

## **Caractérisation Des Saisons À Partir Des Profils De Vents Observés Par Radar Vhf En Afrique De l'Ouest**

**Houngninou B. Etienne**

*Faculté des Sciences et Techniques, Université d'Abomey-Calavi  
Bénin 01 BP 1946 Cotonou (BENIN)  
E-mail: [houngnb@yahoo.fr](mailto:houngnb@yahoo.fr)*

**Kougbéagbédè Hilaire**

*Faculté des Sciences et Techniques, Université d'Abomey-Calavi, Bénin  
E-mail: [hilars83@gmail.com](mailto:hilars83@gmail.com)*

**Moumouni Sounmaïla**

*Ecole Normale Supérieure, Université de Parakou  
Bénin BP 1681 Abomey Calavi (BENIN)  
E-mail: [sgonrouwa@yahoo.fr](mailto:sgonrouwa@yahoo.fr)*

**Guédjé K. François**

*Ecole des Sciences et Techniques du Bâtiment et de la Route (ESTBR)  
Université d'Abomey-Calavi, Bénin  
E-mail: [guedjefranco@yahoo.com](mailto:guedjefranco@yahoo.com)*

**Allé C. S. Ulrich**

*Faculté des Sciences et Techniques, Université d'Abomey-Calavi, Bénin  
E-mail: [ulrichalle@yahoo.fr](mailto:ulrichalle@yahoo.fr)*

**Adéchinan A. Joseph**

*Faculté des Sciences et Techniques, Université d'Abomey-Calavi, Bénin  
E-mail: [adechinanjoseph@yahoo.fr](mailto:adechinanjoseph@yahoo.fr)*

**Houngninou T. Erik**

*Faculté des Sciences et Techniques, Université d'Abomey-Calavi, Bénin  
E-mail: [houngnerik@yahoo.fr](mailto:houngnerik@yahoo.fr)*

### **Résumé**

La variabilité de la mousson Ouest africaine a eu des conséquences socio-économiques et environnementales sur les populations. Cette variabilité est intimement liée à la circulation atmosphérique, qui d'ailleurs joue un rôle dominant dans l'organisation de la mousson. Les présents résultats expérimentaux renseignent sur la dynamique des vents à travers les caractéristiques des jets. Les données proviennent d'un radar VHF profileur de vent installé au Bénin, précisément à Nangatchori (9°6472N, 1°7411E) au cours de la campagne de mesures du programme AMMA (2006-2007). Cette étude montre la présence du Jet d'Est Africain (JEA) dans la troposphère moyenne (2-4 km). Elle montre, en outre, la présence du Jet d'Ouest Subtropical (JOST) et du Jet d'Est Tropical (JET) dans la haute troposphère (10 km). Les profils obtenus laissent distinguer de façon remarquable deux

grandes saisons caractérisant l'OHHVO (Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé). La CAH (Classification Ascendante Hiérarchique) appliquée aux vitesses moyennes et fréquences de direction du vent à 10 km d'altitude associées au cumul mensuel de pluie confirme l'existence des deux grandes saisons : une saison sèche (novembre à mars) et une saison humide (avril à octobre). La saison humide est caractérisée par trois phases: la phase pré-humide (avril, mai, juin), le cœur de la saison humide (juillet, août, septembre) et la phase post-humide (octobre).

**Mots clés:** Jets, mousson Ouest-africaine, circulation atmosphérique, Bénin.

### **Abstract**

The variability of the West African monsoon had socio- economic and environmental impacts on populations. This variability is closely linked to atmospheric circulation, which also plays a dominant role in the organization of the monsoon. These experimental results provide information on the dynamics of winds through the features of the jets. Data are provided by a VHF wind profiler radar installed in Benin, precisely Nangatchori (9°6472N, 1°7411E) during the measurement campaign AMMA program (2006-2007). This study shows the presence of the African Easterly Jet (AEJ ) in the middle troposphere (2-4 km) . It shows also the presence of the Subtropical Jet West (STJ ) and the Tropical Easterly Jet (TEJ ) in the upper troposphere (10 km) . The patterns obtained let distinguish two great seasons characterizing the Hydrometeorological Observatory of Oueme Upper Valley. The Hierarchical Agglomerative Clustering (HAC) applied to the wind mean velocity and frequency of direction at 10 km associated to the monthly rain confirms the two great seasons existence: one dry season (November to March) and wet season (April to October). The wet season is characterized by three phases: the pre-wet phase (April, May, June), the heart of the wet season (July, August, September) and the post-wet phase (October).

**Keywords:** Jets, West African monsoon, atmospheric circulation, Benin

## **1. Introduction**

L'Afrique de l'Ouest sub-saharienne est une des régions du monde ayant connu la plus forte diminution relative des précipitations au cours de la deuxième moitié du XXe siècle (Brown et Crawford, 2008). Cette phase de sécheresse a eu des conséquences catastrophiques sur les ressources alimentaires, l'économie et la santé des populations des pays affectés (Folland et al., 1986) car, d'une part, les performances des systèmes de production, élevages ou cultures de ces pays, sont étroitement tributaires du climat (Bazzaz et Sombroek, 1996) et d'autre part, la pauvreté de ces populations, ne leur permet pas d'accéder aux adaptations technologiques (mécanisation, engrais, irrigation). Les auteurs Folland et al. (1986), Kanamitsu et Krishnamurti (1978), Lamb (1978) et Semazzi et al. (1988) ont montré que les causes de la variabilité de la mousson africaine ne sont ni locales ni régionales mais seraient liées à la circulation atmosphérique générale.

Plusieurs études (Mathon et Laurent, 2001 ; D'Amato et Lebel, 1998 ; Laurent et al., 1998 ; Mathon et al., 2002b) ont montré que la quasi-totalité des précipitations en Afrique de l'Ouest sont d'origine convective. De ce fait, elles sont fortement modulées par le flux de mousson (Sultan et al., 2003 et 2007) et très variables dans le temps et l'espace (Lebel et al., 2000 ; Kohler et al., 2009). La variabilité spatiale serait en partie liée aux perturbations du Jet d'Est Africain (JEA) qui joue un rôle

dominant dans l'organisation des pluies en systèmes convectifs de méso-échelle (Diedhiou et al., 1999). En revanche, les causes de la variabilité temporelle restent encore mal connues mais certains auteurs tentent de les lier aux perturbations du Jet d'Est Tropical (Jeremy et al., 2001 ; Nicholson, 2013). Au regard du rôle des jets dans le système de la mousson africaine, il s'est avéré nécessaire de les caractériser. À cet effet, plusieurs appareils d'observation de l'atmosphère ont été déployés dans la région soudanienne du Bénin à la faveur du programme AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine) au cours des années 2006 et 2007. Parmi ces appareils, nous pouvons citer le radar VHF, utilisé pour observer le profil vertical du vent et des pluviographes à augets basculeurs ou à pesée pour mesurer la pluviométrie. L'objectif de ce travail est d'explorer le profil vertical des vents en région soudanienne à partir des données dudit radar et de caractériser la période d'étude à partir des caractéristiques des jets et de la pluviométrie moyenne mensuelle. A la première section de ce document sont présentées la zone d'étude et les données utilisées. Ensuite, la deuxième section décrit la méthodologie adoptée. Enfin, la troisième section expose les résultats et discussions.

## **2. Description De La Zone D'étude Et Données Utilisées**

### **2.1. Zone D'étude**

Dans le but de mieux comprendre la variabilité climatique et hydrologique associée à la mousson Ouest-Africaine et de mieux expliquer les interactions entre climat, végétation et cycle de l'eau dans cette région, trois sites de méso-échelle ont été instrumentés à la faveur du programme AMMA (Bénin, Niger et Mali). Ce choix favorise la documentation sur la diversité éco-climatique de l'Afrique de l'Ouest le long du gradient latitudinal entre le Golfe de Guinée et la limite Sud du Sahara. Le site du Bénin, appelé "Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO)", s'étend entre les latitudes 9°N et 10°N et les longitudes 1,5°E et 2,8°E et couvre une superficie de 15000 km<sup>2</sup> environ (figure 1).

La région de l'OHHVO est soumise à un climat de type soudanien caractérisé par une seule saison sèche et une seule saison humide. La pluviométrie est de 1200 mm environ sur la période 1954-2005 (Le Lay et Galle 2005 ; Lawin, 2007). Les deux principales villes de cette région sont Parakou au Sud-Est et Djougou située à une centaine de kilomètres au Nord-Ouest de Parakou. Au Nord-Ouest de Djougou se trouve la chaîne montagneuse de l'Atacora dont le point le plus élevé dans la zone culmine à une altitude de 658 m. En dehors de ce massif, le relief est peu marqué dans la région, en témoignent les altitudes de Djougou (480 m) et de Parakou (393 m) par rapport au niveau de la mer. Les deux principales villes ont fait l'objet d'une forte instrumentation au cours de la campagne AMMA. A Djougou, précisément à Nangatchori (9,6472°N, 1,7411°E) étaient installés, entre autres, le radar VHF profileur de vent (figure 2) et des pluviographes à augets basculeurs ou à pesée.

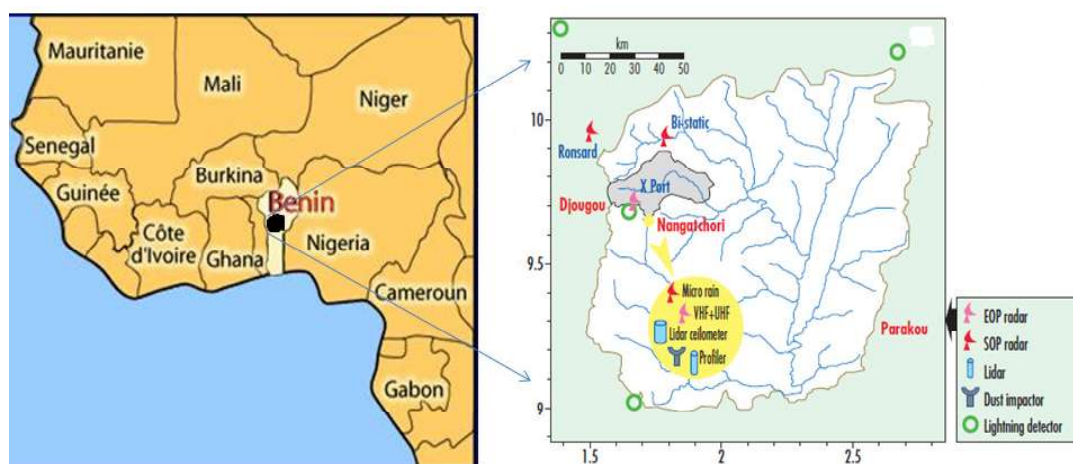
### **2.2. Données Utilisées**

#### **2.2.1. Description Du Radar VHF Profileur De Vent**

Le radar VHF ou strato-troposphérique est un sondeur météorologique principalement conçu pour fournir les profils verticaux des trois composantes principales du vent dans la troposphère et dans les basses couches stratosphériques (Gage et Balsley, 1978 ; Larsen and Röttger, 1982 ; Balsley and Gage, 1982). Il fonctionne comme un radar Doppler à impulsion (Sauvageot, 1992). Il mesure la réflectivité le long de chaque faisceau ainsi que la vitesse Doppler. La vitesse Doppler est la projection de la vitesse vraie du traceur dans la direction de visée. Le radar VHF profileur de vent, utilisé au cours de la campagne AMMA (2006-2007), est un profileur à cinq faisceaux d'ouverture en sondeur vertical de fréquence 45 MHz. Cette fréquence permet d'éviter de détecter autres cibles que le vent, telles que les oiseaux, les insectes, les avions, etc. Ledit radar utilise une antenne composée d'un réseau de dipôles couvrant une aire de 60x60 m<sup>2</sup> (figure 2). En contrôlant la distribution de phase et d'amplitude des dipôles, on forme successivement cinq faisceaux dont un pointant à la verticale puis les quatre autres

dans quatre directions symétriques par rapport à la verticale et inclinées de  $\sigma = 15^\circ$  par rapport au zénith (Campistron et al., 2001). Avec les cinq faisceaux, on mesure cinq composantes de la vitesse. Ces cinq composantes permettent de restituer le vecteur vitesse vrai. Ce dernier est projeté sur le plan horizontal pour avoir le vent horizontal (Iassamen et al., 2009). Le faisceau vertical permet d'accéder à la vitesse verticale du vent. Les caractéristiques techniques du radar sont résumées dans le tableau 1.

**Figure 1:** Situation géographique du Bénin en Afrique de l'Ouest avec la délimitation de l'OHHVO et la position du radar VHF sur l'observatoire.



**Figure 2:** Vue photographique des radars VHF et UHF profileurs de vent installés à Nangatchori dans le cadre du programme AMMA (radar UHF situé en avant).



A pas horaire, le profileur VHF échantillonne l'atmosphère à chaque 375 m entre les altitudes 1461 m et 16075 m, soit un total de 40 niveaux d'échantillonnage par profil (tableau 1). Les variables mesurées sont: la réflectivité de l'air, la largeur spectrale du signal vertical sélectionné, la largeur spectrale médiane du signal oblique sélectionné, les composantes zonale (u) et méridionale (v) du vent horizontal, la vitesse w du vent vertical, l'énergie cinétique turbulente dissipée, le rapport de la réflectivité en visée oblique à la réflectivité en visée verticale et les coordonnées correspondantes (altitude, longitude et latitude) de chaque niveau. Le radar a fonctionné du 25/04/2006 au 07/11/2007 avec parfois des ruptures dues aux coupures d'énergie électrique ou à son dysfonctionnement.

**Tableau 1:** Caractéristiques du radar VHF (source : fichier des données)

Caractéristiques techniques	Valeurs usuelles
Position du radar	Lat : 9°6472 N ; Lon : 1°7411N ; Alt : 428 m/sea
Fréquence d'émission (MHz)	45
Longueur d'onde d'émission $\lambda_0$ (m)	6,67
Nombre de faisceaux	5
Nombre de niveaux	40
Altitude du premier niveau (m/sol)	1461
Différence d'altitude entre deux niveaux successifs (m)	374,7
Site des faisceaux (degré/sol)	90,0 ; 75,0 ; 75,0 ; 75,0 ; 75,0
Azimut des faisceaux (degré/Nord)	90,0 ; 30,0 ; 120,0 ; 210,0 ; 300,0
Ouverture des faisceaux (degré)	5,0 ; 5,5 ; 5,5 ; 5,5 ; 5,5
Temps moyen d'un cycle (sec)	1427
Fréquence de répétition des impulsions (Hz)	2136,8
Distance radiale maximale (m/agl)	16074,7
Nombre de points fft par spectre	256
Nombre d'intégrations cohérentes	128
Nombre d'intégrations incohérentes	1
Code des impulsions	8

### 2.2.2. Description Du Pluviographe A Augets Basculateurs

Il existe plusieurs types de pluviographes. Le pluviographe classique enregistre de façon continue les cumuls de pluie dans le temps à l'aide d'un curseur marqueur sur un papier appelé pluviogramme. Quant au pluviographe à augets basculateurs, il enregistre à la seconde près, sur une carte magnétique, les dates de basculement des augets. Chaque basculement d'auget correspond à une hauteur d'eau qui est fonction du volume de l'auget (le plus souvent 20 cm<sup>3</sup>) et de la surface de réception (200 – 2000 cm<sup>2</sup>). Dans le cadre de la campagne AMMA, deux pluviographes ont été installés à la station météorologique de Djougou. Les deux pluviographes sont à augets basculateurs dont la hauteur d'eau correspondant à un basculement est de 0,5 mm. Ils sont munis d'une bombonne dans laquelle se fait la vidange des augets par le biais d'un tuyau généralement protégé du soleil par une gaine pour éviter les fissurations. Un programme permet d'intégrer le nombre de basculements de l'auget chaque cinq minutes. À partir de ces données, on peut former des cumuls de pluie à divers pas de temps (journalier, mensuel ou annuel).

### 2.2.3. Données Utilisées Dans Le Cadre De Ce Travail

Dans le cadre de la présente étude, les données utilisées sont celles relatives aux composantes u et v du vent horizontal et le cumul mensuel de pluie enregistré à la station météorologique de Djougou à l'aide des pluviographes à augets basculateurs. Les données de vent couvrent la période allant de mai 2006 à octobre 2007 à l'exception du mois de décembre, mois comportant des lacunes. Pendant ladite période, le profil vertical du vent horizontal a été bien observé entre 1836 m et 10080 m. Les données de pluie, quant à elles, couvrent aussi la période de fonctionnement du radar VHF. Elles sont seulement utilisées, dans le cadre de cette étude, pour caractériser la période d'étude.

## 3. Méthodologie

### 3.1. Profil Du Vent

Nous avons défini le profil du vent pour une durée donnée comme étant l'évolution de la vitesse moyenne du vent en fonction de l'altitude au cours de la durée. Dans le cadre de ce travail, la vitesse moyenne à chaque altitude a été calculée par mois.

### **3.2. Détermination De La Direction Du Vent**

Nous avons déterminé la direction du vent en adoptant la méthodologie de Sultan et Janicot (2003). Le vent est d'Est si le vent zonal  $u$  est négatif et d'Ouest si le vent zonal  $u$  est positif. Pour déterminer la direction dominante du vent à une altitude donnée pendant une durée définie, nous avons calculé la fréquence des directions « Est » et « Ouest » sur cette durée. Comme les vitesses moyennes, les fréquences de direction ont été calculées par altitude et par mois.

### **3.3. Caractérisation De La Période D'étude**

Sur la base des profils obtenus, nous avons estimé que les jets peuvent caractériser les différentes périodes d'une année (Nicholson et Grist, 2001 ; Espinoza, 2012). Ainsi, pour caractériser la période d'étude, nous avons utilisé la vitesse moyenne mensuelle des jets obtenus à 10 km d'altitude et les fréquences mensuelles des directions (Est et Ouest respectivement) à la même altitude. On a associé à ces dernières les cumuls moyens mensuels de pluie mesurés sur le site météorologique de Djougou à l'aide des pluviographes à augets basculeurs. Nous avons choisi les jets de la haute altitude car leur nature change au cours du temps. Ainsi, nous avons constitué un tableau de 11×4 données comprenant la vitesse moyenne mensuelle, les fréquences mensuelles de la direction Est et les fréquences mensuelles de la direction Ouest respectivement à 10 km d'altitude et le cumul mensuel moyen de pluie. Le tableau ainsi obtenu nous a permis de découper la période d'étude en utilisant la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) proposée par Jain et Dubes (1988). La CAH regroupe les mois en différentes classes suivant le critère de Ward (Ward, 1963) basé sur la distance euclidienne. Le regroupement se fait de manière à obtenir une inertie intra-classes faible et une inertie inter-classes forte. À partir de l'arbre (dendrogramme), des classes ont été définies.

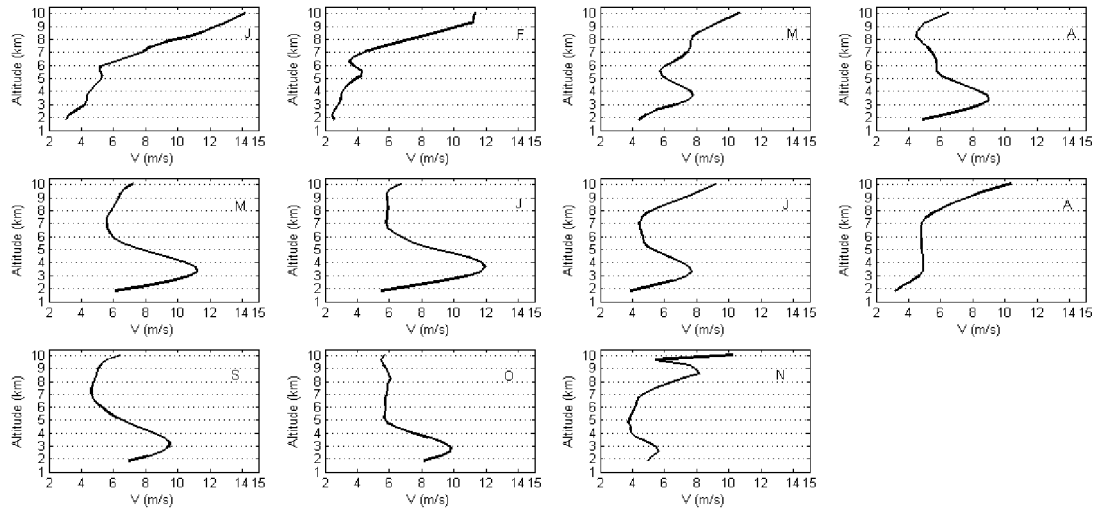
## **4. Résultats Et Discussion**

### **4.1. Analyse Des Profils Obtenus**

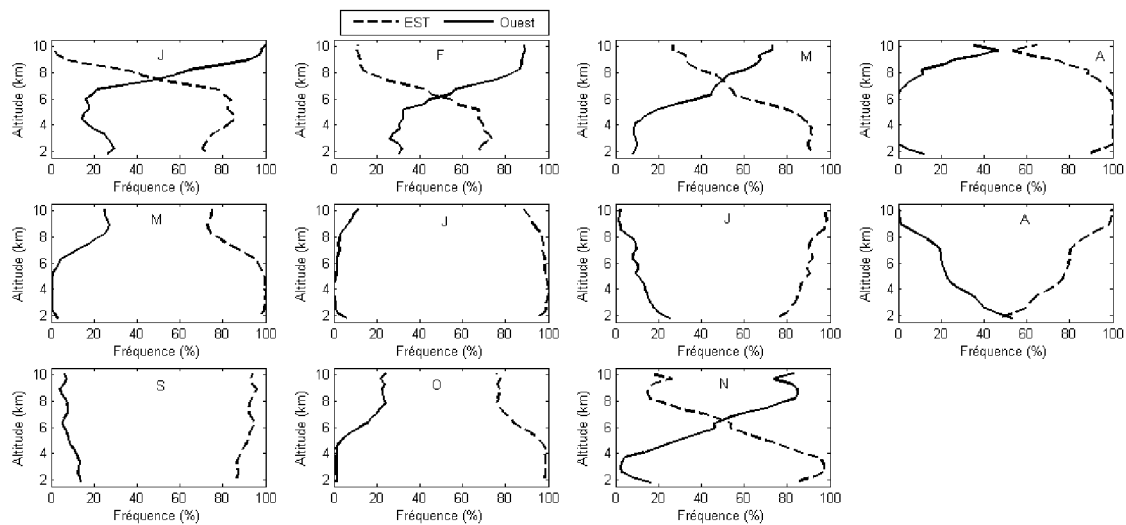
La figure 3-a montre le profil vertical du vent horizontal au cours de chaque mois. Les profils obtenus montrent des variations relativement importantes suivant les altitudes. Les vitesses moyennes des vents sont maximales entre 2 km et 4 km d'altitude et minimales entre 5 km et 7 km d'altitude en moyenne pour tous les mois à l'exception des mois d'août, janvier et février. En effet, pour ces trois mois les vitesses sont maximales à 10 km d'altitude et minimales à 2 km. La figure 3-b, quant à elle, montre le profil vertical de la fréquence des directions. On constate que la circulation atmosphérique dans la tranche comprise entre 1,8 km et 7 km d'altitude est absolument dominée par des vents d'Est quelle que soit la période. Par contre, au-dessus de 7 km deux types de vents se dessinent. En effet, au-dessus de 7 km, la période allant de janvier à mars d'une part et le mois de novembre, d'autre part, sont dominés par les vents d'Ouest alors que la période couvrant les mois d'avril à octobre est dominée par des vents d'Est. Ainsi, les pics de vitesses moyennes caractérisés par la direction Est, obtenus entre 2 km et 4 km, seraient le Jet d'Est Africain (JEA) (Burpee, 1972 ; Thorncroft et Blackburn, 1999 ; Parker et al., 2005a). Ce jet est principalement lié à la différence de température entre l'air chaud du Sahara, siège d'une importante dépression thermique, et l'air plus frais venant du golfe de Guinée (océan Atlantique). En haute troposphère, la nature des pics obtenus à 10 km dépend de la période de l'année. De janvier à mars d'une part et durant novembre d'autre part, les pics de vitesse de vent sont caractérisés par la direction Ouest. Ces pics seraient le Jet d'Ouest Subtropical (STJ) (Charney 1962 ; Burpee, 1972). Ce jet tire son origine de la déviation vers la droite des cellules de Hadley. Par contre, d'avril à octobre, les pics de vitesses sont de direction Est, les pics ainsi obtenus seraient le Jet d'Est Thermique (JET) (Charney, 1962 ; Burpee, 1972, 1974 ; Nicholson et al., 2007). Le JET un vent thermique d'Est, qui s'étend de l'Asie à l'Atlantique. Son origine est liée à la différence de température

entre les hauts plateaux du Tibet (sud-est asiatique) et l'océan indien. On l'observe autour de 10°N en Afrique de l'ouest.

**Figure 3.a:** Profil vertical du vent horizontal.

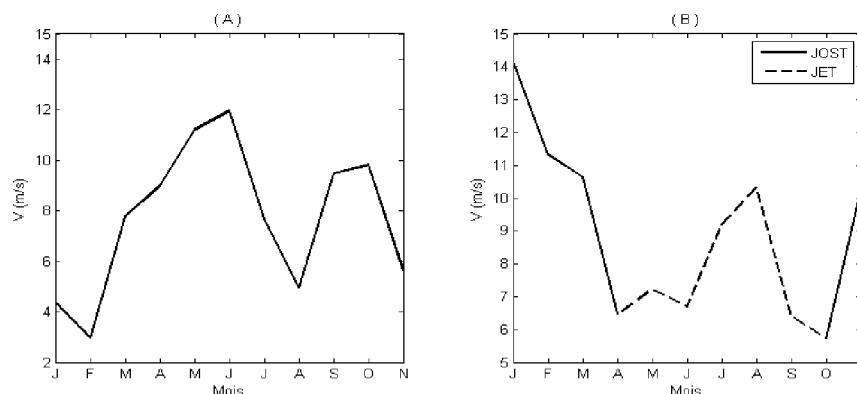


**Figure 3.b :** Profil des fréquences de directions des mois.



Trois jets sont donc mis en évidence dans la colonne atmosphérique de Djougou par le radar VHF profileur de vent. La figure 4 montre l'évolution des vitesses moyennes mensuelles maximales de ces jets. Le JEA présente deux pics, le premier en juin (12 m/s) et le second en octobre (10 m/s). En effet, la vitesse moyenne mensuelle maximale du JEA (figure 4 (A)) croît progressivement de février (3 m/s) à juin où elle atteint sa valeur maximale de 12 m/s. Ensuite, elle chute jusqu'à 5 m/s en août et remonte à nouveau jusqu'à 10 m/s en octobre puis rechute à nouveau. Ces résultats sont en harmonie avec ceux obtenus par Nicholson et Grist (2003). Ces auteurs ont montré que les fortes valeurs de la vitesse du JEA (12 m/s) sont obtenues au cours des mois de mai et juin en Afrique de l'Ouest. De même, la valeur du JEA obtenue en juin est proche de celle obtenue par Lothon et al. (2008) au cours du même mois (14 m/s) en 2006 au Niger à partir des données de radiosondages. La légère différence constatée peut être liée aux moyens de mesure utilisés.

**Figure 4:** Evolution de la vitesse moyenne maximale du JEA (A), du JOST et du JET (B)



Quant au JOST, sa vitesse moyenne décroît de janvier à avril de sa valeur moyenne mensuelle maximale de 14 m/s à sa valeur moyenne mensuelle minimale de 7 m/s et remonte à nouveau en novembre lorsqu'il réapparaît (figure 4 (B)). Le JOST a été aussi mis en évidence par Lothon et al. (2008) à Niamey avec les données de radiosondage de 2006. Sa vitesse moyenne maximale obtenue est de 15 m/s à 8 km en janvier et mars. Le JET, quant à lui, atteint sa valeur moyenne mensuelle maximale d'environ (10 m/s) en août et sa valeur moyenne minimale en octobre (6 m/s) à 10 km.

Les études passées (Flohn, 1964 ; Webster et Fasullo, 2003 ; Dai et al., 2004 ; Dezfuli et Nicholson, 2011 ; Nicholson, 2013) ont montré que le JET dispose d'un fort pouvoir sur la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et s'implique comme un facteur important dans la climatologie ouest africaine. En effet, selon ces auteurs, le JET influence la variabilité interannuelle de la pluviométrie à travers son intensité. Un JET fort/faible occasionne une année humide/sèche. Ainsi, à partir des caractéristiques précédemment décrites des jets présents dans la colonne atmosphérique Ouest Africaine, nous déduisons que la circulation atmosphérique peut permettre de caractériser les temps climatologiques.

#### 4.2. Caractérisation De La Période D'étude.

Le tableau 2 présente les variables utilisées pour caractériser la période d'études. Ce tableau montre que les cumuls moyens mensuels de pluie les plus élevés sont obtenus en juillet, août et septembre, mois dominés totalement par le JET alors que les mois marqués par la dominance totale du JOST n'ont point enregistré de pluie. En outre, nous lisons à travers ce tableau que les mois où l'on enregistre à la fois le JET et le JOST dans des proportions comparables sont caractérisés par une pluviométrie moyenne.

**Tableau 2:** Variables utilisées pour caractériser la période d'étude.

Mois	Cumul mensuel de pluie (mm)	Direction Est (%)	Direction Ouest (%)	V (m/s)
Janvier	0	0	100	14,149
Février	0	11,146	88,854	11,32
Mars	21,48	26,835	73,165	10,644
Avril	92,47	64,706	35,294	6,467
Mai	111,27	75,094	24,906	7,233
Juin	114,28	88,725	11,275	6,7015
Juillet	205,33	97,744	2,256	9,1995
Août	246,82	99,7205	0,2795	10,3305
Septembre	215,97	93,6965	6,3035	6,4
Octobre	54,84	75,729	24,271	5,7215
Novembre	0	16,667	83,333	10,228

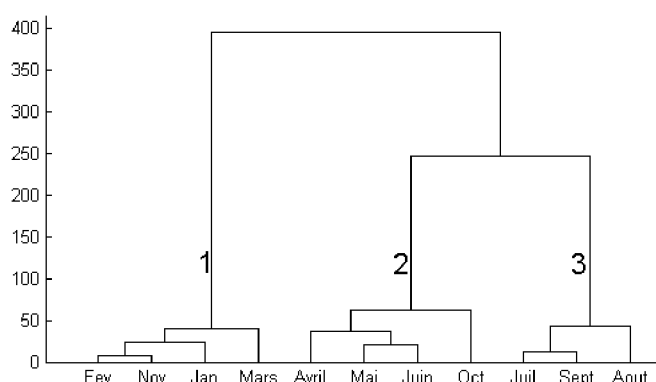


La CAH, appliquée au tableau 2 répartit les mois en trois classes (figure 5). La classe 1 regroupe les mois de novembre, janvier, février et mars alors que la classe 2 comprend les mois d'avril, mai, juin et octobre. Enfin, la classe 3 réunit les mois de juillet, août et septembre. La classe 1 qui constitue la saison sèche sur l'OHHVO (Lawin, 2007) est caractérisée par la dominance du JOST. En revanche, la classe 3 qui représente la saison humide est dominée par le JET. Quant à la classe 2, elle traduit les périodes transitoires pré-humide (avril, mai et juin) et post-humide (octobre). La période pré-humide est caractérisée par une disparition progressive du JOST au profit du JET alors que la période post-humide est caractérisée par le retour progressif du JOST et le retrait du JET. Il apparaît donc que la présence du JOST est caractéristique des périodes sèches tandis que la présence du JET indique les périodes humides.

## 5. Conclusion

Cette étude a permis de faire ressortir les jets présents dans la colonne troposphérique de Djougou comprise entre 1,8 km et 10 km d'altitude à partir du radar VHF profileur de vent. Le JEA, obtenu entre 2 et 4 km d'altitude, présente deux pics, le premier en juin (12 m/s) et le second en octobre (10 m/s). Le JOST et le JET sont enregistrés à 10 km d'altitude. La vitesse moyenne maximale du JOST est obtenue en janvier (14 m/s) et celle du JET est obtenue en août (10 m/s).

**Figure 5:** synthèse de la CAH (dendrogramme obtenu avec le critère de Ward).



En outre, cette étude a permis de caractériser la période d'étude à partir des caractéristiques du JOST et du JET d'une part et du cumul moyen mensuel de pluie enregistré sur la station météorologique de Djougou d'autre part. À l'aide de la classification ascendante hiérarchique (CAH), les mois de la période d'étude ont été regroupés en trois classes permettant de définir deux grandes saisons caractérisant l'OHHVO. Une saison sèche comprise entre novembre et mars et une saison humide comprise entre avril et octobre. La saison humide est composée de trois phases. La première phase appelée pré-humide (avril, mai et juin) est caractérisée par une disparition progressive du JOST cédant place au JET. La deuxième phase est totalement dominée par le JET et constitue le cœur de la saison humide. La troisième et dernière phase est la phase post-humide, caractérisée par une disparition progressive du JET et une installation progressive du JOST. La période sèche quant à elle est totalement dominée par le JOST.

## Acknowledgement

Based on an French initiative, AMMA was built by an international scientific group and is currently funded by a large number of agencies, especially from France, UK, US and Africa. It has been the beneficiary of a major financial contribution from the European Community's Sixth Framework

Research Programme. Detailed information on scientific coordination and funding is available on the AMMA International web site <http://www.amma-international.org>

## **Références Bibliographiques**

- [1] Balsley B. B. and Gage, K. S., 1982. On the use of radars for operational wind profiling, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 63, 1009–1018.
- [2] Bazzaz F. and Sombroek W., 1996. Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes. John Wiley, FAO, Rome, Italy.
- [3] Brown, O. and A. Crawford., 2008. Climate change: a new threat to stability in West Africa? Evidence for Ghana and Burkina Faso. *African Security Review*, 17, 3, 39-57.
- [4] Burpee, R. W., 1972 : The origin and structure of easterly waves in the lower troposphere of North Africa. *J. Atmos. Sci.*, 29 :77-90.
- [5] Campistron B., B., G. Despau, M. Lothon, V. Klaus, Y. Pointin, and M. Mauprivez, 2001. A partial 45 MHz sky temperature map obtained from the observation of five ST radars, *Annales geophysicae*, 19, 863-871
- [6] Charney, J. G. and M. E. Starn, 1962. On the stability of internal baroclinic jets in a rotating atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 19, 159 – 172.
- [7] D'Amato N, and Lebel T., 1998. On the characteristics of the rainfall events in the Sahel with a view to the analysis of climatic variability. *Int J Climatol* 18:955–974
- [8] Dai A., Lamb P. J., Trenberth K. E., Hulme M., Jones P. D., and Xie P. , 2004. The recent Sahel drought is real, *International Journal of Climatology*, vol. 24, no. 11, pp. 1323–1331.
- [9] Diedhiou, A., Janicot, S., Viltard, A., De Felice, P. and Henry, L., 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.
- [10] Dezfuli A. K. and Nicholson S. E, 2011. A note on long-term variations of the African easterly jet, *International Journal of Climatology*, vol. 31, pp. 2049–2054.
- [11] Flohn H., 1964. The tropical easterly jet, *Bonner meteorologische Abhandlungen*, vol. 4, pp. 1–69.
- [12] Folland C.K., Palmer T.N. and Parker D.E., 1986. Sahel rainfall and worldwide sea temperatures. *Nature*, 320, p. 602-607.
- [13] Gage, K. S. and Balsley, B. B., 1978. Doppler radar probing of the clear atmosphere, *Bull.Amer. Meteor. Soc.*, 59, 1074–1093,
- [14] Gage, K. S. and Green, J. L., 1978. Evidence for specular reflection from monostatic VHF radar observations of the stratosphere, *Radio Sci.*, 13, 991–1001,
- [15] Iassamen Alia, Sauvageot Henri, Campistron Bernard et Ameer Soltane, 2007. sondage composite de l'atmosphère par radar VHF et radiomètre microonde en vue de validation des données satellitaires, JAS09.
- [16] Jhan Carlo Espinoza, Matthieu Lengaigne, Josyane Ronchail, Serge Janicot, 2012. Large-scale circulation patterns and related rainfall in the amazon basin: a neuronal networks approach.
- [17] Jain AK, Dubes RC., 1988. Algorithms for clustering data. Prentice Hall, Englewood Cliffs
- [18] Janicot, S., and B. Sultan, 2007. The large-scale context of the West African Monsoon in 2006. *CLIVAR Exchanges*, No. 12, International CLIVAR Project Office, Southampton, United Kingdom, 11–17.
- [19] Kanamitsu et Krishnamurti, T. N., 1978. Northern summer tropical circulations during drought and normal rainfall months. *Mon. Wea.Rev.*, pp.331-347.
- [20] Kohler, M., Kalthoff, N., and Kottmeier, C., 2009. The impact of soil moisture modifications on CBL characteristics in West Africa: A case-study from the AMMAcampaign. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* DOI : 10.1002/qj.430.

- [21] Lamb, P.J., 1978: Large-scale tropical Atlantic surface circulation patterns associated with subsaharan weather anomalies. *Tellus*, 30, pp. 240-251.
- [22] Larsen, M. F. and Röttger, J., 1982. VHF and UHF Doppler radars as tools for synoptic research, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 63, 996–1008,
- [23] Laurent H, D’Amato N and Lebel T.,1998. How important is the contribution of the mesoscale convective complexes to the Sahelian rainfall. *Phys Chem Earth* 23:629–633.
- [24] Lawin A. E., 2007. "Analyse climatologique et statistique du régime pluviométrique de la Haute Vallée de l’Ouémé à partir des données pluviographiques AMMA-CATCH Bénin". Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France. 231p.
- [25] Le Lay M. and S. Galle, 2005. "Variabilité interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien". *Journal des Sciences Hydrologiques* 50, pp. 509-524
- [26] Lebel, T., Delclaux, F., Le Barbé, L., and Polcher, J., 2000. From GCM scales to hydrological scales : rainfall variability in West Africa. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 14, pp. 175-295.
- [27] Lothon Marie, SAÏD Frédérique, Fabienne LOHOU, Bernard CAMPISTRON, 2008. Observation of the Diurnal Cycle in the Low Troposphere of West Africa, *MONTHLY WEATHER REVIEW*, volume 136,3477-3501.
- [28] Mathon, V. and H. Laurent, 2001. Life cycle of Sahelian mesoscale convective cloud systems. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 127, 377-406.
- [29] Mathon V, Diedhiou A and Laurent H., 2002a. Relationship between easterly waves and mesoscale convective systems over the Sahel. *Geophys Res Lett* 29(8):1216
- [30] Nicholson S. E. and Jeremy P. Grist , 2001. A Study of the Dynamic Factors Influencing the Rainfall Variability in the West African Sahel, *journal of climate*, 23,1337-1359
- [31] Nicholson S. E. and Grist J. P., 2003. The seasonal evolution of the atmospheric circulation over West Africa and Equatorial Africa, *Journal of Climate*, vol. 16, pp. 1013–1030
- [32] Nicholson Sharon E., 2013. The West African Sahel: a review of recent studies on the rainfall regime and its interannual variability. Volume 2013, Article ID 453521, 32 pages, *ISRN Meteorology*.
- [33] Parker, D. J., C. D. Thorncroft, R. R. Burton, and A. Diongue, 2005a. Analysis of the African Easterly Jet using aircraft observations from the JET2000 experiment. *Quart. J. Roy. Meteor.Soc.*, 131, 1461–1482.
- [34] Semazzi, F. H. M., Mehta, V. and Sud, Y.C., 1988. An investigation of the relationship between sub-Saharan rainfall and global sea-surface temperatures. *Atmosphere-Ocean*, 26, pp. 118-138.
- [35] Sauvageot H., 1992. *Radar meteorology* Artecch House Publishers,384
- [36] Sultan B. and Janicot S., 2003. The West African monsoon dynamics. Part II: The preonset and the onset of the summer monsoon. *J. Climate*, 16, 3407-3427.
- [37] Sultan B., Janicot S., and P. Drobinski, 2007. Characterization of the diurnal cycle of the West African Monsoon around the monsoon onset. *J. Climate*, 20, 4014 - 4032.
- [38] Thorncroft C.D and Blackburn M., 1999. Maintenance of the African easterly jet. *QJR Meteorol Soc* 125(555):763–786
- [39] Ward JH, 1963. Hierachical grouping to optimize an objective function. *J Am Statist Assoc*
- [40] Webster P. J. and Fasullo J., 2003. Monsoon: dynamical theory,” in *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, J. Holton and J.A. Curry, Eds., pp. 1370–1385, Academic Press, London, UK.