyclones tropicaux. De périodes 3-5 jours, ces ondes ont déjà été

détectées et bien étudiées (Reed *et al.*, 1977 par exemple). Elles ont une longueur d'onde de 2500 km, se propagent vers l'ouest de 6–9° degré de longitude par jour.

Plus récemment, les caractéristiques des ondes 6–9 jours ont été mises en évidence par de Félice *et al.* (1990, 1992) à partir de radiosondages et des analyses du CEPMMT (*Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme*). Ces ondes ont une longueur d'onde d'environ 5000 km, se propagent vers l'ouest avec une vitesse moyenne équivalente à celle des ondes 3–5 jours (Viltard *et al.*, 1997).

En partant de l'hypothèse que ces ondes sont déclenchées par une instabilité barotrope ou barocline liée au Jet d'Est Africain (AEJ), on analyse ici les composantes horizontales du vent à 700 hPa. Une analyse spectrale par la transformée de Fourier (FFT) a été faite sur le vent méridien afin de détecter les principales périodicités et de les isoler. Par une approche composite, nous mettons en évidence la structure moyenne de ces ondes. Ensuite au moment du passage de ces perturbations, nous essayons de voir comment les précipitations quotidiennes observées par l'ORSTOM.

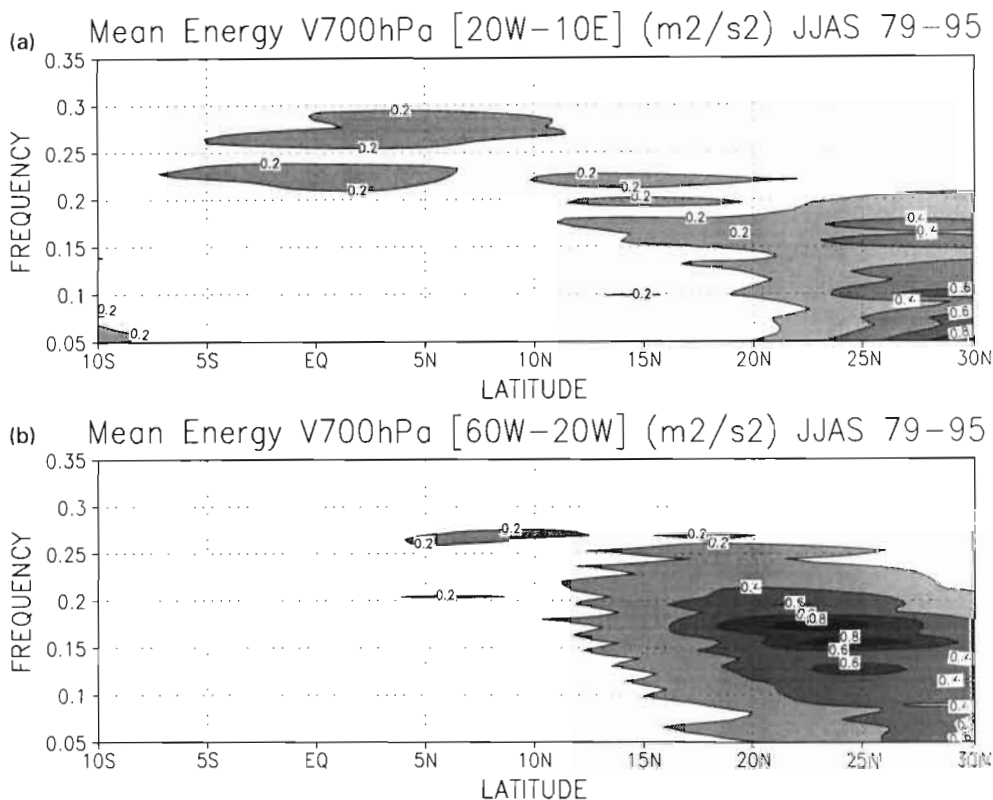
## A PROPOS DE LA STRUCTURE MOYENNE DES ONDES D'EST AFRICAINES

### L'analyse spectrale du vent méridien à 700 hPa

Les densités spectrales présentées sur la Fig. 1 sont des moyennes sur 17 ans obtenues à partir de l'analyse faite par la FFT sur 122 jours de juin à septembre de 1979 à 1995; dans tous les cas le nombre de degrés de liberté est supérieur à 200.

Nous présentons donc sur la Fig. 1 un diagramme latitude-période de la densité spectrale du vent méridien à 700 hPa. Cette analyse a d'abord été faite en ne considérant que des longitudes situées sur le continent (Fig. 1(a)). Nous avons au sud (de 5°S à 10°N) deux pics de fortes densités associés aux périodes entre 3 et 5 jours; dans cette bande, on remarque deux pics: l'un dans la bande 3.53–4.03 jours et l'autre dans la bande 4.44–5 jours. Un peu plus au nord, entre 10°N et 20°N, on note une zone de maxima correspondant à la bande 4.54–6.25 jours. Au delà de 20°N, nous avons essentiellement des pics entre 5 et 10 jours avec des maxima à partir de 6 jours. Lorsqu'on considère que des longitudes situées sur l'océan (Fig. 1(b)), la plupart des pics spectraux apparaissent très au nord entre 12.5°N et 30°N, et sont essentiellement compris dans la bandes 5–10 jours, avec des maxima entre 6 et 9 jours. C'est sur l'océan que nous retrouvons les valeurs les plus fortes dans cette bande de fréquence.

En conclusion, l'analyse spectrale moyenne sur 17 ans et à partir de réanalyses du NCEP/NCAR sur le vent méridien, montre essentiellement 2 bandes de fréquences: une première entre 3 et 5 jours et une seconde entre 6 et 9 jours. Après la mise en évidence de ces périodicités, il est apparu nécessaire de les isoler des autres phénomènes n'entrant pas dans le cadre de cette étude par filtrage numérique.



**Fig. 1** Densité spectrale moyenne (1979-1995) du vent méridien à 700 hPa ( $m^2 s^{-2}$ ) de juin à septembre. (a) Diagramme latitude-période pour des longitudes entre  $20^{\circ}W$  et  $10^{\circ}E$ ; (b) diagramme longitude-période pour des latitudes entre  $15^{\circ}N$  et  $20^{\circ}N$ .

On filtre ainsi le vent méridien et le vent zonal entre 3 et 5 jours puis entre 6 et 9 jours. Après avoir utilisé la méthode de Wallace *et al.* (1988) pour déterminer les zones de fortes activités de ces deux types de perturbations nous allons dans tout ce qui suit, considérer le point ( $17.5^{\circ}N, 0^{\circ}W$ ) comme point de référence (parce qu'il est sur la trajectoire de ces ondes) et noter ainsi toutes les dates de passages de ces ondes en ce point pendant les 17 ans.

### La structure moyenne des ondes d'est 3-5 jours et 6-9 jours

Nous allons donc compter le nombre de fois où une perturbation entre 3 et 5 jours ou entre 6 et 9 jours passe au dessus du point de référence et surtout les dates de passage de ces perturbations. Pour cela, nous retenons toutes les fois où le maximum du vent méridien filtré entre 3 et 5 jours ou entre 6 et 9 jours est supérieur  $0.5 m s^{-1}$ . Sur les étés 1979-1995, 478 passages d'ondes 3-5 jours et 247 cas d'ondes 6-9 jours sont obtenus. Pour chaque bande de périodes, nous considérons la moyenne de tous les cas obtenus.

Les Figs 2(a) et (b) présentent l'anomalie du champ de vent respectivement au passage d'une onde 3-5 jours et d'une onde 6-9 jours; les vecteurs représentent le

vent et les isolignes, les lignes de courant associées. On représente ainsi le vecteur  $(\mathbf{u} - \mathbf{u}^*; \mathbf{v} - \mathbf{v}^*)$ , où en chaque point de grille, on a retranché la moyenne temporelle (sur 17 ans)  $\mathbf{u}^*$  et  $\mathbf{v}^*$  pour les deux composantes du vent. Ainsi, ces figures sont les champs moyens perturbés au passage des ondes. Ces figures ressemblent fortement aux champs filtrés (non montrés ici) et nous pouvons clairement distinguer les différences entre les longueurs d'ondes des deux perturbations:

- Pour l'onde 3-5 jours (Fig. 2(a)), on retrouve bien la structure des ondes d'est telle qu'elle a été observée (Reed *et al.*, 1977) avec une cellule cyclonique suivie d'une autre cellule anticyclonique. Nous remarquons aussi une forte extension méridienne (entre 30°N et 10°S) avec un tilt SE-NW au nord du jet et SW-NE au sud. L'autre axe du talweg étant localisé à 30°W entre 10°N et 20°N, nous avons une longueur d'onde moyenne de 2500 km.
- Pour l'onde 6-9 jours (Fig. 2(b)), nous retrouvons sur l'Afrique de l'ouest un axe de talweg au nord de 5°N orienté SE-NW. Le second axe du talweg étant localisé à 50°W entre 15°N et 25°N, nous avons une longueur d'onde moyenne de 5500 km; entre les deux, nous avons une forte activité anticyclonique.

La vitesse de phase de ces deux régimes d'ondes d'est a été calculée en utilisant la procédure de Wallace *et al.* (1988). Nous avons trouvé une propagation vers l'ouest de ces deux perturbations avec pour l'onde 3-5 jours une vitesse moyenne de 8 m s<sup>-1</sup>

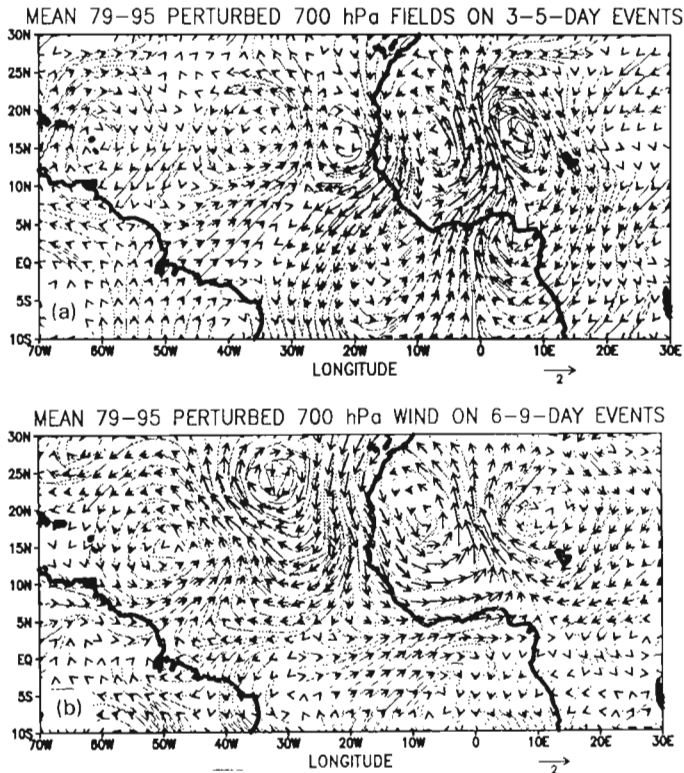


Fig. 2 Moyenne (1979-1995) des anomalies du vent non filtré à 700 hPa (m s<sup>-1</sup>) aux dates de passage des ondes 3-5 jours (a), et en (b) des ondes 6-9 jours (vecteurs); les isolignes sont les lignes de courant associées.

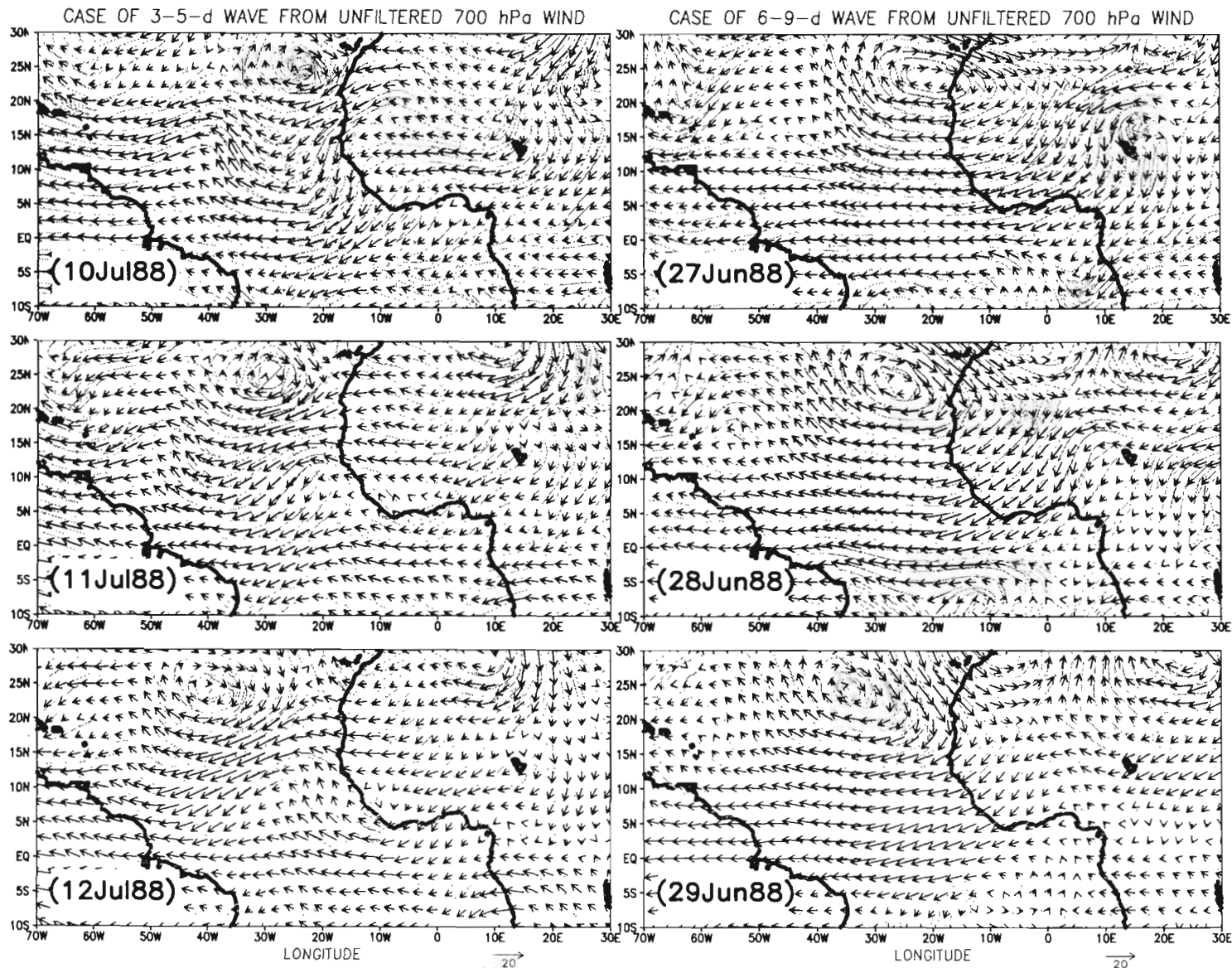


Fig. 3 Champ de vent non filtré à 700 hPa pour illustrer le passage d'une perturbation 3-5 jours (colonne gauche, du 10 au 12 juillet 1988) et celui d'une onde 6-9 jours (colonne droite, du 27 au 29 juillet); les isolignes sont les lignes de courant associées.

et pour l'onde 6–9 jours une vitesse de  $6 \text{ m s}^{-1}$ . Cette procédure a aussi été utilisée pour confirmer les longueurs d'ondes calculées ci-dessus. Une étude locale par la transformée en ondelettes du vent méridien au point ( $17.5^\circ$ ,  $0^\circ\text{W}$ ) sur les 17 ans (non montrée ici) a permis de mettre en évidence l'intermittence du mode 6–9 jours. Par ailleurs, les modes 3–5 jours et 6–9 jours n'apparaissent jamais simultanément: lorsque l'un est fort l'autre est faible. Sur la Fig. 3, nous illustrons cette propagation en présentant un passage de ces deux perturbations sur trois jours en 1988 (du 10 au 12 juillet pour l'onde 3–5 jours et du 27 au 29 juin pour l'onde 6–9 jours). Nous remarquons ainsi le déplacement vers l'ouest des ondes avec des vitesses moyennes identiques à celles calculées plus haut. Les ondes 6–9 jours présentent une activité anticyclonique plus intense. De plus, nous retrouvons des longueurs d'onde de 2500–3000 km pour l'onde 3–5 jours sur un axe de propagation situé entre  $15^\circ\text{N}$  et  $17^\circ\text{N}$ , et des longueurs d'onde de 5000–6000 km pour l'onde 6–9 jours le long d'une branche située un peu plus au nord (entre  $17.5^\circ\text{N}$  et  $25^\circ\text{N}$ ).

Une différence fondamentale entre ces structures réside donc dans le fait que l'intensité de l'activité anticyclonique au nord se renforce dans le cas de l'onde 6–9 jours. La structure de cette onde et le renforcement de l'activité anticyclonique ont déjà été évoqués par Ross (1991) lors de son étude de l'énergétique de deux ondes d'est africaines à partir du modèle du Florida State University. Sur les deux ondes qu'il considère, Ross remarque que cette onde d'est (observée en juillet à partir des analyses III-b du FGGE) arrive au moment où il y a un maximum de chauffage solaire sur le Sahara et se caractérise par une intense circulation anticyclonique dans le ridge de l'onde, secteur où se trouve de l'air chaud du Sahara appelé *Saharian Air Layer* (Carlson & Prospero, 1972; Karyampudi & Carlson, 1988). Il est donc intéressant de noter qu'à partir de la période (6–9 jours) d'une perturbation obtenue par la FFT, nous retrouvons sur une très longue série une structure qui, à l'échelle synoptique, a été considérée comme une onde d'est classique (entre 3 et 5 jours).

## DIAGNOSTIQUE DES INTERACTIONS AVEC LES PRECIPITATIONS

On va considérer ici le vent à 700 hPa pour les mois juin, juillet, août et septembre. Dans tout ce qui suit, nous présentons une moyenne sur 12 ans (1979–1990) des relations entre ces perturbations et les précipitations observées puis les moyennes sur les 17 ans (1979–1995) des interactions avec la mousson ouest-africaine et la convection profonde.

On va d'abord sélectionner les dates où l'amplitude du vent méridien filtré à 700 hPa entre 3 et 5 jours et entre 6–9 jours à 700 hPa est supérieure à  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  au point ( $17.5^\circ\text{N}$ ,  $0^\circ\text{W}$ ). On effectue la moyenne de tous ces cas et on obtient un composite moyen associé à  $t = 0$ . Nous représentons sous forme de vecteurs, l'anomalie ( $\mathbf{u} - \mathbf{u}^*$ ,  $\mathbf{v} - \mathbf{v}^*$ ) associée comme pour les Figs 2(a), 2(b). Quand on a fixé ces dates on refait ce même composite en considérant le jour d'avant, soit  $t - 1$  puis le jour d'après,  $t + 1$ .

Sur la Fig. 4, nous avons représenté la modulation des précipitations observées par l'ORSTOM de  $t - 1$  à  $t + 1$  au moment du passage des ondes 3–5 jours (Figs 4(a), (b), (c)) et des ondes 6–9 jours (Figs 4(d), (e), (f)). L'anomalie de précipitation (on a retranché la moyenne sur 17 ans) obtenue aux dates de passage

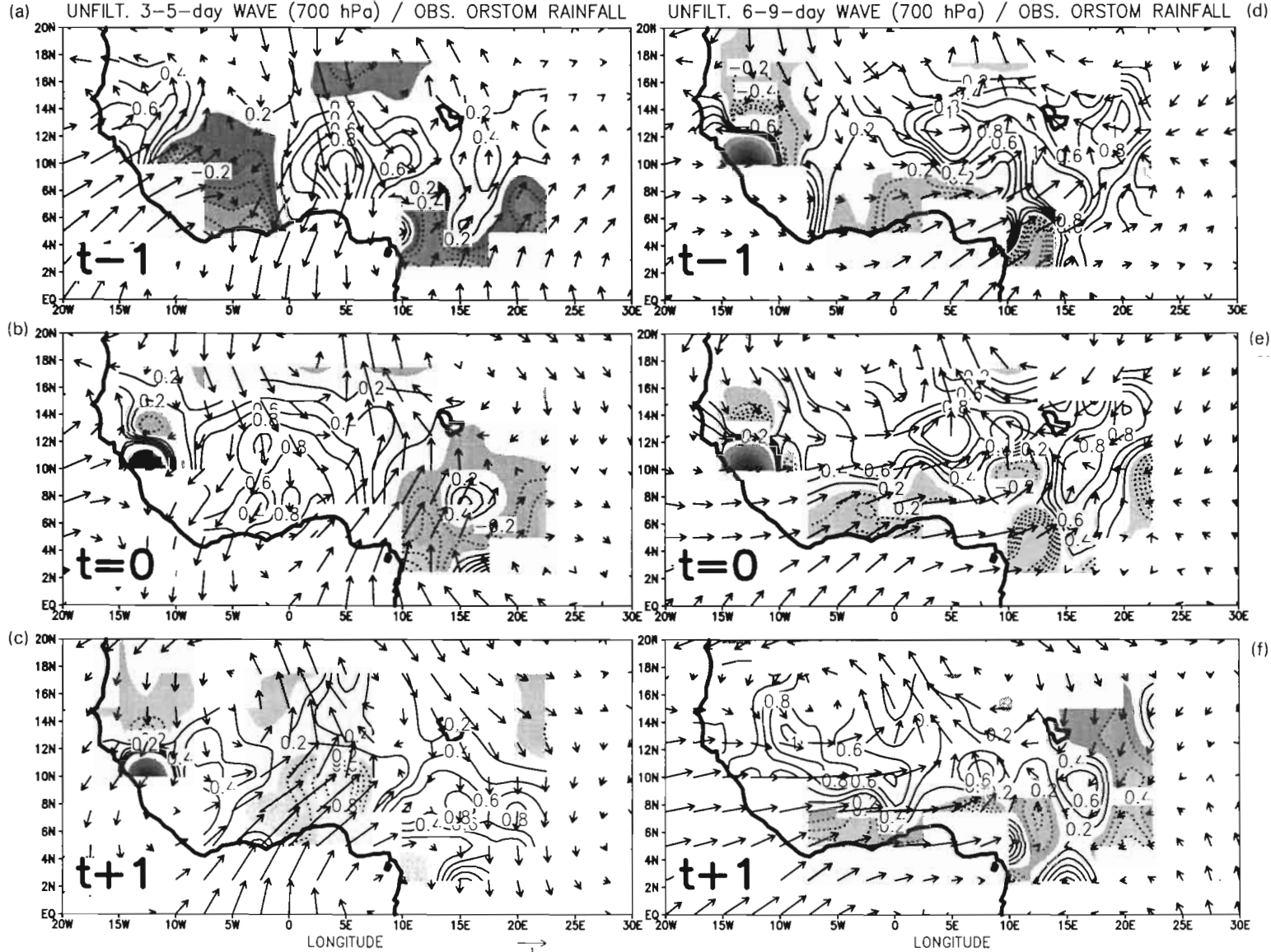


Fig. 4 Moyenne (1979-1990) de la modulation des précipitations au moment du passage (*resp.*  $t - 1$ ,  $t = 0$ ,  $t + 1$ ) des ondes 3-5 jours (*resp.* (a), (b), (c)) et lors du passage des ondes 6-9 jours (*resp.* (d), (e), (f)). Les vecteurs représentent la moyenne de l'anomalie ( $u - u^*$ ,  $v - v^*$ ; voir texte) du champ de vent non filtré à 700 hPa en  $m s^{-1}$  et les isolignes l'anomalie de précipitations observée pour ces mêmes dates (en  $mm jour^{-1}$ ) par l'ORSTOM.

des ondes est superposée sous forme d'isolignes à l'anomalie champ de vent ( $\mathbf{u} - \mathbf{u}^*$ ,  $\mathbf{v} - \mathbf{v}^*$ ). Nous remarquons une propagation vers l'ouest du noyau d'anomalie positive de précipitation avec la même vitesse que celle des ondes. Une différence essentielle entre les deux perturbations réside dans la localisation de l'anomalie positive de précipitation: dans le cas de l'onde 3–5 jours, elle est dans et à l'avant du talweg; de plus elle a une structure qui s'étale du nord au sud sur toute l'Afrique de l'ouest. Dans le cas de l'onde 6–9 jours, l'anomalie positive de précipitation se localise à l'avant et à l'arrière du talweg avec une structure zonale bien marquée; Comme cette onde a une trajectoire qui est située plus au nord que celle des ondes 3–5 jours, l'anomalie positive va se retrouver aussi plus au nord, entraînant ainsi une anomalie bipolaire de précipitation sur l'Afrique de l'ouest. Il semble donc qu'il y ait une interaction entre ces ondes et les précipitations.

**Remerciements** Les auteurs remercient le Professeur P. de Félice (Université Paris XII) pour ses conseils, Mr R. Schweitzer (University of Colorado) pour nous avoir fourni les réanalyses du NCEP/NCAR, Mr J. L. Monge (LMD/CNRS) pour la gestion de la base de données CLIMSERV et toute l'équipe ORSTOM/PRAO pour nous avoir fourni les données de précipitations.

## REFERENCES

- Carlson, T. N. & Prospero, J. M. (1972) The large scale movement of Saharan air outbreaks over the northern equatorial Atlantic. *J. Appl. Met.* **11**, 283–297.
- De Felice, P., Viltard, A., Monkam, D. & Ouss, C. (1990) Characteristics of North African 6–9 day waves during summer 1981. *Mon. Weath. Rev.* **118**, 2624–2633.
- De Felice, P., Viltard, A. & Oubuih, J. (1992) A synoptic-scale wave of 6–9 day period in the Atlantic tropical troposphere during summer 1981. *Mon. Weath. Rev.* **121**, 1291–1298.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woolen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetma, A., Reynolds, R., Jenne, R. & Joseph, D. (1996) The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Met. Soc.* **77**, 437–471.
- Karyampudi, V. M. & Carlson, T. N. (1988) Analysis and numerical simulations of the Saharan air layer and its effect on easterly wave disturbances. *J. Atmos. Sci.* **45**, 3102–3136.
- Reed, R. J., Norquist, D. C. & Recker, E. E. (1977) The structure and properties of African wave disturbances as observed during Phase III of GATE. *Mon. Weath. Rev.* **105**, 317–333.
- Ross, R. S. (1991) Energetics of African wave disturbances derived from the FSU Global Spectral Model. *Met. Atmos. Phys.* **45**, 139–158.
- Viltard, A., De Felice, P. & Oubuih, J. (1997) Comparison of the African and the 6–9 day wave-like disturbance patterns over West Africa and the tropical Atlantic during summer 1985. *Met. Atmos. Phys.* **62**, 91–99.
- Wallace, J. M., Lim, G. H. & Blackmon, M. L. (1988) Relationship between cyclone tracks, anticyclone tracks and baroclinic waveguides. *J. Atmos. Sci.* **45**, 439–462.