

INFLUENCE DE L'UPWELLING CÔTIER SUR LA REPARTITION SPATIO-TEMPORELLE DES PLUIES DANS LE BENIN MERIDIONAL ET CENTRAL (AFRIQUE DE L'OUEST)

Expédit W. VISSIN, Maître de Conférences des universités CAMES, Laboratoire Pierre Pagny, Climat, Eau, Environnement, Développement (LACEEDE)/DGAT/FLASH, Université d'Abomey-Calavi (Bénin). Centre de Recherches de Climatologie (CRC), Université de Bourgogne, 6 boulevard Gabriel 21000 Dijon, France. exlaure@gmail.com.

RÉSUMÉ

Cette étude analyse l'influence de l'upwelling côtier sur la pluviométrie de la période de juillet-août-septembre (JAS) au Bénin méridional et central. Les données de la température de surface océanique (TSO) de l'upwelling côtier et de la pluviométrie de la période de JAS de 15 stations sur une période allant de 1960 à 2010 ont été respectivement recueillies au Centre de Données Océanographique du Bénin et à l'ASECNA-Bénin. La méthodologie a consisté à calculer les coefficients de détermination et de corrélation de SPEARMAN, de KENDALL et la détermination des Indices Pluviométriques. Les résultats indiquent que la pluviométrie est influencée par l'upwelling côtier en période de JAS avec une corrélation très forte durant le mois d'août. Il a été observé une diminution progressive des coefficients de corrélation au fur et à mesure que la station est éloignée de la côte en direction du nord, ce qui influence la bimodalité du régime pluviométrique dans le Bénin méridional et le régime de transition dans le Bénin central. Aussi, le lien entre l'upwelling côtier et la pluviométrie est plus élevé dans la région du Sud-est du Bénin que dans le Sud-ouest. Les différentes observations indiquent que l'upwelling côtier et d'autres facteurs climatiques, participent à la régulation de la pluviométrie de la petite saison sèche au Bénin méridional et central.

Mots-clés: Bénin méridional et central - upwelling côtier - récession pluviométrique de JAS.

ABSTRACT

COSTAL UPWELLING'S INFLUENCE IN SPACE AND TIME DISTRIBUTION OF RAINFALL IN SOUTHERN AND CENTRAL BENIN (WEST AFRICA)

This study analyzes the influence of the coastal upwelling on the pluviometry of July-August-September (JAS) the period to the Benin Southerner and exchange. The data of the oceanic temperature of surface (TSO) of the coastal upwelling and the pluviometry of the period of going JAS of 15 stations over one period of 1960 to 2010 were respectively collected in the Oceanographical Center of Data of Benin and with the Benin one. The methodological one consisted in calculating the coefficients of determination and correlation of SPEARMAN, KENDALL and the determination of the Pluviometric Indices. The results indicate that pluviometry is influenced by the coastal upwelling in period of JAS with a very strong correlation during August. It was observed a progressive reduction in the coefficients of correlation as the station is far away from the coast in direction of north, which influences the bimodality of the pluviometric mode in the Benin Southerner and the arrangement transitional in the Benin exchange. As, the bond between the coastal upwelling and pluviometry are higher in the area of the South-east of Benin as in South-west. The various observations indicate that the coastal upwelling and other climatic factors, take part in the regulation of the pluviometry of the small dry season in the Benin Southerner and exchange.

Key words: Southern and Central Benin - coastal upwelling - JAS's rainfall recession.

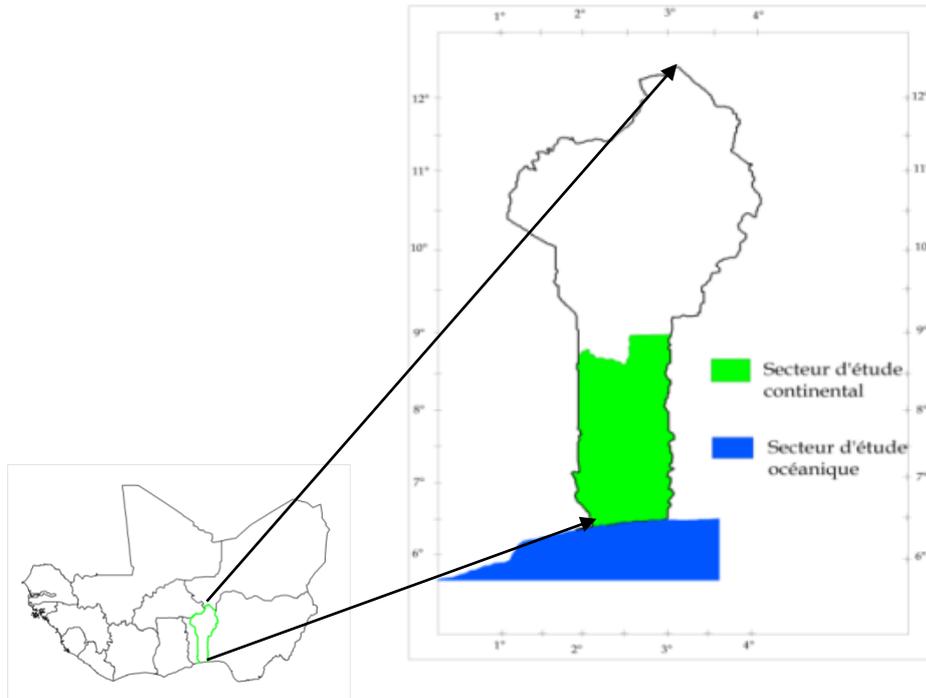
INTRODUCTION

Les épisodes pluvieux de ces dernières décennies en Afrique subsaharienne sont fortement corrélés au balancement du Front Intertropicale (GRIST J. P. & Nicholson S. E., 2001), qui atteint sa position latitudinale maximale durant le mois d'août (LEDUC-LEBALLEUR M. 2012). À cet effet, les mois couvrant la période de JAS sont connus comme les plus humides de l'année dans la zone sahélienne (TAPSOBA D., 1997) et concentrent plus de 60 % des pluies saisonnières dans le bassin béninois du fleuve Niger (VISSIN E. W., 2007).

Cependant, durant les mois de JAS, bien que le Bénin méridional et central soient couverts par le flux de mousson (AMOUSSOU E., 2010), il est observé que le climat de la côte Nord du golfe de Guinée est marqué par la présence d'une récession de la pluviométrie, désignée par le terme de petite saison sèche (ELDIN M., 1971). La pluviométrie du mois d'août représente 4,3 % pour Cotonou, 9,8 % pour Bohicon et 13,2 % pour Savè dans la pluviométrie annuelle (KPANOU M., 2013).

VIERS G. (1967) soulignent que les courants marins ont une influence considérable sur les températures et sur les précipitations des régions qu'ils bordent. Concernant la côte Ouest-africaine, la communauté scientifique s'accorde et estime que l'upwelling côtier de la côte Nord du golfe de Guinée, est à l'origine ou accompagne la petite saison sèche (BOKO M., 1988 et EDJAMÈ K., 2007). La présente recherche se propose d'étudier le lien entre l'upwelling côtier et la récession pluviométrique de JAS dans le Bénin méridional et central (figure 1).

Figure 1: Secteurs d'études océanique et continentale



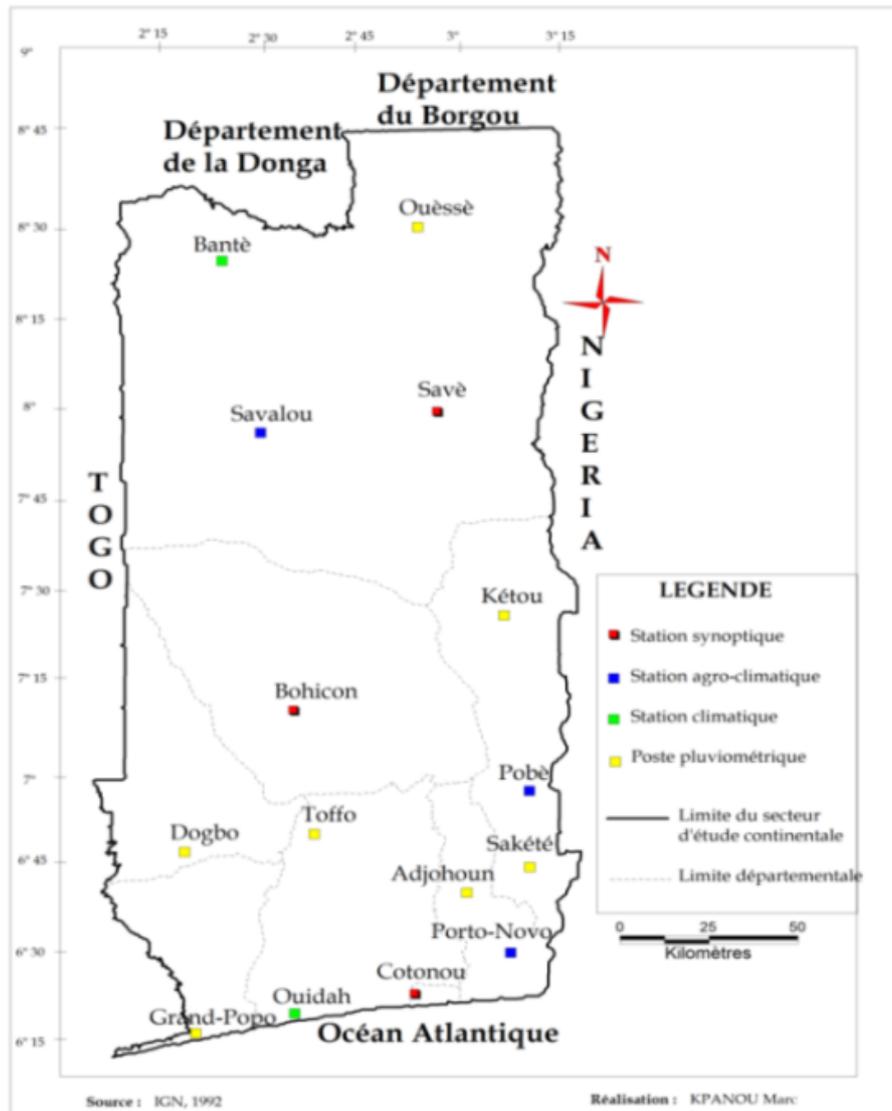
Source: LACEEDE (2009)

L'analyse de la figure 1 montre que les secteurs pris en compte par cette étude sont situés d'une part entre 6°13' et 8°45' de latitudes Nord et 2°05' et 3°17' de longitudes Est, représentant le secteur continental (couleur verte) et d'autre part entre 5°30' et 6°20' de latitudes Nord et 1°30 et 2°40 de longitudes Est, correspondant au secteur océanique (couleur bleue). La partie méridionale du secteur d'étude est soumise à un régime bimodal. La partie septentrionale du secteur d'étude est soumise à un régime de transition, caractérisé par une alternance entre le régime bimodal et unimodal.

1. DONNEES ET METHODES

Données. Les données utilisées dans la présente recherche sont la température de surface océanique (TSO) et la pluviométrie mensuelle de 1960 à 2010 des mois de juillet, août et septembre. La TSO fournie sur la période 1960-2010 par le Centre de Donnée Océanographique du Bénin est issue du traitement des images satellites d'une grille à 2 dimensions (longitude, latitude). La fenêtre de résolution étant de 1° (longitude) x 1° (latitude), l'espace océanique couverte se trouve entre 5° et 6° latitude Nord et 2° et 3° longitude Est. La TSO brute a été calibrée et validée par le dit centre pour avoir la TSO mensuelle. La pluviométrie mensuelle de 15 stations (figure 2) a été recueillie à la Direction Nationale de la Météorologie (DNM) sise à l'ASECNA-Bénin sur la période 1960-2010.

Figure 2: Réseau des stations météorologiques



Source: ASECNA (2012)

Les valeurs manquantes observées au niveau de certaines stations ont été reconstituées par la méthode des moindres carrés selon YABI I. et BOKO M. (2007). Le calcul de la régression pour la période 1960 à 2010 a permis de combler 2,5 % du total d’observation.

Méthodes. La détermination du mois où le lien entre la TSO de l’upwelling côtier et la pluviométrie est le plus important, a été effectué au moyen du calcul pour chaque mois de juillet, d’août et de septembre, du coefficient de corrélation de SPEARMAN qui s’exprime par la formule $\rho = \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$ où d_i représente l’écart entre les rangs au niveau de l’observation i et n est le nombre d’éléments à classer. Dans le cas de la présente étude, i est la différence quantitative entre la TSO et la pluviométrie au niveau d’une année et n est le nombre d’années

d'étude. Très intéressant dans la pratique, le ρ de SPEARMAN peut caractériser une liaison non-linéaire monotone, à la différence du coefficient de PEARSON qui ne retranscrit que les relations linéaires.

Ensuite, il a été déterminé la relation entre l'upwelling côtier et la récession pluviométrique pour chacune des 15 stations du mois où le lien est maximal, grâce aux coefficients de détermination ρ^2 et coefficients de corrélation ρ . Lorsque ρ est compris entre - 0,55 et 0,55, la relation est faible. Lorsque ρ est supérieur à 0,55, la relation est positivement forte et lorsque ρ est inférieur à - 0,55, la relation est négativement forte.

Aussi, le τ de KENDALL de formule $\tau = \frac{P-Q}{\frac{1}{2}n(n-1)}$ a été déterminé, avec n la taille d'un

échantillon, P le nombre de paires concordantes et Q le nombre de paires discordantes. En effet, et c'est sa principale différenciation avec le ρ de SPEARMAN, le τ de KENDALL se lit comme une probabilité. Il est le fruit de la différence entre 2 probabilités: celle d'avoir des paires concordantes et celle d'avoir des paires discordantes. Ainsi, lorsque $\tau = 0$, une paire d'observations a autant de chances d'être concordante que d'être discordante, lorsque $\tau = 1$ les paires sont concordantes et lorsque $\tau = -1$ les paires sont discordantes. Le test de significativité de Student a permis d'avoir un degré de confiance quant aux divers coefficients de corrélation de SPEARMAN et de KENDALL déterminés.

Enfin, il a été réalisé une comparaison de l'évolution interannuelle de la TSO de l'upwelling côtier à la pluviométrie du mois marqué par une plus grande interdépendance entre les 2 paramètres de l'étude par l'indice de Lamb de formule $x'_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sigma(x)}$.

Ces opérations sont réalisées avec les logiciels Excel et XLSTAT 2008 et les valeurs des ρ^2 , ρ et τ déterminées ont été spatialisées sur une carte à l'aide de MapInfo 8.0.

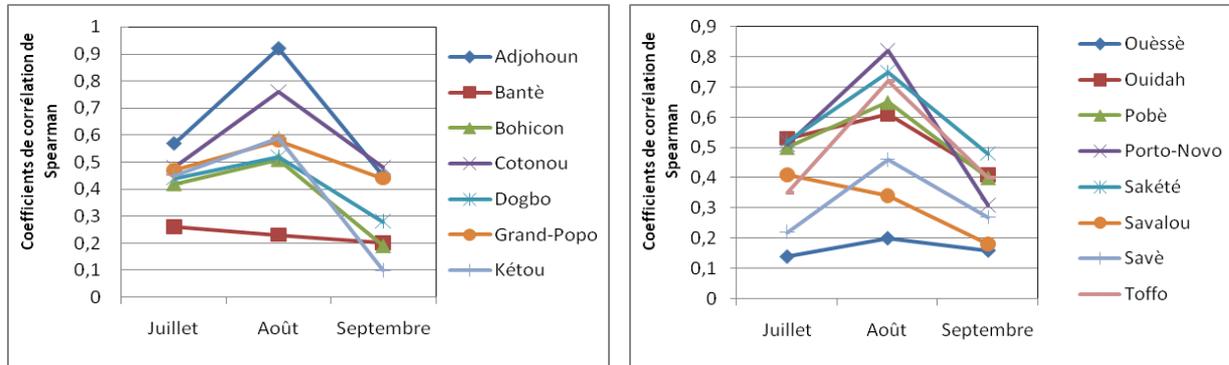
2. RESULTATS

À l'issue de l'application des différentes méthodes exposées, des résultats sont obtenus. Ils sont présentés à travers des argumentaires.

2.1. Détermination du mois où le lien entre la TSO et la pluviométrie est maximal

La figure 3 présente le coefficient de corrélation de SPEARMAN entre la TSO et la pluviométrie au niveau de chaque mois de JAS, et ce pour les 15 stations de 1960 à 2010.

Figure 3: Coefficient de corrélation de SPEARMAN entre la TSO et la pluviométrie de JAS de chaque station du Bénin méridional et central



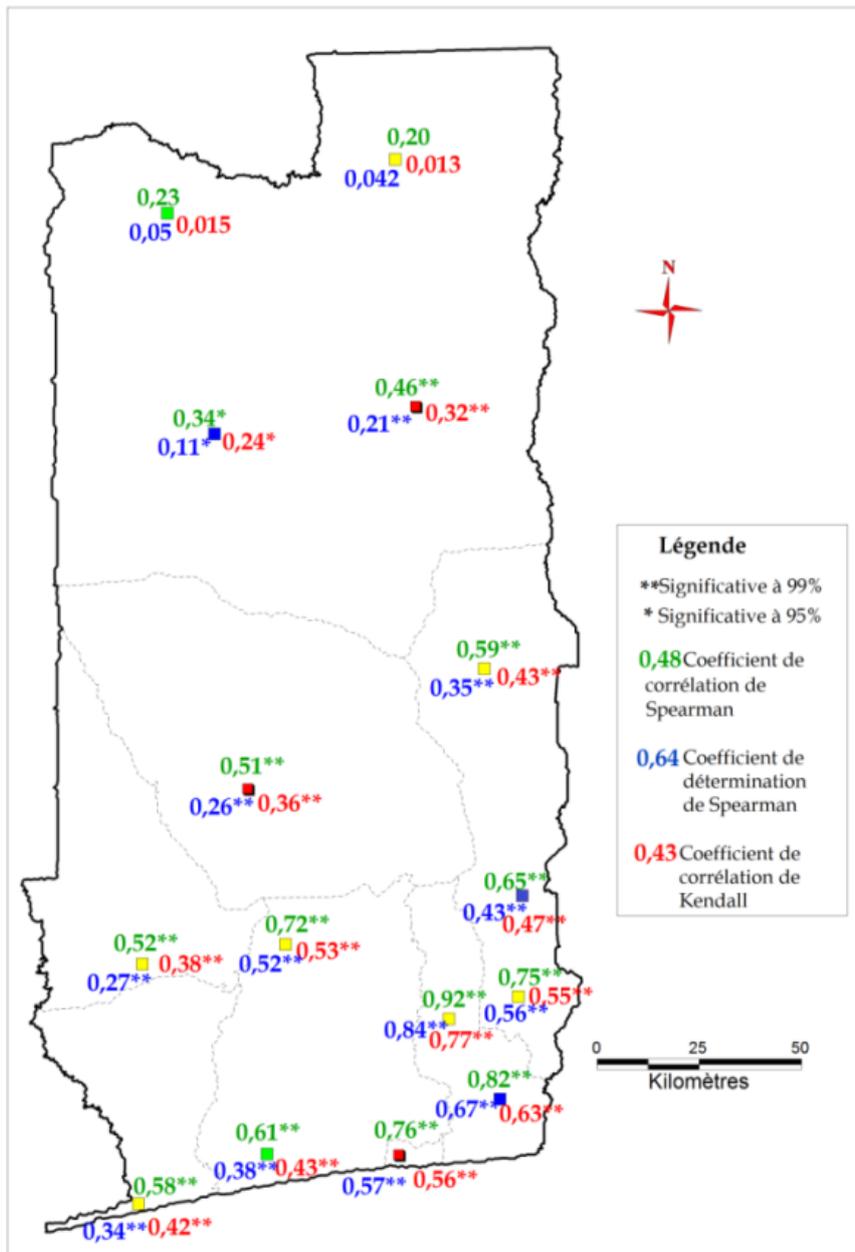
Source ASECNA (2010)

L'analyse de la figure 3 indique que les coefficients de corrélation de SPEARMAN entre la TSO de l'upwelling côtier et la pluviométrie sont les plus élevés durant le mois d'août, exceptées les stations de Savalou et de Bantè où les valeurs des coefficients de corrélation sont respectivement 0,41 et 0,26. Il en ressort que le lien entre l'upwelling côtier et la pluviométrie est maximal durant le mois d'août, qui est celui où l'upwelling côtier est à son optimum, avec une TSO inférieure à 24° C.

2.2. Relation entre l'upwelling côtier et la pluviométrie du mois d'août

La figure 4 présente un aperçu de la répartition spatiale des coefficients de corrélation et de détermination de SPEARMAN avec les coefficients de corrélation de KENDALL, entre la TSO de l'upwelling côtier et la pluviométrie d'août des 15 stations sur la période 1960-2010.

Figure 4: Corrélation entre la pluviométrie du mois d’août de chaque station et la TSO de l’upwelling côtier sur la période 1960-2010



Source ASECNA (2010)

L’analyse de la figure 4 révèle que les coefficients de corrélation de SPEARMAN et de KENDALL sont plus élevés dans la partie méridionale notamment dans les régions d’Adjohoun, Porto-Novo, Cotonou que dans la partie septentrionale du secteur d’étude, dans les régions d’Ouèssè et Bantè. Au Sud de la latitude de Bohicon, ces coefficients sont élevés dans la région du Sud-est par rapport au Sud-ouest (figures 5 et 6).

Figure 5: Relation latitude/coefficient de corrélation du Bénin méridional et central sur la période 1960-2010

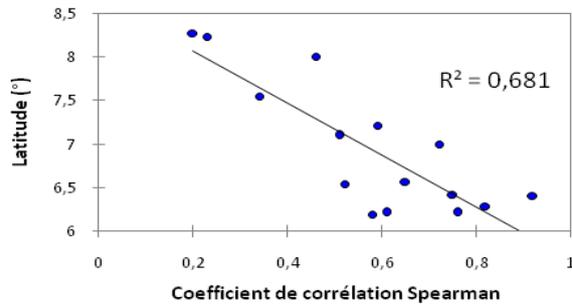
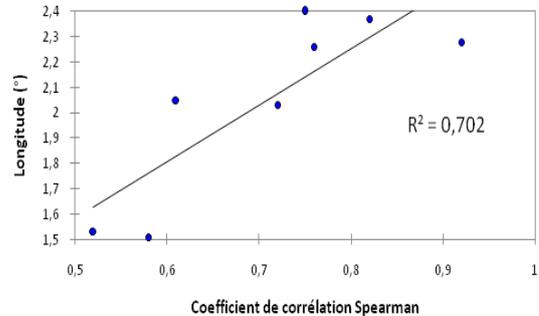


Figure 6: Relation longitude/coefficient de corrélation au Bénin méridional sur la période 1960-2010

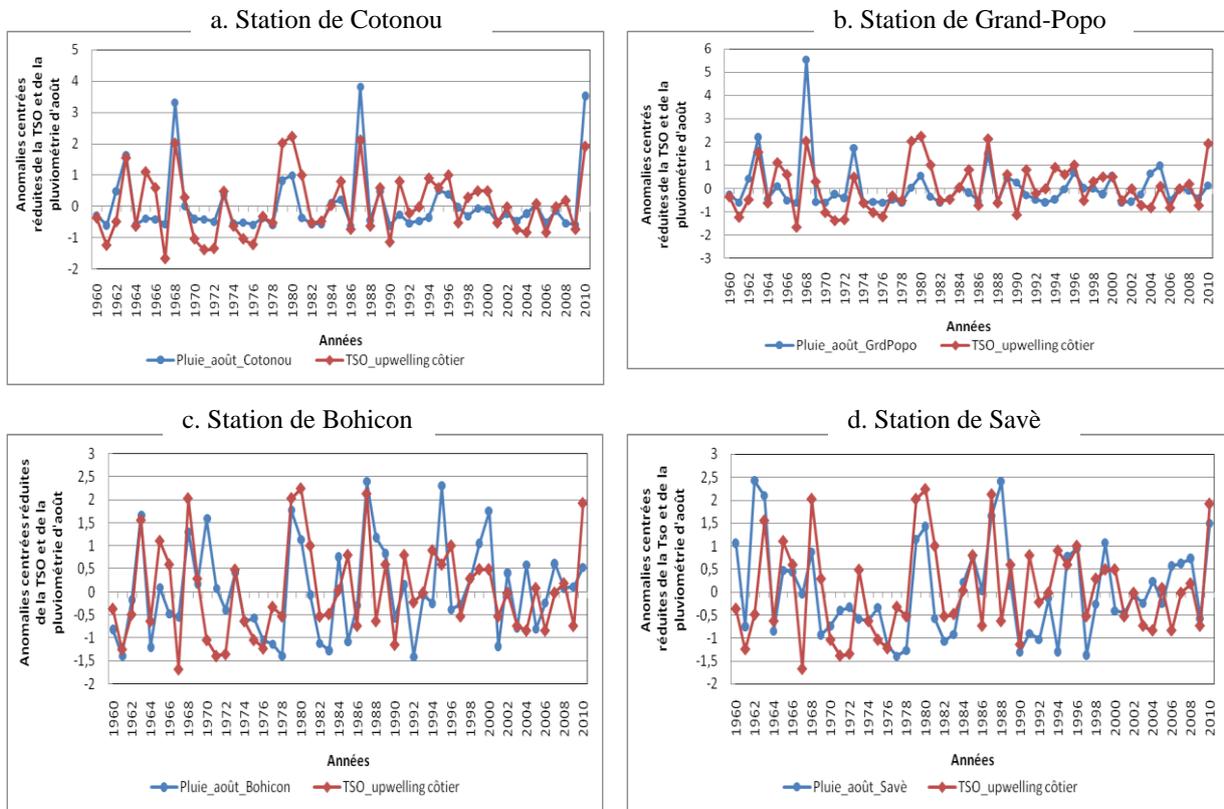


L'analyse des figures 5 et 6 indiquent respectivement que la latitude intervient pour 68 % dans la distribution latitudinale des coefficients de corrélation et que la longitude intervient pour 70,2 % dans la distribution longitudinale des coefficients de corrélation de Spearman dans la partie méridionale du Bénin. L'analyse de la distribution spatiale des coefficients de corrélation permet de déduire 2 éléments: (1) le lien entre l'upwelling côtier et la pluviométrie d'août diminue au fur et à mesure que la station s'éloigne de la côte (gradient décroissant sud-nord), etc.; (2) le lien entre l'upwelling côtier et la pluviométrie d'août diminue paradoxalement au fur et à mesure que la station s'éloigne de la région sud-est dans le sens est-ouest (gradient décroissant est-ouest).

2.3. Comparaison de l'évolution interannuelle de la TSO de l'upwelling côtier et de la pluviométrie du mois d'août

Les figures 7 (a, b, c, d) présentent la comparaison entre la TSO et la pluviométrie d'août des stations de Cotonou, de Grand-Popo, de Bohicon et de Savè sur la période 1960-2010.

Figure 7: Comparaison de l'évolution interannuelle de la pluviométrie d'août et de la TSO de l'upwelling d'août sur la période 1960-2010



Source: ASECNA, (2010)

L'analyse des figures 7 (a, b, c, d) indique que la similitude entre la TSO de l'upwelling côtier et la pluviométrie du mois d'août est plus importante dans la région de Cotonou. Mais, cette similitude diminue au fur et à mesure que les régions de Bohicon et de Savè sont parcourues. Paradoxalement, la station de Grand-Popo qui est une station côtière enregistre une faible similitude entre les 2 paramètres par rapport à la station de Cotonou qui est elle-même une station côtière. Néanmoins, il peut être déduit que lorsque la TSO est anormalement faible, la pluviométrie d'août est faible dans la région méridionale du Bénin, ainsi la petite saison sèche s'installe et vice versa. Dans la région centrale du Bénin, une baisse anormale de la TSO ne correspond pas toujours à une baisse de la pluviométrie d'août.

À l'issu des résultats de la détermination de la relation entre l'upwelling côtier et la pluviométrie du mois d'août et de la comparaison de l'évolution interannuelle de la TSO de l'upwelling côtier et de la pluviométrie du mois d'août, il peut être retenu que:

- l'influence de l'upwelling côtier sur la pluviométrie est importante durant le mois d'août;
- la pluviométrie d'août du Bénin méridional est plus influencée que la pluviométrie du Bénin

central par l'upwelling côtier;

- la pluviométrie d'août du secteur Sud-est du Bénin est plus influencée que la pluviométrie du secteur Sud-ouest du Bénin par l'upwelling côtier.

3. DISCUSSION

3.1. L'influence de l'upwelling côtier sur la pluviométrie du Bénin central

La diminution progressive des coefficients de corrélation entre les 2 paramètres vers le nord (Bénin central) déterminée dans la présente étude, confirme TOTIN H. (2010) selon laquelle il existerait un estompage progressif de l'effet de l'upwelling côtier sur la pluviométrie. Cet estompage induit une instabilité graduelle de l'atmosphère stable marine qui migre vers le nord, justifiant une augmentation continue de la pluviométrie du mois d'août en fonction de la latitude.

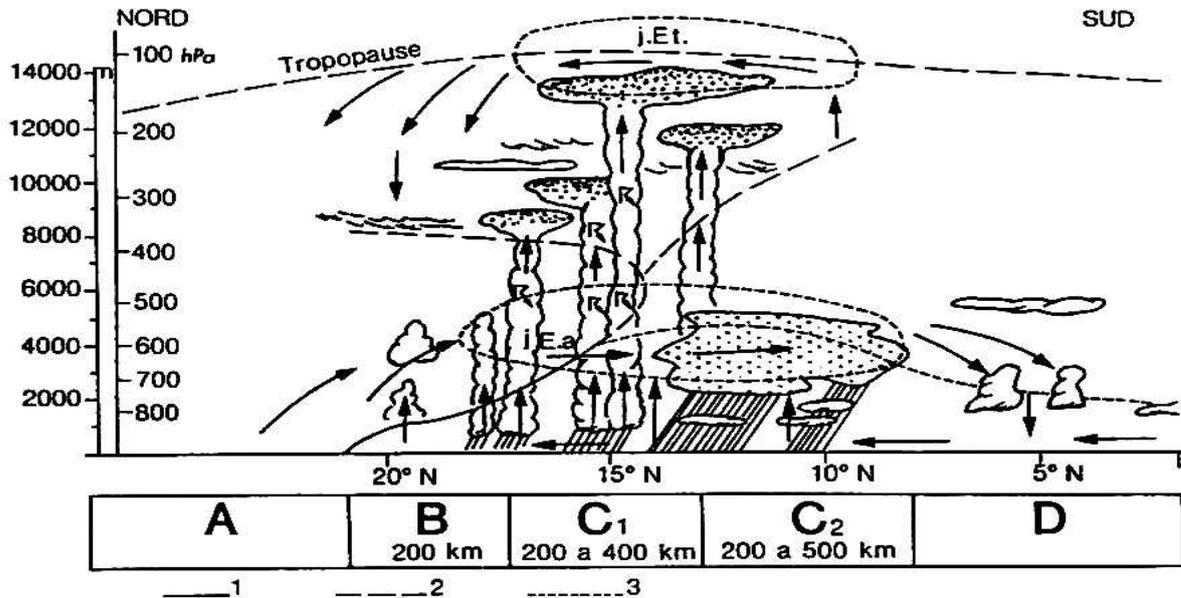
Les résultats de la présente recherche indiquent que la pluviométrie d'août du Bénin central est légèrement influencée par l'upwelling côtier. En effet, sur les 4 stations du Bénin central, 2 ont une corrélation moyenne avec l'upwelling côtier à hauteur de 99 % de significativité pour Savè et de 95 % de significativité pour Savalou. Egalement, les stations du secteur Nord à savoir Savalou et Savè connaissent une pluviométrie du mois d'août assez concordante avec la TSO de l'upwelling côtier (coefficient de KENDALL de Savè et Savalou étant respectivement 0,32 (95 % de confiance) et 0,24 (90 % de confiance)). Pour ainsi dire, une année sur 3 à Savè et une année sur 4 à Savalou connaît un régime pluviométrique qui concorde avec la TSO de l'upwelling côtier, ce qui n'est pas négligeable.

Ainsi, la variation du régime pluviométrique du Bénin central serait due en partie à l'influence réduite de l'upwelling côtier du fait de la distance entre les stations du Bénin central et les côtes de l'océan Atlantique. Mais, étant donné que l'influence de l'upwelling côtier sur la pluviométrie d'août dans le Bénin central est réduite, d'autres facteurs peuvent agir sur la pluviométrie d'août en la diminuant (régime bimodal) ou en l'augmentant (régime unimodal).

ELDIN M. (1971) a démontré que l'Afrique de l'Ouest est sous l'influence de plusieurs centres d'actions situées dans les latitudes tempérées (anticyclone de Sainte-Hélène, dépression sahélienne et ceinture des dépressions polaires). L'interaction de ces centres d'actions conditionne le positionnement des différents compartiments de la mousson (A, B,

C₁, C₂ et D), la figure 8.

Figure 8: Coupe schématique nord-sud en août de la troposphère au-dessus de l'Afrique de l'Ouest vers la méridienne origine



Source : VISSIN E. W. (2007) tiré de FONTAINE B. (1990)

Selon ELDIN M. (1971), dans l'hémisphère boréal, lorsque la ceinture des dépressions polaires est extrêmement haute en latitude, cela entraîne un renforcement maximal de la dépression sahélienne. De ce fait, la dépression sahélienne aspire la mousson qui monte très haut en latitude (FIT très haut en latitude). Alors, la zone D s'établit au-delà du 8° parallèle Nord (Bénin central), ce qui induit une installation de la petite saison sèche. Donc, une ceinture des dépressions polaires extrêmement haute en août entraîne un régime bimodal au Bénin central. Il peut être déduit que, lorsque la ceinture des dépressions polaires serait basse en latitude, la zone C₂ s'installe au Bénin central au détriment de la zone D. Alors, la pluviométrie en août serait élevée, ce qui donne un régime unimodal au Bénin central.

Pour ELDIN M. (1971), dans l'hémisphère austral, lorsque l'anticyclone de Sainte-Hélène est très renforcée ou un peu plus proche de l'équateur que d'habitude, il y a un refoulement important de la mousson vers le nord, ce qui favorise l'installation de la zone D au niveau du Bénin central. De ce fait, il y a une petite saison sèche au Bénin central. Alors, l'anticyclone de Sainte-Hélène très fort ou assez proche de l'équateur favorise un régime bimodal au Bénin

central. Il peut être déduit que l'anticyclone de Sainte-Hélène faible ou loin de l'équateur entraîne l'installation de la zone C₂ au Bénin central, et donc, correspond à un régime unimodal.

Comme le positionnement des compartiments de la mousson sur un lieu est la résultante des forces des centres d'action boréale et australe, alors:

- lorsque l'anticyclone de Sainte-Hélène serait fort que d'habitude et que la ceinture des dépressions polaires serait très haute en latitude en un mois d'août d'une année *x*, cette année *x* enregistrerait un régime bimodal au Bénin central ;
- lorsque l'anticyclone de Sainte-Hélène serait faible que d'habitude et que la ceinture des dépressions polaires serait basse en latitude en un mois d'août d'une année *y*, cette année *y* enregistrerait un régime unimodal au Bénin central;
- si en un mois d'août d'une année *z* l'anticyclone de Sainte-Hélène est fort et la ceinture des dépressions polaires est basse en latitude ou c'est l'anticyclone de Sainte-Hélène qui est faible et la ceinture des dépressions polaires est haute en latitude, le type de régime pluviométrique de cette année *z* qui en découlera serait fonction de la résultante des deux centres d'actions.

Alors, le facteur qui engendre la variation du régime pluviométrique dans le Bénin central serait en grande partie dû à la dynamique des centres d'actions boréal et austral et du résultat de leur interaction. L'upwelling côtier n'est pas à écarter d'office dans le déterminisme du régime pluviométrique du Bénin central, mais il faut y voir un effet faible.

3.2. L'influence de l'upwelling côtier sur la pluviométrie au Bénin méridional

Les résultats de la présente étude confirment les estimations et/ou les observations de VIERS G. (1967), de BOKO M. (1988), d'EDJAMÉ K. (2007), de HOUNDÉNOU C. (2008) et d'AMOUSSOU E. (2010) quant à l'idée selon laquelle la récession pluviométrique de JAS serait due à l'upwelling côtier. Ce lien est plus fort et significatif durant le mois d'août entre la pluviométrie et la TSO de l'upwelling côtier.

Les résultats obtenus confortent les travaux réalisés par GALLARDO Y. (1993) qui, sur la série 1978-1984 à la station côtière d'Abidjan, a déterminé que les dernières fortes pluies (convection profonde) avaient cessé dans 86 % des cas entre les 16 et 23 juin avec des températures côtières comprises entre 25,2 et 26,8 °C. Ainsi donc, lorsque la TSO est inférieure à 26 °C, les basses couches de l'atmosphère se refroidissent. La convection étant

nulle, la convergence de l'air est nulle voire négative, ce qui a pour corolaire l'absence de développement vertical des nuages, ce qui entraîne une stabilité de l'air, ce qui diminue les précipitations. C'est la récession pluviométrique centrée sur le mois d'août au Bénin méridional.

Cependant, l'upwelling côtier n'est pas le seul facteur influençant la pluviométrie d'août au Bénin méridional. En effet, les travaux de ELDIN M. (1971) ont montré que la dynamique des centres d'actions boréal et austral et le résultat de leur interaction, conditionnent le balancement des différents compartiments de la mousson ouest-africaine. En effet, selon l'auteur, la forte pluviométrie enregistrée en août au niveau des stations des côtes ouest-africaines en 1968 (ce qui peut être observé sur les figures 7 a et b) est due à un stationnement du compartiment C₂ au dessus de la côte ouest-africaine. Ce positionnement anormal du compartiment C₂ trouverait son explication dans la descente de la ceinture des dépressions polaires.

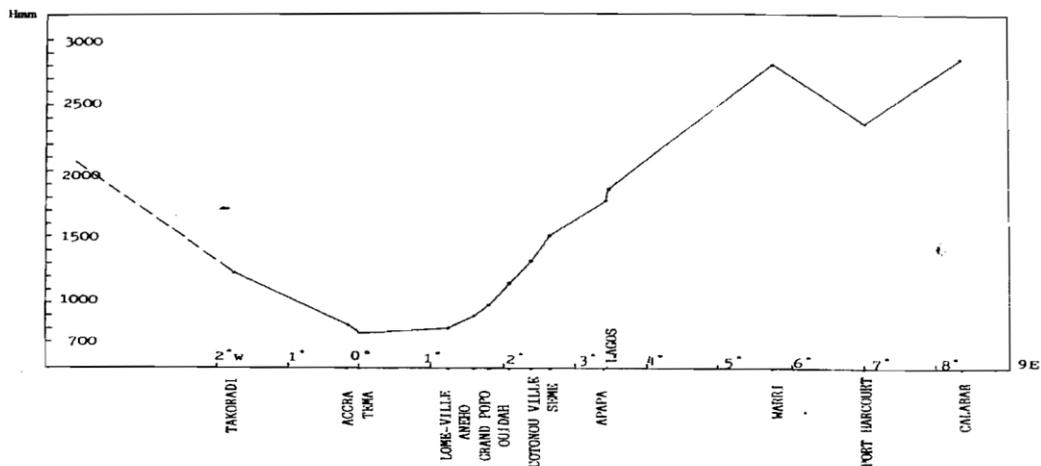
Il apparaît que les pluviométries exceptionnelles durant le mois d'août au Bénin méridional (1968, 1987 et 2010) pourraient correspondre à un stationnement du compartiment C₂. Néanmoins, seule une étude consacrée aux positionnements respectifs du compartiment C₂ et de la ceinture des dépressions polaires, pourrait être très utiles dans la compréhension du climat ouest-africain.

Il ressort des résultats obtenus et de l'analyse des travaux antérieurs que, la pluviométrie du mois d'août au Bénin méridional est influencée par l'upwelling côtier, mais le stationnement du compartiment C₂ au-dessus du Bénin méridional perturbe la pluviométrie en l'augmentant.

3.3. Influence de l'upwelling côtier sur la pluviométrie d'août au sud-ouest du Bénin

Les stations du Bénin méridional qui connaissent une faible corrélation entre la TSO de l'upwelling côtier et la pluviométrie d'août, sont celles situées dans la diagonale de sécheresse encore nommée couloir de sécheresse ou plus spécifiquement le Dahomey Gap. Cet anomalie climatique a été mentionnée par plusieurs auteurs (BOKONON-GANTA E. (1987); BOKO M. (1988); AFOUDA F. (1990); HOUNDENOU C. (1999); EDJAME K. (2007). Ainsi, la question est de savoir quelle est le facteur qui favorise le Dahomey Gap. Des tentatives ont été menées dans le but d'expliquer le déficit pluviométrique caractérisant la côte océanique entre Accra et Lomé (figure 9).

Figure 9: Profil méridional des cumuls annuels de hauteurs de pluie dans le golfe de Guinée



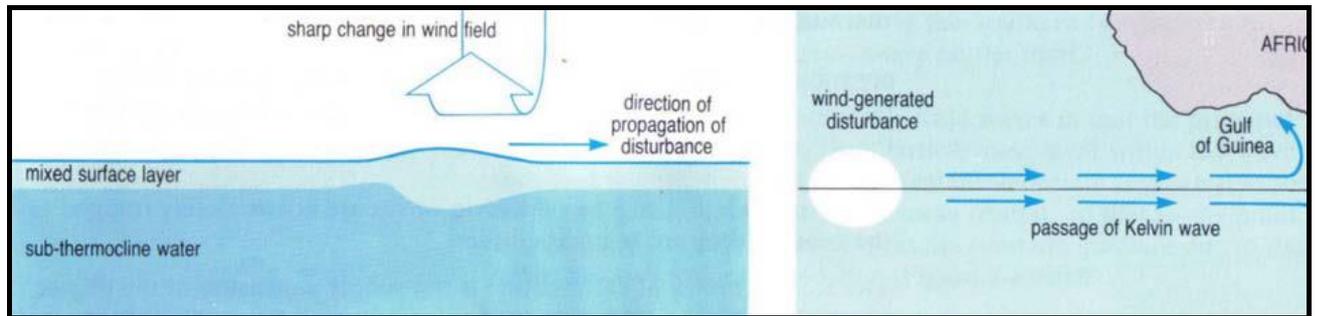
Source : EDJAME K. (2007)

De nombreuses causes ont été identifiées. Le sens parallèle du vent par rapport à la côte qui génère l'upwelling côtier, d'une part et la présence d'une subsidence aérienne, d'autre part.

Le sens parallèle du vent par rapport à la côte est une idée émise par GALLARDO Y. (1993) et reprise par EDJAME K. (2007) selon PITON B. (1987) et défendue par TOTIN H. (2010), pour expliquer les faibles pluies sur la zone côtière entre le Ghana et le Togo. Selon cette conception, le sens parallèle du vent par rapport à la côte induit par la dérive d'Ekman, un upwelling côtier qui inhibe les processus pluviogènes caractérisés par une diminution des mouvements ascendants d'air chaud au niveau de la côte entre Accra et Lomé.

Cependant, HOUGHTON W. R. (1983) a montré qu'il n'existe pas de corrélation suffisante entre l'upwelling côtier et le sens parallèle du vent par rapport à la côte. De fait, le vent bien qu'il soit assez parallèle à la côte, n'est pas le responsable de l'upwelling côtier comme l'ont montré SALANON I. (2009), TOULAY E. (2010), HOUNSOU-GBO A. (2010) et ADDISON N. (2010). À l'issue de leurs travaux, l'onde de KELVIN est la plus cohérente (figure 10) pour expliquer l'upwelling côtier du golfe de Guinée.

Figure 10: Diagramme illustrant l'onde de Kelvin



Source: ADDISON N. (2010)

La figure 10 illustre comment une perturbation du champ de vent peut induire une modification de la couche supérieure océanique (à gauche), qui va ensuite se propager vers l'est sous la forme d'une onde de KELVIN équatoriale. Une fois parvenue à la frontière est (à droite), cette onde de KELVIN équatoriale va générer des ondes de KELVIN côtières de part et d'autre de l'équateur se propageant vers les hautes latitudes (BOURLÈS B., 2008).

En effet, les ondes, du fait des perturbations des courants qu'elles induisent, vont jouer un rôle très important pour le mélange des eaux et le changement de leurs propriétés. Mais il est aussi très important de réaliser que ces ondes, notamment à l'équateur, vont permettre de transmettre des perturbations du milieu océanique sur de grandes distances (comme le son dans l'air). Ainsi, des perturbations se produisant à une longitude donnée d'un bassin équatorial vont pouvoir également perturber le milieu aux autres longitudes. Ceci est désigné par le terme de «forçage lointain», ou «remote forcing» en anglais.

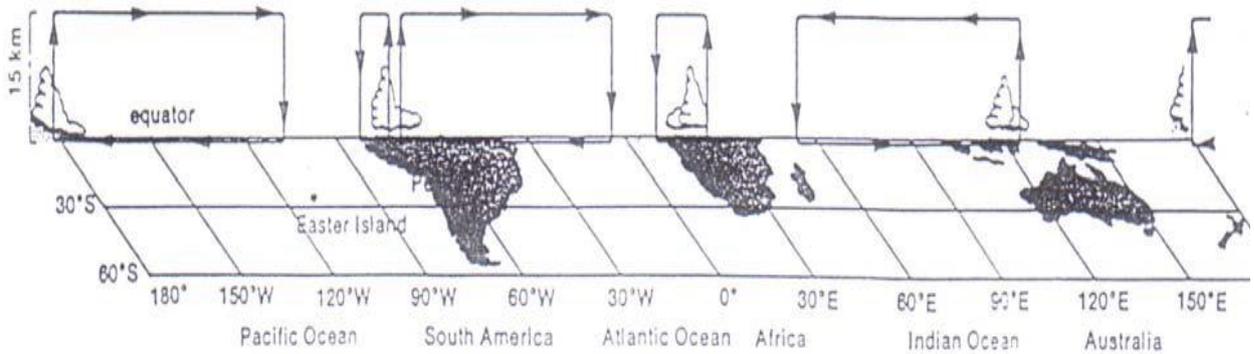
Alors, le vent local de la côte n'est pas responsable de l'upwelling côtier. Cependant, vue les résultats obtenus, il apparaît que le secteur Sud-est soit plus sous l'emprise de l'upwelling côtier que le secteur Sud-ouest. Autrement dit, l'upwelling côtier n'est pas à l'origine de la faible pluviométrie du secteur côtier occidental, mais participe en une certaine mesure à ce phénomène de Dahomey gap.

Par méthode éliminatoire, il ne reste que la 2nde hypothèse: **la subsidence aérienne.**

Selon BOKO M. (1988), entre 600 et 1000 km à l'arrière de la trace au sol de la convergence intertropicale, les sondages aérologiques indiquent une subsidence d'altitude, ce qui a pour conséquence d'inhiber les processus pluvio-gènes. La figure 11, présenté par BOURLÈS B.

(2008), montre la circulation de WALKER le long de l'équateur.

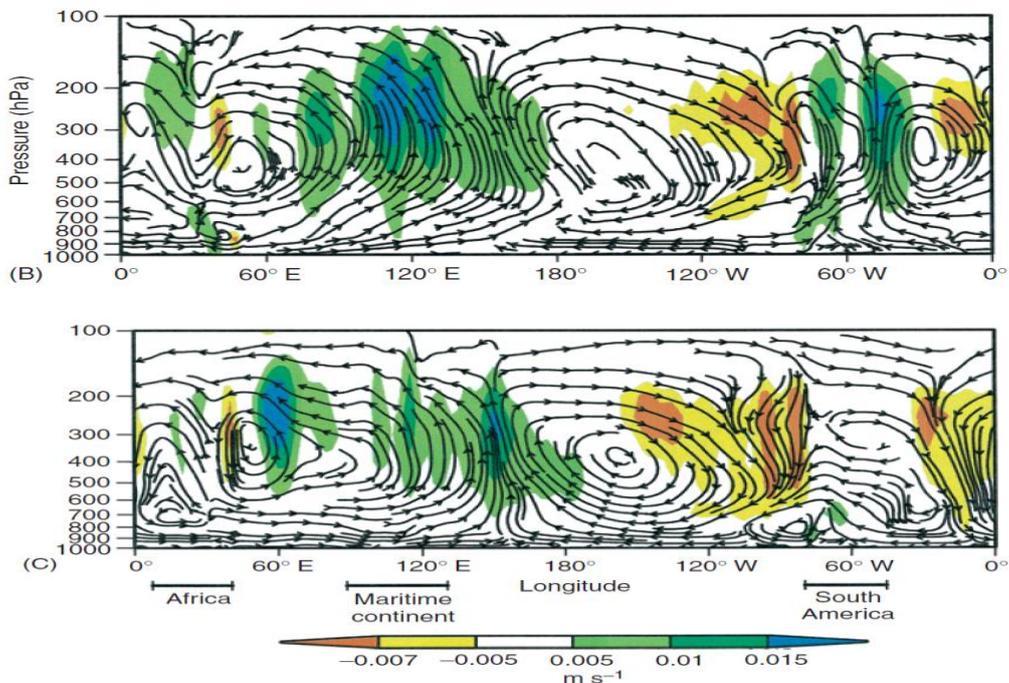
Figure 14: Cellules zonales de la circulation de Walker le long de l'équateur



Source: BOURLÈS B. (2008)

L'analyse de la figure 11 porte à croire qu'au méridien de Greenwich à l'équateur, il existe une subsidence. Aussi, la figure 12 proposée par LAU K-M. et YANG S. (2002), présente la circulation atmosphérique équatoriale Est-ouest. Cette figure tire sa source des analyses des données de l'US National Centers for Environmental Prediction and National Center for Atmospheric Research sur une période allant de 1949 à 1999.

Figure 12: Flux pour le mois de janvier (B) et pour le mois de juillet (C)



Source: LAU K-M. et YANG S. (2002)

La figure 12 indique que durant toute l'année il existe une subsidence aérienne au niveau du

méridien de Greenwich à l'équateur. En effet, cette subsidence aérienne étant affaiblie en janvier (élément B de la figure 12) et se renforce voire s'intensifie en juillet (élément C de la figure 12).

Ainsi, il apparaît selon les conceptions de circulation de WALKER confirmés par l'analyse des flux aériens, que la faible pluviométrie observée entre Accra et Lomé sont due à une subsidence aérienne centrée sur le méridien 0°. Cette conception cadre assez bien avec le profil méridional des cumuls annuels de hauteurs de pluie dans le golfe de Guinée. En effet, tout en descendant à l'équateur, la subsidence sera déviée à la guise de l'alizé maritime qui vient du sud-ouest et aussi par la force de Coriolis. Cette subsidence aérienne inhibe les effets pluviogènes, ce qui explique cette baisse de la pluviométrie notée de Tema à Lomé.

La diagonale de sécheresse devrait être plus élargie, mais elle est amoindrie voire estompée grâce à l'effet orographique du relief du Ghana et du Togo. Mais étant donné que le Sud et le Centre de Bénin sont dépourvus de relief orographique, le prolongement de cette subsidence centrée vers la côte, remonte à l'intérieur du continent pour donner naissance à cette diagonale de sécheresse qui touche les départements de Mono, de Couffo, de Zou et de l'Atlantique Nord-ouest.

Ainsi donc, la subsidence aérienne de la cellule de WALKER inhibe les flux ascendants dans le secteur du Sud-ouest du Bénin; c'est ce qui explique la faible variation interannuelle de la pluviométrie enregistrée à Grand-Popo comparée à la forte variation interannuelle de la TSO de l'upwelling côtier (figure 7b). Il se déduit que la pluviométrie du mois d'août dans le secteur du sud-ouest du Bénin est plus influencée par la subsidence de la cellule de WALKER que par l'upwelling côtier.

CONCLUSION

La présente étude révèle que la pluviométrie d'août est plus influencée par l'upwelling côtier au Bénin méridional que dans le Bénin central. De plus dans la région méridionale du Bénin, le lien entre l'upwelling côtier et la pluviométrie est plus important dans la région du Sud-est que dans la région du Sud-ouest.

Cependant, le positionnement des différents compartiments de la mousson et la subsidence de la cellule de WALKER participent avec l'upwelling côtier dans la modulation de la

pluviométrie de la petite saison sèche au Bénin méridional et central.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADDISON N. (2010): Investigation of the upwelling mechanism in the gulf of Guinea. *Mémoire de Master2 en Océanographie Physique et Applications*, CIPMA/FAST/UAC, Cotonou Bénin, CIPMA Publishing 2010, 58 p.

AFOUDA F. (1990): L'eau et les cultures dans le Bénin central et septentrional : Etude de la variabilité des bilans de l'eau dans leurs relations avec le milieu rural de la savane africaine. *Thèse de doctorat nouveau régime*. Paris IV-Sorbonne. 428 p.

AMOUSSOU E. (2010): Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest). *Thèse de doctorat* ; Université de Bourgogne, Dijon, 315 p.

BOKO M. (1988): Climat et communautés rurales du Bénin : Rythmes climatiques et rythme de développement. *Thèse d'Etat ès lettres*, Dijon 607 p.

BOKONON-GANTA E. (1987): Les climats de la région du Golfe de Guinée. *Thèse de Doctorat du 3^{ème} cycle*. Institut de Géographie, Université de Paris-Sorbonne, Paris, 248 p + annexe.

BOURLÈS B. (2008): Cours d'introduction à l'océanographie. Master2 d'Océanographie Physique et Application, CIPMA, Chaire UNESCO, FAST, 193 p.

EDJAMÈ K. (2007): Régime des précipitations sur le littoral océanique dans le Golfe de Guinée. *Revue du CAMES - Nouvelle Série B*, Vol. 008 N° 1-2007 (1^{er} Semestre).

ELDIN M. (1971): Le climat. Ed ORSTOM, Abidjan, Côte d'Ivoire, 34 p.

GALLARDO Y. (1993): Les conditions océaniques du maximum de pluies littorales ivoiriennes en juin *in* Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire, ed ORSTOM, pp 63-73.

GRIST, J. P., and Nicholson S. E. (2001): A Study of the Dynamic Factors Influencing the Rainfall Variability in the West Africa Sahel. *Journal of Climate*, n°14, pp 1337 – 1359.

HOUNDENOU C. (1999): Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide, diagnostic et modélisation. UMR 50 80 du CNRS, climatologie de l'espace tropicale, 341 p.

- HOUNDENOU C. (2008): Variabilité des précipitations de 1961 à 1990 en Afrique guinéenne au Sud Bénin et champ thermique de l'Atlantique tropical. *In Climat et Développement*; 5. Edition LACEEDE, pp 91-101.
- HOUGHTON W. R., (1973) : Evaporation during Upwelling in Ghanaian Coastal Waters. Department of Physics, University of Ghana, Legon, October 1973, 3 p.
- HOUNSOU-GBO A. (2010): Interactions SST-vent dans l'Atlantique équatorial à partir des observations satellitaires (2000-2008). *Mémoire de Master2 en Océanographie Physique et Applications*, CIPMA/FAST/UAC, Cotonou Bénin, CIPMA Publishing 2010, 42 p.
- KPANOU M. (2013): Influence de l'upwelling côtier sur la récession pluviométrique de juillet-août-septembre au Bénin méridional et central. *Mémoire de Maîtrise*, DGAT/FLASH/UAC, 94 p.
- LAU K-M & YANG S. (2002): Walker circulation. Copyright Elsevier Science Ltd, Ed : M. SHANKAR, USA, 6 p.
- LEDUC – LEBALLEUR M. (2012): Influence du golfe de Guinée sur la mousson ouest-africaine. *Thèse de Doctorat*; Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, Paris, 152 p.
- PITON B. (1987): Caractéristiques hydroclimatiques des eaux côtières du Togo (Golfe de Guinée). Document scientifique, 1987, ORSTOM, Brest, 39 p.
- SALANON I. (2009): Altimétrie et température de surface de la mer le long des côtes Nord du Golfe de Guinée et de l'Afrique de l'Ouest. *Mémoire de Master2 en Océanographie Physique et Applications*, CIPMA/FAST/UAC, Cotonou Bénin, CIPMA Publishing 2010, diapositive.
- TAPSOBA D. (1997): Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques ouest africains et de leur récent changement. *Thèse de doctorat*. Université Paris XI (ORSAY), Paris, 300 p.
- TOTIN H. (2010): Sensibilité des eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier du Bénin à l'évolution du climat et aux modes d'exploitation : Stratégies de gestion durable. *Thèse de doctorat*. DGAT/FLAH/UAC, 300 p.
- TOULAY E. (2010): Contribution à l'étude de la ve côtier du Golfe de Guinée: «causes de la chute importante des SSTs entre juillet et août 1999». *Mémoire de Master2 en Océanographie Physique et Applications*, CIPMA/FAST/UAC, Cotonou Bénin, CIPMA Publishing 2010, diapositive.

VIERS G. (1967): *Eléments de climatologie*. Ed Nathan, Paris, 1967, 224 p.

VISSIN E. W. (2007): *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de doctorat* ; Université de Bourgogne, Dijon, 311 p.

YABI I. & BOKO M. (2007): *Recherche sur la variabilité de l'humidité dans le centre du Bénin (Afrique de l'Ouest)*. In *Climat et Développement*; 3. 2007 Edition LECREDE, pp. 55-65.