

Les sous-courants équatoriaux nord et sud et la formation des dômes thermiques tropicaux

Dômes thermiques
Sous-courants équatoriaux nord et sud
Contre-courants équatoriaux nord et sud
Confluence des alizés
Océan tropical

Thermal domes
North and South Equatorial Undercurrent
North and South Equatorial Countercurrent
Confluence of the trade winds
Tropical Ocean

B. Voituriez

Antenne ORSTOM, Centre Océanologique de Bretagne, B.P. n° 337, 29273 Brest Cedex.

Reçu le 5/2/81, révisé le 30/4/81, accepté le 15/5/81.

RÉSUMÉ

Les branches nord et sud du système des sous-courants équatoriaux induisent sur le bord est de l'Atlantique et du Pacifique, et dans chaque hémisphère, une circulation cyclonique permanente qui crée sous la thermocline des dômes thermiques subsuperficiels permanents que l'on peut définir comme les extrémités est des crêtes thermiques subthermoclinales associées à ces sous-courants. C'est l'émergence de ces dômes au niveau de la thermocline qui constitue les dômes thermiques de Costa Rica, Guinée et Angola tels qu'ils ont déjà été décrits. Elle ne peut se produire que dans des conditions de vent et de pression particulières, favorables à l'apparition en surface des sous-courants équatoriaux nord et sud : vents faibles et variables, pressions atmosphériques basses, rotationnel des tensions de vent favorable à un upwelling. Les variations saisonnières des champs de vent et de pression permettent d'expliquer les différences de structure et de variations saisonnières des dômes thermoclinaux face à la permanence de la structure subthermoclinale. Ceux de l'hémisphère nord associés à la zone de confluence des alizés sont bien définis : celui de Costa Rica en toutes saisons, celui de Guinée en été de l'hémisphère nord seulement. Ceux de l'hémisphère sud, toujours situés dans la zone du gradient de pression des alizés de Sud-Est sont discutables : il n'y a pas de dôme thermoclinale du Pérou et celui d'Angola est incertain. Le pourcentage de stabilité directionnelle du vent est un indice qui rend très bien compte de ces différences et de ces variations, et le rotationnel des tensions de vent explique les différences d'intensité de l'upwelling observées dans les dômes de l'hémisphère nord.

Oceanol. Acta, 1981, 4, 4, 497-506.

ABSTRACT

Northern and southern equatorial undercurrents and the formation of tropical thermal domes

The expression "thermal domes" is used to designate typical structures of the eastern tropical Atlantic and Pacific oceans where the thermocline is very shallow: the Costa Rica dome in the northern Pacific, and the Guinea and Angola domes in the northern and southern Atlantic respectively. These phenomena are usually attributed to a surface cyclonic gyre induced by the poleward rotation of the surface north and south equatorial countercurrents (CCEN and CCES in the text). This paper shows, however, that in the subthermocline layer, the permanent northern and southern equatorial undercurrents (SCEN and SCES) induce permanent subthermocline thermal domes which may be defined as the eastern extremities of the subthermocline ridge extending along the poleward boundaries of the northern and southern equatorial undercurrents; and that the Costa Rica, Guinea and Angola domes, previously described as domes of the thermocline, correspond to the uplifting of the deeper structure and—more specifically—to the upwelling of the north and south equatorial undercurrents which can occur only when the conditions are propitious: weak and variable winds, low atmospheric pressure and windstress curl favourable to an upwelling. In contrast with the stability of the subthermocline structure, the thermocline domes are subjected to seasonal variations

7 NOV. 1983

O. R. S. T. O. M. Fonds Documentaire

N° : 3655

Cote B

133655

which may be explained by those affecting the wind and atmospheric pressure fields. The northern thermocline domes (Costa Rica and Guinea) are associated with the confluence zone of the trade winds; while the former is evident throughout the year, the latter occurs only during the northern summer. In the southern hemisphere, where the domes are always located in the pressure gradient of the SE trade winds, the incidence of thermocline domes remains uncertain: none have been observed off Peru and the existence of the thermocline dome in the Angola area has not been clearly shown. The percentage of wind steadiness is a good indicator of seasonal variations of the thermocline domes and of the differences between them. Variations of windstress curl explain the differences of upwelling intensity observed in the domes of the northern hemisphere.

Oceanol. Acta, 1981, 4, 4, 497-506.

INTRODUCTION

Dans les régions tropicales, l'expression « dômes thermiques » est couramment utilisée pour désigner des structures particulières à thermoclines très peu profondes observées sur le bord est des océans Atlantique et Pacifique : le dôme de Costa Rica dans le Pacifique nord (Cromwell, 1958; Wyrski, 1964 *a*) centré autour de 10°N et 90°E, le dôme de Guinée (Rossignol, Meyrueis, 1964; Mazeika, 1967) dans l'Atlantique nord vers 12°N et 22°W, le dôme d'Angola (Mazeika, 1967) dans l'Atlantique sud vers 10°S et 9°E. Ces trois dômes occupent une situation similaire dans les deux océans (fig. 1) et ont été associés à des circulations cycloniques résultant de la rotation vers le pôle des contre-courants équatoriaux nord et sud de surface (fig. 2). Il n'a semblé-il jamais été fait mention de dôme du Pérou, et les cartes de la profondeur de la thermocline de Wyrski (1964 *b*) ne font pas apparaître de structure semblable dans le Pacifique sud (fig. 1), bien que les chercheurs soviétiques (Bogorov *et al.*, 1973) aient montré l'existence d'une circulation cyclonique au large du Pérou vers 10°S et 85°W comparable à celle qu'ils décrivent au large de l'Angola (fig. 3). Néanmoins il faut remarquer que la circulation cyclonique décrite au large de l'Angola par Bogorov *et al.* (1973), centrée vers 13°S et 3-4°E (fig. 3), ne correspond pas du tout, en dimension ou en position, au dôme décrit par Mazeika vers 10°S et 9°E, et qu'il ne s'agit probablement pas du même phénomène. Les dômes thermiques ont suscité un grand intérêt, car, provoquant une importante remontée de la thermocline, ils amènent des eaux riches en sels nutritifs près de la surface, créant ainsi des conditions très favorables pour une forte production biologique. Cependant l'explication qui lie les dômes à la circulation de surface n'est pas totalement satisfaisante. Ainsi Wyrski (1964 *a*) avait-il déjà noté que le dôme de Costa Rica semblait permanent, alors que le contre-courant équatorial nord de surface dans le Pacifique est disparaissait en février-mars. Les campagnes Eastropac de 1967-1968 (Love, 1972 *a*; 1972 *b*) ont confirmé ce fait et montré que l'upwelling était maximum dans le dôme de Costa Rica en février-mars au moment même où, selon Tsuchiya (1974), le contre-courant équatorial nord de surface était faible et discontinu. Les sections faites à travers les dômes de Costa Rica et de Guinée (fig. 4) montrent en plus que la forme en dôme des isothermes se manifeste aussi jusqu'à une profondeur de 250 à 300 m, dépassant largement l'épaisseur de simples courants de surface. Mratov (1970)

estime d'ailleurs qu'il serait plus correct de parler de dômes de subsurface.

Les progrès réalisés ces dernières années dans la connaissance des contre-courants équatoriaux permettent de préciser la contribution de ceux-ci à la formation des dômes thermiques et de mieux rendre compte de leurs variations saisonnières en relation avec les conditions climatiques.

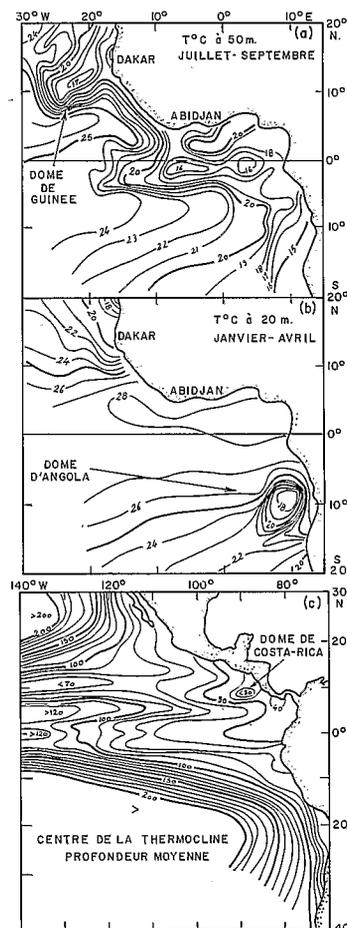


Figure 1

Les dômes thermoclineaux de l'Atlantique et du Pacifique : *a*, Océan Atlantique. Température à 50 m, juillet-septembre : le dôme de Guinée (Mazeika, 1967); *b*, Océan Atlantique. Température à 20 m, janvier-avril : le dôme d'Angola (Mazeika, 1967); *c*, Océan Pacifique. Profondeur moyenne du centre de la thermocline permanente en mètres : le dôme de Costa Rica (Wyrski, 1964 *b*).

The thermocline domes of the Atlantic and Pacific Oceans: a, Atlantic Ocean. Temperature at 50 m depth in July-September: the Guinea dome (Mazeika, 1967); *b*, Atlantic Ocean. Temperature at 20 m depth in January-April: the Angola dome (Mazeika, 1967); *c*, Pacific Ocean. Mean depth in meters of the centre of the permanent thermocline: Costa Rica dome (Wyrski, 1964 *b*).

LE SYSTÈME DES SOUS-COURANTS ÉQUATORIAUX

Dans sa synthèse du système des contre-courants équatoriaux, Khanaichenko (1974) a montré qu'il existait dans l'Atlantique et dans le Pacifique un système unique de contre-courants subsuperficiels formés de trois branches dont les noyaux de vitesse se trouvent en profondeur : la branche centrale qui coule le long de

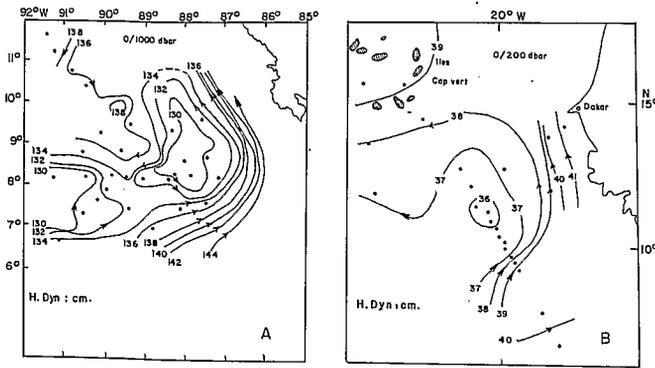


Figure 2
Les circulations cycloniques de surface des dômes de Costa Rica et Guinée. A, Océan Pacifique Nord: dôme de Costa Rica (Wyrтки, 1964 a); B, Océan Atlantique Nord: dôme de Guinée (Voituriez, Dandonneau, 1974).

Surface cyclonic gyres of the Costa Rica and Guinea domes. A, Northern Pacific Ocean: Costa Rica dome (Wyrтки, 1964 a); B, Northern Atlantic Ocean: Guinea dome (Voituriez, Dandonneau, 1974).

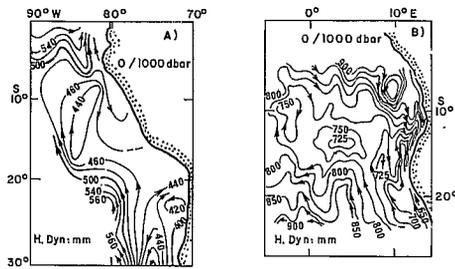
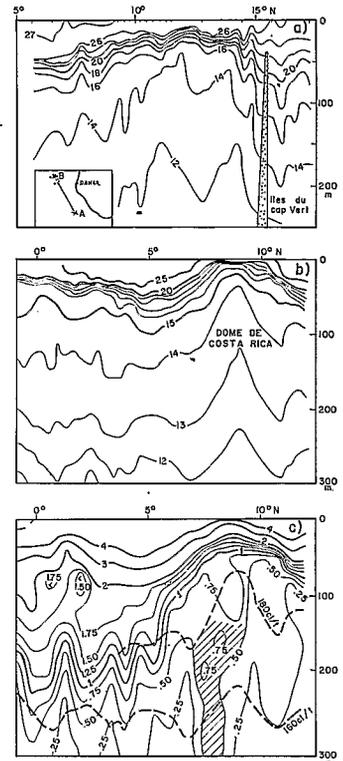


Figure 3
Les circulations cycloniques de surface dans l'hémisphère Sud : A, Océan Pacifique Sud; B, Océan Atlantique Sud (Bogorov et al., 1973).
Surface cyclonic gyres in the southern hemisphere: A, South Pacific Ocean; B, South Atlantic Ocean (Bogorov et al., 1973).

l'équateur (sous-courant équatorial) et les branches nord et sud qui coulent dans la couche subthermoclinale symétriquement par rapport à l'équateur approximativement le long des parallèles 4-5°, et que nous appellerons ici les sous-courants équatoriaux nord et sud (SCEN et SCES), par analogie avec le sous-courant équatorial. L'appellation contre-courant équatorial nord ou sud (CCEN, CCES) sera réservée aux contre-courants de surface, comme le propose Tsuchiya (1975). Hisard et Rual (1970) et Tsuchiya (1975) pour le Pacifique, Hisard et al. (1976) et Cochrane et al. (1979) pour l'Atlantique, ont bien mis en évidence certaines propriétés communes aux sous-courants équatoriaux nord et sud qui permettent aisément de les identifier, et qui seront utilisées ici pour déterminer leur participation à la formation des dômes thermiques. Aussi bien dans l'Atlantique que dans le Pacifique, les sous-courants équatoriaux nord et sud sont permanents, s'écoulent dans la couche subthermoclinale le long des parallèles 4°-5° Nord et Sud, et s'incurvent vers les pôles à l'approche des continents africain et américain. Ils sont facilement reconnaissables sur les sections transéquatoriales par la pente très marquée des isothermes vers l'équateur qui est manifeste vers 5°N et 5°S (fig. 5b). Comme le sous-courant équatorial, les sous-courants nord et sud transportent des eaux riches en oxygène bien visibles sur les sections transéquatoriales (fig. 5) et sur les cartes de

Figure 4

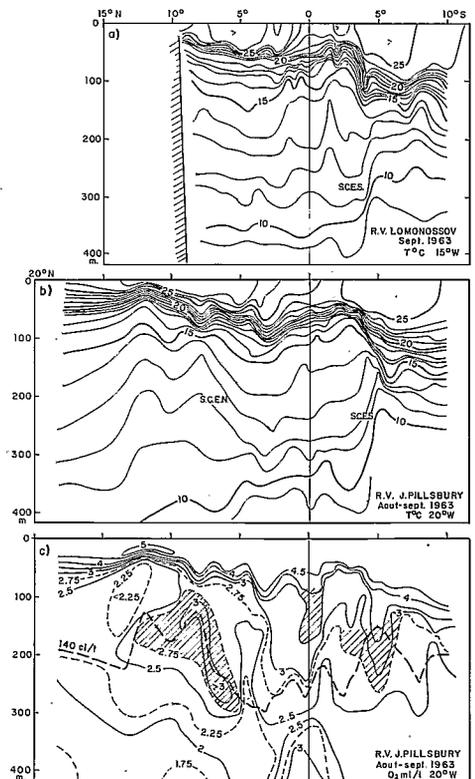
Sections à travers les dômes de Guinée et de Costa Rica : a, dôme de Guinée : distribution verticale de la température suivant AB en août 1973 (Voituriez, Herbland, 1978); b, dôme de Costa Rica : distribution verticale de la température le long de 88°W en août-septembre 1967 (Love, 1972 b); c, dôme de Costa Rica : distribution verticale de l'oxygène le long de 88°W en août-septembre 1967 (Love, 1972 b). Le maximum du sous-courant équatorial nord a été hachuré.



Transects through the Guinea and Costa Rica domes: a, Guinea dome: vertical distribution of temperature through AB in August 1973 (Voituriez, Herbland, 1978); b, Costa Rica dome: vertical distribution of temperature along 88°W in August-September 1967 (Love, 1972 b); c, Costa Rica dome: vertical distribution of oxygen along 88°W in August-September 1967 (Love, 1972 b). The oxygen maximum of the northern equatorial undercurrent is shaded.

Figure 5

Sections transéquatoriales en été 1963 dans l'Atlantique (Equalant 2) : a, température à 15°W (N/O Lomonosov); b, température à 20°W (N/O Pillsbury); c, oxygène à 20°W (N/O Pillsbury). Les fortes valeurs d'oxygène associées aux trois sous-courants ont été ombrées.



Transequatorial sections in summer 1963 in the Atlantic Ocean (Equalant 2): a, temperature at 15°W (R/V M. Lomonosov); b, temperature at 20°W (R/V J. E. Pillsbury); c, oxygen at 20°W (R/V J. E. Pillsbury). The high oxygen values of the three branches of the equatorial undercurrent system are shaded.

distribution d'oxygène sur 160 cl/t dans le Pacifique (Tsuchiya, 1975) et sur 140 cl/t dans l'Atlantique (Hisard *et al.*, 1976). Cette distribution de l'oxygène manifeste bien l'unité du système à 3 branches des sous-courants équatoriaux.

La contribution des branches nord et sud à la formation des dômes évoquée par Khanaichenko (1974) peut être confirmée par l'étude de l'extension vers l'Est des propriétés qui viennent d'être résumées.

CONTRIBUTION DES SOUS-COURANTS ÉQUATORIAUX NORD ET SUD À LA FORMATION DES DÔMES THERMIQUES

Le dôme de Guinée

Hisard *et al.* (1976) ont montré que le sous-courant équatorial nord ne pénétrait pas à l'intérieur du Golfe de Guinée : les sections transéquatoriales faites pendant les campagnes Equalant en 1963 montrent bien qu'à 15°W (section du N/O M. Lomonosov), il n'y a plus dans l'hémisphère nord la pente des isothermes caractéristique du sous-courant équatorial nord que l'on observe encore à 20°W sur la section du N/O Pillsbury (fig. 5). Ceci montre que le sous-courant équatorial nord a tourné vers le Nord en arrivant sur la côte africaine entre 20 et 15°W.

Aux propriétés communes aux sous-courants équatoriaux présentées plus haut s'en ajoute une autre pour l'Atlantique : l'unité hydrologique des trois branches du système. Elle est apparente sur les diagrammes TS des stations faites pendant Equalant 2 (août 1963) par le Pillsbury à 20°W dans les trois branches du système des sous-courants équatoriaux (fig. 6). On observe une partie de courbe commune entre 11 et 15°C, qui correspond exactement à la plage de température du sous-courant équatorial nord défini par la pente des isothermes qui le caractérise sur la coupe du N/O Pillsbury (fig. 5). C'est de l'eau centrale de l'Atlantique sud, et l'on peut conclure que le sous-courant équatorial nord transporte de l'eau

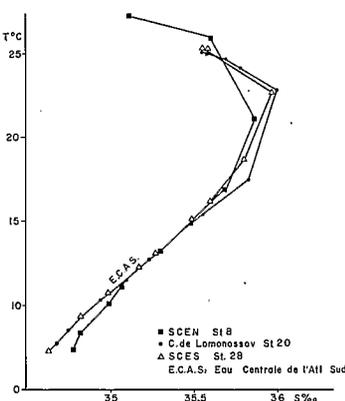


Figure 6

Diagramme TS des trois branches du système des sous-courants équatoriaux le long de 20°W en août 1963 (N/O Pillsbury) : St. 8 : 6°58 N, 20°02 W (SCEN); St. 20 : 0°04 S, 19°57 W (sous-courant équatorial); St. 28 : 4°03 S, 20°01 W (SCES).

TS diagrams in the three branches of the equatorial undercurrent system along 20°W in August 1963 (R/V Pillsbury): St. 8: 6°58 N, 20°02 W (northern Equatorial Undercurrent); St. 20: 0°04 S, 19°57 W (Equatorial Undercurrent); St. 28: 4°03 S, 20°01 W (southern Equatorial Undercurrent).

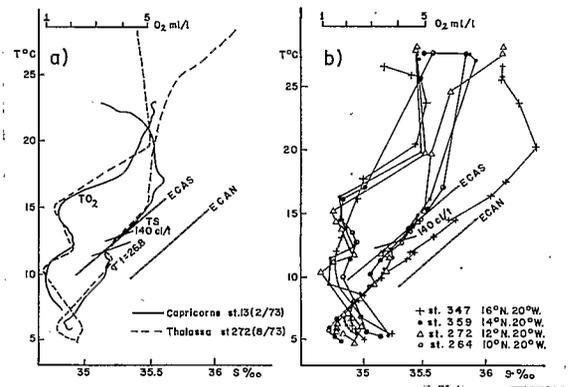


Figure 7

Diagrammes TS et TO₂ dans le dôme de Guinée en 1973: a, au centre du dôme (12°N, 20°W) en février (N/O Capricorne) et août (N/O Thalassa); b, le long de 20°W en août 1973 (N/O Thalassa) (Voituriez, Herbland, 1978).

TS and TO₂ diagrams in the Guinea dome in 1973: a, centre of the dome (12°N, 20°W) in February (R/V Capricorne) and August (R/V Thalassa); b, along 20°W in August 1973 (R/V Thalassa) (Voituriez, Herbland, 1978).

centrale de l'Atlantique sud (ECAS), dont la température est comprise entre 11 et 15°C. Cette eau est moins salée que l'eau centrale de l'Atlantique nord (ECAN) et sa progression vers le Nord est facile à suivre puisqu'elle donne aux diagrammes TS de l'hémisphère nord une forme caractéristique (Voituriez, Chuchla, 1977) avec un minimum de salinité souvent accompagné d'une inversion de température sur la surface $\sigma_t = 26,8$ qui sépare l'eau centrale sud de l'eau centrale nord (fig. 7). Cette séparation correspond justement à l'isotherme 11°C qui représente la base du SCEN, et l'on peut penser que ce type de diagramme TS est la signature des eaux du SCEN dans l'hémisphère nord. Cette propriété jointe au maximum d'oxygène sur 140 cl/t décrit par Hisard *et al.* (1976) permet de suivre leur progression vers le Nord. C'est ainsi que l'on a pu établir la continuité entre le SCEN et le sous-courant associé à l'upwelling côtier sénégal-mauritanien, qui transporte des ECAS le long de la côte jusqu'au nord du Cap Blanc (Tomczak, 1972; Hughes, Barton, 1974; Mittelstaedt, 1976; Voituriez, Herbland, 1978).

Les diagrammes TS et TO₂ (fig. 7) de la région centrale du dôme de Guinée manifestent à l'évidence les propriétés des eaux du SCEN : eaux centrales de l'Atlantique sud associées à un maximum d'oxygène sur 140 cl/t. On voit également sur cette figure que ces propriétés se maintiennent en été et en hiver, indépendamment des variations saisonnières du dôme qui seront étudiées au chapitre suivant. L'évolution des diagrammes TS et TO₂ (fig. 7) du Sud au Nord à travers le dôme de Guinée le long de 20°W en août 1973 (campagne de la Thalassa) CINECA Multi Ship Survey; Leroy, Barbaroux, 1978) montre que ces propriétés du SCEN disparaissent simultanément entre 14 et 16°N juste à la limite nord du dôme de Guinée tel qu'il a été décrit à la même époque par Voituriez et Dandonneau (1974). On peut conclure de ces remarques que le dôme de Guinée est un dôme des eaux centrales de l'Atlantique sud apportées par le sous-courant équatorial nord.

Le dôme de Costa Rica

Il apparaît très nettement sur toutes les sections faites autour de 90°W entre 7° et 10°N pendant les campagnes Eastropac de 1967-1968. La figure 4 b montre même que la thermocline peut couper la surface si bien que sur les cartes de température de surface, le dôme de Costa Rica apparaît comme un minimum thermique particulièrement accusé en février-mars (21°C) (Love, 1975). Les campagnes Eastropac de 1967-1968 constituent sans doute le meilleur réseau de données disponibles pour étudier les relations du dôme de Costa Rica avec le sous-courant équatorial nord et le contre-courant équatorial nord (surface). C'est à partir de ces campagnes que Tsuchiya (1974; 1975) a fait une description complète de la circulation de surface et subthermoclinale du Pacifique est. Il a montré en particulier la permanence de la circulation cyclonique de surface autour du dôme de Costa Rica en 1967-1968 illustrée ici sur la figure 8.

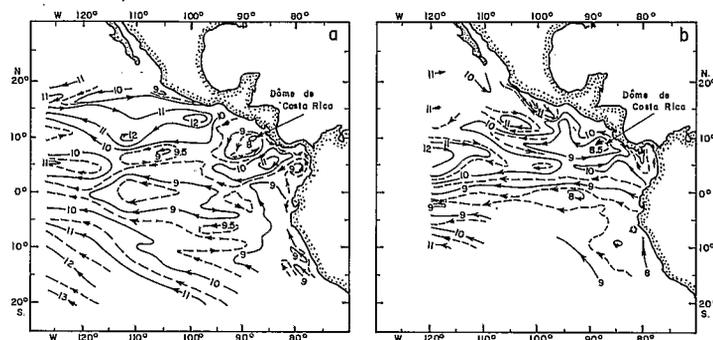


Figure 8

Anomalie géopotentielle de la surface de la mer par rapport à 500 db en décimètres dynamiques d'après Eastropac : a, février-mars 1967; b, août-septembre 1967 (Tsuchiya, 1974).

Geopotential anomaly of the sea surface over 500 d bar from Eastropac cruises: a, February-March 1967; b, August-September 1967 (Tsuchiya, 1974).

Cependant le lien entre le courant est qui forme la branche sud de ce tourbillon cyclonique et le SCEN et/ou le CCEN n'est pas très claire. Selon lui le CCEN est un courant très variable dont l'intensité et la position dépendent des migrations de la Zone Intertropicale de Convergence (ITCZ). Ainsi ce courant est-il faible et discontinu au printemps lorsque l'ITCZ est à sa position la plus sud : en février-mars 1967 il était pratiquement absent de 112°W à 98°W pour réapparaître avec force de 95°W à 85°W dans la circulation cyclonique du dôme de Costa Rica (fig. 8). En août-septembre au contraire, lorsque l'ITCZ est à sa position la plus nord, le CCEN est continu et bien marqué jusqu'au dôme de Costa Rica. A cette très forte variabilité s'oppose sous la thermocline la constance du sous-courant équatorial nord, dont le maximum de vitesse est situé sous la thermocline et dont aucune variation saisonnière, dans la position ou l'intensité, n'a pu être décelée. Tsuchiya (1975) en conclut qu'il ne peut être trouvé de relation entre les deux courants, même si parfois un flux est continu les relie, surtout dans la partie est de la zone. Cette distinction systématique entre les deux courants pose un problème illustré par la figure 9. Sur cette section faite à 92°W en février 1967 dans la partie ouest du dôme de Costa Rica

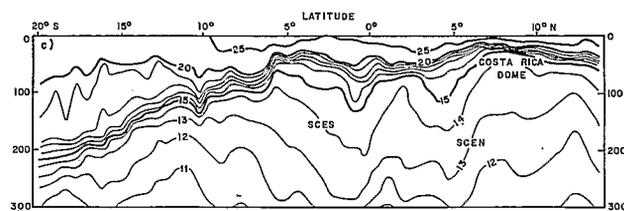


Figure 9

Distribution verticale de la température le long de 92° W en février 1967 (Love, 1972 a).

Vertical distribution of temperature along 92° W in February 1967 (Love, 1972 a).

qui semble typique de la pente des isothermes associée aux sous-courants équatoriaux nord et sud, on constate que la pente des isothermes vers 6°N est la même de la surface au fond, si bien que la vitesse géostrophique augmente de façon monotone vers le haut et que le flux subthermoclinale ne peut être distingué du flux de surface. Cette différence avec les observations faites plus à l'Ouest où les deux flux sont séparés incite Tsuchiya à conclure que la pente subthermoclinale des isothermes observées de 92 à 88°W (dans la région du dôme de Costa Rica) n'est pas, en dépit des apparences, l'extension de la pente que l'on trouve plus à l'Ouest où l'on peut séparer les 2 flux et que le courant est observé dans ce cas est simplement le CCEN. Tsuchiya note que cette conclusion implique que le SCEN se désintègre rapidement à l'est de 95°W mais que les données disponibles ne donnent aucune information sur cette désintégration.

On peut faire des objections à cette interprétation :

- 1) La pente particulièrement remarquable vers 6°N sur la figure 9 des isothermes 12°, 13° et 14°C peut difficilement être interprétée de manière différente de la structure analogue trouvée habituellement dans l'Atlantique et le Pacifique.
- 2) La pente des isothermes intéresse une épaisseur de 300m, alors que plus à l'Ouest la pente des isothermes associée au contre-courant équatorial nord ne dépasse pas la thermocline.
- 3) Un maximum d'oxygène entre 160 et 180 cl/t est apparent sur la section du N/O Rockaway le long de 88°W en août-septembre 1967, associé à la pente vers l'équateur des isothermes 12-14°C sur la face sud du dôme entre 6 et 9°N (fig. 4). Ce maximum d'oxygène avait déjà été signalé par Broenkow (1965), qui a montré qu'à de nombreuses stations faites dans le dôme de Costa Rica pendant la campagne de novembre-décembre 1969, on observait un maximum d'oxygène sur $\sigma_t = 26,25$, c'est-à-dire environ 170 cl/t, très proche donc du maximum associé par Tsuchiya au sous-courant équatorial nord.
- 4) Les trois remarques précédentes tendent à montrer que l'on retrouve toutes les propriétés du sous-courant équatorial nord dans le courant est qui forme le bord sud du dôme de Costa Rica. Partant de là, on peut admettre qu'il s'agit effectivement du sous-courant équatorial nord apparaissant en surface et non de l'inverse : le contre-courant équatorial nord s'étendant soudain jusqu'à 300 m de profondeur. On verra dans le paragraphe suivant que les conditions de vent favorisent une telle remontée.

5) La permanence du dôme de Costa Rica notée par Wyrski (1964a) et confirmée par les campagnes Eastropac de 1967-1968 s'accommode beaucoup mieux de la remarquable stabilité du SCEN mise en évidence par Tsuchiya (1975) que de la grande variabilité du contre-courant équatorial nord.

En particulier l'interruption du CCEN entre 112°W et 98°W en février-mars 1967, à 98° et 95°W en février-mars 1968 et sa réapparition plus à l'est de 95°W à 85°W en 1967 et de 88° à 85°W en 1968 sous la forme d'un courant beaucoup mieux développé associé à la circulation cyclonique du dôme s'explique beaucoup mieux si l'on admet que c'est le SCEN permanent qui apparaît en surface dans une région où les conditions atmosphériques sont favorables. Cette interprétation est d'ailleurs conforme au tracé, continu jusqu'à 88°W, du SCEN fait par Tsuchiya (1975) sur 160 cl/t en février-mars 1967 et 1968, tracé qu'il est obligé de mettre en doute pour tenir compte de la discontinuité de structure thermique qu'il déduit de l'impossibilité de distinguer à 92° et 88°W le courant est de surface de celui de subsurface. Elle permet aussi d'abandonner l'idée d'une désintégration brutale du SCEN à 95°W, que les cartes de février-mars 1967 et 1968 rendent improbable.

Il semble donc logique de considérer que c'est bien le sous-courant équatorial nord qui contribue à la circulation cyclonique qui est à l'origine du dôme de Costa Rica vers 9°N et 90°W.

Le dôme d'Angola

L'existence d'un dôme d'Angola, tel que décrit par Mazeika, et associé à une circulation cyclonique de surface comparable à celles des dômes de Costa Rica et de Guinée n'a pas été réellement confirmée par des observations faites par la suite. Le grand tourbillon cyclonique décrit par Moroshkin *et al.* (1970) à partir de la troisième campagne de l'Akademik Kurchatov (fig. 3b) est un phénomène beaucoup plus vaste que les autres dômes et en particulier celui d'Angola vu par Mazeika (fig. 1). Le centre de ce tourbillon (à 13°S-3-4°E) ne coïncide d'ailleurs pas du tout avec le dôme de Mazeika. Gallardo *et al.* (1974) ont de leur côté noté

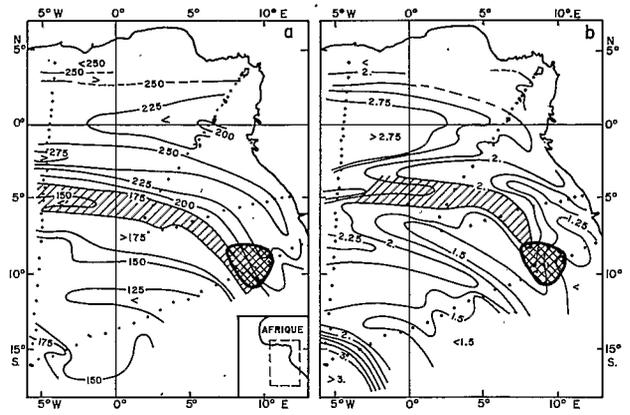


Figure 11
 a, topographie de la surface isanostère 140 cl/t (en mètres) en janvier 1975 dans l'Atlantique équatorial est (Hisard *et al.*, 1976);
 b, distribution de l'oxygène (en ml/l) sur la surface isanostère 140 cl/t dans l'Atlantique équatorial est en janvier 1975 (Hisard *et al.*, 1976). La crête thermique et les fortes valeurs en oxygène du sous-courant équatorial sud ont été ombrées, ainsi que la position du dôme d'Angola matérialisé par l'isotherme 18°C à 20 m de profondeur (Mazeika, 1967).
 a, topography of the isanosteric surface 140 cl/t (in metres) in the eastern equatorial Atlantic Ocean in January 1975 (Hisard *et al.*, 1976);
 b, oxygen distribution (ml/l) on the isanosteric surface 140 cl/t in the eastern equatorial Atlantic Ocean in January 1975 (Hisard *et al.*, 1976). The thermal ridge and the high oxygen values of the southern equatorial undercurrent are shaded. The position of the Angola dome is given by the isotherm 18°C at 20 m depth (Mazeika, 1967).

qu'en février-mars 1971 il n'apparaissait pas de dôme net de la thermocline dans la région définie par Mazeika (1967). Ils ont observé cependant une crête thermique qui se manifeste sur la carte des températures à 20 m (fig. 10a). En février 1975 il n'était pas observé de crête thermoclinale caractérisée, mais simplement une remontée continue d'Est en Ouest de la thermocline. Ces observations jettent un doute sérieux sur la réalité du dôme d'Angola au niveau thermoclinale. Cependant les cartes de distribution sur 140 cl/t de Hisard *et al.* (1976) ont bien montré que la crête subthermoclinale et le maximum d'oxygène caractéristiques du sous-courant équatorial sud s'incurvent à l'Est de 0° pour atteindre en janvier 1975 la latitude de 10°S vers 8°-9°W, qui correspond sensiblement à la position du dôme donné par Mazeika (1967) (fig. 11). Des cartes plus précises de la

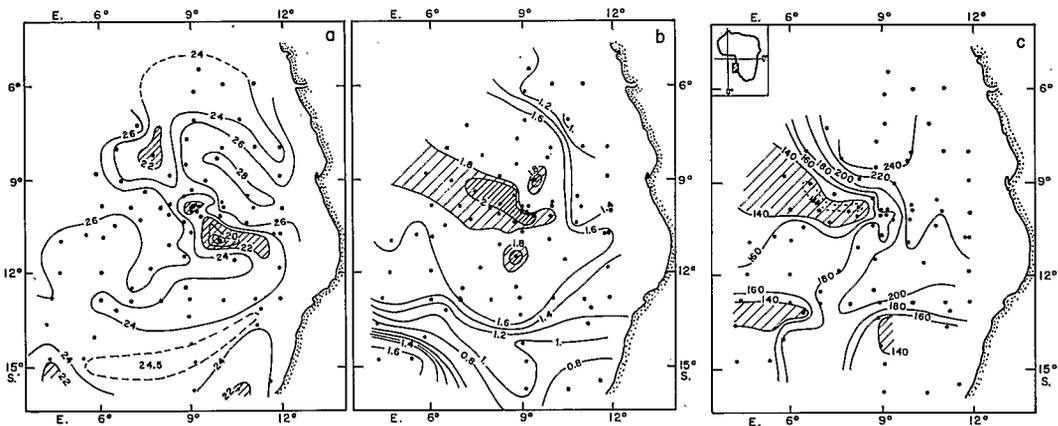


Figure 10
 Le dôme d'Angola en février 1971 : a, la température à 20 m : les températures < 22°C sont hachurées; b, oxygène (ml/l) sur 140 cl/t : les valeurs > 1,8 ml/l sont hachurées; c, profondeur de la surface 140 cl/t (m) : les valeurs inférieures à 140 m sont hachurées.

The Angola dome in February 1971: a, temperature (T°C) at 20 m: temperatures < 22°C are shaded; b, oxygen (ml/l) on 140 cl/t: oxygen values > 1.8 ml/l are shaded; c, depth of the 140 cl/t surface: depths < 140 m are shaded.

profondeur de la surface 140 cl/t (fig. 10 c) et de l'oxygène sur 140 cl/t (fig. 10 b) faites en février 1971, très précisément dans la région du dôme d'Angola décrite par Mazeika, montrent bien que ce dôme centré sur 10°S et 9°E et réduit ici à une crête thermique sur la carte des températures à 20 m (fig. 10 a), est en profondeur l'extrémité d'une crête (fig. 10 c) associée à de fortes valeurs d'oxygène (> 1,8 ml/l) (fig. 10 b), caractéristiques du sous-courant équatorial sud. Il y a d'ailleurs une grande similitude entre les diagrammes TO₂ du dôme de Guinée (fig. 8 a), du dôme d'Angola (Voituriez, Herbland, 1978) et du dôme de Costa Rica (Broenkow, 1965) qui tous montrent un maximum d'oxygène au niveau du sous-courant équatorial correspondant. Il est donc clair que la région dite du dôme d'Angola correspond effectivement, comme les dômes de l'hémisphère nord, à la limite de l'extension vers l'Est de la crête associée au sous-courant équatorial correspondant. A la différence des dômes de l'hémisphère nord, il n'y correspond pas nécessairement en surface une circulation cyclonique qui permette de parler véritablement de dôme d'Angola au niveau thermoclinale. On verra dans la section suivante que les différences de structure des champs de vent et de pression entre les deux hémisphères peuvent expliquer l'imprécision du dôme d'Angola au niveau de la thermocline.

Le dôme du Pérou

Il ressort de cette étude que les dômes de Costa Rica et de Guinée et l'hypothétique dôme d'Angola, qui occupent des positions symétriques, font tous les trois intervenir les sous-courants équatoriaux nord et sud. On peut les définir comme l'extrémité est de la crête thermique subthermoclinale qui caractérise les sous-courants équatoriaux nord et sud. Pour des raisons de symétrie, on peut s'étonner qu'il n'ait jamais été fait mention d'un dôme du Pérou alors que le sous-courant équatorial sud existe aussi toute l'année dans le Pacifique (Tsuchiya, 1975). La distribution de l'oxygène sur 160 cl/t en février-mars 1967 montre que l'on peut le suivre jusqu'à 85°W (Tsuchiya, 1975), où il atteint 9°S, position qu'on attribuerait normalement au dôme du Pérou par comparaison avec la position des autres dômes. Une section faite le long de 85°W (fig. 12) fait nettement apparaître la crête thermique subthermoclinale très accentuée accompagnée du maximum d'oxygène, qui pourrait constituer le dôme subthermoclinale du Pérou. La différence avec les autres dômes proviendrait, comme il sera discuté dans la prochaine section, de ce qu'il n'apparaît jamais au niveau thermoclinale et qu'il n'a donc pas d'influence sur les conditions de production.

LES VARIATIONS SAISONNIÈRES DES DÔMES

Associés aux sous-courants équatoriaux nord et sud, les dômes précédemment décrits sont donc des dômes subthermoclinaux comme le fait remarquer Mratov (1970), et on peut les définir alors comme les extrémités est de la crête thermique subthermoclinale qui caractérise ces sous-courants. A cet égard on peut

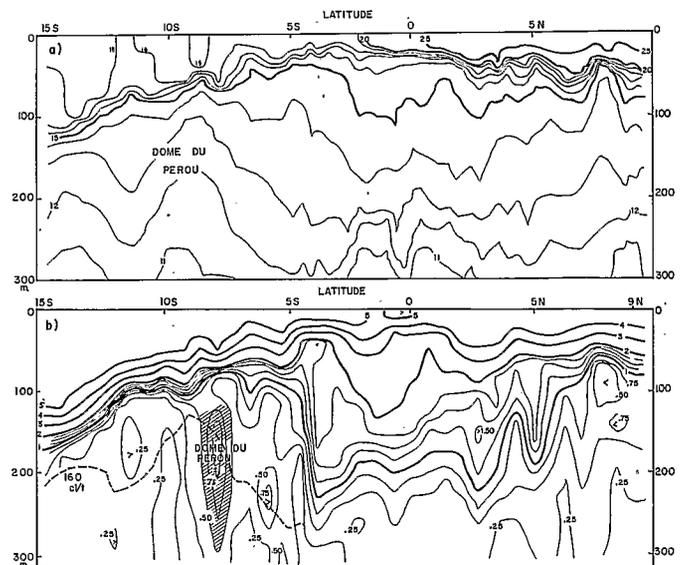


Figure 12

Distributions verticales de la température et de l'oxygène le long de 85° W en août 1967 (Love, 1972 b); a, température; b, oxygène.

Vertical distributions of temperature and oxygen along 85° W in August 1967 (Love, 1972 b): a, temperature; b, oxygen.

considérer que les dômes sont permanents, dans la mesure où ils sont associés à des sous-courants eux-mêmes permanents. Cependant l'intérêt suscité par les dômes vient de leur apparition au niveau de la thermocline qui conditionne l'enrichissement en sels nutritifs de la couche euphotique. C'est cette apparition au niveau de la thermocline qui est soumise à des variations saisonnières importantes, mais variables d'un dôme à l'autre. Il est donc important de dissocier la structure subthermoclinale permanente et commune aux 4 dômes, que nous appellerons « dôme subthermoclinale », de la structure superficielle, que nous appellerons dôme thermoclinale. Le dôme thermoclinale de Costa Rica semble permanent (Wyrтки, 1964 a) et les cartes saisonnières de la profondeur du centre de la thermocline (Wyrтки, 1964 b), comme les campagnes Eastropac de 1967-1968 (Love, 1972 a et b; 1975) le font apparaître en toute saison. Néanmoins King et Packard indiquent que le dôme thermoclinale de Costa Rica était peu développé, ou même absent en janvier 1973 pour réapparaître en février 1973. Cette disparition pourrait être en relation avec le phénomène El Niño de 1972-1973, dont l'anomalie thermique positive comportait deux pics, l'un de mars à juin 1972 et l'autre, très pointu, en janvier 1973 (Wyrтки, 1975). Contrairement à celui de Costa Rica, les dômes d'Angola et de Guinée n'apparaissent, selon Mazeika (1967), au niveau thermoclinale, qu'en été de leur hémisphère (fig. 1). Ce sont d'ailleurs des dômes statistiques mis en évidence à partir des BT et des stations faites de 1905 à 1963. L'existence du dôme thermoclinale de Guinée a été effectivement confirmée par des campagnes océanographique en 1964-1965 (Paliy, Kirichek, 1970) et pendant les campagnes CINECA d'août 1973 (Voituriez, Dandonneau, 1974; Leroy, Barbaroux, 1978). La situation est moins claire pour le dôme thermoclinale d'Angola qui, comme on l'a vu plus haut, n'a pas été retrouvé lors des campagnes océanographiques faites ensuite dans

cette région. Il semble donc que, si le dôme d'Angola peut apparaître effectivement au niveau thermoclinale en hiver boréal lorsque l'on considère l'ensemble des données historiques, sa structure soit beaucoup plus imprécise que celle des dômes de l'hémisphère nord quand on veut le décrire à un moment donné, trop imprécise même pour que l'on puisse parler réellement de dôme thermoclinale d'Angola. Quant au « dôme du Pérou », il n'a jamais été observé au niveau thermoclinale.

La pression atmosphérique, la zone de confluence des alizés, la stabilité du vent et les variations saisonnières des dômes thermoclinaux

L'émergence des dômes thermiques au niveau de la thermocline suppose l'établissement d'une circulation cyclonique de surface, et par conséquent l'apparition d'un courant est en surface. Ceci peut se produire dans des conditions de vent et de pression atmosphérique particulières. Selon Khanaichenko (1974), le contre-courant équatorial nord de surface (CCEN), particulièrement développé de mai à octobre dans l'Atlantique, est le résultat de l'entraînement vers l'Est des eaux chaudes de surface par le SCEN lorsque les alizés de NE faiblissent ou disparaissent au moment où l'ITCZ se déplace vers le Nord et se stabilise au-dessus de la zone occupée par le SCEN. Kirichek (1971) a d'ailleurs noté l'association du dôme thermoclinale de Guinée avec la migration au Nord de l'ITCZ en été. La position des dômes comparée à la structure des champs de pression et de vent dans l'océan tropical décrite dans l'Atlas d'Hastenrath et Lamb (1977) permet d'expliquer de cette manière les variations saisonnières des dômes thermoclinaux et les différences entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud.

Le champ de pression atmosphérique est caractérisé par un minimum équatorial à gradient horizontal faible qui migre saisonnièrement en latitude avec la Zone Intertropicale de Convergence (ITCZ). C'est au sein de ce minimum équatorial de pression que se situe la zone de confluence des alizés qui correspond aux vents les plus faibles dont la stabilité directionnelle est minimum (Hastenrath, Lamb, 1978). C'est donc la région la plus favorable à l'apparition en surface d'un courant est entraîné par le SCEN et à l'émergence d'un dôme thermoclinale. La figure 13 représente la situation des dômes dans le champ de pression atmosphérique en février et août qui correspondent aux positions extrêmes des migrations de l'ITCZ. On constate que l'amplitude des migrations de la zone de confluence des vents est beaucoup plus importante dans l'Atlantique est que dans le Pacifique est. Le dôme de Costa Rica se trouve,

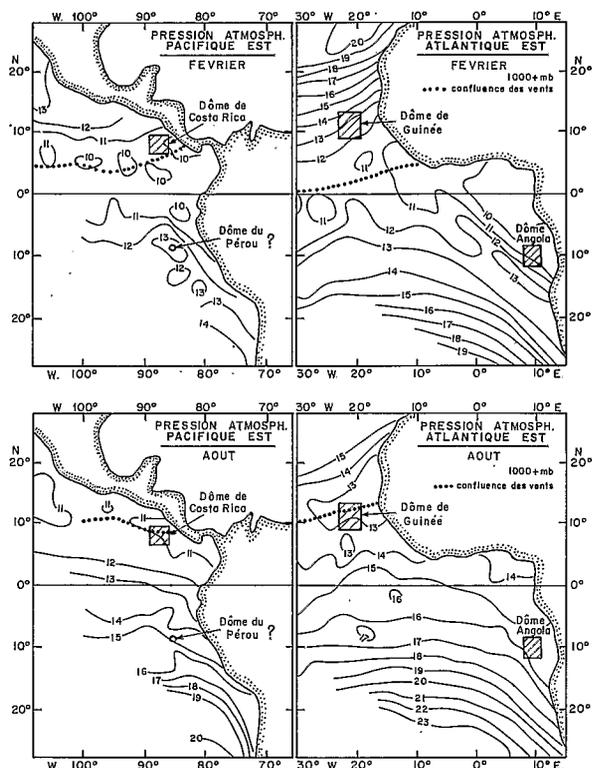


Figure 13
Les dômes et le champ de pression atmosphérique. En haut : février. En bas : août. A gauche : Pacifique est. A droite : Atlantique est. Le champ de pression et la zone de confluence des vents sont tirés de l'atlas d'Hastenrath et Lamb (1977). La position du dôme thermoclinale de Costa Rica est tirée de Wyrтки (1964 a). La position des dômes thermoclinaux de Guinée et d'Angola est tirée de Mazeika (1967). La position de l'hypothétique dôme thermoclinale du Pérou a été déduite de l'extension maximale vers l'Est de la langue riche en oxygène sur 160 cl/t associé au SCES (Tsuchiya, 1975).

Domes and atmosphere pressure field. Upper: February. Lower: August. Left: Eastern Pacific Ocean. Right: Eastern Atlantic Ocean. The pressure field and the confluence zone of the trade winds are drawn from the atlas of Hastenrath and Lamb (1977). The position of the Costa Rica dome is plotted from Wyrтки (1964 a) and those of Guinea and Angola domes from Mazeika (1967). The position of the hypothetical Peru dome corresponds to the easternmost extension of the high oxygen tongue on 160 cl/t of the South Equatorial Undercurrent (Tsuchiya, 1975).

dans les deux cas, dans le minimum équatorial de pression atmosphérique, très proche de la zone de confluence. Le dôme de Guinée en revanche se situe dans la zone du gradient des Alizés de Nord-Est en février et au cœur des basses pressions et traversé par la zone de confluence en août. Cette différence entre les deux océans se retrouve au niveau des variations saisonnières de la force du vent (tableau 1), et de celles du pourcentage de la stabilité directionnelle du vent (tableau 2) dans la région des dômes. Elle permet d'expliquer la permanence du dôme thermoclinale de Costa Rica, et l'apparition seulement en été de l'hémisphère nord de celui de Guinée.

Tableau 1

Moyenne mensuelle du vent (m/s) au centre des dômes.

Monthly mean of the wind speed in the domes from the Hastenrath and Lamb (1977) data set.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Pérou (10° S-85° W)	4	5	5	5,5	6	6	7	7	7	6	5,5	4,5
Angola (10° S-9° E)	3	2,5	3	4	4	4	3,5	3	2,5	3	3,5	3,5
Guinée (11° N-22° W)	6	6	5	5	4	3	1	3	1	2	4	5
Costa Rica (9° N-88° W)	4	3	2	1	2	2	1	2	3	3	2	2

Tableau 2

Moyenne mensuelle du pourcentage de stabilité directionnelle du vent au centre des dômes (d'après Hastenrath, Lamb, 1977).

Monthly mean of the percent of the wind steadiness in the domes (from Hastenrath, Lamb 1977).

Mois	Janvier	Avril	Juillet	Octobre
Pérou (10° S-85° W)	> 90	> 90	> 90	> 90
Angola (10° S-9° E)	75	85	85	90
Guinée (11° N-22° W)	90	80	40	55
Costa Rica (9° N-88° W)	60	45	50	60

En effet le dôme de Costa Rica est associé toute l'année à des vents faibles ($< 4 \text{ m/s}^{-1}$) et de faible stabilité directionnelle (entre 45 et 60%), conditions propices à l'apparition en surface du courant est entraîné par le SCEN. Pour le dôme thermoclinale de Guinée des conditions semblables ne s'observent que de juillet à octobre (tableaux 1 et 2).

Il n'y a pas de zone de confluence analogue dans l'hémisphère sud, et la figure 13 montre que les dômes d'Angola et du Pérou se trouvent en février comme en août dans la zone de gradient des alizés du Sud-Est. Les conditions sont donc beaucoup moins propices que dans l'hémisphère nord à l'apparition d'un courant est en surface et d'un dôme thermoclinale. Cependant la comparaison de la force du vent et de sa stabilité directionnelle au Pérou et en Angola montre que la probabilité d'émergence au niveau thermoclinale du dôme du Pérou où le vent est toujours supérieur à 4 m/s et la stabilité supérieure à 90%, est inférieure à celle du dôme d'Angola où la vitesse mensuelle moyenne maximum est de 4 m/s et où le pourcentage de stabilité atteint son minimum en janvier (75%), période d'observation du dôme thermoclinale d'Angola d'après Mazeika (1967). On peut utiliser ce pourcentage de stabilité du vent comme indice pour classer l'intensité du « doming » de la thermocline dans chacun des dômes : plus il est faible, plus la probabilité de dôme thermoclinale est grande. Le tableau 2 montre que l'on retrouve ainsi en effet les variations saisonnières observées de chacun des dômes thermoclinaux : permanence de celui de Costa Rica, absence de celui du Pérou et périodicité de ceux d'Angola et de Guinée. De même l'imprécision de la structure du dôme thermoclinale d'Angola est en accord avec la stabilité du vent qui est relativement grande même en janvier (75%), par rapport à celle du vent dans le dôme de Guinée (40 à 50 % en juillet-octobre) et celui de Costa Rica ($< 60\%$ toute l'année).

Le rotationnel des tensions de vent : l'upwelling dans les dômes thermoclinaux

Une des différences essentielles entre les dômes de Costa Rica et de Guinée est l'apparition en surface d'eaux froides dans le dôme de Costa Rica (Cromwell, 1958; Wyrski, 1964 a) et le maintien dans le dôme de Guinée au-dessus de la thermocline d'une couche homogène chaude (Voituriez, Dandonneau, 1974). Cette différence ressort très clairement de la figure 4. Ceci est le résultat d'un upwelling plus intense dans le dôme de Costa Rica que dans celui de Guinée, et peut s'expliquer par la

différence dans le rotationnel des tensions de vent que l'on peut considérer comme forçant les mouvements verticaux dans l'océan. Paliy et Kirichek (1970) et Mratov (1970) pensent d'ailleurs que le rotationnel des tensions de vent est un des principaux facteurs de l'apparition du dôme thermoclinale de Guinée. C'est aussi l'explication retenue pour expliquer l'upwelling dans le dôme de Costa Rica par Hofmann *et al.* (sous presse), qui proposent un modèle d'évolution du dôme de Costa Rica basé sur les variations du rotationnel des tensions de vent. Les cartes d'Hastenrath et Lamb (1977) (fig. 14) montrent que les dômes de Costa Rica et de Guinée sont toujours associés à une bande bien définie, au nord de l'équateur, où le rotationnel positif est favorable à un upwelling. En outre, alors que les valeurs de ce rotationnel restent faibles dans la région du dôme de Guinée, elles atteignent leur maximum dans la région du dôme de Costa Rica en avril comme en juillet. Pour la formation des dômes thermoclinaux, il est donc vraisemblable qu'à la circulation cyclonique qui résulte de l'apparition en surface du CCEN entraîné par le SCEN, s'ajoute l'effet du rotationnel des tensions de vent qui favorise l'upwelling dans ces dômes, particulièrement dans celui de Costa Rica.

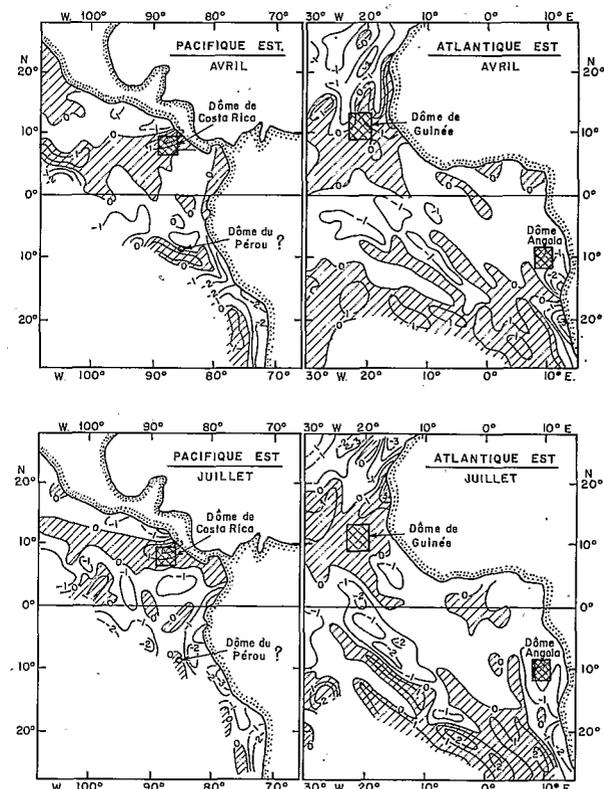


Figure 14

Les dômes et le rotationnel des tensions de vents. En haut : avril. En bas : juillet. A gauche : Pacifique est. A droite : Atlantique est. Les zones ombrées sont les valeurs positives. Les valeurs positives sont favorables à un upwelling dans l'hémisphère nord. Les valeurs négatives sont favorables à un upwelling dans l'hémisphère sud. Les sources sont les mêmes que celles de la figure 13.

Domes and curl of wind stress. Upper: April. Lower: July. Left: Eastern Pacific Ocean. Right: Eastern Atlantic Ocean. Shaded areas represent positive values conducive to an upwelling in the northern hemisphere. Data sources indicated with those given in Figure 13.

CONCLUSION

La permanence et la similitude du système des sous-courants équatoriaux du Pacifique et de l'Atlantique donnent à ces deux océans une unité de structure qui se traduit sur leur bord est par l'existence, au Nord et au Sud vers 10° de latitude, de 4 dômes subthermoclinaux permanents qui constituent l'extrémité des crêtes subthermoclinales associées aux sous-courants équatoriaux nord et sud. C'est l'émergence de ces dômes profonds au niveau de la thermocline qui constitue véritablement les dômes de Costa Rica, de Guinée et d'Angola, tels qu'ils ont été décrits auparavant. Elle est associée à une circulation cyclonique de surface induite par l'apparition en surface de courants est entraînés par les sous-courants équatoriaux nord et sud. Cette circulation est elle-même associée à des basses pressions atmosphériques, des vents faibles et variables et un rotationnel des tensions de vents favorable à un upwelling.

La dissymétrie entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud, matérialisée par le maintien au Nord, en toutes saisons, au cœur des basses pressions, de la zone de confluence des alizés qui est aussi une zone au rotationnel des tensions de vent favorable à l'upwelling, se retrouve au niveau des dômes. C'est en effet dans cette zone que les dômes de l'hémisphère nord émergent au niveau thermocline, et leurs variations saisonnières suivent la migration Nord-Sud de la zone de confluence des vents. Dans l'hémisphère sud en revanche, la permanence et l'intensité du vent s'opposent toute l'année à l'apparition d'un dôme thermocline au large du Pérou, mais laissent une faible possibilité au large de l'Angola en hiver. Le pourcentage de stabilité directionnelle des vents est un indice de l'existence des dômes thermoclinaux, qui explique la permanence de celui de Costa Rica, la nette apparition, en été, de celui de Guinée, le caractère incertain de celui d'Angola et la non existence du dôme thermocline du Pérou.

RÉFÉRENCES

- Bogorov V. G., Vinogradov M. E., Stepanov V. N., Moroshkin K. V., Bulatov R. P.**, 1973. Tropical cyclonic macrocirculation systems and their role in the formation of the ocean structure, in: *Formation of biological productivity and bottom sediments as related to ocean circulation in the south-eastern Atlantic*, Transactions of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology, 95, 1-13 (en russe).
- Broenkow W. W.**, 1965. The distribution of nutrients in the Costa Rica Dome in the eastern tropical Pacific Ocean, *Limnol. Oceanogr.*, 10, 1, 40-52.
- 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.
- Cromwell T.**, 1958. Thermocline topography, horizontal currents and "ridging" in the eastern tropical Pacific, *Inter.-Am. Trop. Tuna Comm. Bull.*, 3, 135-164.
- Gallardo Y., Dandonneau Y., Voituriez B.**, 1974. Variabilité, circulation et chlorophylle dans la région du dôme d'Angola en février-mars 1971, *Doc. Sci. Cent. Rech. Océanogr. Abidjan*, 5, 1-2, 1-51.
- Hastenrath S., Lamb P. J.**, 1977. *Climatic atlas of the Tropical Atlantic and Eastern Pacific oceans*, the University of Wisconsin Press.
- Hastenrath S., Lamb P.**, 1978. On the dynamics and climatology of surface flow over the equatorial oceans, *Tellus*, 30, 436-448.
- Hisard P., Rual P.**, 1970. Courant équatorial intermédiaire de l'océan Pacifique et contre courants adjacents, *Cah. ORSTOM, sér. Océanogr.*, 8, 21-45.
- Hisard P., Citeau 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.
- Hofmann E. E., Busalacchi A. J., O'Brien J. J.**, sous presse. Wind generation of the Costa Rica Dome, *Science*.
- Hughes P., Barton E. D.**, 1974. Stratification and water mass structure in the upwelling area off North-West Africa in April-May 1969, *Deep-Sea Res.*, 21, 611-628.
- Khanaichenko N. K.**, 1974. *Le système des contre-courants équatoriaux dans l'océan*, Gidrometeoizdat, Leningrad, traduit par P. Hisard et H. Rotschi, 157 p.
- Kirichek A. D.**, 1971. Water circulation in the North Eastern part of the Tropical Atlantic, *Inter. Counc. Explor. Sea, C.M. 1971/C, 7, Hydrography Committee*, 8 p.
- Leroy C., Barbaroux O.**, 1978. Participation de la « Thalassa » au programme concerté dans la zone Cinea. Observations physico-chimiques juillet-août 1973, *Cons. Inter. Explor. Mer, Symposium sur le courant des Canaries. Upwelling et ressources vivantes*, n° 8, 26 p.
- Love C. M.**, editor, 1972 a. *Eastropac Atlas*, vol. 1, US Dept. Comm., Natl. Mar. Fish. Serv., Circ. 330.
- Love C. M.**, editor, 1972 b. *Eastropac Atlas*, Vol. 5, US Dept. Comm., Natl. Mar. Fish. Serv., Circ. 330.
- Love C. M.**, editor, 1975. *Eastropac Atlas*, Vol. 9, US Dept. Comm., Natl. Mar. Fish. Serv., Circ. 330.
- Mazeika P. A.**, 1967. Thermal domes in the eastern tropical Atlantic Ocean, *Limnol. Oceanogr.*, 12, 3, 537-539.
- Mittelstaedt E.**, 1976. On the current along the northwest African coast south of 22° north, *Dtsch. Hydrogr. Z.*, 29, 3, 97-117.
- Moroshkin K. V., Bubnov V. A., Bulatov R. P.**, 1970. Water circulation in the eastern South Atlantic Ocean, *Oceanology*, 10, 1, 27-34.
- Mratov K. Ya.**, 1970. On formation of water gyres in the eastern tropical Atlantic, *Inter. Counc. Explor. Sea, C.M. 1970/C, 4, Hydrography Committee*, 9 p.
- Paliy N. F., Kirichek A. D.**, 1970. On the thermal dome and the water circulation South-East of Cape Verde, *Inter. Counc. Explor. Sea, C.M. 1970/C, 5, Hydrography Committee*.
- Rossignol M., Meyrueis A. M.**, 1964. *Campagne océanographique du Gérard Treca*, ORSTOM, Cent. Oceanogr. Dakar-Thiaroye, 53 p.
- Tomczak M. Jr.**, 1972. Problems of physical oceanography in coastal upwelling investigations, *Geoforum*, 11, 23-36.
- Tsuchiya M.**, 1974. Variation of the surface geostrophic flow in the eastern intertropical Pacific Ocean, *Fish. Bull.*, 72, 4, 1075-1086.
- Tsuchiya M.**, 1975. Subsurface countercurrents in the eastern equatorial Pacific Ocean, *J. Mar. Res., suppl.*, 33, 145-175.
- Voituriez B., Dandonneau Y.**, 1974. Relations entre la structure thermique, la production primaire et la régénération des sels nutritifs dans le Dôme de Guinée, *Cah. ORSTOM, sér. Océanogr.*, 12, 4, 241-255.
- Voituriez B., Chuchla R.**, 1977. Influence of the southern Atlantic central water on the distribution of salinity and oxygen in the northeast tropical Atlantic Ocean, *Deep-Sea Res.*, 25, 107-117.
- Voituriez B., Herbland A.**, 1978. Comparison of the coastal and open ocean upwelling ecosystems of the eastern tropical Atlantic, *Inter. Counc. Explor. Sea, Symposium on the Canary Current and Living Resources*, 43, 26 p.
- Wyrtki K.**, 1964 a. Upwelling in the Costa Rica dome, *US Fish Wildl. Serv. Fish. Bull.*, 63, 355-372.
- Wyrtki K.**, 1964 b. The thermal structure of the eastern Pacific Ocean, *Ergänzungsheft Reihe A*, 8, 6, *Zur Dtsch. Hydrogr. Z.*, 84 p.
- Wyrtki K.**, 1975. El Niño. The dynamic response of the Equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing, *J. Phys. Oceanogr.*, 5, 572-584.