

Vent
Transport d'Ekman
Upwelling
Sénégal

Wind
Ekman transport
Upwelling
Senegal

Fluctuations des vents et variabilité de l'upwelling devant les côtes du Sénégal

Claude ROY

Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM), CRODT/ISRA, BP n° 2241, Dakar, Sénégal.

Reçu le 18/1/88, révisé le 2/2/89, accepté le 20/2/89.

RÉSUMÉ

A partir des mesures de vent effectuées de 1963 à 1986 à la station météorologique de l'aéroport de Dakar-Yoff (Sénégal), le cycle saisonnier de la vitesse et de la direction du vent est décrit. En hiver et au printemps les alizés continentaux (secteur Nord-Nord-Est) et maritimes (secteur Nord-Ouest-Nord) sont dominants. En été et en automne, les vents sont faibles et variables en direction; on observe cependant de brèves incursions des alizés.

La période 1963-1986 est caractérisée par la succession de périodes de forte et de faible activité des alizés en saison froide (novembre à mai), d'une durée moyenne de sept ans. Des fluctuations similaires sont observées pour les directions prépondérantes des alizés en saison froide: les alizés de secteur N-NE constituent la majeure partie des observations en période de vents forts; par contre les alizés de secteur NW-N sont dominants en période de vents faibles.

Dans un upwelling au sens d'Ekman, l'intensité des flux verticaux est fonction de la vitesse du vent et de son orientation par rapport à la côte. L'orientation du plateau continental n'étant pas la même au nord et au sud du Cap-Vert, l'intensité de l'upwelling est différente de part et d'autre de la presqu'île. Au cours des périodes d'alizés faibles ou de secteur Nord-Ouest-Nord, l'upwelling au nord de la presqu'île est atténué par rapport à celui situé au sud. En période d'alizés forts ou de secteur Nord-Nord-Est, l'intensité de ces upwellings est comparable. Les fluctuations d'intensité et l'hétérogénéité spatiale des upwellings affectent les apports en sels minéraux dans les deux zones. La variabilité inter-annuelle des températures de surface de part et d'autre de la péninsule est également corrélée négativement avec l'intensité des upwellings.

Oceanologica Acta, 1989. 12, 4, 361-369.

ABSTRACT

Fluctuations of wind and upwelling variability off the Senegalese coast

From wind data collected between 1963 and 1986 at the meteorological station of Dakar-Yoff airport (Senegal), the mean annual cycle of wind speed and wind direction is analysed. During winter and spring, continental (N-NE direction) and maritime (NW-N direction) trade-winds are prevailing. In summer and autumn, winds are weak and variable, brief occurrences of the trade-winds being observed.

From 1963 to 1986, the long-term variability of the trade-winds intensity is characterized by an alternance between seven-year periods of high, and seven-year periods of weak, trade-wind velocities. For the trade-wind directions, similar fluctuations are observed: N-NE dominates during periods of strong activity of the trade-winds, and NW-N is predominant during periods of weak activity.

In an Ekman-type upwelling, the intensity of the vertical motion is a function of wind speed and wind direction. The continental shelf shows a shape that is different north of the Cap-Vert peninsula from that south of the peninsula; therefore, upwelling intensity will differ in these two areas. During periods of weak trade-wind intensity, the upwelling is weaker north of the peninsula than south. During periods of high

trade-wind intensity, similar upwelling intensities are observed in the two areas. Nutrient inputs also appear to be related to these spatial fluctuations of upwelling intensity. Interannual variability of sea surface temperatures in the two areas is negatively correlated to upwelling intensity.

Oceanologica Acta, 1989. 12, 4, 361-369.

INTRODUCTION

Au cours des trente dernières années, la circulation atmosphérique au-dessus de l'Atlantique tropical et du continent africain a connu de profondes modifications dont une des conséquences les plus spectaculaires a été la sécheresse frappant la zone sahélienne à partir des années soixante dix (Hastenrath et Lamb, 1977; Lamb, 1978; Hastenrath, 1984). Ces changements climatiques peuvent avoir une répercussion importante sur l'écosystème marin. En effet, les alizés sont le moteur des upwellings permanents ou saisonniers qui se développent le long du littoral ouest-africain, du Maroc au Sénégal (Wooster *et al.*, 1976). Les alizés du nord repoussent les eaux côtières vers le large, à la côte ce déséquilibre est compensé par un flux vertical qui apporte en surface des eaux froides profondes, riches en éléments minéraux. Ces apports d'éléments minéraux dans la couche euphotique sont à l'origine de la forte productivité des zones d'upwellings côtiers (Jacques et Tréguer, 1986). Dans ces écosystèmes le vent est donc un facteur clé, les fluctuations saisonnières ou inter-annuelles des apports en sels minéraux sont en grande partie déterminées par la variabilité des vents.

L'importance des facteurs climatiques et notamment de l'upwelling sur la pêche au Sénégal a été abondamment illustrée. Fréon (1984) a montré que les fluctuations inter-annuelles de l'intensité de l'upwelling permettent d'expliquer une part importante de la variabilité de l'abondance apparente des sardinelles et de modéliser la production en fonction de l'effort de pêche et du régime des vents. De même, le cycle migratoire et l'intensité des migrations d'*Epinephelus aeneus* sont influencés par les fluctuations saisonnières et inter-annuelles de l'upwelling au nord du Cap-Vert (Cury et Roy, 1988).

Teisson (1982) et Portolano (1986) ont étudié la réponse de l'océan aux fluctuations de la vitesse des vents au Sénégal depuis les années 1970. Ces auteurs ont montré que, à l'échelle saisonnière, la variabilité du vent permet d'expliquer une part importante des fluctuations de l'intensité de la résurgence mesurée par les températures de surface côtières. A partir de données mensuelles de la vitesse du vent, Teisson (1982) a mis en évidence une périodicité voisine de seize ans et une décroissance linéaire de la vitesse depuis 1947. Nous présenterons tout d'abord dans cette étude une analyse détaillée des fluctuations de la vitesse et de la direction du vent depuis les années 1960. Ensuite, l'influence de la variabilité de la vitesse et de la direction du vent sur la dynamique spatio-temporelle de l'upwelling de part et d'autre de la presqu'île du Cap-Vert sera analysée.

LOCALISATION DES STATIONS ET CALCULS DES PARAMÈTRES

Le littoral sénégalais s'étend de 12°30'N à 16°N. Située à 14°40'N, la presqu'île du Cap-Vert sépare le domaine maritime sénégalais en deux régions aux caractéristiques topographiques distinctes : au Nord le plateau continental est étroit et orienté N-NE, au sud de la presqu'île le plateau continental s'élargit et le talus continental s'incurve vers l'Est jusqu'à 13°30' de latitude Nord (fig. 1).

La station météorologique de l'aéroport de Dakar-Yoff est située à l'extrémité de la péninsule du Cap-Vert (fig. 1). Les données recueillies à cette station sont représentatives du régime des vents auquel est soumis le domaine maritime sénégalais (Rébert, 1983). Nous nous sommes limités à la période 1963-1986, car les données y sont homogènes : avant 1961, les données n'étaient enregistrées que toutes les six heures, en juillet 1962 la hauteur de l'anémomètre au-dessus du sol est passée de 18 à 11,45 m. A partir de ces données tri-horaires, la vitesse du vent, les fréquences moyennes dans huit secteurs de 45° chacun (N-NE, NE-E, E-SW, ..., NW-N) ont été calculées avec un pas de temps d'une quinzaine. Le cycle moyen annuel de la vitesse, des fréquences de vent dans les huit secteurs et les valeurs moyennes de ces paramètres par saison ont ensuite été calculés.

A partir des données de vent tri-horaires, le transport d'Ekman par quinzaine a été calculé. Ce paramètre estime la dérive de la couche superficielle de l'océan sous l'action du vent, le transport résultant est orienté

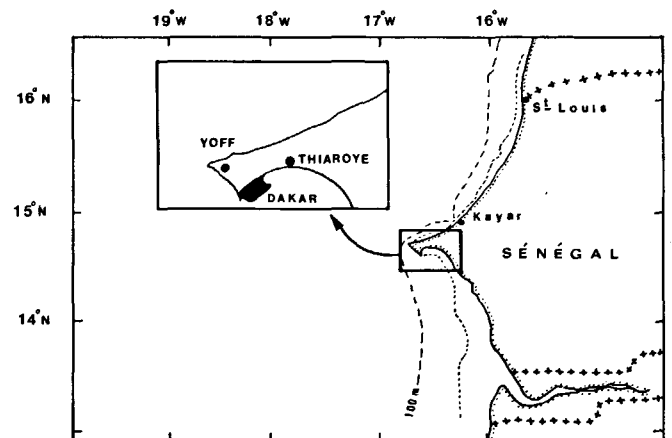


Figure 1
Localisation des stations et bathymétrie de l'isobathe 100 m le long des côtes sénégalaises.
Position of the stations and bathymetry of the 100 m isobath along the Senegalese coast.

à 90° à droite du vent dans l'hémisphère Nord. Ce paramètre est donné par la relation suivante :

$$\vec{M} = \frac{1}{f} \cdot \vec{\tau} \times \vec{k}$$

\vec{k} = vecteur unité vertical ascendant ;

f = paramètre de Coriolis.

et

$$\vec{\tau} = \rho_a \cdot Cd \cdot |\vec{V}| \cdot \vec{V}$$

\vec{V} = vitesse du vent ;

ρ_a = densité de l'air ;

Cd = coefficient de frottement à l'interface.

Nous avons choisi pour le coefficient Cd la valeur 0,0013 et pour la densité de l'air : 0,0012 g/cm³ (Bakun, 1973). Le transport d'Ekman exprimé en kg/s par mètre de côte a été transformé en m³/s par mètre de côte en considérant la densité de l'eau de mer égale à 10³ kg/m³.

La composante du transport d'Ekman normale à la côte et orientée vers le large est utilisée comme indice de l'intensité des remontées d'eaux froides (Bakun, 1973 ; Bakun et Parrish, 1980), cet indice sera noté par la suite IUC (Indice d'Upwelling Côtier). L'IUC a été calculé pour les régions situées au nord et au sud du Cap-Vert, en prenant respectivement 20 et 340° comme orientation du talus continental par rapport au Nord.

Les relevés quotidiens des températures de surface aux stations côtières de Kayar et Thiaroye, situées de part et d'autre de la presqu'île du Cap-Vert, ont été utilisés pour calculer une valeur moyenne de la température par quinzaine. A Kayar les données existent depuis 1972 et à Thiaroye depuis 1966.

RÉGIME SAISONNIER DES VENTS A YOFF

La climatologie de l'Atlantique tropical Est est dominée par l'influence des anticyclones des Açores et de Sainte-Hélène, les mécanismes mis en jeu et leur dynamique sont maintenant bien connus et abondamment décrits (Dhonneur, 1974 ; Leroux, 1983 ; Wauthy, 1983). Le balancement saisonnier des deux anticyclones de l'Atlantique tropical se traduit au Sénégal par l'alternance de deux saisons aux caractéristiques bien marquées. En hiver et au printemps, de novembre à mai, un régime d'alizés s'établit. Au cours de cette saison, la vitesse du vent croît régulièrement du mois d'octobre au mois de décembre pour atteindre, en moyenne, 5 m/s (fig. 2). La vitesse du vent se stabilise autour de cette valeur du mois de décembre à la première quinzaine de février. Après un nouvel accroissement en février et mars, les vitesses maximales sont enregistrées au cours du mois d'avril (fig. 2). En été et en automne, de juin à octobre, les alizés font place à un régime de vents variables et instables, les vitesses minimales sont observées pendant le mois de septembre (fig. 2).

De novembre à mai, les alizés continentaux (vent de secteur N-NE) et les alizés maritimes (secteur NW-N) sont prépondérants (fig. 3). La somme des fréquences

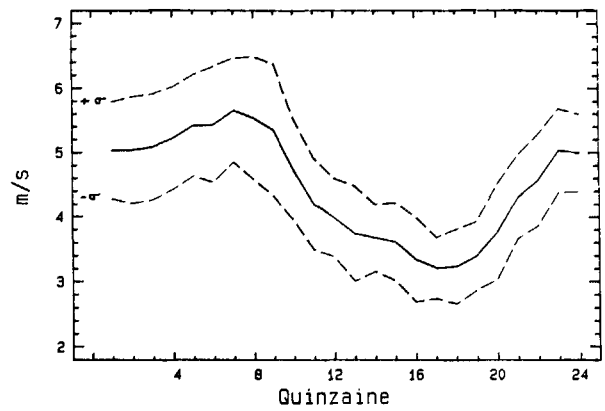


Figure 2 Cycle moyen annuel par quinzaine et écart type de la vitesse du vent à la station météorologique de l'aéroport de Dakar-Yoff (moyenne 1963-1986).
Mean fortnightly annual cycle and standard deviation of wind speed at the meteorological station of Dakar-Yoff airport (1963-1986).

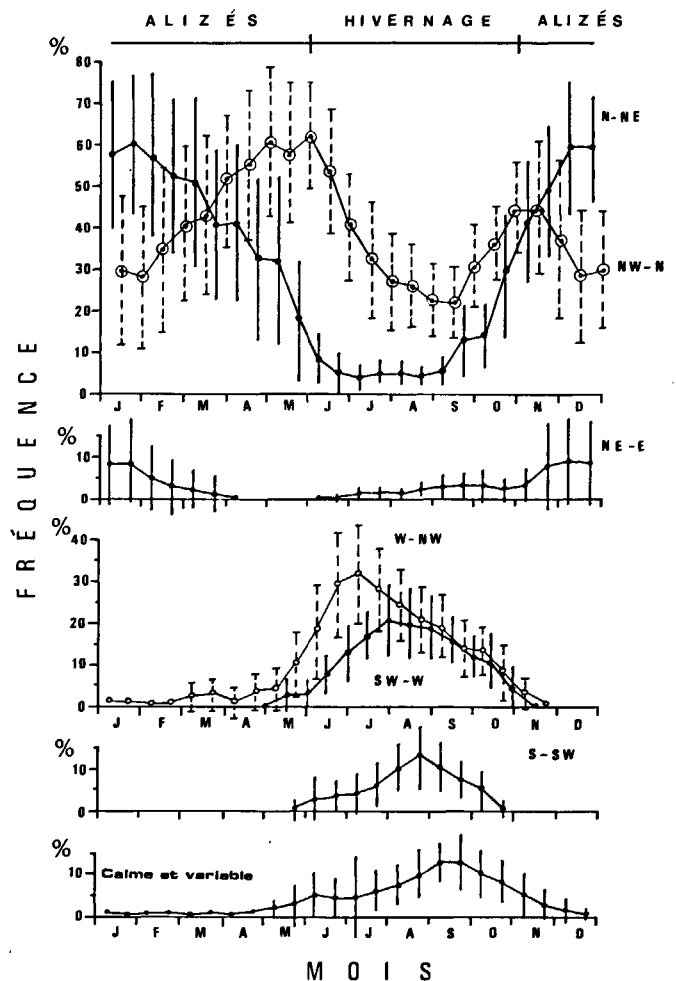


Figure 3 Cycle par secteur à la station météorologique de l'aéroport de Dakar-Yoff (moyenne 1963-1986).
Mean fortnightly annual cycle and standard deviation of wind direction frequencies at the meteorological station of Dakar-Yoff airport (1963-1986).

dans ces deux directions (NW-N et N-NE) représente près de 90% des observations totales. La vitesse moyenne par quinzaine en saison d'alizés varie entre 4 et 5,6 m/s, mais peut dépasser 10 m/s en vitesse instantanée. Au cours de la saison d'alizés, l'orientation moyenne des vents suit un schéma que l'on retrouve, au moins qualitativement, de 1963 à 1986. Au cours des mois de décembre et janvier, les vents de secteur N-NE représentent 60% des observations et les vents de secteur NW-N environ 30% (fig. 3). Les fréquences des vents de secteur NE-E sont alors maximales; elles représentent en moyenne près de 10% des observations. A partir de la deuxième quinzaine de janvier, une rotation des vents vers l'Ouest apparaît, les fréquences des vents de secteur NW-N augmentent pour atteindre leur valeur maximale en mai avec plus de 60% des observations (fig. 3). En saison d'alizés, les vents de secteur N-NE ont une vitesse moyenne supérieure d'environ 0,5 m/s à celle des vents de secteur NW-N.

Au cours de l'été, la Zone Inter-Tropicale de Convergence (ZITC) atteint la latitude du Sénégal, où s'établit alors un régime de vents variables en force et direction, avec notamment un flux de mousson chargé d'humidité, responsable de la pluviométrie sur le continent. A la fin de l'été, une température de l'eau élevée et un vent faible peuvent favoriser la formation de zones orageuses souvent originaires du Sud, et accompagnées de vents forts pouvant dépasser 15 m/s pendant une courte période (Rébert, 1983). Les plus fortes valeurs de vents « calmes ou variables » sont observées à la fin de l'été au cours du mois de septembre (fig. 3). Au cours de cette saison, les observations, qui représentent une fréquence supérieure à 10% par quinzaine, se répartissent sur une large part de la rose des vents, du secteur S-SW au secteur NW-N (fig. 3). Les fréquences cumulées des vents de secteur SW-W et des vents de W-NW représentent, du mois de juin au mois d'août, près de 50% des observations. Les fréquences des vents de NW-N, qui traduisent de brèves incursions des alizés au cours de cette saison, sont minimales la première quinzaine de septembre, avec une valeur qui reste cependant supérieure à 20% des observations. A partir du mois de septembre, les vents de secteur NW-N deviennent prépondérants avec plus de 25% des observations, fin octobre les fréquences des vents de secteur N-NE passent de 5% à plus de 30% des observations (fig. 3). Cet accroissement des vents de secteur N-NE marque le début de la saison d'alizés.

A partir de l'ensemble des observations récoltées au cours de la période 1963-1986, un schéma moyen de l'orientation des vents par saison a été défini. Les vents de secteur N-NE et NW-N sont prépondérants en saison d'alizés. Orientés plutôt dans le secteur N-NE en décembre-janvier, au mois de février les vents tournent vers l'Ouest, les alizés de secteur NW-N sont alors dominants. En été, les observations couvrent l'ensemble de la rose des vents, avec cependant une prédominance des vents de secteur SW-W, W-NW et NW-N. Ce schéma moyen reste cependant qualitatif. En effet si pour chacune des saisons d'alizés les directions prépondérantes concordent avec ce schéma moyen, leur contribution respective d'une année à l'autre a pu évoluer de façon significative.

VARIABILITÉ INTER-ANNUELLE DE LA VITESSE ET DE LA DIRECTION DU VENT

Dans les upwellings au sens d'Ekman, le vent est l'élément moteur des résurgences. Les fluctuations de la vitesse et de la direction du vent vont déterminer l'intensité des remontées d'eaux froides. Au Sénégal, les alizés sont établis de novembre à mai. Pour nous permettre d'analyser les fluctuations à long terme de l'upwelling sénégalais, nous allons tout d'abord étudier la variabilité inter-annuelle de la vitesse et de la direction du vent à Dakar-Yoff, au cours des saisons d'alizés de 1963 à 1986.

Vitesse du vent

Les vitesses par quinzaine en saison froide ont été filtrées par une moyenne mobile afin de mettre en évidence les fluctuations et tendance à long terme. La série filtrée montre une succession de périodes d'intensification et de relaxation du vent en saison froide d'une durée voisine de sept ans (fig. 4). De la saison froide de 1971-1972 (novembre 1971 à mai 1972) à celle de 1976-1977, la tendance se situe entre 5,4 et 6 m/s, c'est une période d'alizés intenses qui sépare deux périodes de faible activité des alizés (1963-1964 à 1970-1971 et 1977-1978 à 1984-1985). La succession de ces périodes d'intensification et de relaxation suggère que la variabilité à long terme du vent en saison froide est caractérisée par une oscillation de période de l'ordre de quatorze ans. Des résultats similaires ont été obtenus par Teisson

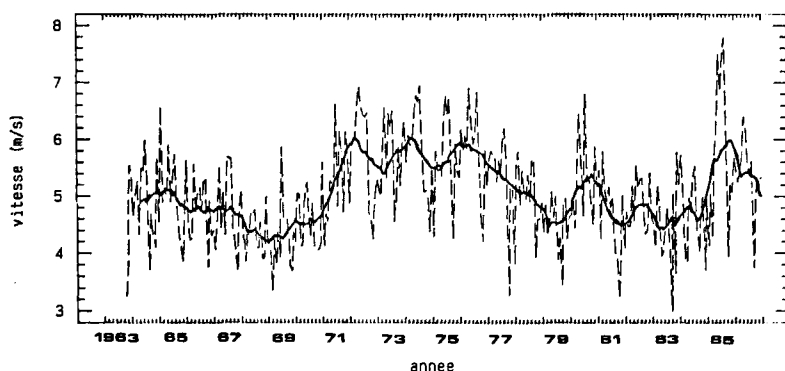


Figure 4

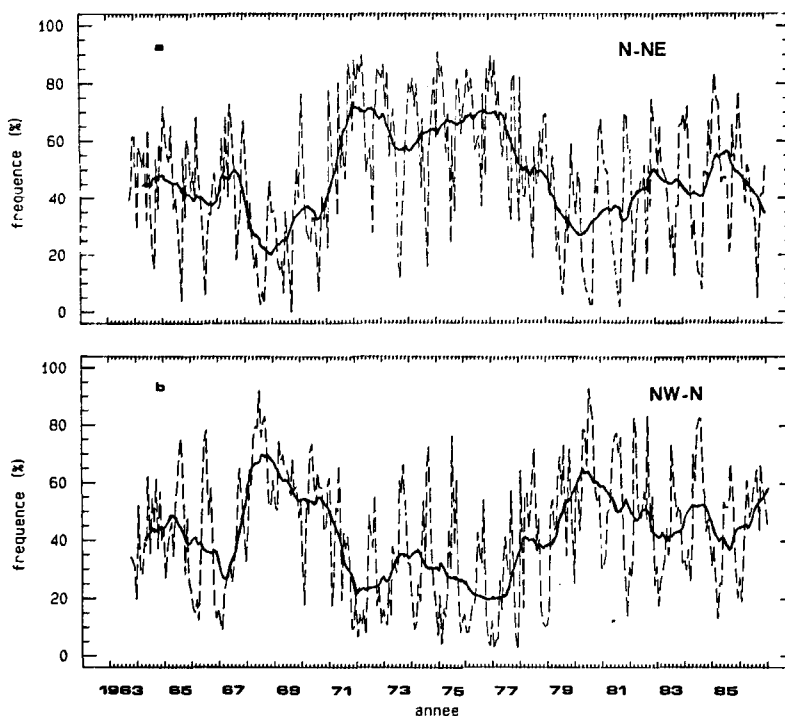
Vitesse du vent en saison d'alizés par quinzaine (trait pointillé) et variabilité inter-annuelle (trait plein) à la station météorologique de l'aéroport de Dakar-Yoff de 1963 à 1986.

Fortnightly wind speed during the trade-wind season (dashed line) and interannual variability (solid line) at the meteorological station of Dakar-Yoff airport (1963-1986).

Figure 5

Fréquences des vents en saison d'alizés dans les secteurs N-NE (5 a) et NW-N (5 b) par quinzaine (trait pointillé) et variabilité inter-annuelle (trait plein) à la station météorologique de l'aéroport de Dakar-Yoff de 1963 à 1986.

Fortnightly wind direction frequencies during the trade-wind season for the N-NE (5 a) and NW-N (5 b) directions (dashed line) and interannual variability (solid line) at the meteorological station of Dakar-Yoff airport (1963-1986).



(1982). On peut cependant noter que l'intensification observée au cours de la saison froide 1985-1986, et qui devrait s'étendre jusqu'aux années 1991-1992, ne s'est pas poursuivie en 1986-1987. Des données sur une plus longue période sont nécessaires pour confirmer la validité de cette périodicité. Teisson (1982) a montré une décroissance linéaire de la vitesse du vent des années 1947 à 1981. Cette tendance n'apparaît pas sur la série 1963-1986; il est possible que cette tendance soit un artéfact dû à des modifications successives du protocole de mesure et de l'emplacement de l'anémomètre.

Direction du vent

Les fréquences de vent par quinzaine en saison froide ont également été filtrées, afin d'extraire les fluctuations à long terme. Seules les fréquences de vent de secteur N-NE et NW-N ont été traitées, car elles constituent la majeure partie des observations en saison froide. Ces deux séries varient en opposition de phase, les fréquences de vent de N-NE sont maximales quand celles de NW-N sont minimales et inversement (fig. 5 a et 5 b). De la saison froide 1971-1972 à celle de 1976-1977, les vents dominants étaient orientés N-NE; ils représentaient, en moyenne en saison froide, entre 60 et près de 80% des observations. En dehors de cette

période, les vents de secteurs NW-N étaient dominants, ou avaient une contribution sensiblement égale à celle des vents de N-NE. Comme pour la vitesse du vent, la durée des périodes pendant lesquelles les vents dominants sont alternativement de N-NE ou NW-N semble être voisine de sept ans. Il semble que les fluctuations à long terme de la vitesse du vent en saison froide soient associées à des fluctuations de la direction du vent : les périodes de vent de secteur N-NE correspondent à des périodes de vents forts, et celles de secteur NW-N à des vents plus faibles.

Relation entre vitesse et direction du vent en saison froide

Pour chaque saison froide de 1963 à 1986, la vitesse moyenne et les fréquences moyennes dans les secteurs N-NE et NW-N ont été calculées. Une relation linéaire existe entre les fréquences de N-NE et la vitesse du vent, les fréquences de vent de secteur N-NE les plus élevées sont observées en période de vent fort (fig. 6). Cette relation linéaire permet d'expliquer 65% de la variance des fréquences de N-NE, le coefficient de corrélation est significatif au seuil de 99%. Malgré une assez forte dispersion des points pour la relation entre vitesse et fréquences des vents de NW-N (fig. 6), ce dernier paramètre est inversement corrélé à la vitesse

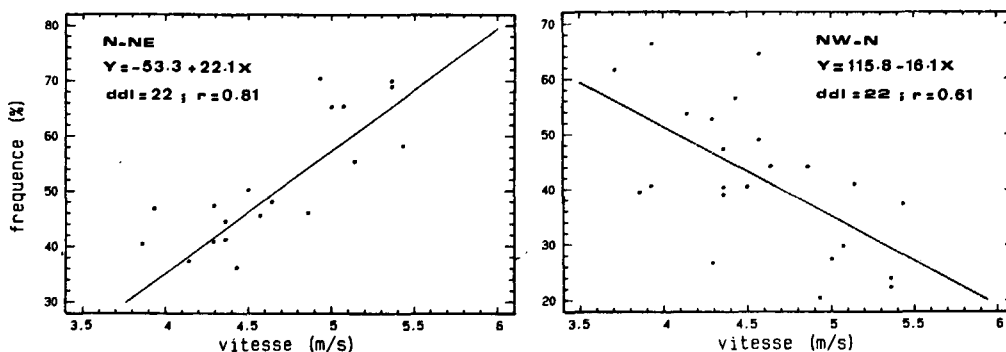


Figure 6

Fréquence des vents de secteur N-NE et NW-N en saison d'alizés (novembre à mai) en fonction de la vitesse du vent à la station météorologique de l'aéroport de Dakar-Yoff de 1963 à 1986.

N-NE and NW-N wind direction frequencies during the trade-wind season (November-May) versus wind speed at the meteorological station of Dakar-Yoff airport (1963-1986).

du vent. Le coefficient de corrélation est significatif au seuil de 95%. Les vents de secteurs NW-N sont dominants en saison froide quand les alizés sont en période de faible activité.

VARIABILITÉ DE L'INTENSITÉ DE L'UPWELLING

Les fluctuations saisonnières et inter-annuelles du vent entraînent des fluctuations de l'intensité de l'upwelling. L'amplitude de ces fluctuations peut être estimée à l'aide de l'IUC. Comparer les valeurs de ce paramètre de part et d'autre de la péninsule va nous permettre d'analyser les disparités que l'orientation du talus continental crée entre ces deux régions.

La résultante du transport d'Ekman dans les couches superficielles est orientée à 90° à droite de la direction du vent. Sur la côte Nord, le talus continental est orienté N-NE (fig. 1). En cas de vent de NW-N, la composante du transport d'Ekman vers le large (IUC) sera donc atténuée par rapport à celle obtenue avec des vents de secteur N-NE. Au sud de la péninsule, le plateau continental s'incurve légèrement vers l'Est (fig. 1). Quelle que soit l'orientation des alizés (N-NE ou NW-N), l'orientation de la côte reste favorable à l'upwelling, notamment par la présence du Cap-Vert qui crée une discontinuité entraînant une divergence des eaux de surface. La configuration du talus continental va entraîner une baisse de l'intensité de l'upwelling sur la côte Nord en cas d'alizés de NW-N; par contre l'upwelling sur la côte sud sera moins sensible aux fluctuations de l'orientation des alizés.

Variabilité saisonnière de l'indice d'upwelling

En début de saison d'upwelling, les valeurs de l'IUC de part et d'autre de la péninsule sont très proches: 8,3 et 8,5 m³/s par 10 m de côte en fin novembre et 10 et 10,4 m³/s par 10 m de côte à la fin décembre (fig. 7).

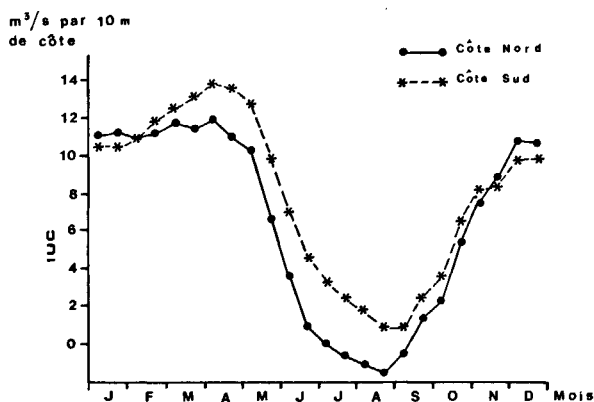


Figure 7

Cycle moyen annuel par quinzaine de l'indice d'upwelling calculé d'après les données de vent de la station météorologique de l'aéroport de Dakar-Yoff de 1963 à 1986.

Mean annual cycle by fortnight of the upwelling index calculated from wind speed data at the meteorological station of Dakar-Yoff airport (1963-1986).

A partir du mois de février, bien que la vitesse des alizés s'accroisse (fig. 2), l'IUC sur la côte Nord reste stable, par contre on observe un net accroissement sur la côte Sud (fig. 7). La rotation des alizés vers le secteur NW-N à partir du mois de février se traduit par une intensification de la résurgence au sud de la péninsule du Cap-Vert. A partir du mois de juin, on observe une chute brutale de l'IUC sur la côte Nord, des valeurs négatives sont observées de la mi-juillet à la fin août, ce qui va tendre à créer une accumulation d'eaux à la côte. Sur la côte Sud, l'IUC décroît à partir du mois de juin mais de façon moins brutale. En été, bien que faible, l'IUC reste en moyenne toujours positif.

Variabilité inter-annuelle

La succession de période de forte et de faible activité des alizés entre 1963 et 1986 est associée à des modifications simultanées de l'orientation de ces vents. L'intensité de l'upwelling va décroître simultanément avec la vitesse du vent au cours des phases d'alizés faibles. Cependant, les vents dominants étant alors orientés NW-N, la décroissance de l'intensité de l'upwelling sera plus forte au nord de la presqu'île qu'au sud. La relation entre vitesse du vent et transport d'Ekman étant de forme quadratique, la variabilité du transport d'Ekman sera de plus forte amplitude que celle de la vitesse du vent.

De la saison d'alizés 1971-1972 à celle de 1976-1977, l'IUC au nord et au sud du Cap-Vert dépasse 12 m³/s par 10 m de côte; c'est la période de plus forte intensité de l'upwelling au Sénégal enregistrée entre 1963 et 1986 (fig. 8). Les valeurs de cet indice au nord et au sud de la péninsule sont similaires. Quand la vitesse des alizés décroît, l'intensité de l'upwelling baisse, avec cependant des amplitudes différentes de part et d'autre du Cap-Vert. Les écarts les plus importants entre les deux régions sont observées au cours des saisons froides de

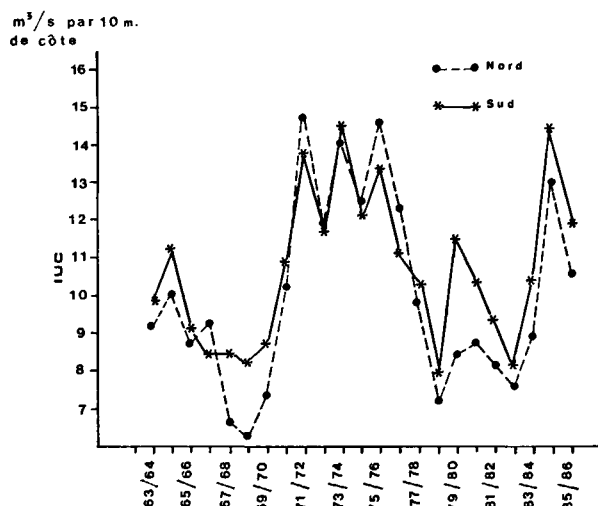


Figure 8

Variabilité inter-annuelle de l'indice d'upwelling en saison froide au nord et au sud de la presqu'île du Cap-Vert, calculée d'après les données de vent de la station météorologique de l'aéroport de Dakar-Yoff de 1963 à 1986.

Interannual variability of the upwelling index during the cold season, north and south of the Cap-Vert peninsula, calculated from wind speed data at the meteorological station of Dakar-Yoff airport (1963-1986).

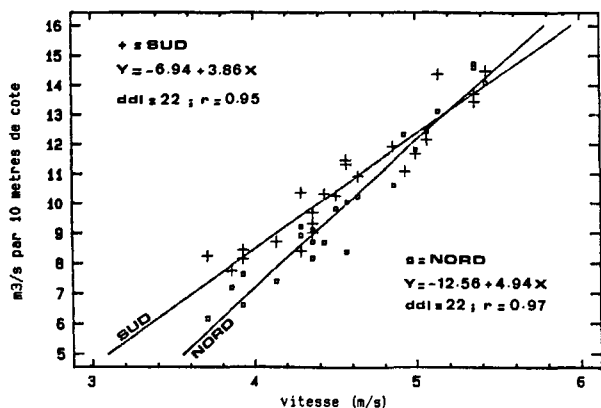


Figure 9
Indice d'upwelling en saison froide au nord et au sud de la presqu'île du Cap-Vert, en fonction de la vitesse du vent à la station météorologique de l'aéroport de Dakar-Yoff de 1963 à 1986.

Upwelling index during the cold season north and south of the Cap-Vert peninsula versus wind speed at the meteorological station of Dakar-Yoff airport (1963-1986).

1967-1968 à 1969-1970 et de 1979-1980 à 1981-1982 (fig. 8), saisons pendant lesquelles les fréquences des alizés de secteur NW-N dépassent 45% des observations et les fréquences dans le secteur N-NE sont minimales.

Afin d'illustrer ces disparités entre les deux régions, les IUC au nord et au sud du Cap-Vert ont été tracés en fonction de la vitesse du vent à Yoff (fig. 9). Les pentes des droites de régression sont statistiquement différentes (au seuil de 99%). Pour des vitesses de vent supérieures à 5 m/s, les upwellings au nord et au sud du Cap-Vert ont des intensités similaires. Par contre, quand le vent faiblit, l'indice d'upwelling au sud de la presqu'île devient supérieur à celui observé au nord. La différence entre ces deux valeurs dépasse 1 m³/s par mètre de côte pour les vitesses inférieures à 4,2 m/s.

Intensité de l'upwelling et apports en sels minéraux

Cette disparité de l'intensité des upwellings au nord et au sud de la péninsule affecte-t-elle les apports en sels minéraux? Pour répondre à cette question, nous ne disposons que de données éparées; cependant les teneurs en phosphate mesurées en surface le long de deux radiales de part et d'autre de la péninsule en février 1986 et mars 1987, vont nous permettre d'examiner des situations ponctuelles. La saison d'upwelling 1985-1986 est caractérisée par des vents forts (5,1 m/s), de secteur N-NE (63% des observations). Au cours des premiers mois de 1987, une chute notable de la vitesse des alizés (4,2 m/s) accompagnée d'une rotation vers le secteur NW-N (67% des observations) a été enregistrée.

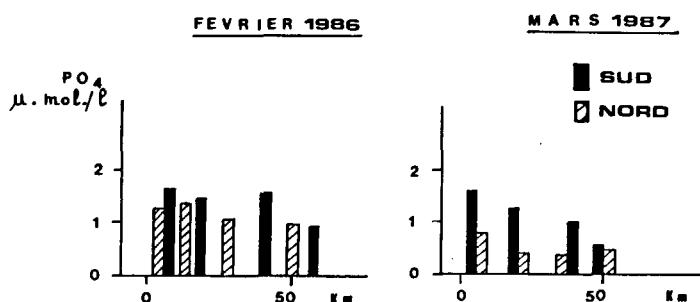
Figure 10
Teneurs en phosphate le long de deux radiales au nord et au sud de la presqu'île du Cap-Vert en février 1986 et mars 1987 (campagnes du N.O. « Louis-Sauger », CRODT).

Phosphate concentrations along two transects north and south of the Cap-Vert peninsula in February 1986 and March 1987 (R.V. « Louis-Sauger », CRODT cruises).

Les teneurs en phosphate le long des deux radiales montrent une disparité importante (fig. 10). En février 1986, elles sont comparables de part et d'autre de la péninsule; celles mesurées en mars 1987 au sud du Cap-Vert sont deux à trois fois supérieures à celles enregistrées simultanément au nord du cap. Ces observations montrent que la vitesse, mais également la direction du vent, influencent de façon déterminante les apports en sels minéraux. Les résultats obtenus à partir du transport d'Ekman indiquaient une intensification de l'upwelling sur la côte Sud en cas de vent de secteur NW-N. Il semble que cette intensification affecte également les apports en sels minéraux. Un net déficit des apports en phosphate au nord du cap par rapport à ceux enregistrés au sud a été observé avec des alizés de secteur NW-N dominants. Des alizés de secteur N-NE semblent conduire à des conditions trophiques comparables de part et d'autre de la péninsule du Cap-Vert.

Intensité de l'upwelling et température de surface

Une forte variabilité inter-annuelle de l'intensité de l'upwelling depuis les années 1960 est observée. Cette variabilité se traduit-elle par des fluctuations similaires de la température de surface? Teisson (1982) a montré qu'il existait, à l'échelle inter-annuelle, une forte corrélation entre la vitesse du vent au carré et la température de surface en saison froide à Thiaroye. Nous allons examiner à nouveau la relation entre vent et température de surface en saison d'alizés (novembre à mai), mais cette fois en utilisant l'IUC afin de tenir compte des fluctuations de la direction du vent. Pour les stations de Kayar et Thiaroye situées respectivement au nord et au sud du Cap-Vert, les coefficients de corrélations entre IUC et température de surface sont tous deux significatifs (fig. 11). Les fluctuations de l'IUC permettent d'expliquer respectivement 60 et 50% de la variabilité des températures de surface relevées à Kayar et Thiaroye. A Thiaroye, un écart important est observé au cours de la saison froide 1967-1968, sans qu'il nous soit possible d'en déterminer la cause exacte. Les faibles températures enregistrées à Thiaroye au cours de l'hiver 1968 sont confirmées par des relevés similaires à d'autres stations. Des erreurs de mesure du vent pourraient être la cause de cet écart. En effet les enregistrements réalisés à Saint-Louis, station distante d'environ 200 km, montrent que les alizés étaient particulièrement forts cette année-là.



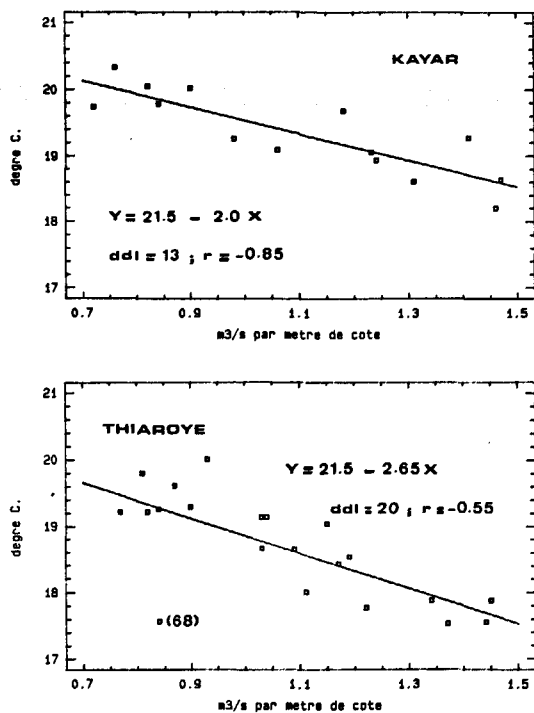


Figure 11
Température de surface à Kayar (1972-1986, pas de données en 1981) et Thiaroye (1966-1986) et indice d'upwelling au nord et au sud de la péninsule du Cap-Vert en saison d'alizés.

Sea surface temperature at Kayar (1972-1986, 1981 missing) and Thiaroye (1966-1986) and upwelling index north and south of the Cap-Vert peninsula during the trade-winds season.

Ces observations confirment à nouveau que le vent est un paramètre clé au sein de l'écosystème sénégalais. En saison d'alizés, le vent permet d'expliquer une grande part de la variabilité inter-annuelle de la température de surface.

CONCLUSION

Au Sénégal, les fluctuations inter-annuelles de la vitesse du vent en saison froide sont caractérisées par l'alternance de périodes de faible et de forte activité des alizés, s'étendant sur plusieurs années. Des fluctuations similaires sont également observées pour les directions prépondérantes des alizés : les alizés de secteur NW-N sont plutôt associés aux périodes de faible activité des alizés; à l'inverse, les alizés de secteurs N-NE sont dominants en période de vent fort. Ces fluctuations dans le régime des vents sont à relier à des modifications de la circulation atmosphérique à l'échelle planétaire. Ces perturbations affectent l'intensité et la position des centres d'action de l'Atlantique tropical (anticyclones des Açores, de Libye, de Sainte-Hélène, zone de convergence inter-tropicale...). Ces perturbations atmosphériques à grande échelle se traduisent par une modification des vents de surface sur de larges zones. Ainsi, les fluctuations à long terme des vents à Nouadhibou sont cohérentes avec celles observées au Sénégal : la période 1963-1970 est caractérisée par un minimum d'activité des alizés qui a été suivie par une intensification notable de 1971 à 1977 (Arfi, 1985).

L'écosystème sénégalais ne constitue pas un système homogène de part et d'autre de la péninsule du Cap-Vert. Suivant la vitesse et la direction du vent, l'intensité de l'upwelling et les apports en sels minéraux montrent d'importantes disparités de part et d'autre de la péninsule. Les upwellings dans les deux régions seront comparables en période d'alizés forts, par contre en période d'alizés faibles, les vents dominants étant orienté NW-N, la résurgence et les apports en sels minéraux seront plus importants dans la région située au sud de la presqu'île du Cap-Vert.

Le vent agit de façon prépondérante sur la dynamique de l'upwelling au Sénégal. Les fluctuations du régime des alizés vont se répercuter sur l'ensemble des maillons de la chaîne trophique. L'impact des fluctuations des vents sur la dynamique et l'exploitation des stocks de poissons au Sénégal a été démontré à de nombreuses reprises (Fréon et Stéquert, 1979; Fréon, 1984; Binet, 1988; Cury et Roy, 1988). Dans le secteur de la pêche, les alizés, par l'intermédiaire de l'upwelling, déterminent en partie l'abondance de la ressource et, comme le montre la figure 12, ont aussi un impact direct sur l'économie de ce secteur. De 1969 à 1986, le prix de vente des sardinelles au port de Dakar a évolué de façon inverse par rapport à l'intensité de l'upwelling : les prix les plus faibles sont observés au cours de la période d'alizés forts entre 1971 et 1977, période pendant laquelle les captures étaient abondantes (fig. 12). L'affaiblissement des alizés entre 1979 et 1984 a engendré une baisse de l'abondance des sardinelles, qui s'est alors traduite par une augmentation simultanée du prix de débarquement (fig. 12).

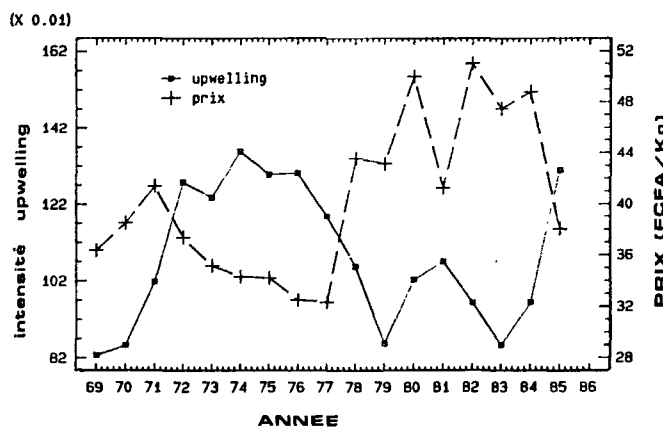


Figure 12
Évolution de 1969 à 1986 du prix moyen pondéré des sardinelles au port de Dakar (francs CFA constants 1983; Chaboud et Dem, pers. comm.) et de l'indice d'upwelling utilisé par Fréon (1984) pour modéliser la production des stocks de sardinelles en fonction de l'intensité de l'upwelling. Cet indice est calculé à partir de l'IUC de l'année précédant la pêche et de l'année de la pêche, pondérés respectivement par 1/3 et 2/3.
Evolution from 1969 to 1986 of the mean weighted price of sardinellas at Dakar harbour (constant CFA francs 1983; Chaboud et Dem, pers. comm.) and upwelling index as used by Fréon (1984) to model the sardinellas stock production versus upwelling intensity. This index is calculated from the upwelling indices of the previous and present fishing year, respectively weighted by 1/3 and 2/3.

Remerciements

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans la collaboration de la Météorologie Nationale du Sénégal et de l'ASECNA de Dakar, qui nous ont facilité l'accès aux données. Les données des campagnes du N.O. « Louis-Sauger » nous ont été communiquées par I. Gning et

C. Oudot. Nous tenons à remercier C. Chaboud et M. Dem qui nous ont communiqué les données sur le prix des débarquements au Sénégal. Les commentaires de P. Cury, P. Fréon ainsi que ceux de deux arbitres anonymes nous ont été très utiles.

RÉFÉRENCES

- Arfi R.** (1985). Variabilité inter-annuelle d'un indice d'intensité des remontées d'eaux dans le secteur du Cap-Blanc (Mauritanie). *Can. J. Fish. aquat. Sci.*, **42**, 1969-1978.
- Bakun A.** (1973). Daily and weekly upwelling indices, West coast of north America 1946-71. U.S. Dep. Comm., NOAA Tech. Rep. NMFS SSRF-671, 103 p.
- Bakun A. et R. H. Parrish** (1980). Environmental inputs to fishery population models for Eastern boundary current regions. In: *Workshop on the effects of environmental variation on the survival of larval pelagic fishes*. G. D. Sharp, éditeur, Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO, Paris, IOC Workshop Rep. 28.67-104.
- Binet D.** (1988). Rôle possible d'une intensification des alizés sur le changement de répartition des sardines et sardinelles le long de la côte ouest-africaine. *Aquat. Liv. Resour.*, **1**, 115-132.
- Cury P. et C. Roy** (1988). Migration saisonnière et abondance apparente du Thiof au Sénégal : influence de la disparité régionale et des effets locaux de l'upwelling sénégal-mauritanien. *Oceanologica Acta*, **11**, 1, 25-36.
- Dhonneur G.** (1974). Nouvelle approche des réalités météorologiques de l'Afrique occidentale et centrale. ASECNA, Université de Dakar.
- Fréon P.** (1984). Des modèles de production appliqués à des fractions de stock dépendants des vents d'upwelling (pêche sardinière au Sénégal). *Océanographie trop.*, *ORSTOM*, **19**, 1, 67-94.
- Fréon P. et B. Stéquert** (1979). Note sur la présence de *Sardina pilchardus* (Walb.) au Sénégal : étude de la biométrie et interprétation. *Cybium* (3^e sér.), **6**, 65-90.
- Hastenrath S.** (1984). Interannual variability and annual cycle: mechanism of circulation and climate in the tropical Atlantic. *Mon. Weath. Rev.*, **112**, 6, 1097-1107.
- Hastenrath S. et P. J. Lamb** (1977). Some aspects of circulation and climate over the eastern equatorial Atlantic. *Mon. Weath. Rev.*, **105**, 8, 1019-1023.
- Jacques G. et P. Tréguer** (1986). *Écosystèmes pélagiques marins*. Collection d'écologie, 19. Masson éd. Paris, 243 pp.
- Lamb P. J.** (1978). Case studies of tropical surface circulation patterns during recent sub-saharian weather anomalies: 1967 and 1968. *Mon. Weath. Rev.*, **106**, 4, 482-491.
- Leroux M.** (1983). *Le climat de l'Afrique tropicale*. Vol. 1 et 2. Champion Éd., Paris.
- Portolano P.** (1986). Analyse des séries vent-températures de la mer en surface le long des côtes sénégalaises. *Océanographie trop.*, *ORSTOM*, **21**, 2, 205-227.
- Rébert J.-P.** (1983). Hydrologie et dynamique des eaux du plateau continental sénégalais. *Doc. scient. Cent. Rech. océanogr., Dakar-Thiaroye*, **93**, 186 pp.
- Teisson C.** (1982). Application de la théorie d'Ekman à l'étude des courants et des remontées d'eaux profondes le long des côtes sénégalaises. *Doc. scient. Cent. Rech. océanogr., Dakar-Thiaroye*, **106**, 79 pp.
- Wauthy B.** (1983). Introduction à la climatologie du Golfe de Guinée. *Océanographie trop.*, *ORSTOM*, **18**, 1, 103-138.
- Wooster W. S., A. Bakun et D. R. McLain** (1976). The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic. *J. mar. Res.*, **34**, 131-141.