

Contre-courants équatoriaux et variations saisonnières du contenu thermique et du niveau moyen dans l'Atlantique tropical Est

Contre-courants
Eau Centrale
Contenu thermique
Niveau moyen
Atlantique tropical
Counter-currents
Central water
Heat content
Mean sea level
Tropical Atlantic

J.-M. VERSTRAETE

Centre ORSTOM de Dakar-Hann, BP 1386, Dakar, Sénégal.

Reçu le 26/11/84, révisé le 31/1/85, accepté le 7/2/85.

RÉSUMÉ

Les données hydrographiques Nansen, les bathythermogrammes et les observations du niveau de la mer ont été analysés dans trois régions de l'Atlantique tropical Est où la densité des observations était suffisamment élevée : au large de Dakar, Abidjan et Pointe-Noire. Cette étude établit le cycle climatique saisonnier du niveau moyen de l'océan, en même temps que celui de la thermocline tropicale peu profonde, du contenu thermique dans diverses couches entre 0 et 500 m (1 400 m au large d'Abidjan), et enfin de la hauteur dynamique. Dans chacune des régions océaniques, les variations saisonnières du contenu thermique dépendent fortement des variations d'épaisseur des masses d'Eau Centrale de l'Atlantique Sud (ECAS). Les variations saisonnières du niveau moyen de l'océan dépendent non seulement des déplacements verticaux de la thermocline tropicale et des variations d'épaisseur et de température des Eaux Tropicales Superficielles, mais également des variations d'épaisseur des ECAS. Le signal annuel d'upwelling est clairement mis en évidence dans les variations du niveau moyen de l'océan, en liaison avec les variations de la structure thermique. D'après ces résultats, le contenu thermique de l'Atlantique tropical Est dépendrait essentiellement du transport saisonnier des masses d'ECAS advectées vers l'Est par les contre-courants équatoriaux. L'advection de l'Eau Centrale de l'Atlantique Sud fait partie d'un processus dynamique complexe, encore analysé de façon incomplète par les mécanismes de téléconnexions supposées entre les bords Ouest et Est du bassin océanique.

Oceanol. Acta, 1985, 8, 3, 249-261.

ABSTRACT

Equatorial counter-currents and seasonal variations of heat content and mean sea level in the Eastern tropical Atlantic

The historical Nansen and bathythermographic data together with the existing sea level data files have been analysed in three areas of the Eastern Tropical Atlantic where data coverage was sufficiently dense: off Dakar, Abidjan and Pointe-Noire. This study establishes the annual cycle of the mean sea level, together with the depth of the shallow tropical thermocline, the heat content in various layers and the steric height. In each area, the annual changes of the heat content in the "warm water sphere" depend to a great extent upon the changes of thickness of the South Atlantic Central Water masses. Sea level changes are strongly dependent not only upon the vertical displacements of the shallow tropical thermocline and changes in thickness and temperature of the Tropical Surface Waters, but also on changes in the South Atlantic Central Water thickness. Annual upwelling signals are revealed in the mean sea level variations, in association with changes in the thermal structure in the three quoted areas.

These results testify to the strong influence of advection of South Atlantic Central Water in the heat content of the Eastern Tropical Atlantic through the eastward equatorial counter-currents; this advection could be part of a complex seasonal dynamic process as yet incompletely analysed by the theory of remote forcing from the West.

Oceanol. Acta, 1985, 8, 3, 249-261.

INTRODUCTION

La connaissance des variations du Contenu Thermique (CT) et de la Température de Surface de la Mer (T_s) est fondamentale pour l'étude des variations à court terme du climat. L'un des objectifs du « Programme National d'Étude de la Dynamique du Climat » (PNEDC, Anonyme, 1982) et d'une de ses parties océanographiques (programme « Focal », Français Océan Climat Atlantique équatorial, Anonyme, 1980 b) est d'approfondir nos connaissances sur le rôle de l'océan dans le bilan thermique global des deux fluides géophysiques qui baignent la planète. Les modèles couplés océan-atmosphère, encore très rudimentaires, exigent une bonne connaissance de T_s . Dans l'océan tropical, ce paramètre dépend de la redistribution horizontale et verticale de la chaleur transportée par les courants superficiels et profonds et de l'effet du vent sur la profondeur de la thermocline tropicale. Aux basses latitudes dans la « sphère d'eau chaude », les variations saisonnières de CT (et de T_s) sont conduites d'abord par l'advection plutôt que par le « forcing » atmosphérique local (Merle, 1980). Malheureusement, des observations continues de courant ne sont pas possibles à l'échelle d'un bassin océanique. D'innombrables modèles numériques ont permis d'obtenir une nouvelle approche de la réponse dynamique de l'Océan Atlantique Tropical superficiel à l'action du vent. Bien des hypothèses restent encore à vérifier par des observations synoptiques du champ thermique, notamment les téléconnexions supposées entre les bords Ouest et Est du bassin par le truchement d'ondes de Kelvin piégées à l'équateur, engendrées par un vent impulsional sur la partie ouest du bassin. L'une des composantes du programme Focal est précisément d'obtenir des informations continues sur le contenu thermique de l'océan au moyen d'un réseau de marégraphes déployé pendant plusieurs années sur l'ensemble du bassin atlantique tropical. On sait en effet que le Niveau Moyen (NM) de l'océan aux basses latitudes est directement lié à son contenu thermique. Pour donner un ordre de grandeur, une élévation de 1°C de la température moyenne de l'océan mondial entraînerait, par simple dilatation thermique, une surélévation de NM de l'ordre de 60 cm.

Dans cet article, nous établissons le cycle moyen annuel de CT et NM en utilisant exclusivement les données historiques archivées en France, à l'exclusion du nouveau jeu des observations marégraphiques « Focal ». Ce travail était nécessaire afin de pouvoir, dans un deuxième temps, comparer les nouvelles observations continues au cycle climatique et savoir si nous sommes dans des conditions normales ou anormales. Après une brève vue d'ensemble sur les données utilisées, nous décrivons les variations saisonnières de la structure thermique et de CT, puis de NM dans l'Atlantique tropical Est. Nous étudions ensuite les variations d'épaisseur des Eaux Centrales de l'Atlantique Sud (ECAS) et de l'Eau Tropicale Superficielle (ETS), au large de Dakar, Abidjan et Pointe-Noire. Dans une discussion, nous montrons que les variations saisonnières observées de CT et NM dans l'Atlantique tropical Est s'expliquent en grande partie par les variations

des flux des masses d'eau advectées vers l'Est par les contre-courants équatoriaux. La conclusion aborde brièvement les perspectives offertes par l'altimétrie satellitaire.

DISCUSSION

Les données

Les températures moyennes mensuelles utilisées dans cette étude sont tirées des stations hydrographiques et des profils thermiques (XBT) collectés principalement par l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer) au large d'Abidjan, Dakar et Pointe-Noire. Ces données historiques sont archivées au Centre IFREMER de Brest, au Bureau National des Données Océaniques (BNDO). Dans les trois aires citées ci-dessus, la distribution temporelle et spatiale des données a été examinée soigneusement pour éviter toute distorsion dans la structure thermique moyenne (Gouriou, Servain, 1983). Il est important de contrôler le nombre d'échantillons à chaque profondeur, chaque mois, pour être certain d'éliminer la variabilité interannuelle et obtenir une moyenne « climatique ». Les statistiques sur les données contrôlées ont été établies par le BNDO. La distribution des stations est présentée sur la figure 1 pour les régions au large de Dakar et de

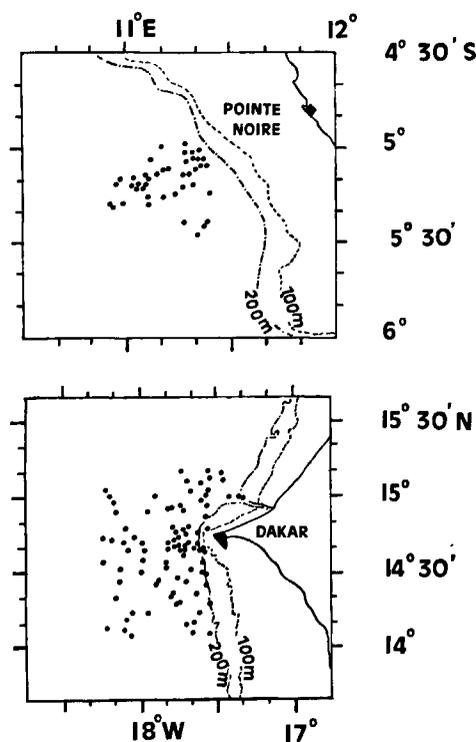


Figure 1
Positions des stations utilisées pour l'étude du contenu thermique et l'identification des différentes masses d'eau au large de la presqu'île du Cap-Vert (Dakar) et Pointe-Noire.

Locations of the Nansen and XBT stations used for the study of the heat content and water masses off Dakar and Pointe-Noire.

Pointe-Noire. Au large de Pointe-Noire, 105 stations Nansen de 0 à 500 m ont été sélectionnées entre 1961 et 1975; chaque niveau contient en moyenne chaque mois de 5 (décembre) à 11 (mai et septembre) observations de température et de salinité. Au large de la presqu'île du Cap-Vert (région de Dakar), on a extrait du fichier 142 profils thermiques de 0 à 500 m et de 1957 à 1979 (75 stations Nansen, 67 XBT); chaque mois, chaque niveau contient entre 5 (mai) et 26 (février) observations.

Abidjan est un cas spécial, car nous avons là les excellentes observations faites par Varlet (ORSTOM) de 1957 à 1964. Dans un travail de pionnier, pendant 7 ans, Varlet a visité la même station, que nous appellerons « Abidjan-Sud », située à 4°W et 4°53'N sur la pente continentale du plateau continental ivoirien et à l'ouvert du canyon sous-marin « Trou-sans-fond »; 217 stations Nansen ont ainsi été exécutées de 0 à 600 m et parmi elles, 80 jusqu'à une profondeur de 1400 m. C'est probablement la série d'observations hydrologiques à grande profondeur la plus significative dans la région, et elle nous a permis notamment d'identifier les différentes masses d'eau profondes.

Les observations horaires du niveau de la mer ont été collectées pendant près de 15 ans par le Service

Hydrographique Français à Dakar, entre 1941 et 1968. Une partie de ces observations a été publiée (Doniol, 1956), et une autre partie se trouve à l'EPSHOM (Brest). Nous avons collecté 12 ans d'observations horaires à Abidjan (de 1967 à 1978) et près de 6 années à Pointe-Noire, entre 1959 et 1980. Ces données sont maintenant en archives à l'Antenne ORSTOM du Centre IFREMER de Brest. Les composantes de la marée ont été retirées de ces séries afin d'obtenir le niveau moyen journalier puis les niveaux moyens mensuels.

Les variations saisonnières dans l'Atlantique tropical Est

Structure et contenu thermiques

Dans l'Atlantique tropical Est (20°N-20°S), les variations saisonnières maximales de T_s et de la structure thermique subsuperficielle ont lieu dans trois aires côtières : entre 10° et 20°N (Sénégal, Mauritanie); entre 2°E et 8°W (Ghana, Côte-d'Ivoire) et entre 3° et 18°S (Congo, Angola). Dans ces trois régions, la thermocline tropicale est peu profonde et l'on observe un fort signal annuel, maintenant bien connu (Picaut, 1983; Houghton, 1984). La structure thermique entre 0 et 1000 m apparaît sur la figure 2. Elle est caractérisée par une thermocline tropicale peu profonde (T)

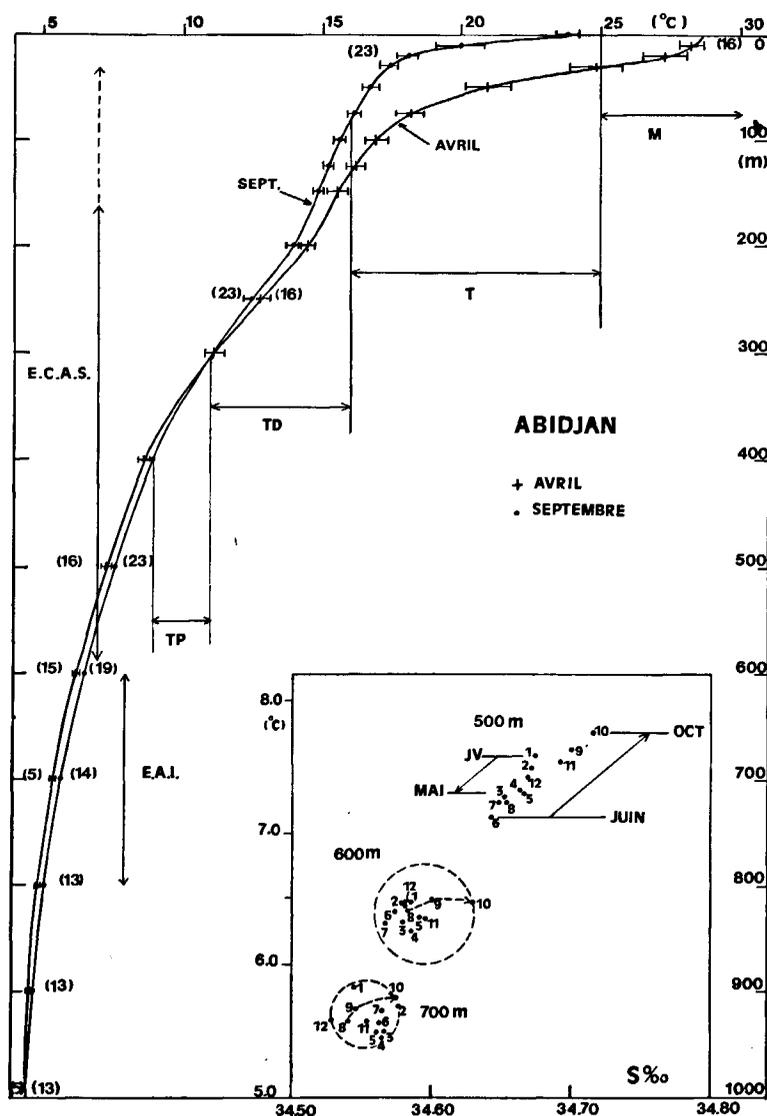


Figure 2

Profil thermique moyen de 0 à 1000 m à « Abidjan-Sud » en avril et septembre. L'intervalle de confiance à 95% est indiqué. M, couche de mélange; T, thermocline tropicale; TD, thermostad; TP, thermocline principale; les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre d'observations à chaque niveau, pour le mois considéré. En encart : diagramme T-S à 500, 600 et 700 m chaque mois numéroté de 1 à 12.

Mean temperature profile 0-1000 m off Abidjan in April and September. The 95% interval confidence is given. Figures between brackets give the number of observations at each level for this month. ECAS is South Atlantic Central Water; EAI, Antarctic Intermediate water; M is Mixed Layer; T, Tropical Thermocline; TD, Thermostad; TP, Main Thermocline. Inset: T-S diagram at 500, 600 and 700 m levels. Each month is numbered from 1 to 12.

comprise entre 20 et 125 m de profondeur; nous la définissons en épaisseur entre les isothermes 25°C et 16°C; au-dessus de (T), se trouve la couche de mélange (M), avec des températures supérieures à 25°C; (M) n'existe que pendant la saison chaude, avec des températures pouvant dépasser 29°C, et disparaît pendant la saison d'upwelling quand (T) atteint la surface comme c'est le cas à Abidjan en septembre (fig. 2).

Au-dessous de (T) se trouve la thermostat (TD) où l'on observe un faible gradient de température entre 11° et 16°C; finalement la thermocline principale (TP), (ou permanente), se trouve entre 9° et 11°C. Sur la figure 2, nous avons également représenté le diagramme (T-S) à 500, 600 et 700 m de profondeur. Ce diagramme (T-S) agrandi permet de voir entre quelles profondeurs se fait le mélange entre les ECAS et les Eaux Antarctiques Intermédiaires (EAI). Enfin, nous donnons l'intervalle de confiance de la température à 95% ainsi que le nombre d'observations à chaque niveau en avril et en septembre.

Dans le Golfe de Guinée, on admet généralement que la profondeur de l'isotherme 20°C représente commodément la profondeur de la thermocline tropicale. Au large de Dakar, c'est l'isotherme 19°C qui joue ce rôle (l'isotherme 20°C crève la surface pendant l'upwelling). Le cycle annuel des déplacements verticaux de (T) est représenté sur la figure 3 pour les régions de Dakar (19°C), Abidjan et Pointe-Noire (20°C). L'upwelling annuel de « grande saison froide » apparaît clairement avec une montée de l'isotherme 19°C ou 20°C qui atteint presque la surface en février à Dakar, en juillet-août à Pointe-Noire et en septembre à Abidjan. Les barres verticales indiquent l'intervalle de confiance à 95%.

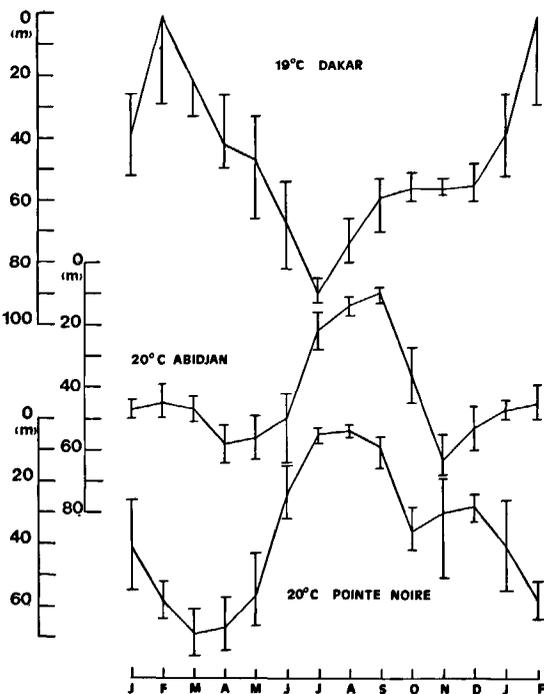


Figure 3 Variations saisonnières de la profondeur de la thermocline tropicale au large de Dakar (isotherme 19°C), Abidjan et Pointe-Noire (isotherme 20°C). L'intervalle de confiance à 95% est indiqué.

Seasonal variations of the depth of the tropical thermocline off Dakar (19°C isotherm), Abidjan and Pointe-Noire (20°C isotherm). The 95% interval confidence is given.

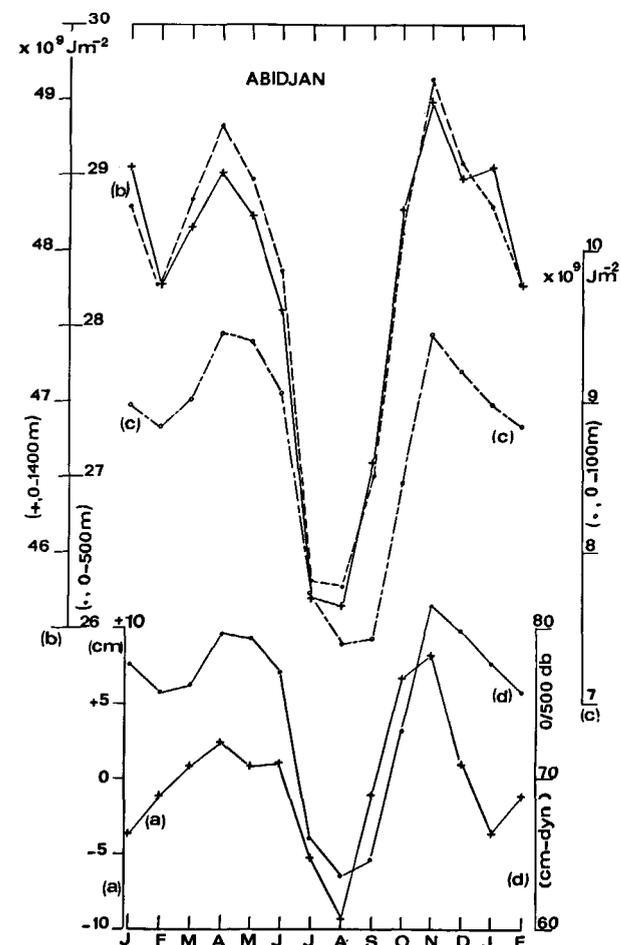
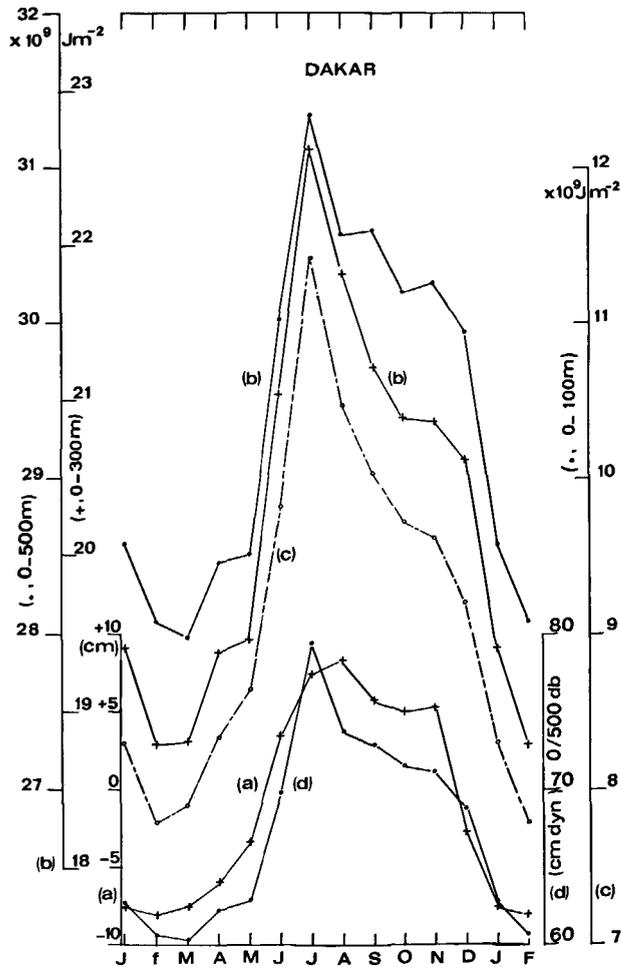
Figure 4

- Variations saisonnières au large de Dakar :
- a) niveau moyen de l'océan (cm);
 - b) contenu thermique de 0 à 500 m et de 0 à 300 m ($J m^{-2}$);
 - c) contenu thermique de 0 à 100 m ($J m^{-2}$);
 - d) hauteur dynamique (cm-dyn) de la surface (référence 500 db).
- Seasonal variations off Dakar :
- a) mean sea level (cm);
 - b) heat content (0-500 m) and (0-300 m), ($J m^{-2}$);
 - c) heat content (0-100 m), ($J m^{-2}$);
 - d) dynamical height of the sea surface referred to 500 db (dyn-cm).

Les contenus thermiques océaniques mensuels ont été calculés dans chaque couche en intégrant suivant la verticale le produit de la température moyenne mensuelle par la masse volumique et par la chaleur spécifique. Nous avons utilisé 19 couches océaniques entre la surface et 500 m pour les aires au large de Dakar et de Pointe-Noire, 22 couches océaniques entre 0 et 1 400 m à la station « Abidjan-Sud ». Les présentes estimations de CT sont fondées sur les températures aux profondeurs standard à « Abidjan-Sud » : 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 et 500 m, puis par pas de 100 m jusqu'à 1 400 m. Au large de Dakar et de Pointe-Noire, les CT sont fondés sur les températures aux profondeurs suivantes : 0, 20, 30, 40, 50, 60, 85, 110, 135, 160, 185, 210, 235, 260, 285, 310, 360, 410, 460, 510 m. On a défini les différentes couches par trois méthodes : d'abord entre la surface et des profondeurs fixes; puis par la température des isothermes supérieure et inférieure; enfin par les masses d'eau, après leur identification sur les diagrammes (T-S).

Dans la région au large de Dakar, les variations saisonnières de CT suivant la profondeur sont en phase dans les couches 0-100, 0-300 ou 0-500 m (fig. 4), avec un minimum en février (0-100; 0-300 m) ou mars (0-500 m) et un maximum en juillet dans toutes les couches. Toutefois entre octobre et novembre, on observe un palier de CT dans les couches profondes (0-300; 500 m), tandis que dans les couches superficielles CT décroît. Ce palier apparaît également sur les observations de NM entre octobre et novembre.

Dans le Golfe de Guinée, les CT au large de Pointe-Noire et Abidjan présentent deux maxima et deux minima annuels. Devant Pointe-Noire, le signal de l'upwelling saisonnier apparaît entre mai et juin de 0 à 500 m, et le minimum de CT s'établit d'abord dans les couches profondes (juin-août, fig. 5), puis dans la couche superficielle (août). A « Abidjan-Sud », l'upwelling annuel se manifeste par une chute importante de CT en juin-juillet dans toutes les couches, mais alors que le minimum s'établit en juillet-août dans les couches profondes (fig. 6), il n'apparaît qu'un mois plus tard en août-septembre dans la couche 0-100 m. Le signal de l'upwelling annuel dans le Golfe de Guinée apparaît à Pointe-Noire environ un mois plus tôt qu'à Abidjan. Le maximum de CT se déplace progressivement du Sud vers le Nord, étant observé d'abord à Pointe-Noire (février-mars-avril), puis à Abidjan (avril-mai) et enfin à Dakar (juillet-août-septembre).



POINTE-NOIRE

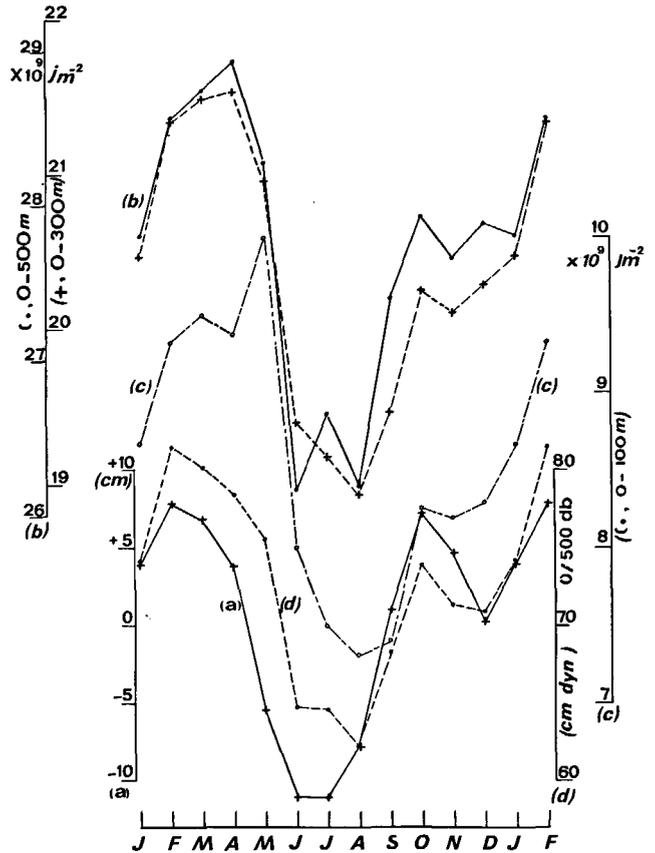


Figure 5
Variations saisonnières au large de Pointe-Noire : voir légende de la figure 4.
Seasonal variations off Pointe-Noire. Same as Figure 4.

Niveau moyen

A l'aide de la relation (T-S) établie pendant trois expériences intensives en 1973, 1974 et 1977, il a été possible de calculer la Hauteur Dynamique (HD) à partir des seuls profils thermiques et de montrer qu'une très bonne corrélation existe entre HD et NM à des échelles de temps comprises entre 2-3 jours et 6 mois (Verstraete, Picaut, 1983). Ceci justifie notre comparaison des cycles annuels de CT et de NM.

Sur la bordure Est de l'Atlantique tropical, dans le Golfe de Guinée, les variations saisonnières de T_s et NM présentent deux événements caractéristiques (Verstraete, 1982) : entre novembre et février, T_s et NM baissent respectivement d'environ 2°C et 5 cm par rapport à la référence du mois de novembre; entre la mi-avril et la mi-septembre, T_s et NM chutent d'environ $5-8^\circ\text{C}$ et 10-15 cm en prenant les valeurs du mois d'avril

Figure 6
Variations saisonnières au large d'Abidjan :
a) niveau moyen de l'océan (cm);
b) contenu thermique de 0 à 1400 m et de 0 à 500 m (J m^{-2});
c) contenu thermique de 0 à 100 m (J m^{-2});
d) hauteur dynamique (cm-dyn) de la surface (réf. 500 db).
Seasonal variations off Abidjan :
a) mean sea level (cm);
b) heat content (0-1400 m) and (0-500 m), J m^{-2} ;
c) heat content (0-100 m), (J m^{-2});
d) dynamical height of the sea surface referred to 500 db (dyn-cm).

pour référence; cette dernière période constitue la saison d'upwelling. La chute de NM se produit environ un mois avant la chute de T_s , près de la côte, et on observe un retard d'un mois dans la marche de HD (0/20 db) à la station côtière d'Abidjan par rapport à la marche de NM (Verstraete, Picaut, 1983). Dans la région du Cap-Vert, T_s et NM sont minimums entre janvier et mars, période de l'upwelling; maximums en juillet-août-septembre pendant la saison chaude. Ce fort signal annuel a une double amplitude (crête à creux) de 9°C pour T_s et de 16 cm pour NM.

Les cycles annuels du niveau moyen de l'océan, de son contenu thermique dans les couches 0-100 m et 0-500 m, et de la hauteur dynamique de la surface de la mer relative au niveau 500 db sont présentés sur les figures 4, 5 et 6. Le début de l'upwelling est détecté par une chute de NM de 8 cm entre novembre et décembre à Dakar (fig. 4), de 6,3 cm entre juin et juillet à Abidjan (fig. 6) et de 9,3 cm entre avril et mai à Pointe-Noire (fig. 5). On observe dans la région de Dakar une baisse légère mais significative de NM et de HD de l'ordre de 3 cm en octobre par rapport au niveau du mois d'août (fig. 4) alors qu'à cette époque de l'année T_s est maximale; cette chute est induite par un refroidissement en profondeur qui apparaît clairement en septembre avec une montée des isothermes comprises entre 13°C (200 m) et 19°C (70 m). Le même phénomène de chute de NM (de l'ordre de 5 cm) en pleine saison chaude s'observe en décembre à Pointe-Noire et en janvier à Abidjan; les hauteurs dynamiques et les contenus thermiques dans diverses couches passent par un minimum, et un refroidissement subsuperficiel apparaît clairement dans chacune de ces aires océaniques : d'octobre à décembre à Pointe-Noire et de novembre à février à Abidjan, avec une montée générale des isothermes comprises entre 10°C (350 m) et 25°C (30 m). Ces refroidissements en profondeur sont dus à des Eaux Centrales de l'Atlantique Sud que l'on peut identifier facilement sur les diagrammes (T-S) et que nous allons maintenant étudier.

Les masses d'eau au large de Dakar, Abidjan et Pointe-Noire; les Eaux Centrales de l'Atlantique Sud

Afin de mieux préciser le cycle annuel de CT, nous avons cherché à identifier les différentes masses d'eau et leurs variations d'épaisseur. En effet grâce à leur relation (T-S) parfaitement définie, nous pouvons identifier chaque masse d'eau, en proportions différentes à chaque profondeur en provenance du mélange de cinq eaux-types désignées ci-dessous de (1) à (5) [la salinité est donnée en unités pratiques, conformément à l'usage en océanographie] :

- Eau Tropicale de Surface (ETS) : 28°C, 35; (1)
- Eau Centrale de l'Atlantique Sud (ECAS) : 18°C, 35,6; (2)
- Eau Centrale de l'Atlantique Nord (ECAN) : 18°C, 36,5; (3)
- Eau Antarctique Intermédiaire (EAI) : 5°C, 34,55; (4)
- Eau Profonde de l'Atlantique Nord (EPAN) : 3,5°C, 35; (5).

Les températures et salinités des eaux types (1), (2) et (4) sont celles qui correspondent au Golfe de Guinée (Houghton, 1976; Beer, 1983; Guillermin, 1981). Sur le diagramme (T-S) que nous avons établi à l'aide des observations faites de 0 à 1400 m à « Abidjan-Sud » (fig. 7), on identifie aisément l'Eau Tropicale de Surface (ETS) très chaude (28°C) et de salinité relativement faible (35), en contact avec l'ECAS relativement froide (18°C) et salée (35,6) que l'on trouve à partir de profondeurs comprises entre 50 m (août-septembre) et 125 m (avril; novembre). Le minimum de salinité de 34,55 à 5,0°C entre 700 et 800 m de profondeur révèle la présence d'EAI (Sverdrup *et al.*, 1942; Emery, Dewar, 1982); enfin l'accroissement régulier de salinité observé entre 900 et 1400 m provient de l'EPAN (mêmes références que pour l'EAI pour l'identification).

Le mélange entre l'EAI et l'ECAS a lieu suivant une relation rigoureusement linéaire sur les diagrammes

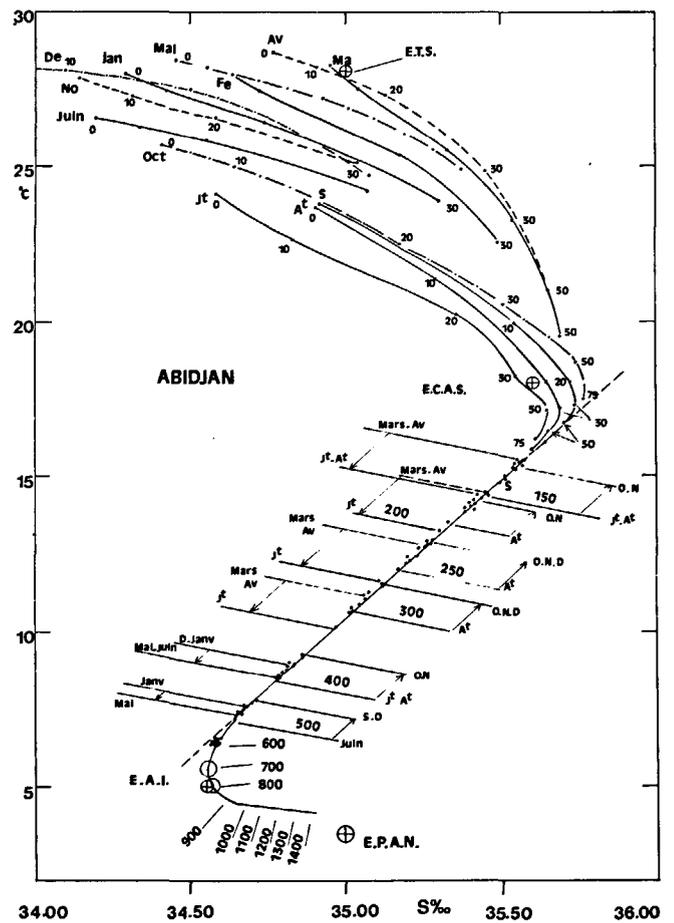


Figure 7

Diagramme T-S moyen à la station « Abidjan-Sud ». Chaque point représente la température et la salinité moyenne de toutes les observations pour le mois considéré. Le déplacement saisonnier des points est indiqué entre 150 et 500 m. Le déplacement mensuel des points de la courbe T-S entre 0 et 75 m est indiqué. Les chiffres donnent la profondeur en mètres. ETS : Eau Tropicale Superficielle; ECAS : Eau Centrale de l'Atlantique Sud; EAI : Eau Antarctique Intermédiaire; EPAN : Eau Profonde de l'Atlantique Nord. La droite de mélange est en trait plein de 7,4°C (500 m) à 15,6°C (125 m).

Mean T-S diagram at the "Abidjan-Sud" Station. Each dot gives the mean temperature and salinity of all the observations for each month. Figures indicate the depth in metres. Seasonal shifts of dots are shown between 150 and 500 m; monthly T-S curves are shown between 0 and 75 m; ETS is Tropical Surface Water; ECAS South Atlantic Central Water; EAI Antarctic Intermediate Water; EPAN North Atlantic Deep Water. The mixing straight line is continuous between 7,4°C (500 m) and 15,6°C (125 m).

T-S, entre 125 et 500 m, toute l'année (fig. 7); ce n'est qu'à partir de 700 m que les points s'écartent notablement de la droite de mélange (fig. 2), signe manifeste que l'EAI est prépondérante à partir de cette profondeur. Par contre, à 500 m, les masses d'eau gardent toute l'année leurs caractéristiques d'ECAS (fig. 2); ceci est confirmé par les diagrammes sels nutritifs-salinité établis pendant les campagnes FOCAL à 4°W (Morin, Oudot, comm. pers.); le diagramme T-S de la figure 7 permet de suivre l'évolution saisonnière des températures et salinités à chaque niveau : T et S augmentent à partir de juin à 500 m et seulement en août à 75 m jusqu'en octobre-novembre; de même le refroidissement et la baisse de salinité sont plus précoces à 500 m (de janvier à mai, fig. 2) qu'à 150 m (de mars à août, fig. 7). A 600 et 700 m (fig. 2), les nuages de points ne permettent pas de déceler une évolution saisonnière, sauf de août à octobre où l'on observe une augmentation nette de température et de salinité. Les frontières qui séparent les eaux-types (1-2) et (2-4) se déplacent verticalement de plusieurs dizaines de mètres au cours de l'année; afin de préciser ces mouvements verticaux, nous avons établi la droite mélange entre 7,4°C (500 m) et 15,6°C (125 m); la régression linéaire (équation (1) dans l'Annexe) a porté sur 84 couples de valeurs (T-S) et le coefficient de corrélation ($r=0,99950$) est hautement significatif; elle est représentée en trait plein entre 7,4°C (500 m) et 15,6°C (125 m) sur la figure 7. Au-delà de ces limites, nous l'avons extrapolée en pointillés. Nous avons ensuite calculé les régressions linéaires mois par mois en faisant varier les profondeurs h et H des interfaces des masses d'eau (1-2) et (2-4); par régressions successives, nous avons déterminé les immersions minimale et maximale de h et H pour lesquelles les points T-S caractéristiques de l'ECAS se trouvent sur la droite de mélange avec deux critères : le coefficient de régression r doit être le plus élevé possible et l'intervalle de confiance à 95% sur la pente de la droite de régression le plus petit possible. Ces critères de sélection de h et H se révèlent extrêmement sensibles au choix de h et H , et nous avons donc donné r avec cinq décimales. Les résultats des calculs sont présentés en annexe dans le tableau. On notera l'extraordinaire stabilité de la pente a des droites de mélange. Finalement, nous avons établi la régression linéaire globale pour les 106 points (T-S) compris entre 50 et 600 m; elle est extrêmement significative avec r égal à 0,99950 et pour cette raison, nous l'avons dénommée « Droite de Mélange Canonique » (DMC); elle est présentée en trait plein entre 6,4°C (600 m) et 16,5°C (50 m) sur la figure 8. Son équation (2) est donnée en Annexe.

D'après ces résultats, nous pouvons suivre les déplacements verticaux saisonniers des interfaces h [masses d'eau (1) et (2)] et H [masses d'eau (2) et (4)], donc les variations saisonnières d'épaisseur des ECAS. Nous voyons qu'entre les situations types de « grande saison chaude » (avril) et de « grande saison froide » (septembre), l'épaisseur d'ECAS au large d'Abidjan croît de 175 m. Ceci s'explique par un déplacement vers le haut et vers le bas des interfaces h et H d'avril à septembre. La meilleure régression en avril nous donne $h=125$ m, $H=500$ m; tandis qu'en septembre, $h=50$ m et

$H=600$ m (tableau). Entre la « petite saison chaude » (octobre-novembre) et la « petite saison froide » (décembre-janvier-février), l'épaisseur d'ECAS croît d'environ 100 m. La couche d'ECAS atteint son maximum d'expansion verticale pendant les deux saisons froides : 500-550 m entre juin et septembre, et 500 m en décembre-janvier-février; son épaisseur est minimale pendant les deux saisons chaudes : 375-400 m en mars-avril-mai et 400 m en octobre-novembre. On peut voir sur la figure 2 que ces excursions verticales des eaux centrales débordent la thermostat vers le bas et la thermocline tropicale vers le haut.

L'étude des corrélations (T-S) niveau par niveau de 0 à 1400 m pour l'ensemble des 12 mois de l'année révèle que la pente de la droite de régression et la covariance sont négatives de 0 à 50 m (les minimums de température sont corrélés à des maximums de salinité), positives de 75 à 600 m et enfin négatives de 700 à 1400 m. Ceci traduit bien le fait, déjà étudié en partie ci-dessus, que nous avons trois lois de mélange avec quatre masses d'eau différentes (1), (2), (4) et (5) au large d'Abidjan. Nous donnons en annexe la droite de régression (3) qui représente la loi du mélange entre l'EAI et l'EPAN.

Il est évident que les variations d'épaisseur considérables des couches d'ECAS et ETS ont des répercussions très importantes sur le contenu thermique dans la « sphère

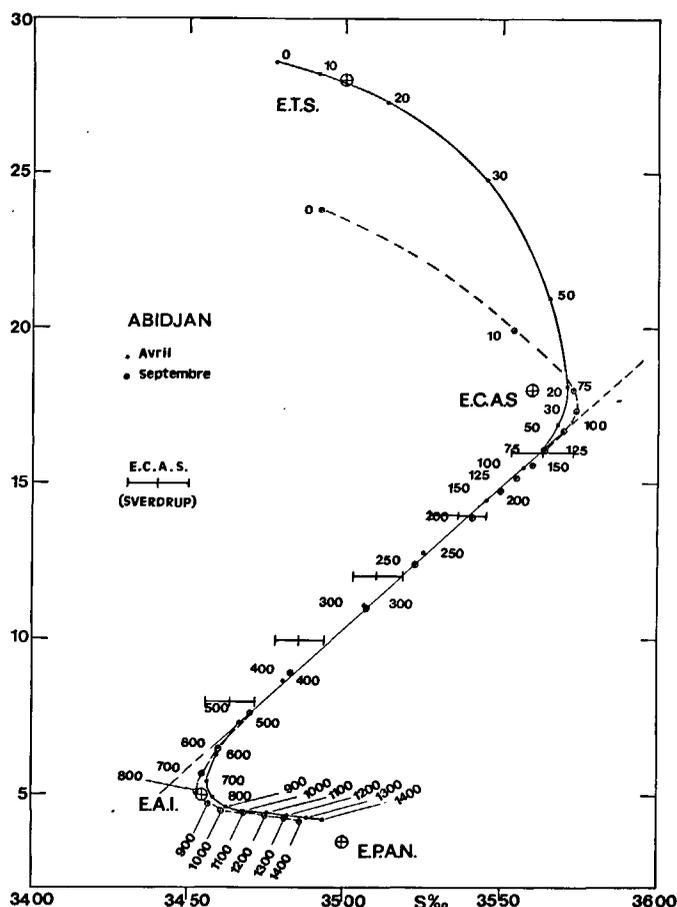


Figure 8

Diagrammes T-S à « Abidjan-Sud » en avril et en septembre. La droite de mélange « canonique » de l'ECAS est en trait plein de 6,4°C (600 m) à 16,5°C (50 m). Entre 8 et 16°C, on a figuré les points de l'ECAS avec leurs intervalles de confiance, d'après Sverdrup (voir légende de la fig. 7 pour les acronymes).

T-S diagram at "Abidjan-Sud" in April and September. The SACW "canonical" mixing straight line is continuous between 6,4°C (600 m) and 16,5°C (50 m). Between 8 and 16°C are shown the SACW according to Sverdrup (see the legend of Fig. 7).

d'eau chaude ». Les variations de CT dans ces couches d'eau s'expliquent essentiellement par leurs variations d'épaisseur plutôt que par leurs variations de température (Fahrbach, 1983; Verstraete, 1983). On constate que CT dans la couche ECAS varie en opposition de phase avec celui de la couche ETS (fig. 9), qui correspond à peu près à l'épaisseur des couches (M) et (T) réunies. Ce résultat se trouve confirmé en comparant les variations de CT dans les couches (TD) et (TP) réunies avec la couche d'ECAS; celle-ci étant plus épaisse que la thermostad et la thermocline principale, son contenu thermique est nettement plus élevé. Il est intéressant de noter que l'amplitude crête à creux des variations de CT dans la couche superficielle (ETS) est à peu près égale à celle observée dans la couche d'ECAS entre avril-mai et août-septembre (environ $8 \times 10^9 \text{ J m}^{-2}$). Cependant l'épaisseur de ces couches d'eau varie respectivement de -75 m (ETS) et de 175 m (ECAS). Il y a donc des transferts de chaleur verticaux très importants, le refroidissement des ETS étant à peu près égal au réchauffement des ECAS. Nous avons repris ce travail d'identification des masses d'eau au large de Pointe-Noire. Le diagramme T-S moyen (fig. 10), quasiment identique à celui d'« Abidjan-Sud », met en évidence la présence d'ECAS entre 7,0°C (500 m) et 15,8°C (125 m); l'importance des intervalles de confiance à 95% aux niveaux 10, 20 et 30 m s'explique par l'influence sporadique des eaux douces déchargées par les fleuves (Congo notamment). Une première régression très signi-

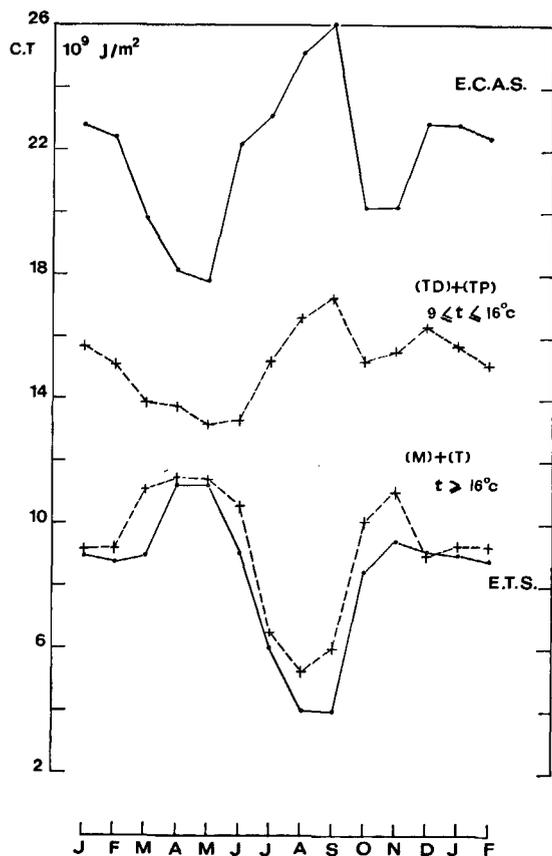


Figure 9
Variations saisonnières du contenu thermique en Joule par m^2 à « Abidjan-Sud ». Pour les significations de M, T, TD, TP, voir légende de la figure 2; ECAS, ETS, voir légende de la figure 7.
Heat content seasonal variations (J m^{-2}) at "Abidjan-Sud" (see the legends of Fig. 2 and 7).

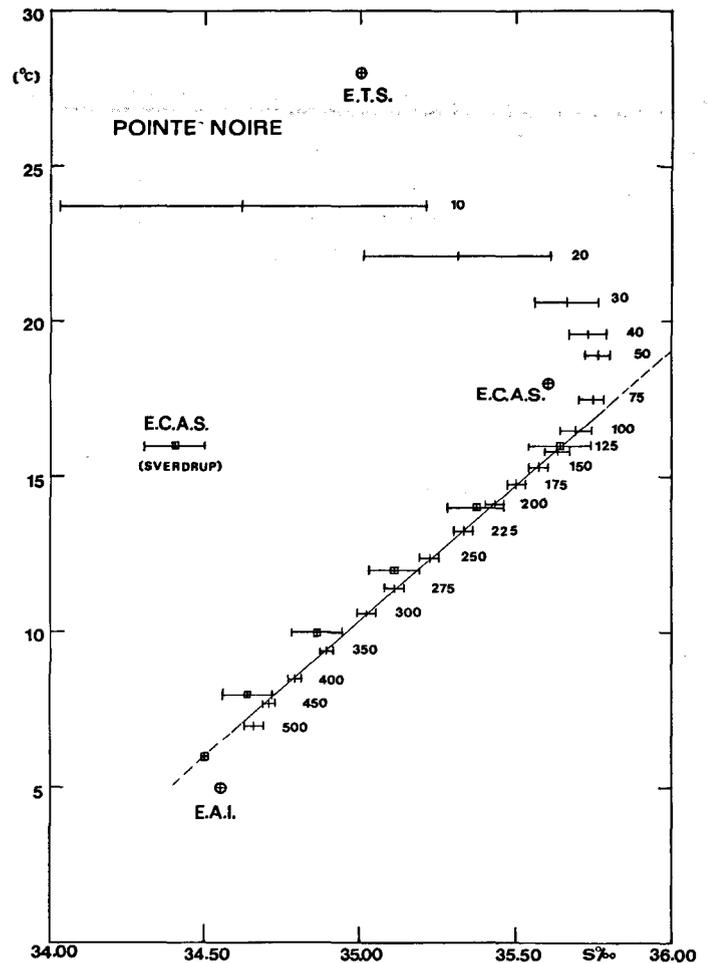


Figure 10
Diagramme T-S moyen au large de Pointe-Noire. Les chiffres indiquent la profondeur en mètres. La définition des ECAS selon Sverdrup est figurée de 6 à 16°C. Intervalles de confiance à 95% ETS, ECAS, EAI, voir légende figure 7. Droite de mélange « canonique » de l'ECAS en trait plein de 7,1°C (500 m) à 17,2°C (40 m).
Mean T-S diagram off Pointe-Noire. The figures give the depth in metres. The SACW according to Sverdrup are shown between 6 and 16°C. 95% confidence intervals. The SACW "canonical" mixing straight line is continuous between 7,1°C (500 m) and 17,2°C (40 m).

ficative a porté sur 136 couples (T-S) entre 7,0 et 15,8°C. Nous n'avons pas pu déterminer les mouvements verticaux de l'interface H au-dessous de 500 m, car les stations ne sont pas assez profondes pour atteindre le maximum d'extension verticale de l'ECAS. Nous pouvons seulement affirmer que l'ECAS est présente en permanence à 500 m sauf en juin; un événement se produit en août entre 275 et 500 m sur lequel nous reviendrons. La régression globale a porté sur 155 couples (T-S) compris entre 40 et 500 m. Elle est hautement significative et elle est présentée en trait plein entre 7,1°C et 17,2°C sur la figure 10.

L'examen de la marche des isothermes et des 12 T-S mensuels révèle deux événements importants en mai-juin d'une part et en juillet-août d'autre part. Entre mai et juin, la température et la salinité baissent dans la colonne d'eau 75-500 m, tandis qu'entre la surface et 50 m la forte chute de la température s'accompagne du maximum annuel absolu de salinité à 35,90 à 30-40 m. Il est à noter qu'au niveau 225 m, T et S varient peu ($-0,43^\circ\text{C}$, $-0,03$ et que la décroissance de T augmente vers le haut ($-1,4^\circ\text{C}$ au niveau 100 m) et

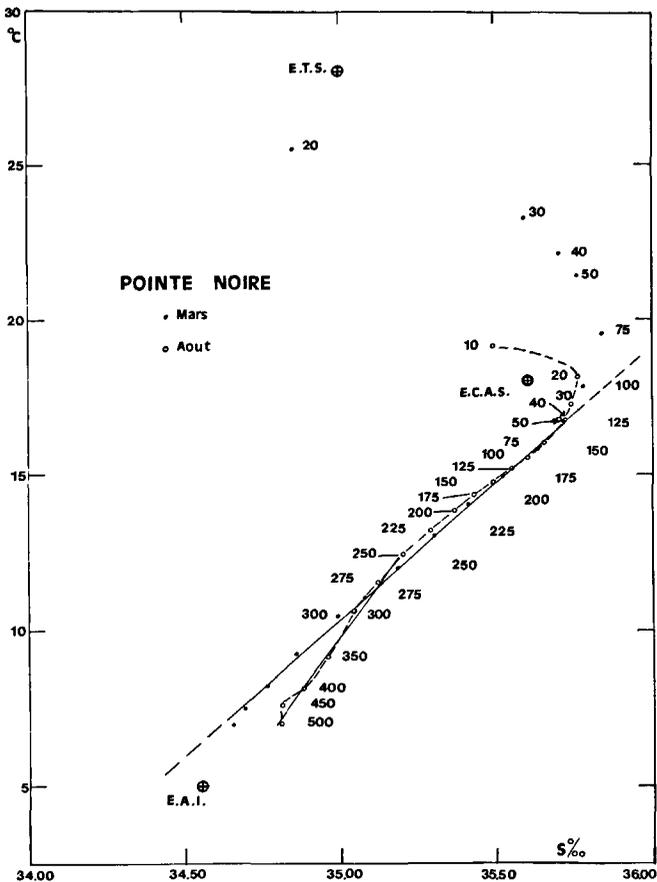


Figure 11
Diagrammes T-S au large de Pointe-Noire en mars et en août (voir légende de la figure 10). Droite de mélange des ECAS en août entre 250 et 500 m.

T-S diagram off Pointe-Noire in March and August (see legend of Figure 10). SACW mixing straight line in August between 250 and 500 m.

vers le bas (-1.1°C au niveau 500 m). La montée des isothermes supérieures et inférieures est de plus en plus forte à mesure que l'on s'éloigne de l'isotherme 13°C . Il est donc exclu que le refroidissement observé en mai-juin en surface soit dû à un upwelling d'eaux profondes dont les salinités décroissent, puisque les salinités des eaux superficielles croissent dans le même temps. Nous sommes donc conduits à admettre que le refroidissement général observé de 0 à 500 m devant Pointe-Noire est causé par l'advection horizontale de deux masses d'eau différentes. D'une part, une poussée d'EAI en profondeur (à 500 m, le point TS se rapproche nettement de l'eau-type EAI) et d'autre part, une poussée d'ECAS, relativement froide par rapport aux ETS, dans les couches superficielles. On constate en effet que tous les points du diagramme (T-S) compris entre 30 et 75 m se rapprochent des caractéristiques de l'ECAS. Entre juillet et août, nous observons une couche très stable en température et en salinité entre les isothermes 15°C (140 m) et 12°C (260 m), comprise entre deux couches qui se refroidissent faiblement suivant deux processus différents; en profondeur, entre 275 et 500 m la salinité croît fortement (fig. 11) (à 500 m elle passe de 34.67 à 34.81), tandis que dans les couches superficielles entre 0 et 175 m, la salinité décroît. L'interprétation de ce fait est simple : une augmentation significative de salinité entre 275 et 500 m accompagnée

d'un refroidissement faible ne peut provenir que d'un apport par advection d'ECAS puisqu'il n'existe aucune autre source d'eau salée à ces profondeurs. Quant à la faible baisse de salinité et de température dans les couches superficielles, elle résulte du mélange déjà ancien vers le haut et vers le bas des ECAS advectées entre mai et juin; les variations de profondeur de l'interface des eaux-types (1) et (2), ont été établies en suivant la même méthode qu'à « Abidjan-Sud »; brièvement, l'interface (1-2) se trouve à 125 m en avril, 100 m en mai, 75 m en juin et elle affleure à 40 m en juillet-août; elle plonge à 75 m en septembre-octobre et s'enfonce à 100 m de novembre à janvier. La droite de mélange des ECAS entre 250 et 500 m en août est présentée sur la figure 11.

Au large de Dakar enfin, les diagrammes T-S mettent en évidence une droite de mélange caractéristique de l'ECAN entre $12,0$ et $15,0^{\circ}\text{C}$ (profondeurs comprises entre 310 et 85 m). Entre 11 et 12°C (de 360 à 280 m), une soudaine rupture de pente révèle la présence d'une masse d'eau différente (fig. 12); en effet, entre 11 et 9°C (500 m), une nouvelle droite de mélange apparaît dont la pente est supérieure ou égale à celle de l'ECAN; de mai à août, les deux droites sont sensiblement parallèles (voir juillet, fig. 12). Cette deuxième droite est la

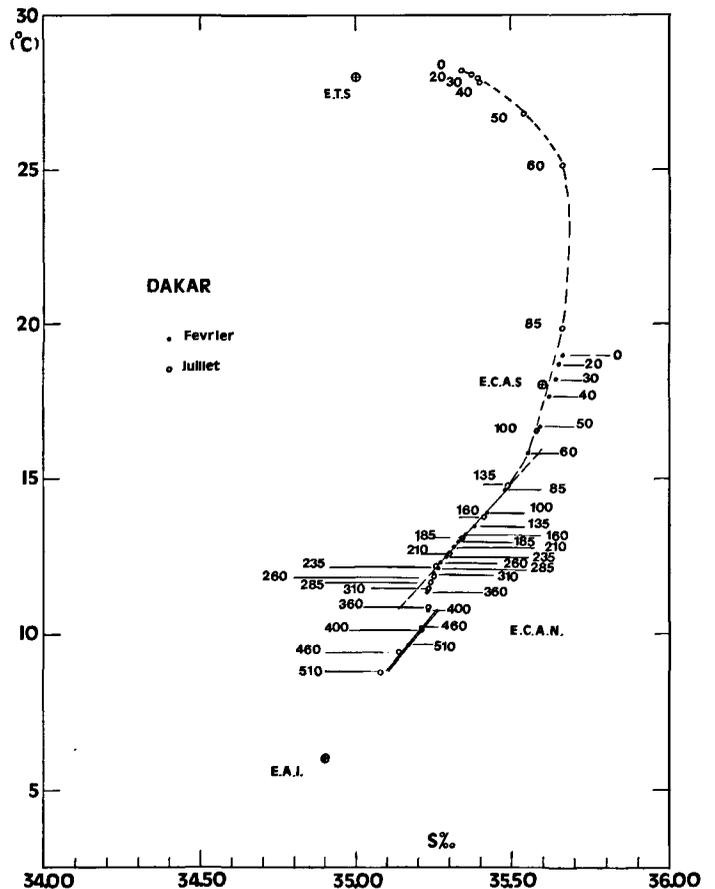


Figure 12
Diagrammes T-S au large de Dakar en février et en juillet. ECAN : Eau Centrale de l'Atlantique Nord (voir légende figure 7 pour les autres acronymes). Droite de mélange des ECAN entre $14,8^{\circ}\text{C}$ (85 m) et 12°C (310 m). Droite de mélange des ECAN entre $8,8^{\circ}\text{C}$ (510 m) et $10,8^{\circ}\text{C}$ (410 m).

T-S diagram off Dakar in February and July. ECAN is North Atlantic Central Water (see Fig. 7 for other acronyms). SACW mixing straight line between $14,8^{\circ}\text{C}$ (85 m) and 12°C (310 m). NACW mixing straight line between $8,8^{\circ}\text{C}$ (510 m) and $10,8^{\circ}\text{C}$ (410 m).

manifestation de la présence d'ECAN telle qu'elle est définie par Sverdrup *et al.* (1942) et par Emery et Dewar (1982). Nous avons figuré la droite de mélange de l'ECAN entre 8,8 et 10,8°C sur la figure 12. Cette eau-type n'apparaît pas dans le Golfe de Guinée et c'est elle qui explique la forme caractéristique des diagrammes T-S au large de Dakar. La montée de l'isotherme 10°C de mai à août correspond à une poussée d'ECAN entre 300 et 500 m. On peut également identifier les masses d'eau responsables du refroidissement observé entre 85 et 200 m entre septembre et novembre : il s'agit d'ECAS, facilement identifiables sur les diagrammes T-S. Ces masses d'eau ont été observées le long du talus continental africain jusqu'au Cap Timiris (Mittelstaedt, 1983). On les observe en permanence au large de la presqu'île du Cap-Vert entre 135 et 260 m. L'ECAS est en contact avec l'ETS au-dessus et avec l'ECAN au-dessous. Son extension verticale est maximale pendant deux périodes : de janvier à mars (200 à 225 m) et de septembre à novembre (200 m); minimale en juillet (125 m) et en décembre (175 m).

Le refroidissement observé en profondeur (entre 60 et 250 m) de septembre à novembre (baisse de NM de 3,2 cm d'août à octobre) trouve ici son explication : il est dû à des ECAS advectées vers le Nord par la branche nord du contre-courant équatorial Nord (CCEN), dont le flux à 23°W est maximal en juillet (entre 4°30 et 14°N; Hémin, Hisard, 1984). Ce refroidissement ne peut pas s'expliquer par une action atmosphérique locale (alizés faibles ou absents, calmes importants). En février-mars-avril, les alizés sont puissants et l'upwelling se développe complètement jusqu'en surface, avec une baisse de CT (NM baisse de 8,0 cm par rapport à la moyenne annuelle), tandis qu'en septembre-octobre, le refroidissement subsuperficiel n'atteint pas la surface.

Discussion sur la variation d'épaisseur de l'ECAS dans l'Atlantique tropical Est

Les contre-courants équatoriaux (CCE) transportent de l'ECAS (Mazeika, 1968; Cochrane *et al.*, 1979; Voituriez, 1983 *a* et *b*) dont les caractéristiques T-S, parfaitement connues, ont été revues récemment pour l'Atlantique Nord, sauf dans le Golfe de Guinée, par Emery et Dewar (1982). Voituriez (1981) explique la formation des dômes thermiques de Guinée et d'Angola par l'advection d'ECAS dans l'Atlantique tropical Est par ces courants (fig. 13). Au large de Dakar, l'ECAS se trouve entre 12 et 15°C (de 85 à 310 m); son extension verticale est maximale de janvier à mars et de septembre à novembre; minimale en juillet-août et en décembre. Au large d'Abidjan, l'ECAS se trouve entre 6,4 et 16,5°C (de 50 à 600 m) avec deux maxima d'épaisseur pendant la « grande saison froide » de juin à septembre, et la « petite saison froide » de décembre à février; et deux minima de mars à mai et en octobre-novembre. Au large de Pointe-Noire, la borne inférieure de l'ECAS n'a pas été déterminée au-dessous de 500 m; en nous fondant sur les observations de 0 à 500 m, il existe un

maximum d'épaisseur de juillet à septembre (460 m) et un minimum de février à mai (375 m); entre octobre et janvier, nous observons un palier intermédiaire (400 m). L'interface *h* entre les eaux tropicales chaudes et dessalées superficielles (ETS) et les ECAS relativement froides et salées se déplace vers le haut pendant chacun des refroidissements saisonniers au large du Cap-Vert, d'Abidjan et de Pointe-Noire; entre la grande saison chaude et la grande saison froide, ce déplacement est respectivement de 50, 75 et 85 m. En même temps que l'ECAS augmente d'épaisseur, sa température s'élève et son contenu thermique croît pour ces deux raisons; symétriquement, l'épaisseur d'ETS décroît, sa température baisse et son CT chute (fig. 9). La baisse globale de CT (fig. 4, 5, 6) entre 0 et 500 m, qui se manifeste par une chute de NM (et de HD) pendant les upwellings (−8,0 cm à Dakar, −9,4 cm à Abidjan et −11,1 cm à Pointe-Noire) nous masque en réalité de vigoureux échanges thermiques verticaux entre l'ETS (source chaude) et l'ECAS (source froide). Il est manifeste que ce sont les variations d'épaisseur d'ECAS qui sont la cause première des variations de CT : en effet, à Abidjan-Sud par exemple, l'ECAS se réchauffe de juin à novembre (fig. 7) alors que son contenu thermique chute en octobre-novembre (fig. 9), parce que son épaisseur a diminué de plus de 100 m.

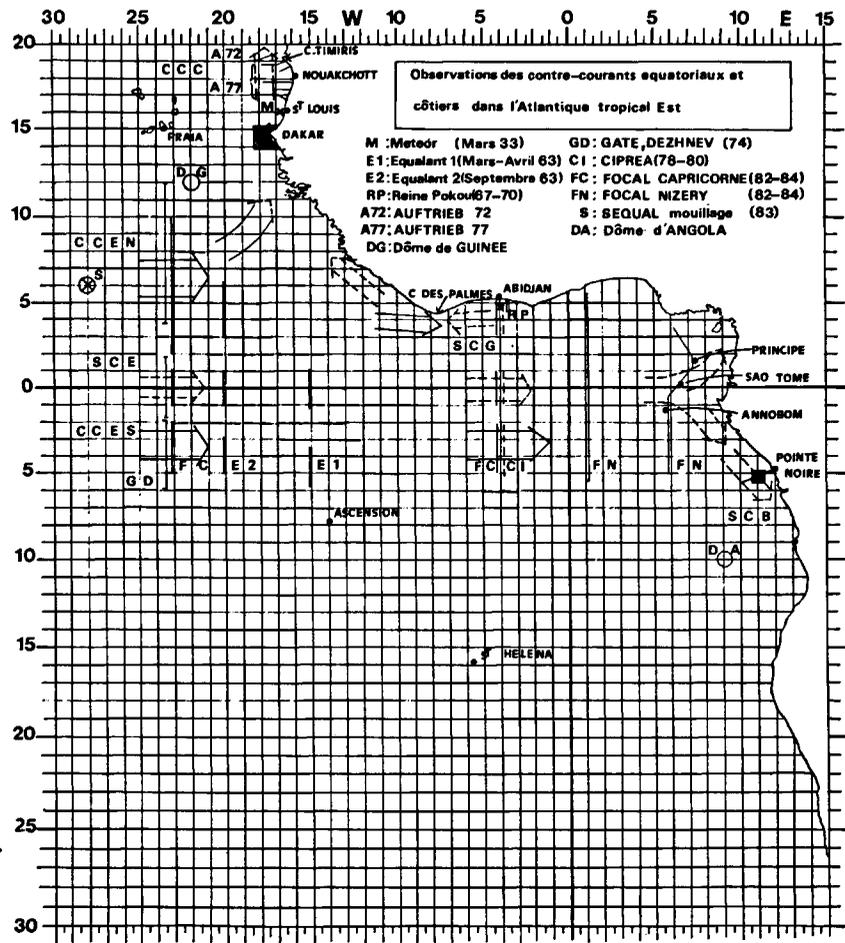
Comment expliquer de pareilles variations d'épaisseur de l'ECAS dans cette région? Tout d'abord, nous devons éliminer l'action locale de l'atmosphère : les cycles annuels des vents et des pressions barométriques sont bien connus pour leur régularité et leur faible amplitude surtout dans le Golfe de Guinée (Verstraete *et al.*, 1980). Les études sur les upwellings côtiers montrent que les profondeurs à partir desquelles les eaux remontent à la surface ne dépassent guère 100 à 200 m entre 17 et 19°N (Mittelstaedt, Hamann, 1981) et 80 m dans le Golfe de Guinée (Verstraete, 1970; Houghton, 1976). Les variations d'épaisseur d'ECAS ne sont pas dues à des mouvements verticaux, vu la faiblesse des vents, toujours inférieurs à 9 ms⁻¹. Les seules sources d'ECAS ne peuvent donc être que les contre-courants équatoriaux et les contre-courants côtiers. Les campagnes Focal (1982-84) ont démontré la permanence des contre-courants équatoriaux Nord (CCEN), Sud (CCES) et du Sous-Courant Équatorial (SCE) à 23°W respectivement entre 3° et 10°N, 2° et 5°S et entre 1°N et 1°S (Hémin, Hisard, 1984). De même à 4°W, le CCES, le SCE et le Sous-Courant de Guinée (SCG) sont des courants permanents transportant de l'ECAS comme l'ont montré les nombreuses campagnes de l'ORSTOM (fig. 13; Lemasson, Rébert, 1973; Hisard *et al.*, 1976; Herbland *et al.*, 1983; Oudot, 1983). Au large de Pointe-Noire, Guillermin (1981) a montré que sous un mince et faible courant superficiel portant vers le Nord s'écoulait, pendant la saison d'upwelling, un puissant contre-courant vers le Sud que nous désignerons par Sous-Courant de Benguela (SCB); les eaux remontées en surface sont des ECAS en provenance de la branche Sud du SCE et du CCES, observés à 1°E et 6°E en mai 1984 (Piton, comm. pers., T et S de 0 à 500 m, compte rendu de la campagne A. Nizery en mai 1984).

Au large du Sénégal et de la Mauritanie, il est établi

Figure 13

Principales campagnes d'océanographie dans l'Atlantique tropical Est. Positions moyennes observées des Contre-Courants Équatoriaux : CCEN : Contre-Courant Équatorial Nord; CCES : Contre-Courant Équatorial Sud; SCE : Sous-Courant Équatorial; SCG : Sous-Courant de Guinée; CCC : Contre-Courant des Canaries; SCB : Sous-Courant de Benguela.

Main oceanographical cruises in the Eastern Tropical Atlantic Ocean. Mean locations of the equatorial counter-currents: CCEN is the North Equatorial counter-current; CCES, South Equatorial counter-current; SCE, Equatorial under current; SCG, Guinea undercurrent; SCB, Benguela undercurrent; CCC, Canaries counter-current.



que pendant l'upwelling, l'ETS est remplacée par de l'ECAS (Mittelstaedt, 1983; Rébert, 1983), advectée vers le Nord par le Contre-Courant des Canaries (CCC) lui-même alimenté par la réunion de deux contre-courants distincts : le CCEN et le SCG. Au cours des campagnes « Auftrieb » d'abord au large du Cap Timiris en 1972, puis entre 17 et 19°N en 1977 (fig. 13), Mittelstaedt a observé à l'aide de mesures absolues un sous-courant vers le pôle, de plus de 100 km de large, dont le cœur ($7 \text{ à } 20 \text{ cm s}^{-1}$) se trouvait contre la pente du talus continental. Ce contre-courant a été observé à maintes reprises sur le plateau continental entre 14 et 19°30'N; ainsi pendant trois jours, le Météor ancré par fonds de 100 m au large de St-Louis en mars 1933, a observé au-dessous de 20 m un courant de 15 cm/s vers le Nord (*in* Rébert, 1983). Ce puissant flux subsuperficiel transporte de l'ECAS en provenance du CCEN et du SCG; il est maintenu par le gradient de pression barotrope à grande échelle qui existe dans l'Atlantique tropical Est entre 5° et 15°N (environ 20 cm-dyn) à 20°W (Merle, comm. pers., carte des HD au niveau 5 m, réf. 500 db); ce flux vers le pôle serait maximal en hiver et au printemps lorsque les alizés et le rotationnel du vent sont maximaux. L'alimentation du CCC par le CCEN a été confirmée par les trajectoires de bouées dérivantes « Sequal » qui montrent deux branches : l'une entre dans le Golfe et renforce le courant de Guinée; l'autre tourne vers le Nord et longe l'Afrique (Richardson, 1984). Quant à la continuation du SCG au-delà du Cap des Palmes, elle a été établie par Mc Grail (1977; 1979) sur le plateau continental et

sa rupture de pente au large du Libéria, de la Sierra Léone, de la Guinée et de la Guinée-Bissau. Nous avons également indiqué sur la figure 13 la position des contre-courants équatoriaux à 23°30'W en 1974 (Atlas GATE, Anonyme, 1980 a) et à 15°W et 20°W en 1963 (Equalant 1 et 2, Mazeika, 1968).

L'ensemble de ces observations nous permet d'avancer que les variations saisonnières du contenu thermique dans l'Atlantique tropical Est dépendent essentiellement des variations d'épaisseur de l'ECAS advectée vers l'Est à 23°W par le système des trois contre-courants équatoriaux et de leurs prolongements le long du talus continental africain : au large de Dakar, le contre-courant des Canaries alimenté par la branche Nord du contre-courant équatorial Nord et le sous-courant de Guinée; au large d'Abidjan, le SCG alimenté par la branche Nord du SCE, et la branche Est du CCEN qui alimente le courant de Guinée; enfin, devant Pointe-Noire, le CCES et la branche Sud du SCE. Une extension du courant de Benguela atteindrait également 5°S à la fin de l'hiver austral (Guillerm, 1981).

CONCLUSION

Deux sources d'ECAS alimentent avec de fortes variations saisonnières les aires côtières de l'Atlantique tropical Est. Leurs variations d'épaisseur au large de Dakar, Abidjan et Pointe-Noire sont la cause d'échanges thermiques verticaux très importants entre les eaux

tropicales superficielles chaudes et les eaux centrales de l'Atlantique Sud relativement froides advectées vers l'Est par les trois contre-courants équatoriaux à 23°W dans l'Atlantique tropical Est. On explique ainsi facilement les upwellings côtiers observés aussi bien en surface qu'en subsurface entre 10° et 20°N (Sénégal, Mauritanie), 2°E et 8°W (Côte d'Ivoire, Ghana, Togo, Bénin) et de 3° à 13°S (Congo, Angola). Dans ces trois régions, et ceci est vrai pour le refroidissement subsuperficiel au large du Cap-Vert en septembre-octobre, les vents sont faibles et il a été impossible jusqu'ici d'expliquer ces refroidissements par l'action du vent local (« grande » et « petite » saison froide du Golfe de Guinée). Ces refroidissements sont dus, selon nous, à l'advection saisonnière d'ECAS par les trois contre-courants équatoriaux plutôt qu'à une téléconnexion entre les bords Ouest et Est du bassin équatorial. Selon cette théorie (dite en anglais du « remote forcing »), les refroidissements observés le long de la côte d'Afrique de l'Ouest proviendraient d'une soudaine accélération des vents en avril-mai sur l'Atlantique équatorial Ouest; une onde de Kelvin piégée à l'équateur se propagerait ensuite le long du continent africain vers les pôles sous forme d'onde de talus continental. Il semble assez hypothétique, vu les termes d'amortissements (toujours négligés dans les modèles) qu'une onde de Kelvin piégée à l'équateur (et probable) puisse ensuite continuer sa progression vers les pôles le long du talus continental, en faisant notamment le tour du Golfe de Guinée. On observe effectivement une progression vers le Nord du signal d'upwelling saisonnier (surtout sur les niveaux moyens), donnant l'apparence de propagation de phase d'une onde; il ne s'agit vraisemblablement pas d'une seule et même onde voyageant sur plusieurs milliers de km, mais plutôt de la progression des ECAS advectées par les divers contre-courants, comme nous l'avons vu.

ANNEXE

La notation est la suivante : T, température en °C; S, salinité en unités pratiques : par exemple 35 pour mille s'écrit 35; n, nombre d'échantillons; h (m) et H (m) profondeurs minimale et maximale où une masse d'eau appartient statistiquement à la droite de mélange; h et H sont déterminées à l'aide des contraintes suivantes : r, le coefficient de la droite de mélange doit être le plus élevé possible et les intervalles de confiance à 95% de la pente et de l'ordonnée à l'origine doivent être minimaux; ils sont déterminés à l'aide des tests statistiques en fonction du nombre de degrés de liberté pour chaque régression (tables de « Student », de « KHI2 » et de « U »); a et b, pente et ordonnée à l'origine de la droite de mélange; Δa et Δb, intervalles de confiance de a et b avec un niveau de certitude à 95%.

- ECAS : Eau Centrale de l'Atlantique Sud;
- ECAN : Eau Centrale de l'Atlantique Nord;
- EAI : Eau Antarctique Intermédiaire;
- EPAN : Eau Profonde de l'Atlantique Nord.

1. Corrélations T-S à « Abidjan-Sud » (4°53'N; 4°00'W).

1 a. Droite de mélange établie à l'aide des couples T-S en permanence dans l'ECAS (h et H fixes) :

$$T = 8.952 S - 302.908 \quad (1), \text{ [fig. 7].}$$

n = 84; h = 125; H = 500; r = 0.99950; Δa = ± 0.070; Δb = ± 23.342.

1 b. Droite de mélange « canonique » (DMC) établie à l'aide de tous les couples T-S compris entre h (interface ECAS/ETS) et H (interface ECAS/EAI) :

$$T = 9.053 S - 306.450 \quad (2), \text{ [fig. 8].}$$

n = 106; h = 50; H = 600; r = 0.99950; Δa = ± 0.060; Δb = ± 18.307.

1 c. Droite de mélange établie à l'aide de tous les couples T-S compris entre l'EAI et l'EPAN (h et H fixes) :

Comme le « moteur » des trois contre-courants à 23°W, c'est le vent sur l'ensemble du bassin équatorial, responsable des gradients de pression zonale (équateur) et méridiens (entre 3 et 6°N, resp. S), il y a effectivement téléconnexion par advection. Il semble que celle-ci ait été largement sous-estimée; c'est l'un des premiers enseignements que nous donne Focal.

Pour terminer, nous pensons que ce travail permet d'apprécier l'intérêt d'une surveillance continue et globale du niveau moyen de l'océan. Les altimètres et radiomètres embarqués sur satellite travaillant de concert avec un réseau de marégraphes seront probablement, à la fin des années 1980, l'une des composantes les plus efficaces de l'observation continue de la température de surface, du contenu thermique océanique et des courants superficiels.

Remerciements

Les observations marégraphiques à Abidjan et à Téma ont été exécutées respectivement par le service hydrographique de Côte d'Ivoire et le Survey Department du Ghana, que nous tenons à remercier pour avoir bien voulu nous les communiquer. La sélection et la validation des stations hydrographiques et des XBT au large de Dakar, et de Pointe-Noire ont été réalisées par J. Servain et Y. Gouriou; les statistiques des températures et des salinités ont été exécutées par le B.N.D.O. au Centre IFREMER de Brest. Les 217 stations Nansen, à 38 km au Sud d'Abidjan, ont été exécutées par Varlet (ORSTOM) de 1957 à 1964 et Joël Picaut nous a communiqué les résultats de ses travaux sur cette station. Enfin, je remercie les deux arbitres anonymes pour leurs remarques pertinentes. Le titre et le résumé anglais ont été également nettement améliorés grâce à l'un des rapporteurs.

$$T = -1.671 S + 62.420 \quad (3), \text{ [fig. 7].}$$

n = 72; h = 900; H = 1400; r = 0.954; Δa = ± 0.126; Δb = ± 76.65.

1 d. Voir tableau.

Tableau

Droites de mélange des ECAS mois par mois à « Abidjan-Sud », nombre total de couples T-S : 106.

Mixing straight lines of "ECAS" off Abidjan each month; a, slope; b, origin ordinate; r, regression coefficient; n, samples number; h and H, respectively minimum and maximum depths of the boundaries between the South Atlantic Central Water and the Tropical Surface Water (h) or the Antarctic Intermediate Water (H).

Mois	a	-b	r	n	h	H
1	9.104	308.159	.99957	9	100	600
2	8.964	303.362	.99969	9	100	600
3	9.063	306.785	.99960	8	100	500
4	9.004	304.701	.99974	7	125	500
5	9.232	312.661	.99974	7	125	500
6	9.198	311.524	.99983	9	100	600
7	9.314	315.530	.99976	10	75	600
8	9.053	306.537	.99952	11	50	600
9	9.017	305.305	.99962	11	50	600
10	8.850	299.396	.99983	8	100	500
11	9.068	307.034	.99960	8	100	500
12	8.958	303.114	.99927	9	100	600

RÉFÉRENCES

- Anonyme, 1980 a. *Physical oceanography of the tropical Atlantic during Gate Global Atmospheric Research Program (GARP) Atlantic Tropical Experiment*, edited by W. Düing, F. Ostapoff and J. Merle, Univ. Miami, USA.
- Anonyme, 1980 b. Programme « Français Océan Climat Atlantique Équatorial » (Focal), CNRS-CNEXO-ORSTOM-Universités-LOP-Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris.
- Anonyme, 1982. Programme National d'Étude de la Dynamique du Climat (P.N.E.D.C.), Ministère de la Recherche et de la Technologie, CNRS, Paris.
- Beer T., 1983. *Environmental oceanography*, Pergamon Press, 262 p.
- Cochrane J.D., Kelly F.J. Jr., Olling C.R., 1979. Subthermocline countercurrents in the Western equatorial Atlantic Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, **9**, 724-738.
- Doniol R., 1956. Les variations saisonnières du niveau moyen à Dakar, *Bull. Inf. COEC*, **8**, 5, 225-240.
- Emery W.J., Dewar J.S., 1982. Mean temperature-salinity, salinity-depth and temperature-depth curves for the North Atlantic and the North Pacific, *Progr. Oceanogr.*, **11**, 3, 219-305.
- Fahrbach E., 1983. On the variation of the heat content in various vertical layers in the central equatorial Atlantic, in: *Hydrodynamics of the equatorial ocean*, Elsevier Oceanography, Series, 36, edited by J. Nihoul, 83-98.
- Gouriou Y., Servain J., 1983. Le cycle annuel de la structure thermique à Pointe-Noire, Dakar et le long du rail méridien à 4°W, programme Focal, convention CNEXO-Univ. Bretagne Occidentale, mai 1983, 161-180.
- Guillerm J.M., 1981. Contribution à l'océanographie physique du Golfe de Guinée : hydrologie et circulation saisonnière sur une radiale au large de Pointe-Noire (Congo), *Thèse Doct. Univ., Univ. Bretagne Occidentale*, 203 p.
- Hénin C., Hisard P., 1984. Surface equatorial current system along 23°W (July 1982 - January 1984), *Geophys. Res. Lett.*, **11**, 8, 765-768.
- Herbland A., Le Borgne R., Le Bouteiller A., Voituriez B., 1983. Structure hydrologique et production primaire dans l'Atlantique tropical oriental, *Océanogr. Trop.*, **18**, 2, 249-293.
- Hisard P., Cîteau J., Morlière A., 1976. Le système des contre-courants équatoriaux subsuperficiels. Permanence et extension de la branche Sud dans l'Océan Atlantique, *Cah. ORSTOM, Sér. Océanogr.*, **14**, 3, 209-220.
- Houghton R.W., 1976. Circulation and hydrographic structure over the Ghana continental shelf during the 1974 upwelling, *J. Phys. Oceanogr.*, **6**, 910-924.
- Houghton R.W., 1984. Seasonal variation of the Gulf of Guinea thermal structure, *Geophys. Res. Lett.*, **11**, 8, 783-786.
- Lemasson L., Rebert J.P., 1973. Les courants marins dans le golfe ivoirien, *Cah. ORSTOM, Sér. Océanogr.*, **11**, 1, 67-95.
- Mac Grail D.W., 1977. Sedimentologic and physical oceanographic evidence of a shelf edge counter current off Guinea Bissau, Guinea and Sierra Leone, *J. Sed. Petrol.*, **47**, 915-925.
- Mac Grail D.W., 1979. Topographically controlled mesoscale flow anomalies on the continental shelf off Southern Sierra Leone and Liberia, *J. Phys. Oceanogr.*, **9**, 327-336.
- Mazeika P.A., 1968. Eastward flow within the South Equatorial current in the Eastern South Atlantic, *J. Geophys. Res.*, **73**, 18, 5819-5828.
- Merle J., 1980. Seasonal heat budget in the equatorial Atlantic Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, **10**, 464-469.
- Mittelstaedt E., 1983. The upwelling area off Northwest Africa, *Progr. Oceanogr.*, **12**, 3, 162 p.
- Mittelstaedt E., Hamann L., 1981. The coastal circulation off Mauritania, *Dtsch Hydrogr. Z.*, **34**, 3, 81-118.
- Oudot C., 1983. Les gaz dissous (azote-oxygène) dans le Golfe de Guinée : distributions, échanges physiques, relation avec la production primaire, *Océanogr. Trop.*, **18**, 2, 201-221.
- Picaut J., 1983. Propagation of the seasonal upwelling in the Eastern equatorial Atlantic, *J. Phys. Oceanogr.*, **13**, 18-37.
- Rébert J.P., 1983. Hydrologie et dynamique des eaux du plateau continental sénégalais, Doc. N° 89, CRODT, ISRA, 99 p.
- Richardson P.L., 1984. Drifting buoy trajectories in the Atlantic North Equatorial Countercurrent during 1983, *Geophys. Res. Lett.*, **11**, 8, 745-748.
- Sverdrup H.U., Johnson M.W., Fleming R.H., 1982. *The oceans*, Prentice-Hall, 1087 p.
- Verstraete J.-M., 1970. L'oxygène au large de Grand-Bassam, *Doc. Sci. Cent. Rech. Océanogr. Abidjan*, **1**, 19-35.
- Verstraete J.-M., 1982. Sea-level variation in the Gulf of Guinea, *Trop. Ocean. Atmos. News*, **9**, 5-6.
- Verstraete J.-M., 1983. The seasonal variation in the depth of the thermocline, heat content and mean sea level in the Eastern tropical Atlantic, *I.U.G.G. Symposium n° 17, "Low-Latitude coupled ocean-atmosphere circulations"*, 22-24 August 1983, Hamburg.
- Verstraete J.-M., Picaut J., 1983. Variations du niveau de la mer, de la température de surface et des hauteurs dynamiques le long de la côte Nord du Golfe de Guinée, *Océanogr. Trop.*, **18**, 2, 139-162.
- Verstraete J.-M., Picaut J., Morlière A., 1980. Atmospheric and tidal observations along the shelf of the Guinea Gulf, *Deep-Sea Res.*, **26**, suppl. II, 343-356.
- Voituriez B., 1981. Les sous-courants équatoriaux Nord et Sud et la formation des dômes thermiques tropicaux, *Oceanol. Acta*, **4**, 4, 497-506.
- Voituriez B., 1983 a. Les variations saisonnières des courants équatoriaux à 4°W et l'upwelling équatorial du Golfe de Guinée. I : Le sous-courant équatorial, *Océanogr. Trop.*, **18**, 2, 163-183.
- Voituriez B., 1983 b. Les variations saisonnières des courants équatoriaux à 4°W et l'upwelling équatorial. II : Le courant équatorial Sud, *Océanogr. Trop.*, **18**, 2, 185-199.