

VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES DU FRONT LIGURO-PROVENÇAL LIÉES AU RÉGIME DES VENTS

MOUCHET A. (1) ET M. FRANKIGNOULLE (2)

(1) G.H.E.R., Institut de Physique, Université de Liège

(2) Laboratoire d'Océanologie, Institut de Chimie, Université de Liège

Sart Tilman B-4000 Liège.

Mots-clés : Méditerranée, Front, Hydrologie, Interactions air-mer

Key-words : Mediterranean Sea, Front, Hydrology, Atmospheric Forcing

RESUME : En mars et juin 1985, des transects espacés d'une semaine ont été effectués au travers du front liguro-provençal, côté Corse, et ont permis de mettre en évidence l'influence du vent sur la structure frontale.

Dans les deux cas, un vent soutenu du sud-ouest a entraîné un déplacement en "bloc" du front vers la côte, accompagné d'une accentuation du gradient et du caractère méditerranéen des eaux de surface. Ces faits sont en bon accord avec les conclusions d'études théoriques de la dynamique d'un front soumis à des contraintes extérieures.

Ces observations montrent en outre que malgré l'aspect permanent de la structure frontale, celle-ci présente des variations à moyen terme (5 à 6 jours) en réponse à celles du régime des vents.

*Spatial and temporal variations of the
liguro-provençal front in relations with the wind field*

SUMMARY : During March and June of 1985, one week apart measurements have been achieved across the Ligurian Front (along Corsica). These have permitted to evidence the wind effect on the frontal structure.

In both cases, strong southwesterly wind gales have been followed by a block displacement of the front towards the coast while an increase of the horizontal gradients and of surface water salinity were observed. Changes in the frontal shape have been noticed as deep as one hundred meters (maximum depth of our measurements).

These observations bring out the important fact that although this front shows a strong permanency of its structure and its position through seasons and years, it undergoes strong variations at time scale of 5-6 days in response to the atmospheric forcing.

INTRODUCTION

En tant que zones de transition entre masses d'eau différentes, les fronts sont une caractéristique essentielle et universelle de la circulation océanique. Les échanges et mouvements verticaux intenses dont ils sont le siège leur confèrent un rôle biologique important.

Malgré l'aspect permanent des structures frontales, d'importantes fluctuations y ont lieu. Celles-ci se manifestent sous forme d'oscillations, de méandres ou de tourbillons dont les dimensions sont de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres et dont les temps caractéristiques varient de quelques jours à quelques semaines (Pingree 1978; Crépon *et al.* 1982; Roden 1985).

De plus les conditions météorologiques influencent fortement un front déjà formé (Ou 1984; Adamec et Garwood 1985). On observera un renforcement ou un affaiblissement de la structure frontale en réponse aux contraintes extérieures (transfert de quantité de mouvement et d'énergie turbulente dû à l'action mécanique du vent, flux de poussée provoqué par l'évaporation, les précipitations et les échanges thermiques...). La compréhension de ces phénomènes est importante puisqu'ils affectent non seulement la position du front mais également l'amplitude et la fréquence des échanges perpendiculairement à celui-ci.

En 1985, nous avons eu l'occasion, à deux époques différentes, d'effectuer des transects hydrologiques espacés de quelques jours au niveau du front liguro-provençal. Nous discutons dans cet article les relations possibles entre les mouvements de ce front et le régime des vents.

OBSERVATIONS

Le front liguro-provençal sépare les eaux centrales denses du bassin occidental de la Méditerranée et celles plus légères d'origine atlantique situées à la périphérie. Les études précédentes ont montré la présence permanente de ce front au cours des saisons et d'une année à l'autre (Hecq *et al.* 1986).

La figure 1 indique la zone d'étude ainsi que la position des stations où ont été effectués les différents prélèvements. Des mesures profondes menées début avril montrent que la structure frontale occupe les deux cents mètres supérieurs de la colonne d'eau (fig. 2).

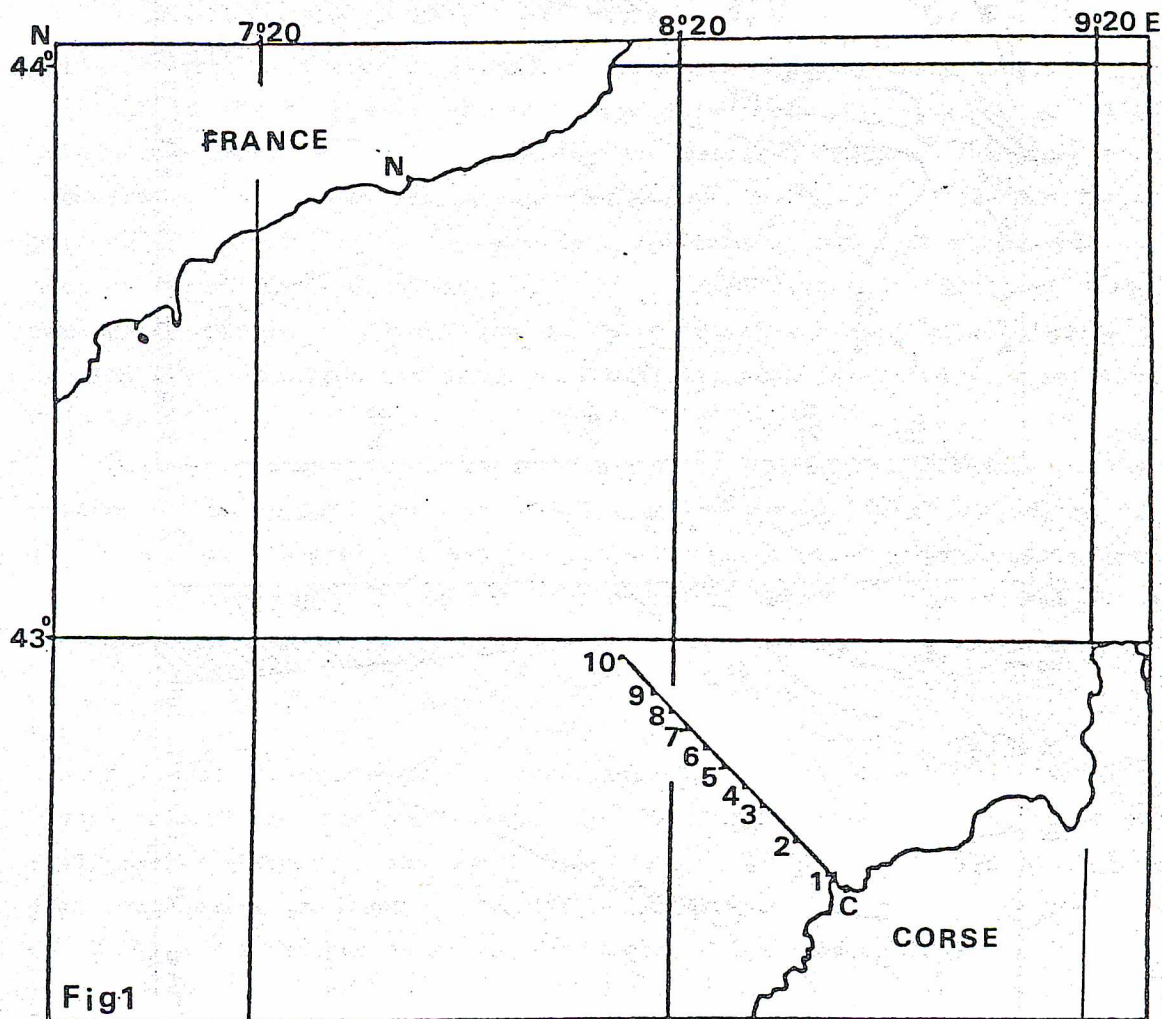


Fig. 1. : Aire d'échantillonnage et positions des stations.

La distance entre les stations 1, 2, 3 et entre les 9 et 10 est de 5 milles nautiques. Cette distance est de 2.5 milles nautiques pour les autres stations. (d'après Hecq *et al.* 1986).

a) Mars-avril

Fin mars et début avril nous avons effectué trois transects au travers du front. Le long des deux premiers (les 26 et 30 mars) l'alcalinité et la salinité ont été mesurées à dix mètres de profondeur. Les 3 et 5 avril des prélèvements ont été effectués jusqu'à huit cents mètres aux stations 2, 3, 4, 5 et 7.

La répartition des isopycnes en ces mois de fin d'hiver est similaire à celle des isohalines, la stratification thermique étant faible. Si l'on compare les différents diagrammes de la figure 2, on note la présence d'un front de densité entre les stations 3 et 4 où est situé également le gradient horizontal de salinité le plus élevé. Donc pour cette époque de l'année le champ de densité

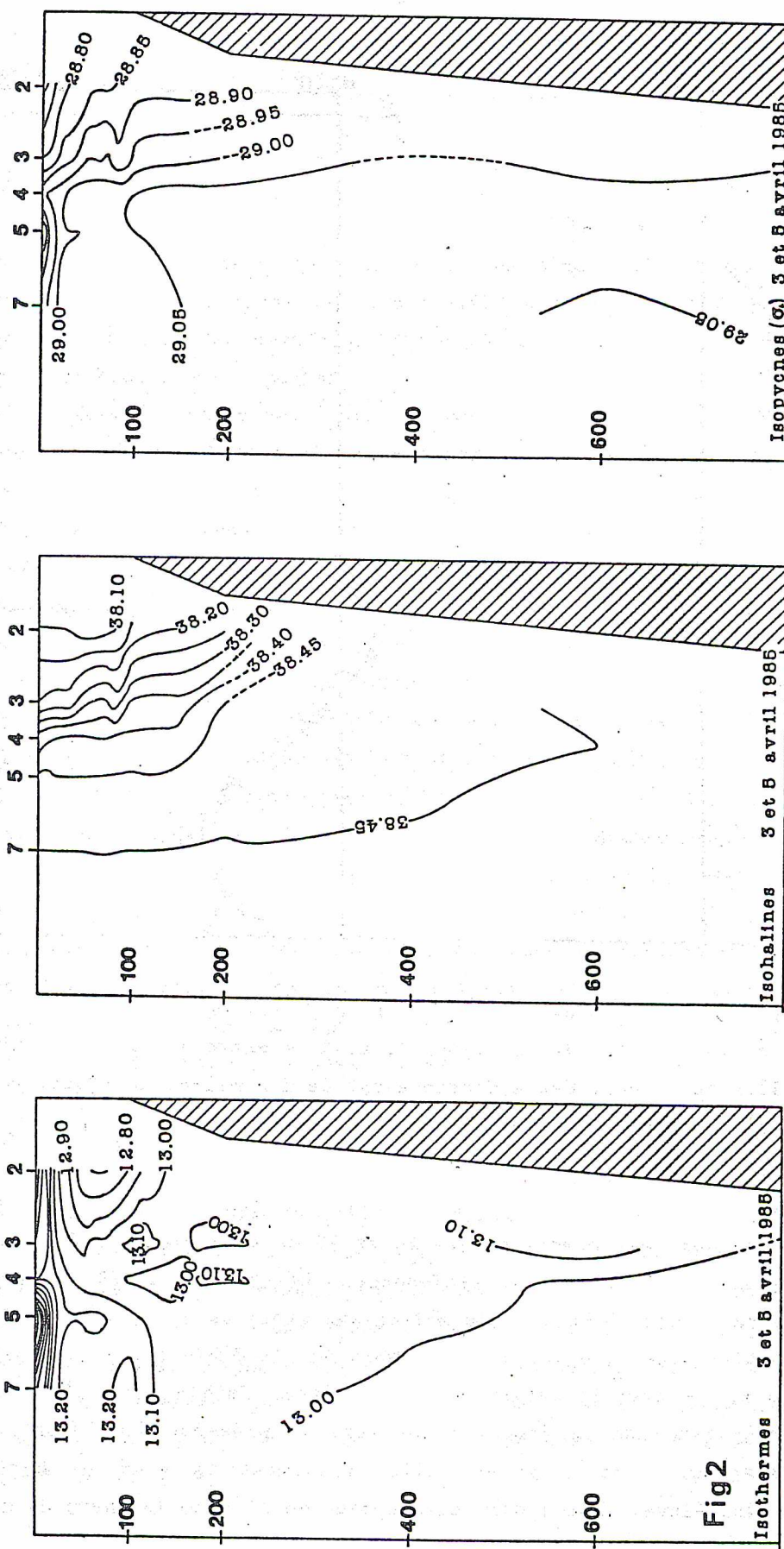


Fig. 2. : Isothermes, isohalines et isopycnes (σ_t) d'après les prélèvements effectués les 3 et 5 avril 1985 aux stations 2, 3, 4, 5 et 7.

peut être très bien représenté par celui de salinité. L'alcalinité totale est également représentative du type de masse d'eau (Frankignoulle 1986).

Sur la figure 3 sont reportées les valeurs de salinité et de l'alcalinité totale mesurées à dix mètres le long des trois transects. Ces deux paramètres s'accordent à mettre en évidence un déplacement du front vers la côte durant cette période. En effet, si le 26 mars les gradients maxima sont rencontrés entre les stations 4 et 5, au début avril ils se trouvent entre les stations 3 et 4. On remarquera également l'évolution des propriétés des eaux situées au-delà de la station 4 vers un type nettement plus méditerranéen (salinité supérieure ou égale à 38 ‰).

On peut estimer ainsi le déplacement du maximum du gradient de densité à environ 6.5 km en neuf jours au plus (ce qui correspond à une vitesse de 10^{-2} m s^{-1} au minimum). L'analyse des données météorologiques montre que durant la période précédant le 30 mars, les vents dominants provenaient du secteur sud-ouest avec des vitesses moyennes supérieures à 10 m s^{-1} (figure 4).

b) Juin

A la fin du printemps, la stratification verticale est importante, suite à l'échauffement en surface. Bien que le front halin soit toujours présent, l'allure des isopycnes est cette fois déterminée par celle des isothermes avec pour conséquence un front de densité moins marqué qu'en mars (voir aussi Hecq *et al.* 1986). Des mesures au niveau du front ont été effectuées à deux reprises : le 19 et le 26 juin 1985. Ces deux études montrent un changement radical dans la structure frontale en l'espace d'une semaine (figures 5 à 8).

Le 19 juin, la pente des isocourbes pour la salinité et l'alcalinité est relativement modérée, la couche légère s'étend de la côte à la station 5 (salinité inférieure à 38 ‰, alcalinité inférieure à 2.587 méq l^{-1} , dans les 50 premiers mètres).

Le 26 juin, la situation est très différente. Il y a un net redressement des isocourbes de salinité et d'alcalinité (fig. 6-b et 8-b), qui se manifeste sur toute la colonne d'eau étudiée (100 mètres). Les eaux de faibles alcalinité et salinité ont été repoussées vers la côte. Au point de vue thermique on observe un approfondissement de la couche de mélange avec une thermocline nettement plus marquée (fig. 5-b). Le champ de densité reflète plus les caractéristiques thermiques et ne montre pas d'augmentation du gradient horizontal d'une fois à l'autre (fig. 7-a et 7-b).

Fig. 3. : Distribution de la salinité (en haut) et de l'alcalinité mesurées à 10 m le long des trois transects effectués en mars-avril 1985.

La position des stations est donnée en abscisse.

A chaque date correspond un symbole différent explicité au bas de la figure.

Fig. 4. : Direction et intensité du vent (moyenne sur quatre heures) du 22 mars au 5 avril 1985 d'après les données du service météorologique de l'aéroport de Calvi. Les dates soulignées correspondent aux jours de mesure au niveau du front.

La représentation choisie montre d'où vient le vent : l'origine de celui-ci est donc extérieure à l'axe horizontal.

Fig. 5. : Isothermes relevés les 19 juin (a) et 26 juin 1985 (b).

Fig. 6. : Isohalines relevés les 19 juin (a) et 26 juin 1985 (b).

Fig. 7. : Isopycnes (σ_t) relevés les 19 juin (a) et 26 juin 1985 (b).

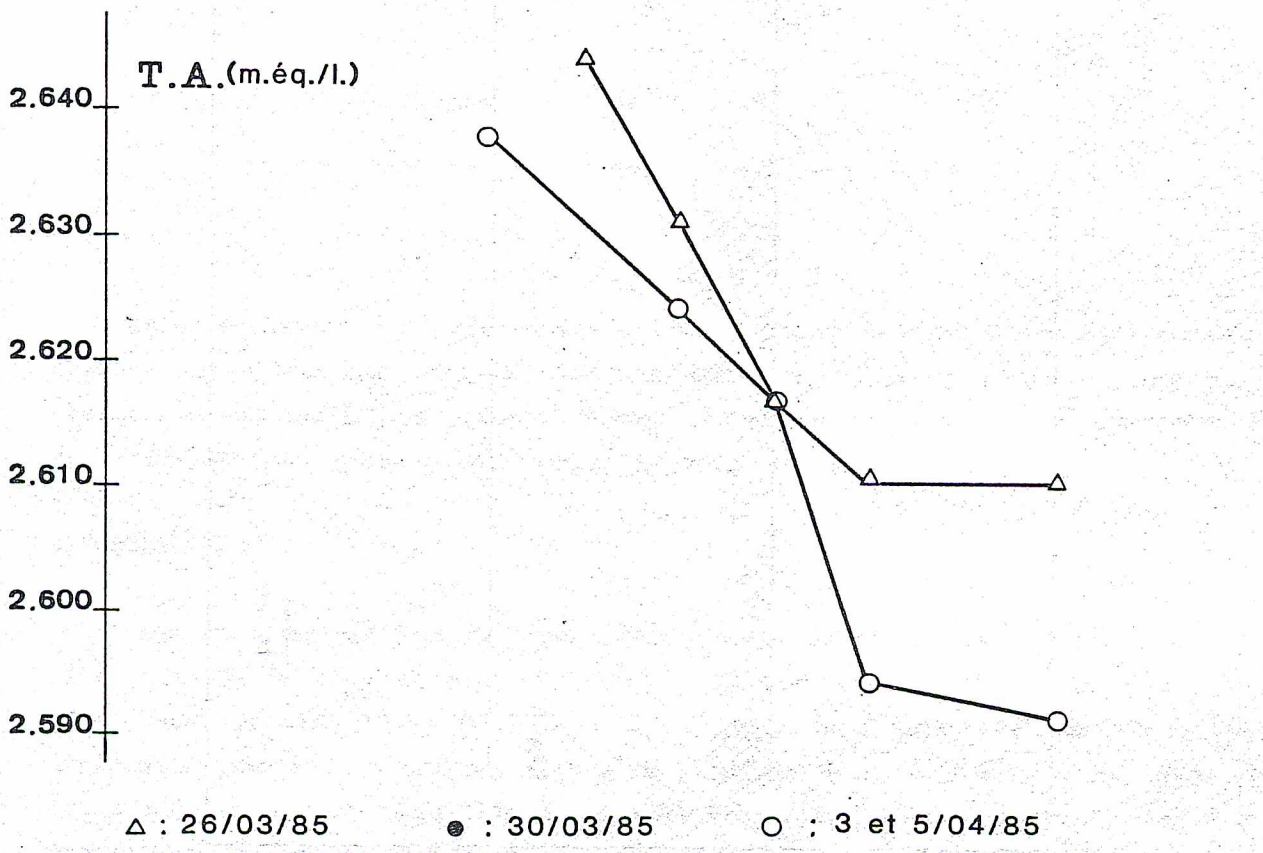
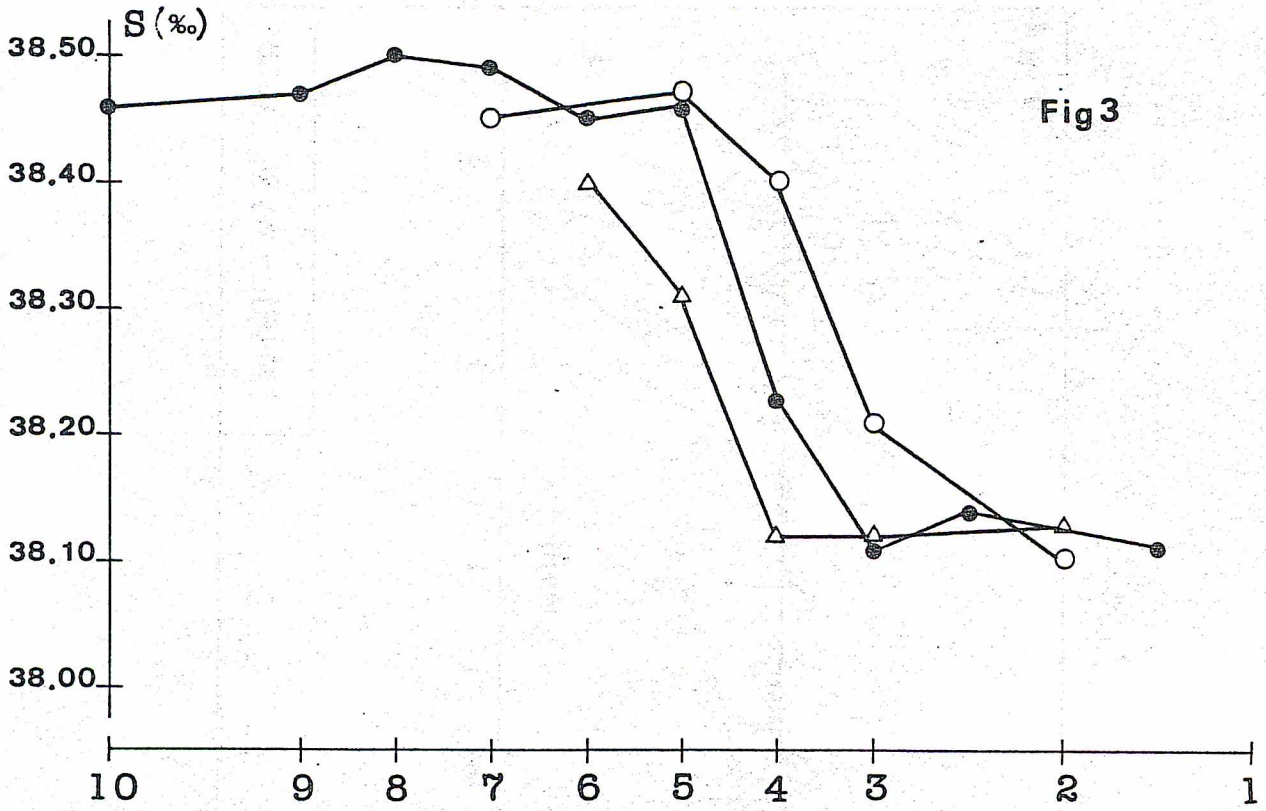
Fig. 8. : Isocourbes d'alcalinité totale pour le 19 juin (a) et le 26 juin (b) 1985 (Frankignoulle 1986).

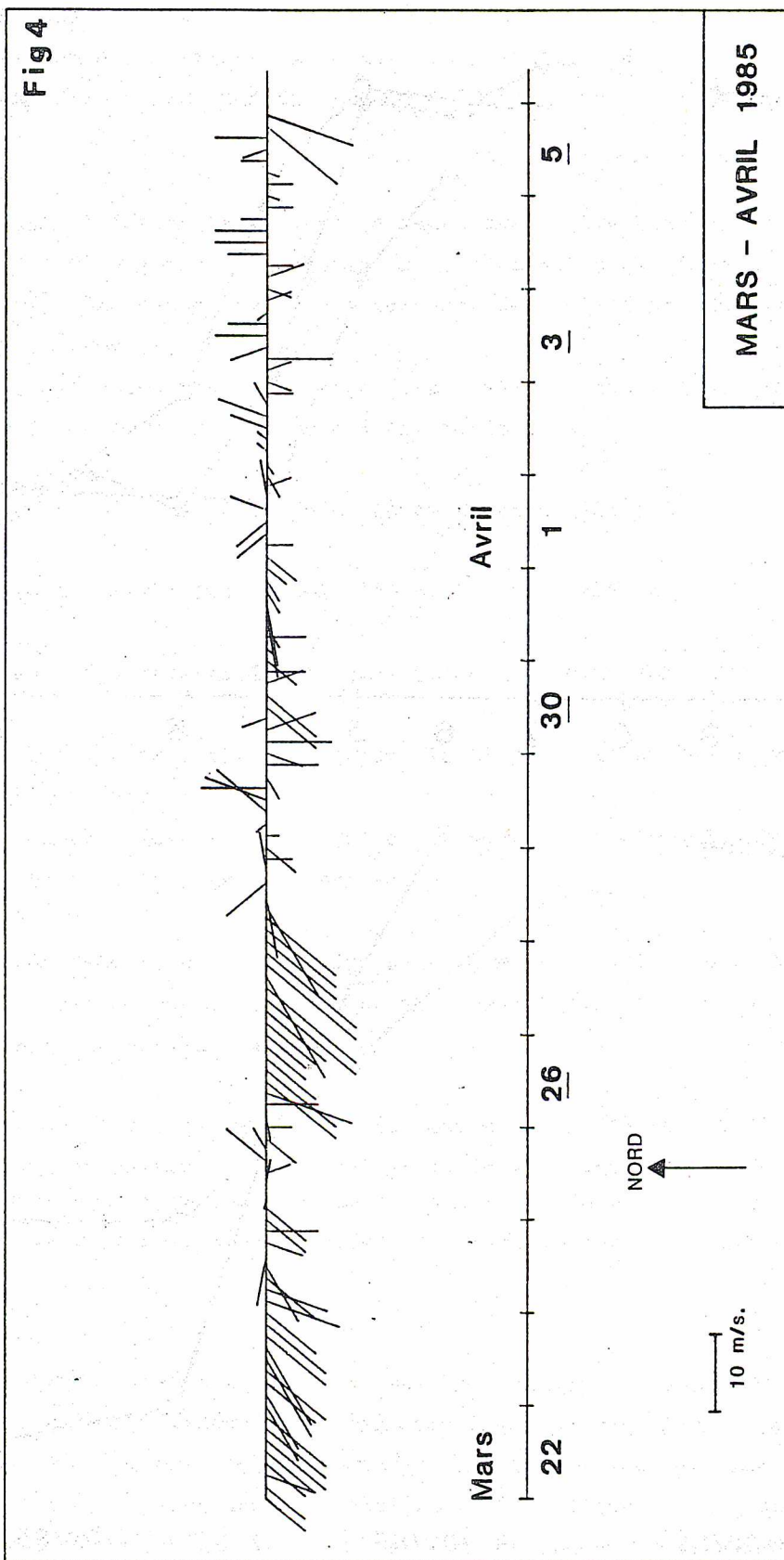
Chaque numéro représente un type d'eau dont la gamme d'alcalinité est donnée dans le tableau I en annexe.

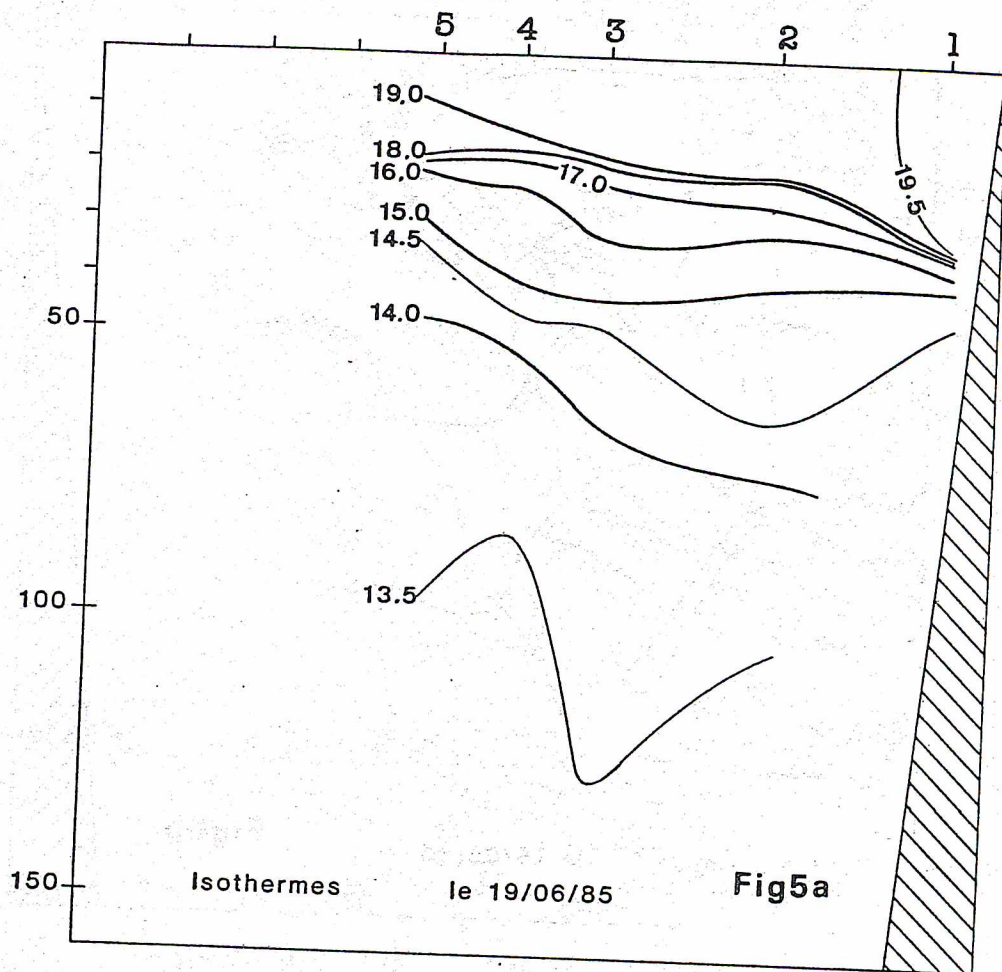
Fig. 9. : Diagramme température - salinité pour le mois de juin 1985. Les courbes en trait discontinu correspondent au transect effectué le 19, celles en trait continu à celui du 26 juin.

Fig. 10. : Direction et intensité moyenne du vent du 16 au 30 juin 1985, d'après les données du service météorologique de l'aéroport de Calvi. Les vitesses sont moyennées sur quatre heures. Chaque trait montre d'où vient le vent avec l'origine de celui-ci extérieure à l'axe horizontal.

La représentation de ces données sur un diagramme T-S (fig. 9) met particulièrement bien en évidence les modifications survenues en l'espace d'une semaine. Le 19, les courbes pour les stations 3, 4 et 5 ont la même allure que celle de la station 2, typique des eaux côtières. Tandis que le 26 juin, les 4 et 5 sont identiques à celle de la station 7 correspondant aux eaux centrales méditerranéennes.



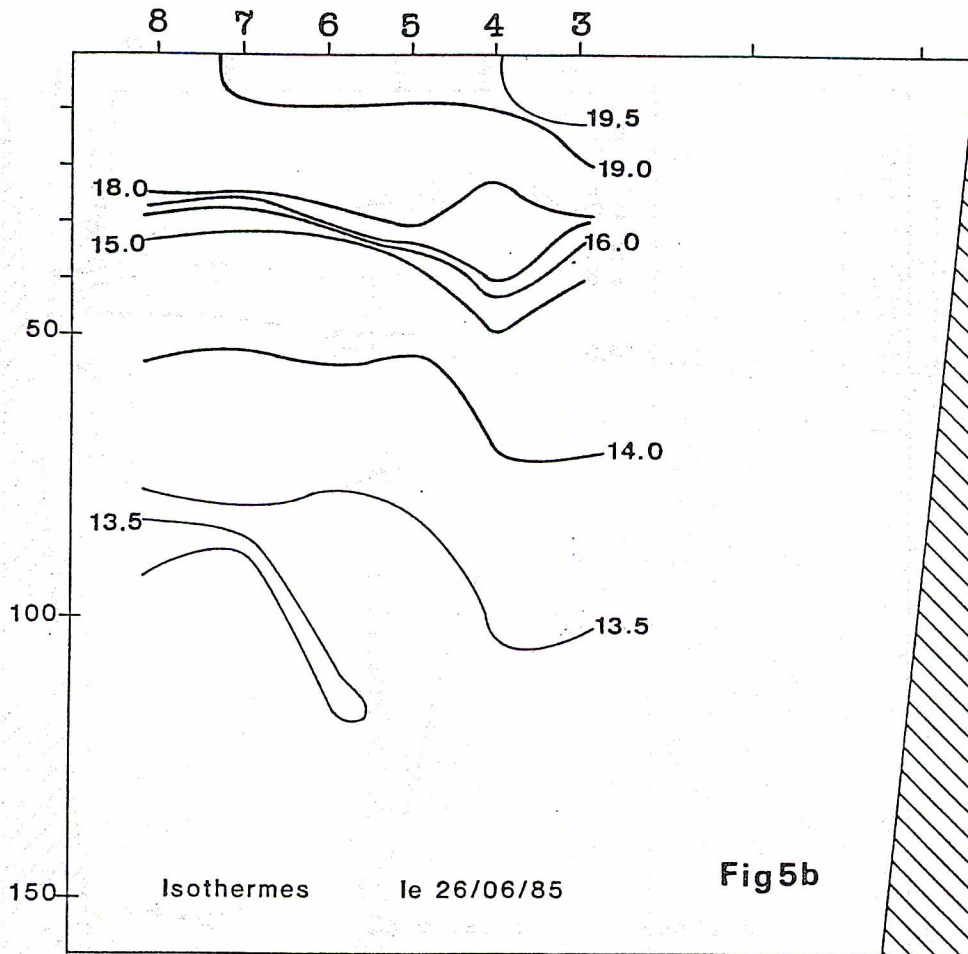




Cette évolution d'un type d'eau atlantique vers un type d'eau méditerranéen suggère un déplacement vers la côte des différentes masses d'eau qui peut être consécutif aux conditions atmosphériques. Entre ces deux transects un régime de vents du sud-ouest s'est maintenu pendant plusieurs jours (fig. 10).

DISCUSSION

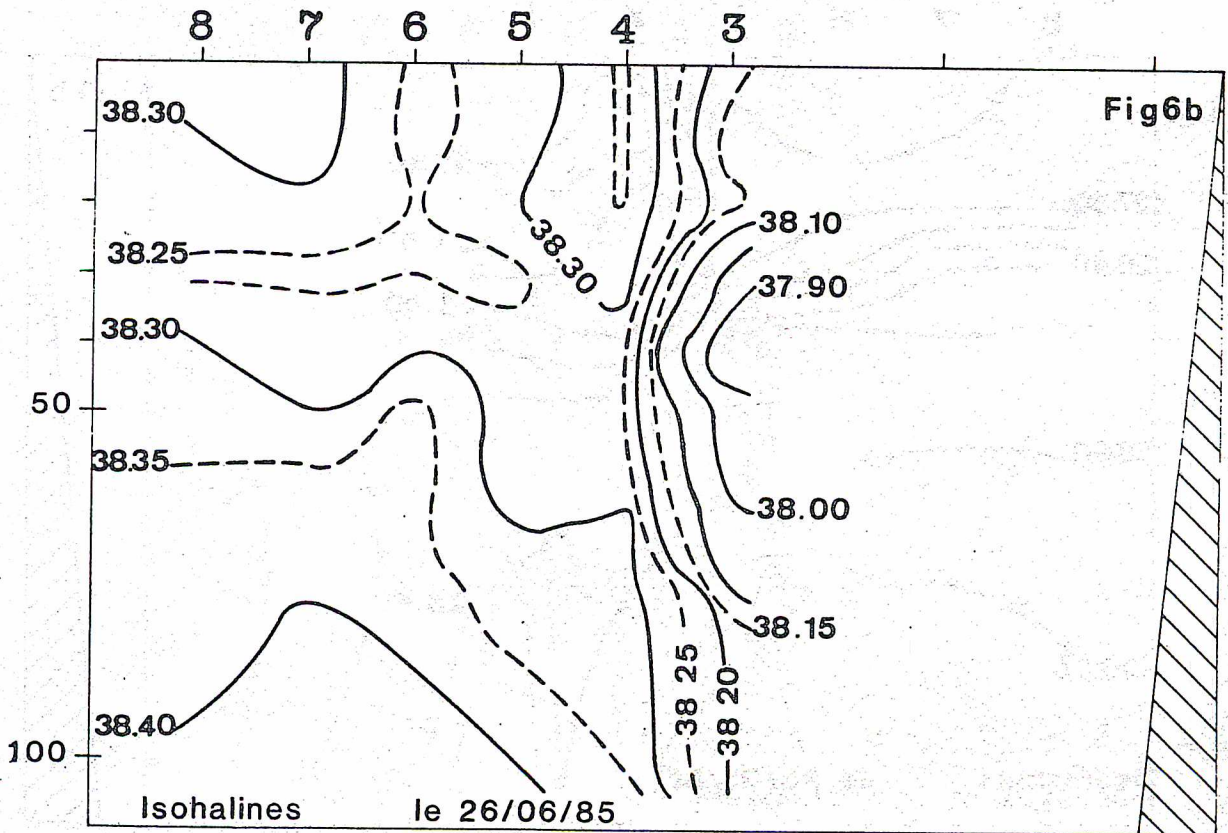
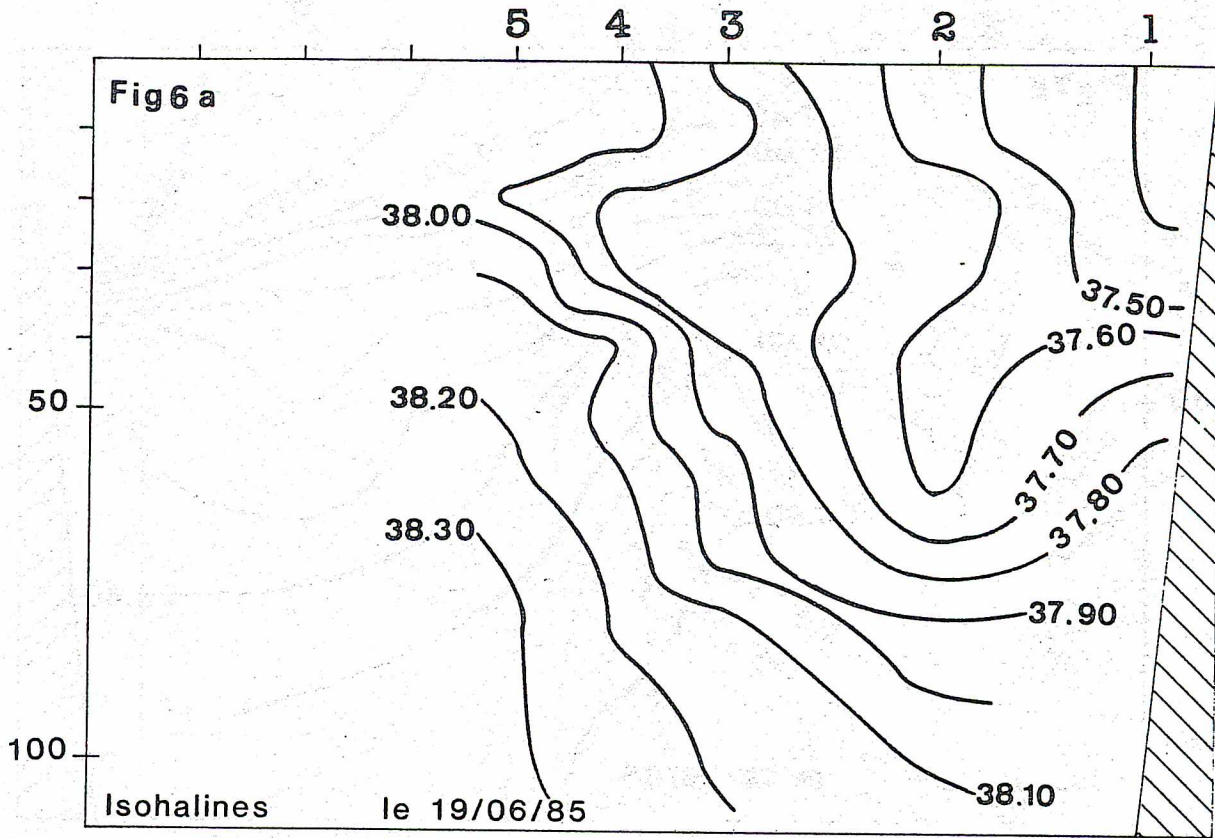
Dans les deux cas étudiés, nous avons observé un déplacement du front vers la côte suite à un coup de vent de sud-ouest. Les modèles développés (Ou 1984, Adamec and Garwood 1985) pour mettre en évidence l'influence des conditions météorologiques sur le comportement d'un front de densité, montrent que dans un cas similaire (front parallèle à la côte, vent soufflant avec celle-ci à sa droite) on observe les résultats suivants :

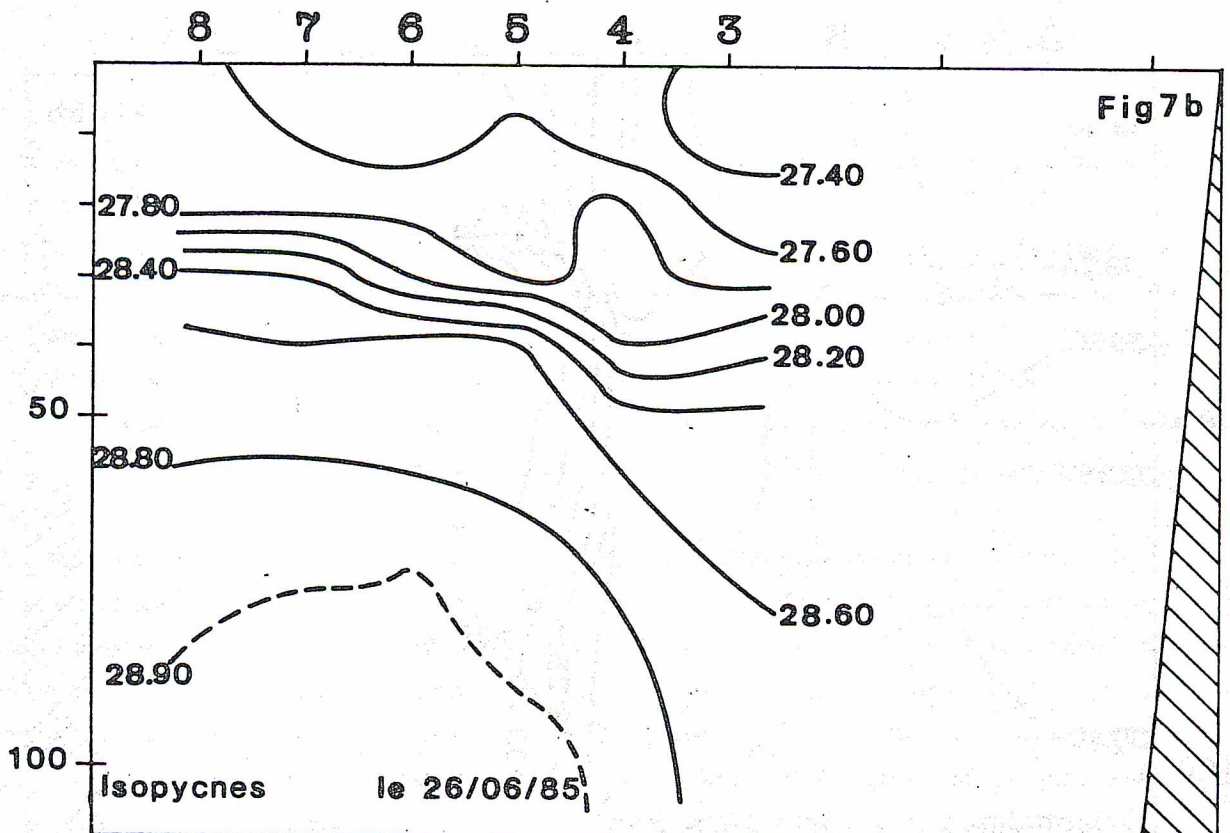
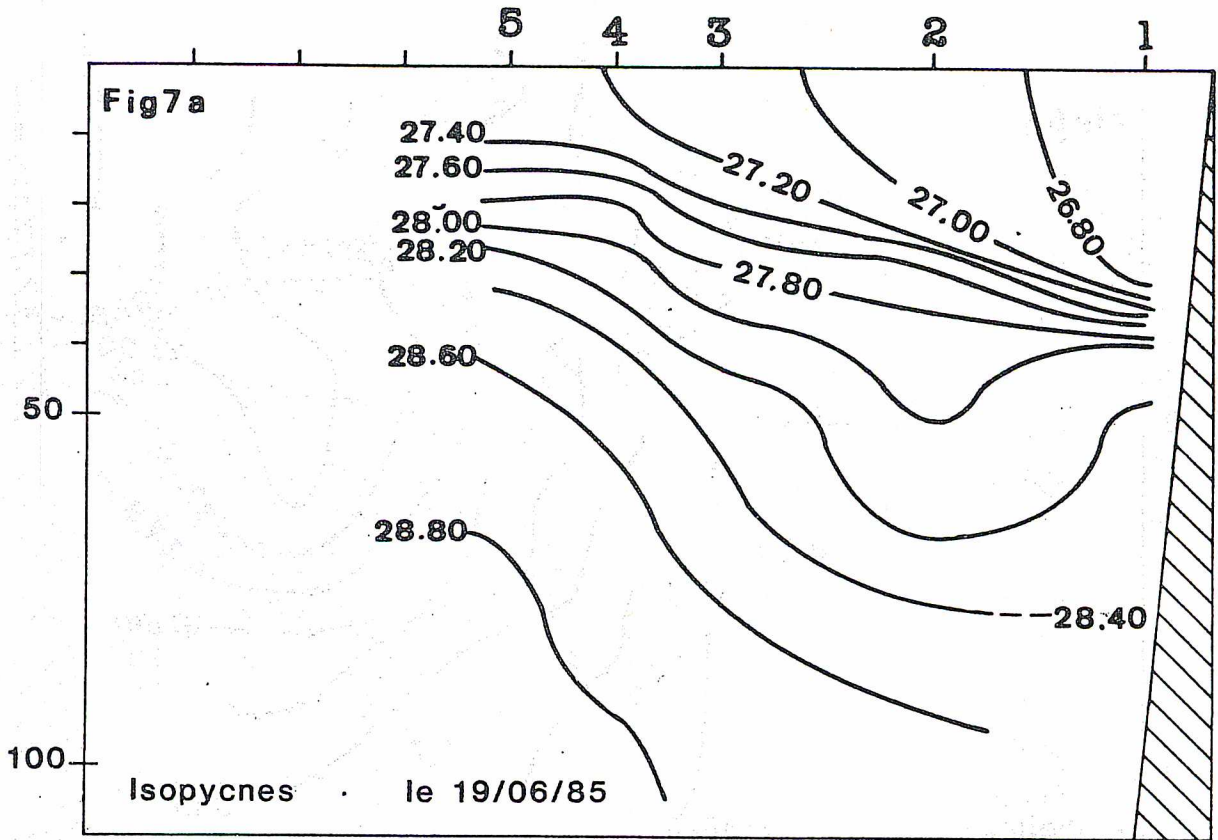


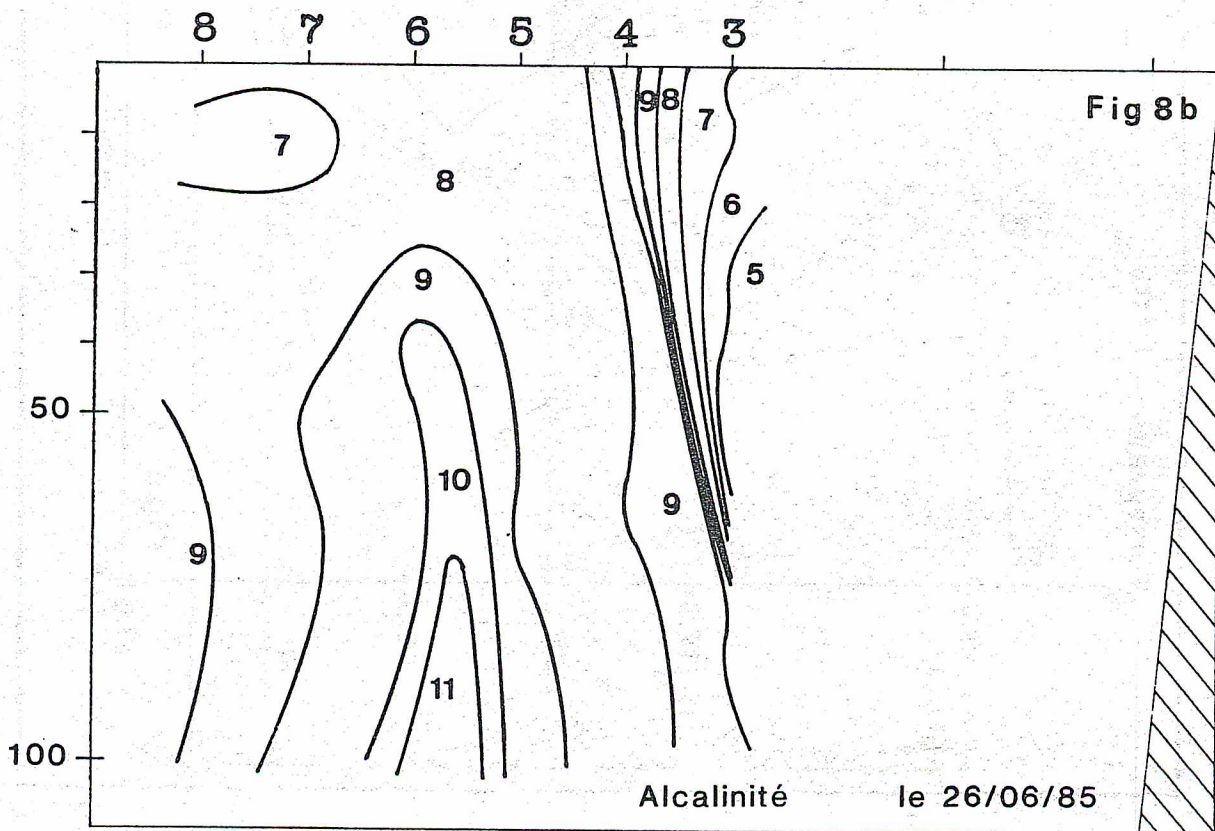
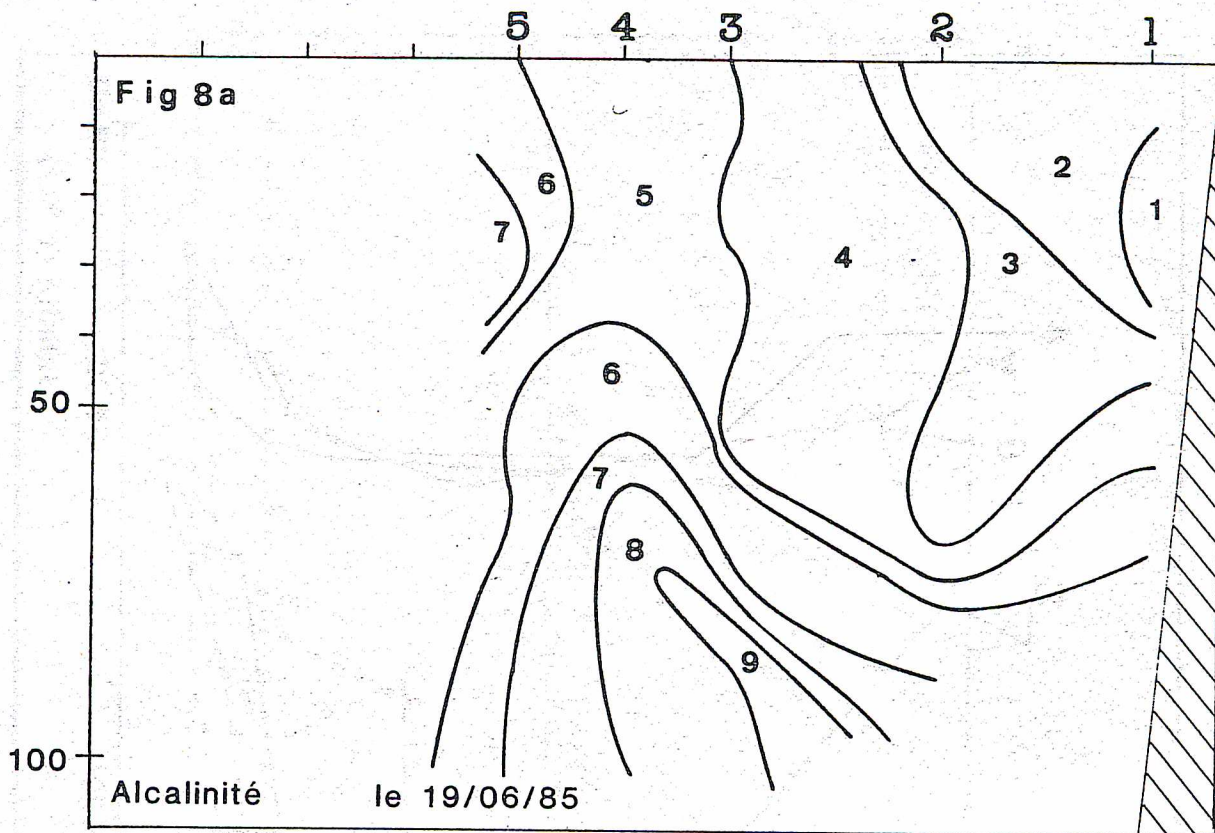
- d'une part, il y a un déplacement "en bloc" du front vers la côte mais peu d'intensification du gradient horizontal de densité,
- d'autre part, le mélange en surface provoque une augmentation de la pente des isocourbes en plus de l'approfondissement de la thermocline. L'influence du vent se manifeste à des profondeurs supérieures à celle de la couche de mélange et selon Camerlengo (1982) ces effets peuvent être ressentis jusqu'à 150 m.

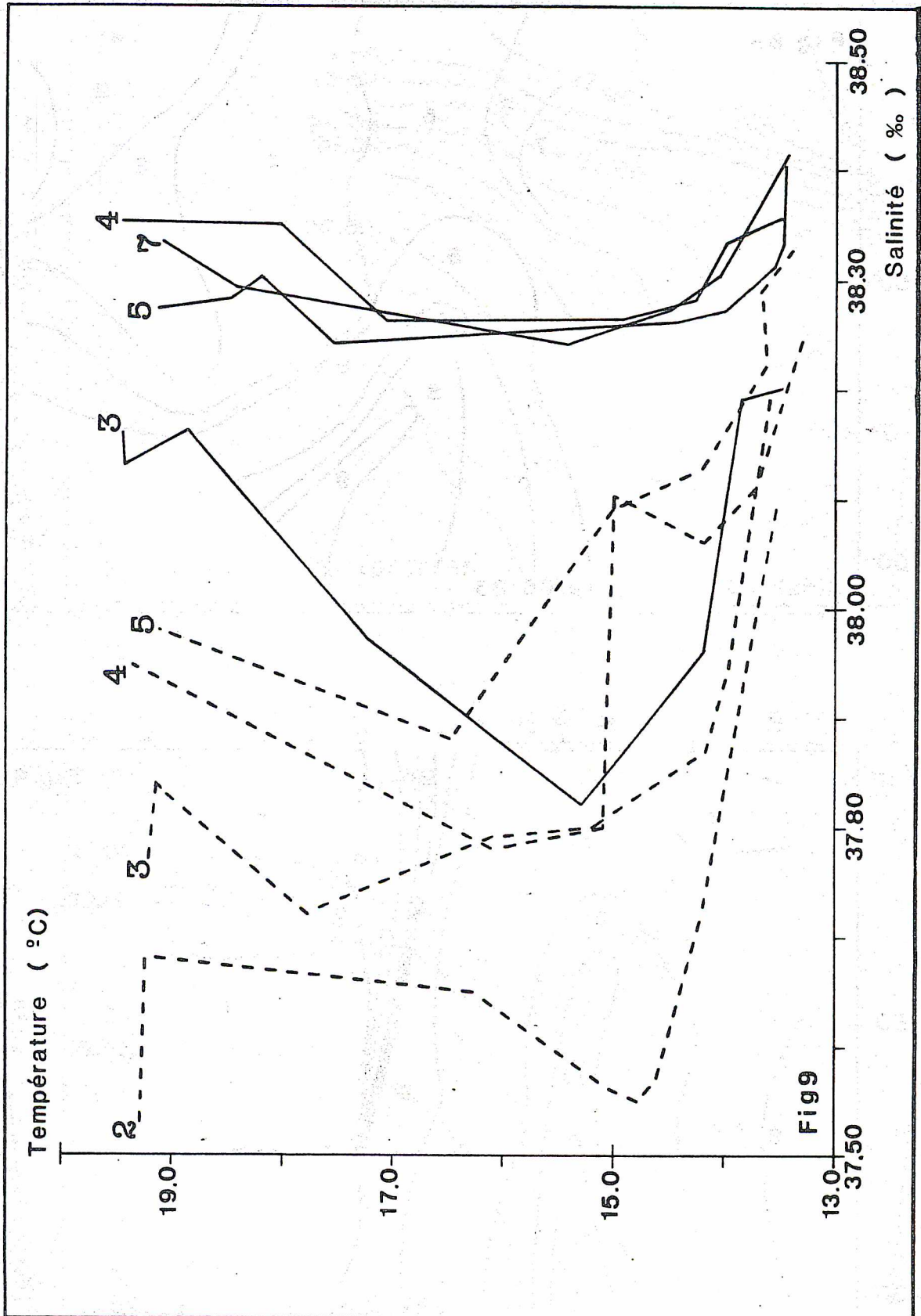
Les modifications observées en juin sont remarquablement cohérentes avec cette description et il est donc fort probable qu'elles soient imputables à l'action du vent.

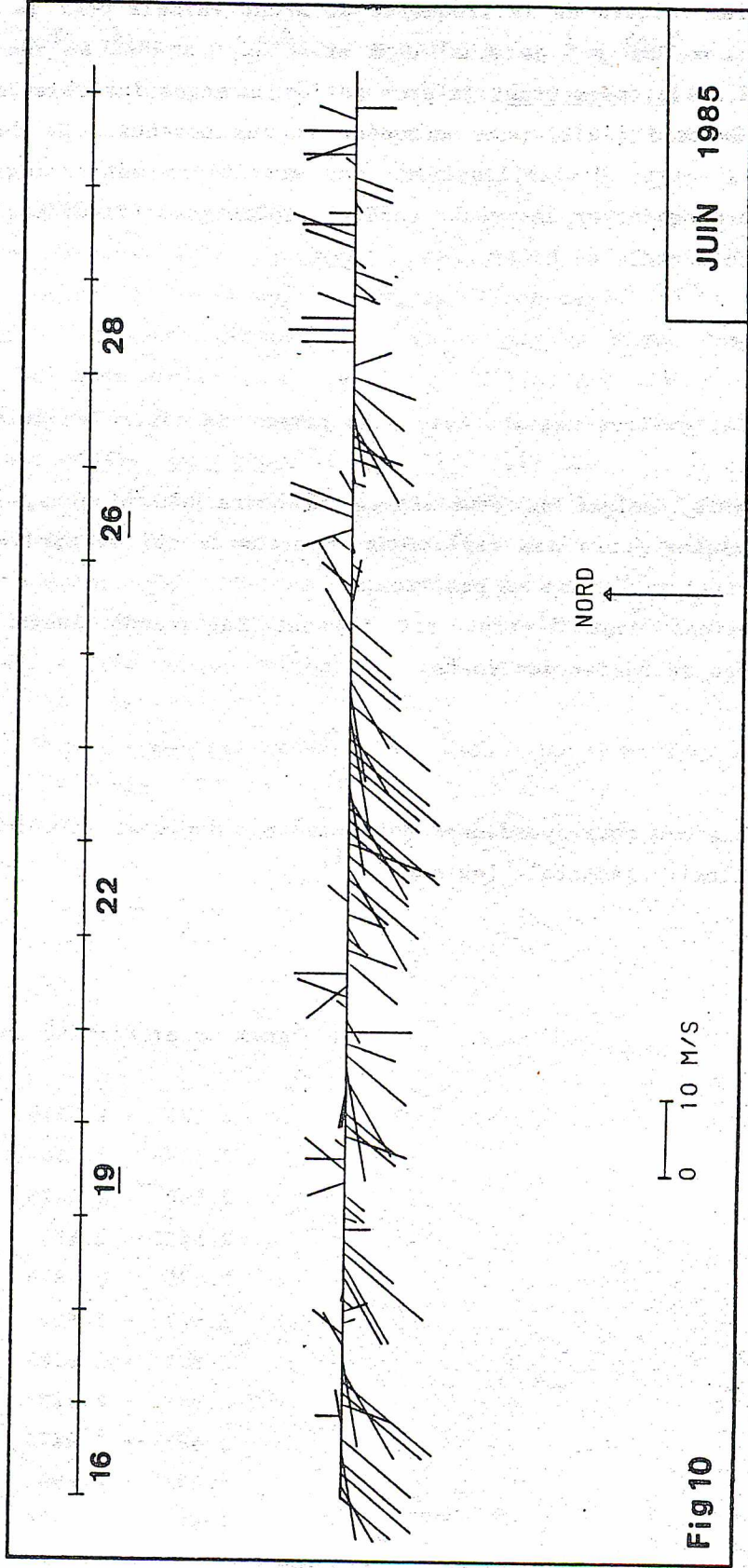
Par contre, pour le mois de mars, l'absence d'information sur l'évolution de la structure verticale ne nous permet pas de conclusions aussi nettes. Le comportement du front a probablement été influencé par les conditions atmosphériques mais nous ne pouvons écarter à priori la possibilité que les mouvements observés soient consécutifs à la propagation d'ondes. La méditerranée occidentale est connue pour être le siège d'instabilités baroclines, particulièrement en automne et en hiver (Gascard 1978; Crépon *et al.* 1982; Marullo











et al. 1985).

De plus, les valeurs de la fréquence de Brunt Väisälä pour le début du mois d'avril ($N^2 \approx 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-2}$ de 0 à 150 m et $N^2 \approx 0.8 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-2}$ de 150 à 800 m) correspondent à celles permettant la propagation de modes instables dans le modèle développé par Gascard (1978) pour un océan à deux couches. Ce dernier insiste également sur l'action déstabilisatrice des conditions météorologiques suite à l'évaporation provoquée par les vents secs et violents soufflant sur le nord de la méditerranée occidentale en hiver.

CONCLUSION

Cette étude, quoique qualitative, nous permet de mettre en évidence quelques faits importants :

- le front ligure, malgré sa persistance au cours des saisons, peut subir en l'espace de quelques jours des variations importantes qui se manifestent tant au niveau de sa structure que de sa position,
- ces fluctuations dont l'effet est ressenti à grande profondeur, semblent étroitement liées au régime des vents.

ANNEXE

TABLEAU 1 : Table des correspondances entre le type d'eau et la valeur de l'alcalinité totale (en méq. l^{-1})

Type d'eau	gamme d'alcalinité totale
1	2.525 - 2.5375
2	2.5375 - 2.550
3	2.550 - 2.5625
4	2.5625 - 2.575
5	2.575 - 2.5875
6	2.5875 - 2.600
7	2.600 - 2.6125
8	2.6125 - 2.625
9	2.625 - 2.6375
10	2.6375 - 2.650
11	2.650 - 2.6625

REFERENCES

- ADAMEC, D. and R.W. GARWOOD. (1985). - The simulated response of an upper-ocean density front to local atmospheric forcing. J. Geophys. Res., 90 : 917-928.
- CAMERLENGO, A.. (1982). - Large scale response of the Pacific Ocean Subarctic front to momentum transfer : a numerical study. J. Phys. Oceanogr., 12 : 1106-1121.
- CREPON, M., L. WALD and J.M. MONGET. (1982). - Low frequency waves in the Ligurian Sea during December 1977. J. Geophys. Res., 87 : 595-600.
- FRANKIGNOULLE, M. (1986). - Le système CO₂ en milieu marin : activité biologique, interactions air-mer, caractérisation des masses d'eau dans la couche de surface. Thèse de doctorat, Université de Liège, 252 p.
- GASCARD, J.C. (1978). - Mediterranean deep water formation, baroclinic instability and oceanic eddies. Oceanologica Acta, 1 : 315-330.
- HECQ, J.H., J.M. BOUQUEGNEAU, S. DJENIDI, M. FRANKIGNOULLE, A. GOFFART and M. LICOT. (1986). - Some aspects of the Liguro-Provençal frontal ecohydrodynamics, in : Marine Interfaces Ecohydrodynamics. (J.C.J. NIHOUL ed., ELSEVIER), 42 : 257-271.
- OU, H.W. (1984). - Wind driven motion near a shelf slope front. J. Phys. Oceanogr., 14 : 985-993.
- PINGREE, R.D. (1978). - Cyclonic eddies and cross frontal mixing. J. Mar. Biol. Ass. U.K., 58 : 955-963.
- RODEN, G.I. (1985). - Mesoscale oceanic fronts of the North Pacific (unpublished manuscript).