

Projet Référentiel Plancton de la Baie de Calvi

I. LE FRONT LIGURO-PROVENÇAL

Les variations spatiales et temporelles des communautés phytoplanctoniques au large de la côte occidentale corse, en relation avec la dynamique des masses d'eau et le Front Liguro-Provençal

Anne GOFFART ET Jean-HENRI HECQ

PROJET FINANCE PAR L'AGENCE DE L'EAU RMC

Juillet 2007

Table des matières

Fiche de synthèse	1
1. Introduction à l'hydrologie du Bassin Liguro-Provençal	3
2. Contrôle de la production phytoplanctonique par le Front Liguro-Provençal (secteur corse)	5
2.1. La caractérisation hydrologique du Front Liguro-Provençal	5
2.2. La caractérisation du Front Liguro-Provençal par imagerie satellitaire	7
2.3. Les variations saisonnières des communautés phytoplanctoniques en relation avec la dynamique du Front Liguro-Provençal (secteur corse)	9
2.3.1. La situation en fin d'hiver et au printemps	11
2.3.2. La situation en mai	14
2.3.3. La situation en juin	17
2.4. La variabilité interannuelle de la distribution du phytoplancton en relation avec le Front Liguro-Provençal	19
3. Le rôle du Front Liguro-Provençal dans l'accroissement de la biomasse phytoplanctonique du bassin Liguro-Provençal (secteur corse)	19
4. Première approche de la diversité fonctionnelle du phytoplancton associé au Front Liguro- Provençal	21
4.1. La composition spécifique et la dynamique des groupes fonctionnels	21
4.2. La composition pigmentaire par HPLC	22
5. Synthèse de l'influence du Front Liguro-Provençal sur l'écologie des populations phytoplanctoniques: la distribution et les facteurs de contrôle prioritaires	24
6. Références	26

Fiche de synthèse

Caractéristiques du Courant Ligure (secteur corse)

- eau d'origine atlantique, peu salée et à caractère oligotrophe prononcé;
- au large de Calvi, largeur moyenne de 10 à 15 milles;
- forts courants horizontaux, de l'ordre de 40 cm s^{-1} (une particule met théoriquement 15 jours pour effectuer le parcours circulaire de Calvi à Nice).

Caractéristiques du Front Liguro-Provençal (secteur corse)

- structure hydrologique permanente, en forme de fer à cheval (fig. 2), liée à la circulation cyclonique générale des régions côtières du bassin Liguro-Provençal;
- borde le côté gauche du Courant Ligure;
- sépare les eaux légères et oligotrophes du Courant Ligure (Zone périphérique) des eaux plus denses du centre du bassin (Zone Centrale);
- au large de Calvi, structure d'une largeur de 2 à 5 milles, située à une distance de 10 à 15 milles de la côte;
- profondeur maximale de 300 m;
- zone où la circulation verticale est complexe et associe divergences et convergences;
- les mécanismes de divergence associés à la zone frontale génèrent des remontées de sels nutritifs d'origine profonde et assurent de façon permanente la fertilisation des eaux superficielles ou sub-superficielles;
- en zone frontale, les vitesses de remontée de sels nutritifs varient 20 à 80 m j^{-1} selon les saisons.

Contrôle de la production phytoplanctonique par le Front Liguro-Provençal (secteur corse)

- La stabilité interannuelle des caractéristiques physiques du Front Liguro-Provençal contrôle de manière reproductible la dynamique saisonnière des communautés phytoplanctoniques et l'exportation de la biomasse produite.
- Pendant les périodes printanière et post-printanière (de la seconde partie de mars au mois de mai), le front génère systématiquement des biomasses phytoplanctoniques plus élevées que celles produites dans le Courant Ligure et en Zone Centrale.
- En mars - avril, en Zone Frontale, les concentrations en chlorophylle a intégrées entre 0 et 100 m atteignent des valeurs très élevées pour un écosystème méditerranéen non perturbé (150 - 175 mg chl a m^{-2}). Cet l'enrichissement en phytoplancton a sans aucun doute une signification écologique importante, mais survient dans un contexte de production généralisée (fig. 7).

- En mai, le rôle écologique du front en tant que « zone refuge » paraît maximum, puisqu'il constitue la seule région où du phytoplancton est disponible pour les consommateurs (fig. 9). A cette période, les mécanismes de fertilisation qui entretiennent la production phytoplanctonique en zone frontale contrôlent l'organisation spatiale de toute la chaîne trophique pélagique, jusqu'aux niveaux supérieurs.
- En période estivale, on observe une tendance généralisée à l'uniformisation des concentrations en chlorophylle de toutes les zones. Les biomasses intégrées au niveau du front, si elles font toujours partie des valeurs élevées, ne sont plus systématiquement supérieures à celles des autres régions.

1. Introduction à l'hydrologie du bassin Liguro-Provençal

La Méditerranée est une mer semi-fermée et profonde. Sa profondeur est de 1 500 mètres en moyenne et atteint une profondeur maximale 5 100 mètres.

A l'ouest, la Méditerranée est en contact avec l'Atlantique au niveau du détroit de Gibraltar (largeur de 12 miles), caractérisé par un seuil immergé à une profondeur de 300 mètres environ. A l'est, la Méditerranée est reliée à la Mer Rouge par le canal de Suez et à la Mer Noire par le Bosphore. Ces deux passages, de faible profondeur et très étroits, jouent un rôle hydrologique beaucoup moins important que le détroit de Gibraltar. Enfin, la Méditerranée Occidentale est séparée de la Méditerranée Orientale par le Canal de Sicile.

En Méditerranée, les vents et l'énergie solaire induisent une forte évaporation qui est loin d'être compensée par les apports fluviaux et les précipitations: le bilan d'eau est en déficit de 2 500 km³ par an (Béthoux, 1979). L'équilibre hydrique méditerranéen est maintenu grâce à une entrée d'Eau Superficielle Atlantique au niveau du Détroit de Gibraltar, compensée par une sortie d'Eau Méditerranéenne plus dense en profondeur (entre 150 et 300 m). Soixante-dix ans seraient nécessaires pour renouveler la totalité de l'Eau Méditerranéenne (Jacques et Tréguer, 1986). Ce temps de résidence est relativement court par rapport à celui des grands océans où il varie de 100 à 1 000 ans.

Ces flux d'Eau Atlantique déterminent une circulation de type cyclonique dans la plupart des bassins (fig. 1) et influencent la répartition horizontale et verticale des

masses d'eau. Il s'établit un système à 3 couches:

- L'Eau Superficielle, d'origine Atlantique, située entre la surface et environ 150 mètres de profondeur est peu salée et relativement froide à son entrée en Méditerranée. Elle perd ses caractéristiques atlantiques (salinité: 36.25, densité σ_t : 27) et sa densité augmente au fur et à mesure de sa progression vers l'est (Tchernia, 1960). En fonction des conditions climatiques, elle donnera naissance soit à de l'Eau Intermédiaire, soit à de l'Eau Profonde.
- L'Eau Intermédiaire, située entre 150 et +/- 600 mètres, se forme en hiver en Méditerranée Orientale, dans les zones de cyclogenèse intense, par exemple autour des îles de Rhodes et de Chypre (Ozsoy *et al.*, 1981) et s'avance en Méditerranée Occidentale où elle se caractérise par un double maximum thermique et halin (13.2°C < température < 13.3°C; 38.5 < salinité < 38.58; 29.0 < densité σ_t < 29.1) (Gascard, 1978). Dans le nord de la Méditerranée Occidentale, l'isohaline de 38.45 sépare l'Eau Intermédiaire des masses d'Eaux Profondes et Superficielles (Coste *et al.*, 1972).
- L'Eau Profonde occupe le reste de la colonne d'eau, depuis 600 mètres jusqu'au fond. C'est une eau-type, très homogène, née du mélange de l'Eau Intermédiaire et de l'Eau Superficielle. En Méditerranée Occidentale, elle se forme en surface au large des côtes Provençales et Catalanes lorsque la surface de l'eau est soumise à des vents violents, froids et secs. Elle est plus froide et moins salée que l'Eau Intermédiaire (température = 12.7°C;

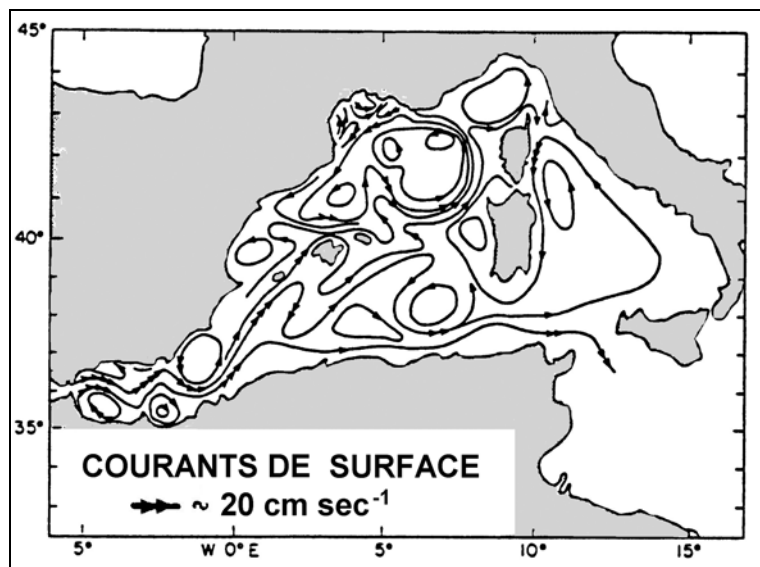


Figure 1

Schéma de la circulation superficielle en Méditerranée Occidentale en été. D'après Allain (1960).

salinité = 38.41; $\sigma_t = 29.1$) (Gascard, 1978; Prieur, 1981).

Le mode de circulation et la formation des masses d'eau permettent d'interpréter la pauvreté générale en sels nutritifs de la Méditerranée par rapport aux grands océans, l'homogénéité des concentrations sous la couche de surface et la diminution des concentrations dans les différents bassins en fonction de leur éloignement du Déroit de Gibraltar (Goffart, 1992). La pauvreté en sels nutritifs est attribuée à celle de l'Eau Superficielle Atlantique qui alimente la Méditerranée (Coste et al., 1972) et à la faiblesse des apports fluviaux fertilisants (Da Costa et al., 1980).

De plus, le bilan de l'azote calculé au niveau du Déroit de Gibraltar n'est pas équilibré. La Méditerranée présente un déficit apparent en azote de 30 à 60 10^{12} $\mu\text{mol an}^{-1}$, soit environ 10% de la quantité d'azote sortant à Gibraltar (Coste et al., 1988).

Ce déficit théorique peut provenir:

- d'une mauvaise estimation (sous-estimation?) des apports continentaux,

- d'un apport par les précipitations,
- d'un apport atmosphérique d'azote directement utilisé par les bactéries et certaines espèces phytoplanctoniques (e.g. Cyanobactéries),
- du recyclage sous forme gazeuse à partir des sédiments (dénitrification),
- d'une mauvaise connaissance du rôle de la matière vivante dans les processus de fixation, de régénération directe (excrétion) et de reminéralisation de l'azote dans la colonne d'eau.

A l'échelle de la Méditerranée Occidentale, le mélange vertical d'hiver constitue l'événement le plus spectaculaire concernant le retour en surface des sels nutritifs (Jacques, 1988). Il permet, au début de la phase de réchauffement des eaux, une floraison phytoplanctonique généralisée, suivie d'un épuisement en sels nutritifs des couches de surface.

2. Contrôle de la production phytoplanctonique par le Front Liguro-Provençal (secteur corse)

2.1. La caractérisation hydrologique du Front Liguro-Provençal

La Mer Ligure présente, en été comme en hiver, une circulation cyclonique avec une structure en dôme des isopycnes. La circulation horizontale à la périphérie du bassin est plus intense que dans la partie centrale et constitue le Courant Ligure, d'origine atlantique, caractérisé par la présence d'eau légère et oligotrophe. Une particule met théoriquement 15 jours pour effectuer le parcours circulaire de Calvi à Nice (Béthoux et Prieur, 1979).

L'utilisation simultanée de l'imagerie satellitaire et de mesures multiparamétriques en continu a permis l'émergence de la notion de Zone Frontale en Mer Ligure (Prieur, 1985; Prieur et Tiberti, 1985; Goffart et Hecq, 1985; Hecq, Goffart et Nihoul, 1986; Goffart et al., 1988; Sournia et al., 1990). Dans tout le Bassin Liguro-Provençal, le côté gauche

du Courant Ligure est bordé par un front permanent, le Front Liguro-Provençal. Ce front, de type géostrophique, est lié à la circulation cyclonique générale des régions côtières du bassin (Sournia et al., 1990). En forme de fer à cheval, il constitue une région de transition rapide entre les eaux légères périphériques du Courant Ligure et les eaux plus denses du centre du bassin (fig. 2).

La Zone Périphérique du Courant Ligure, d'une largeur moyenne de 10 à 15 milles, présente de forts courants horizontaux, de l'ordre de 40 cm s^{-1} au large de la Côte Occidentale Corse (Béthoux et al., 1981; Béthoux et Prieur, 1983). Jusqu'à une profondeur d'environ 100 mètres, l'eau peu salée et relativement chaude y présente les caractéristiques oligotrophes de l'Eau Atlantique Superficielle. C'est une région peu variable où la faible salinité de l'eau de surface lui confère une certaine stabilité vis-à-vis des eaux sous-jacentes et empêche les mélanges verticaux hivernaux d'atteindre des immersions suffisamment profondes pour permettre un enrichissement important en sels nutritifs (Coste et al., 1972).

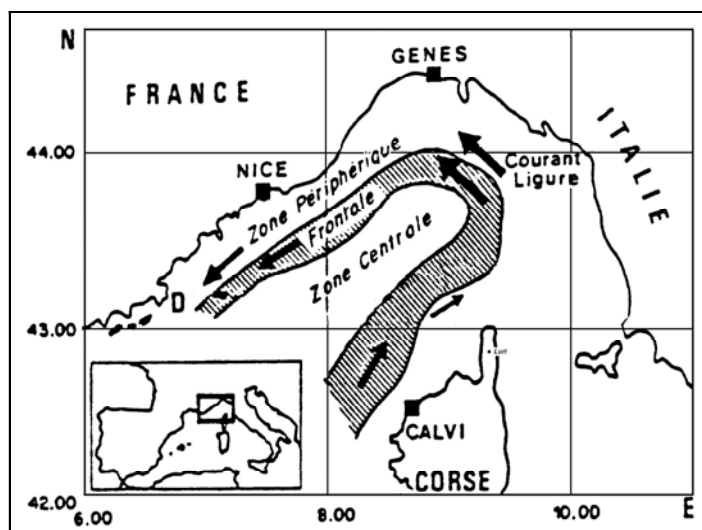


Figure 2

Carte de la Mer Ligure, montrant schématiquement la position du Front Liguro-Provençal et des Zones Périphérique, Frontale et Centrale. D'après Sournia et al. (1990).

La Zone du Front Liguro-Provençal est caractérisée par un gradient horizontal de densité compris entre 0.2 et 0.4 sur une distance d'au moins 20 km et une profondeur maximale de 300 m (fig. 2) (Sournia et al., 1990). A ce niveau, la circulation verticale est complexe et associe divergences et convergences (Boucher et al., 1987). Les mécanismes de divergence génèrent des remontées de sels nutritifs d'origine profonde et assurent de façon permanente la fertilisation des eaux superficielles ou sub-superficielles.

La Zone Centrale (ou zone du large), homogène horizontalement, est caractérisée par des salinités et des densités élevées ($\sigma_t > 28.95$) (Prieur,

1981). Les courants y sont faibles et la stratification verticale s'y efface en hiver.

Un schéma de circulation verticale des masses d'eau au niveau de la Zone Frontale a été proposé par Boucher et al. (1987). Il fait intervenir une convergence (C) dans le gradient horizontal maximum de densité, encadrée de deux divergences qui délimitent deux cellules de convection (fig. 3). L'une (D2), d'origine profonde, est située plus au large, vers la Zone Centrale. L'autre (D1), d'origine moins profonde, est située plus près de la côte, à la limite de la Zone Périphérique. Ces divergences constituent un processus dynamique qui enrichit la couche euphotique en sels nutritifs d'origine profonde.

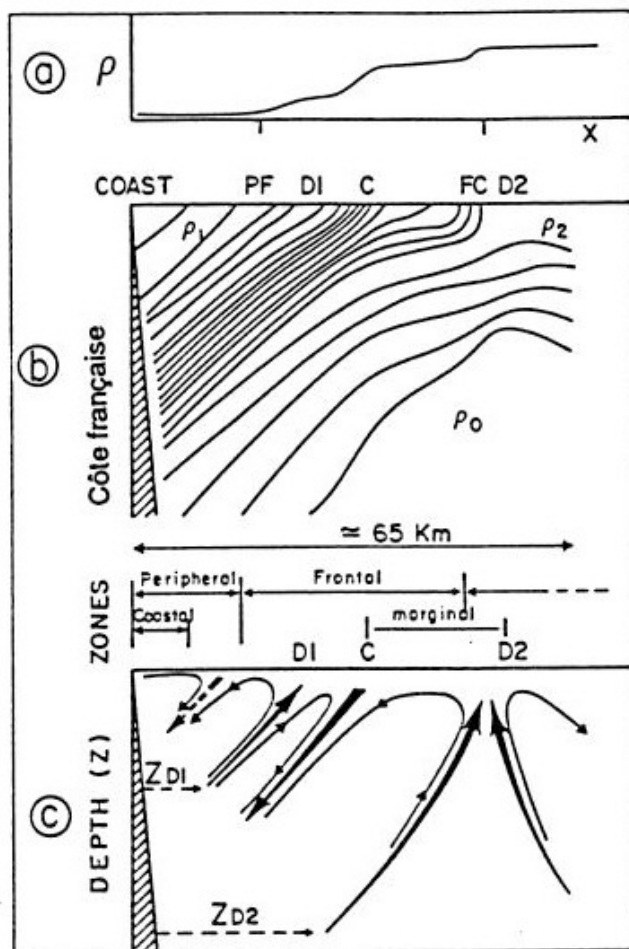


Figure 3

Représentation schématique des densités et de la circulation dans un plan vertical perpendiculaire au Courant Ligure.

a: Aspect typique d'un profil horizontal de densité au départ de la Côte Française, située à gauche.

b: Champ vertical de densité.

c: Circulation dans un plan vertical, constituée principalement d'une convergence C et de deux divergences D1 et D2.

Ni l'échelle ni les proportions ne sont respectées. La longueur totale de la coupe est de 65 km.

D'après Boucher, Ibanez et Prieur (1987).

En hiver et au printemps, l'advection verticale peut atteindre des vitesses de l'ordre de 80 m j^{-1} ($1 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$). La pente des isopycnes entre le front et la côte est de 1 à 2 %. Par contre, en période stratifiée (en été et au début de l'automne), suite à l'établissement de la thermocline, la pente des isopycnes est plus faible (0.3 %) et les vitesses de remontée de l'ordre de 20 m j^{-1} ($0.25 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$) (Prieur, communication personnelle).

D'un point de vue biologique, le Front Liguro-Provençal, constitue une région de transition entre l'écosystème du Courant Ligure et celui du large. De plus, il est le siège de mécanismes de divergence et de convergence qui assurent de façon permanente la fertilisation des eaux superficielles ou sub-superficielles et l'exportation de la biomasse produite. A côté des travaux consacrés au front au large de Nice (Béthoux et Prieur, 1983; Prieur, 1985; Prieur et Tiberti, 1985; Boucher et al., 1987; Sournia et al., 1990; Monzikoff et al., 1992; Savenkoff et al., 1993), des études sur la partie corse du front ont été réalisées au départ de STARESO, station de recherche sous-marine et océanographique de l'Université de Liège – Belgique (Licot, 1985; Goffart et Hecq, 1985; Hecq et al., 1986; Goffart et Hecq, 1990; Goffart, 1992; Goffart et al., 1995).

2.2. La caractérisation du Front Liguro-Provençal par imagerie satellitaire

L'observation satellitaire permet d'obtenir une vision globale et synoptique de la surface de la mer et donc d'identifier certaines structures physiques ou biologiques remarquables à grande échelle.

Ainsi, les données thermographiques infra-rouges (NOAA) illustrent la variabilité saisonnière des fronts thermiques superficiels en Méditerranée (fig. 4):

- En hiver et au printemps, consécutivement au mélange hivernal, les images satellitaires montrent un bassin Liguro-Provençal homotherme à l'échelle de la sensibilité de la mesure. Les seuls fronts détectés sont dus aux apports fluviaux d'eau froide.
- En mai, les fronts thermiques s'installent progressivement.
- A partir du mois de juin et pendant tout l'été, ils sont nombreux et bien individualisés. Dans le Bassin Ligure, le Front Liguro-Provençal, lié à la circulation cyclonique, sépare les eaux denses et froides de la Zone Centrale, des eaux plus légères et plus chaudes de la Zone Périphérique.

La formation de ces fronts thermiques est associée au réchauffement des eaux de surface à la fin du printemps et à l'établissement de la thermocline saisonnière. Les mouvements horizontaux et verticaux des masses d'eau, particulièrement dans la Zone Périphérique, modifient la pente des isothermes et aboutissent à la formation de gradients superficiels, qui, en dépit de leur variabilité dans l'espace et dans le temps, se maintiennent pendant tout l'été et en automne (Philippe et Harang, 1982). En automne cependant, les fronts thermiques présentent des instabilités de plus en plus fréquentes et finissent par disparaître au moment de la destruction de la thermocline, associée au forcing météorologique hivernal.

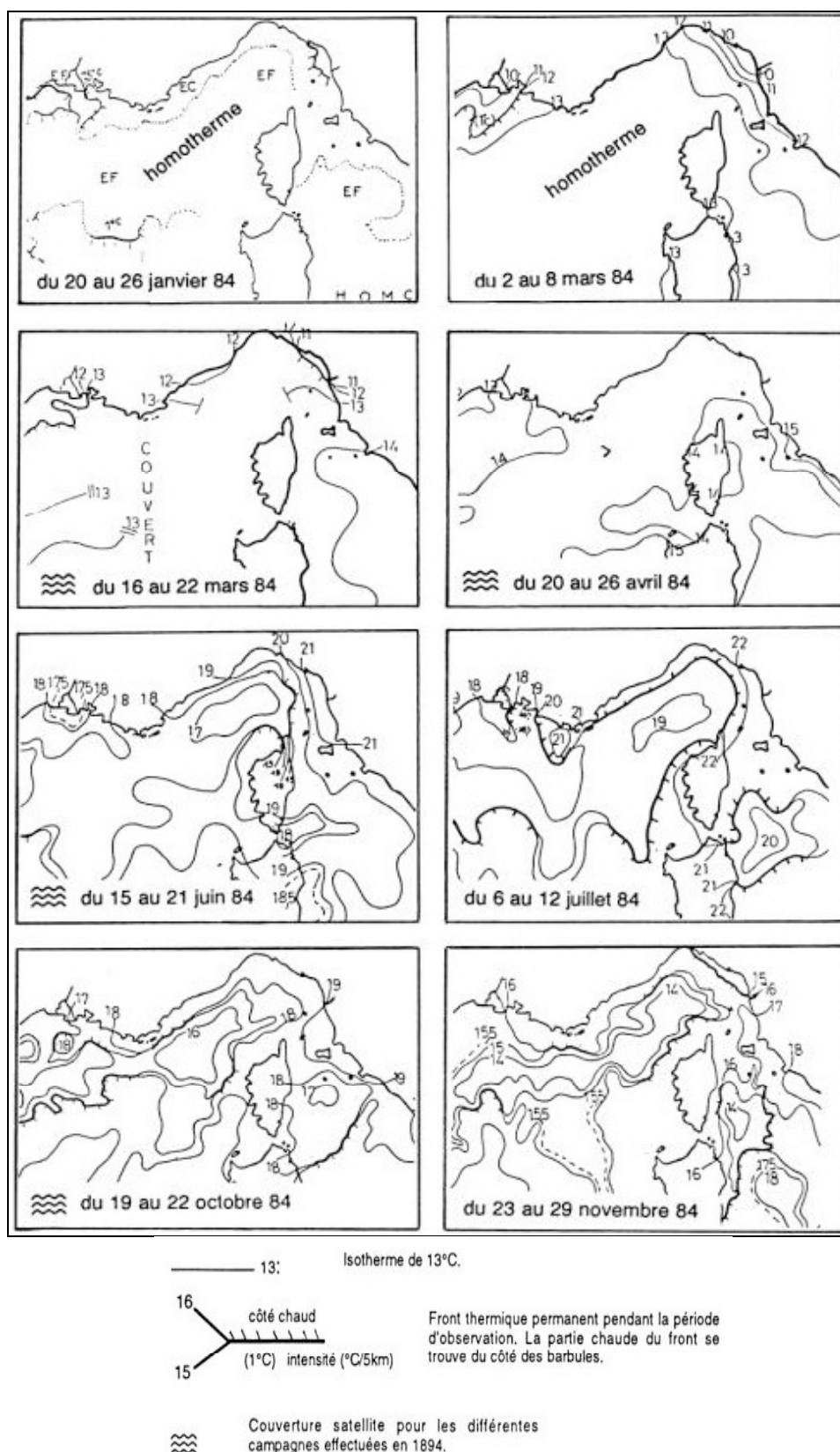


Figure 4

Thermographies satellitaires (NOAA) montrant les gradients thermiques superficiels. Les images présentées sont la synthèse de mesures réalisées sur plusieurs jours, en général une semaine, à différentes périodes caractéristiques de l'année 1984 (Centre de Météorologie Spatiale de Lannion, France). La méthode d'analyse utilisée permet de détecter des gradients lorsque les différences de température atteignent 1 °C sur une distance de 5 km. D'après Philippe et Harang (1982).

D'autre part, un traitement complexe des informations captées par le satellite CZCS (Coastal Zone Color Scanner) permet d'obtenir des cartes de distribution superficielle de la chlorophylle a (fig. 5).

Au début du printemps (16 mars 1982), à l'exception de quelques petites zones très localisées, les concentrations en chlorophylle sont basses dans toute la Méditerranée Nord-Occidentale, qui est aussi complètement homotherme.

En période de bloom (6 mai 1981), les eaux côtières françaises sont le siège de la production phytoplanctonique la plus élevée. A l'ouest de la Corse, ce sont les eaux du large, associées au Front Liguro-Provençal, qui sont le siège d'une poussée phytoplanctonique intense. Les concentrations en chlorophylle a atteignent des valeurs très élevées, supérieures à $3.0 \text{ mg chl a m}^{-3}$. Ces valeurs sont trois à dix fois supérieures aux maxima mesurés en zone côtière, et en baie de Calvi en particulier.

En été, de façon générale et à l'exception des eaux influencées par le panache du Rhône, les eaux de surface sont très pauvres en phytoplancton. Cependant, de façon assez spectaculaire, les fronts thermiques séparent les eaux chaudes et très oligotrophes de la Mer Tyrrhénienne et de la partie centrale de la Méditerranée Occidentale (Sardaigne - Baléares) des eaux relativement plus froides et un peu plus productives du bassin Liguro-Provençal et de la Côte Occidentale Sarde.

En automne, à l'échelle de la Méditerranée Occidentale, les zones plus riches en phytoplancton sont toujours limitées par les fronts thermiques et associées aux masses d'eau plus froides. Au nord du bassin Liguro-Provençal, une poussée

phytoplanctonique atteignant $1.5 \text{ mg chl a m}^{-3}$ est observée dans la zone centrale.

2.3. Les variations saisonnières des communautés phytoplanctoniques en relation avec la dynamique du Front Liguro-Provençal (secteur corse)

Si les images satellitaires apportent une vision synoptique des couches de surface, les données hydrologiques acquises en mer permettent d'obtenir une image détaillée de la distribution verticale des masses d'eau.

Dix stations ont été échantillonnées le long de la radiale Calvi - Nice, depuis la Côte Corse jusqu'à 30 milles au large (fig. 6 b), lors de campagnes de mesures réalisées entre 1983 et 1997, à différentes périodes de l'année, à bord des navires océanographiques « Recteur Dubuisson » et « Winnaretta Singer ». Dans la région susceptible de contenir le front, la distance entre les stations est de 2.5 milles (stations 3 à 9). De part et d'autre de cette zone, elle est de 5 milles (stations 1 à 3 et 9 à 10).

Les prélèvements ont été effectués entre la surface et 200 mètres de profondeur, de manière à couvrir la couche euphotique et ses limites d'influence. Pour des raisons logistiques de travail à la mer, les sections n'ont pas toujours été réalisées le même jour. Cependant, par beau temps, les mesures réalisées lors de sorties successives ont montré que la structure hydrologique générale du front et des masses d'eau adjacentes est conservée et pratiquement stationnaire pendant au moins 5 jours (Goffart, 1992). Nous considérerons donc que les cartes de distribution présentées sont quasi-synoptiques.

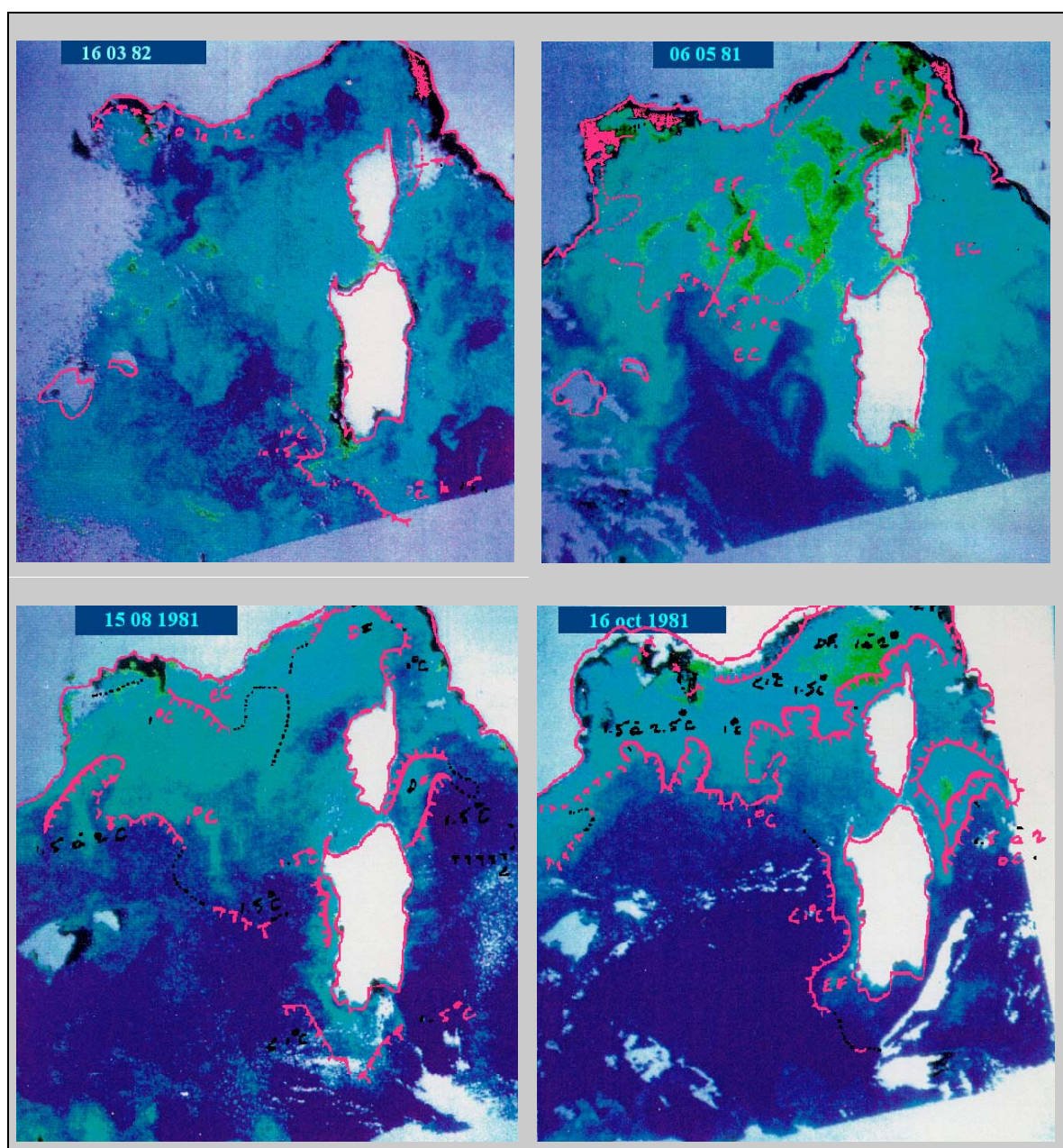


Figure 5

Images satellitaires (CZCS) représentant la distribution superficielle de la chlorophylle a dans le bassin Liguro-Provençal, en mars 1982, en mai, en août et en octobre 1981. Adapté de Fellous et Morel (1987), dans Goffart (1992).

En rouge, thermographie satellitaire (NOAA) fournies par le Centre de Météorologie Spatiale de Lannion (France) montrant les gradients thermiques superficiels pendant les mêmes périodes.

Les concentrations en chlorophylle a dans les couches superficielles croissent en fonction d'une gamme de fausses couleurs (bleu foncé, bleu clair, vert clair et vert foncé), adaptée à chaque photographie et donc différente d'une image à l'autre (voir étalonnage ci-dessous):

Période	bleu foncé	vert foncé
15 Mars 82	$< 0.20 \text{ mg chl a m}^{-3}$	$> 2.0 \text{ mg chl a m}^{-3}$
6 Mai 81	< 0.15	> 3.0
15 Août 81	< 0.10	> 1.0
16 Octobre 81	< 0.25	> 3.0

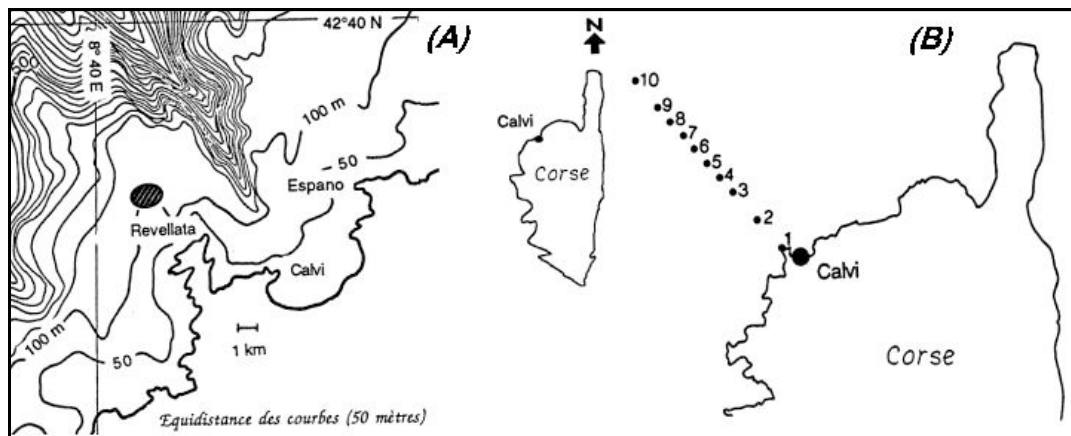


Figure 6

A Bathymétrie au large de Calvi

B Position des stations d'échantillonnage le long de la radiale Nice-Calvi (secteur Corse) étudiées dans ce chapitre. La carte du Précontinent Calvais a été établie par le Musée Océanographique de Monaco.

2.3.1. La situation en fin d'hiver et au printemps

La situation hydrologique, à la fin de l'hiver et au printemps (fig. 7), montre un fort gradient halin caractérisé par un resserrement des isohalines, ce gradient étant systématiquement observé en surface entre 10 et 20 milles de la côte (stations 3 à 5). Il concerne toute la colonne d'eau étudiée, jusqu'à au moins 200 m de profondeur, et constitue une région de transition rapide entre l'eau côtière peu salée du Courant Ligure et l'eau très salée de la Zone Centrale.

Dans la Zone Centrale, l'Eau Intermédiaire, formée dans le Bassin Oriental et repérable par un maximum de salinité (> 38.45), atteint la surface ou les couches immédiatement sous-jacentes alors qu'elle n'est jamais rencontrée au-dessus de 200 m entre le front et la côte. La colonne d'eau est pratiquement homotherme le long de toute la radiale et le front de densité, d'une largeur de 3 à 5

milles, coïncide avec le front de salinité. Il se marque sur toute la colonne d'eau étudiée et sépare les eaux légères et stratifiées du Courant Ligure des eaux très denses ($\sigma_t > 29$) et non stratifiées de la Zone Centrale (Hecq et al., 1986; Hecq et Goffart, 1990; Goffart, 1992; Goffart et Hecq 1993; Goffart et al., 1995).

La distribution des éléments nutritifs au début du mois de mars (Goffart, 1992) indique que le tracé des isoplèthes en nitrates et en silicates suit celui des isohalines et les concentrations sont maximales pour la région étudiée. Toutefois, les eaux légères du Courant Ligure conservent une certaine stratification, due essentiellement à la persistance du gradient vertical de salinité et restent pauvres en nutriments (NO_3^- et $\text{Si(OH)}_4 < 1,5 \mu\text{M}$). Au niveau du front, les nitrates et les silicates présentent de forts gradients horizontaux et verticaux. Dans la Zone Centrale, des teneurs en nutriments élevées ($\text{NO}_3^- > 5.0 \mu\text{M}$, $\text{Si(OH)}_4 > 4.0 \mu\text{M}$) sont associées à l'Eau Intermédiaire ($S > 38.45$).

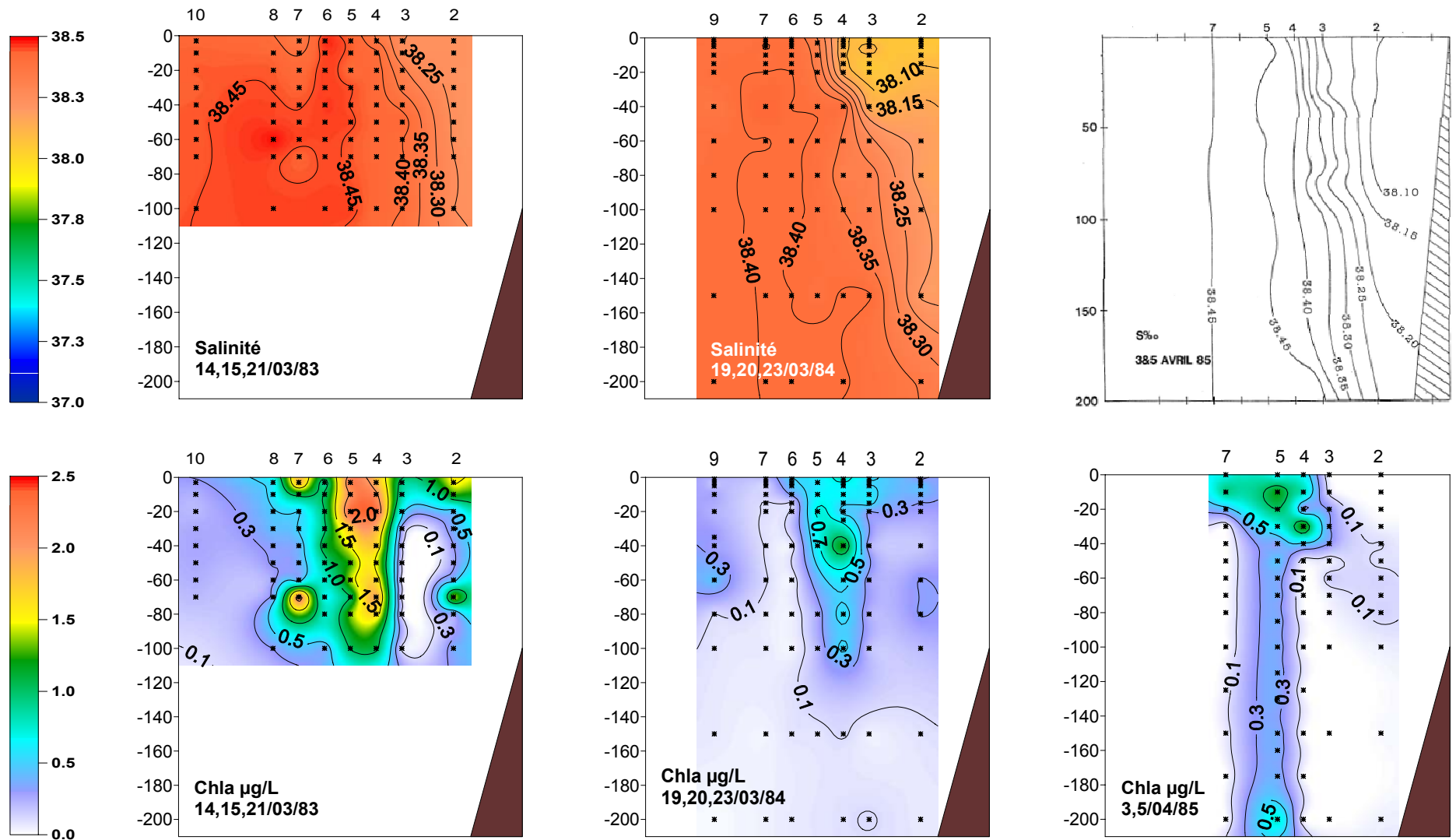


Figure 7

Situation printanière (mars - avril): sections verticales (0 - 200 m) de salinité et de chl a ($\mu\text{g l}^{-1}$) le long de la radiale Calvi - Nice, depuis la côte corse (à droite) jusqu'à 30 milles au large (station 10). Chl a: méthode spectrophotométrique (Scor Unesco 1966).

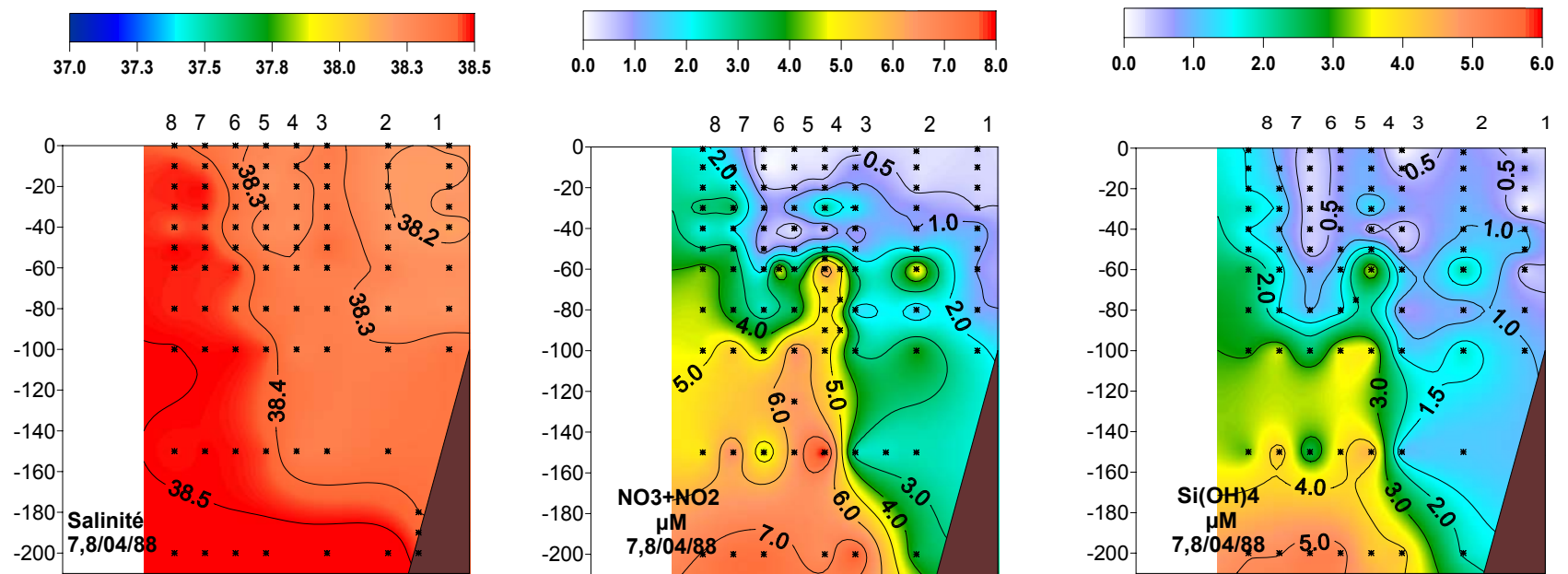


Figure 8

Situation printanière (avril): sections verticales (0 - 200 m) de salinité, de nitrates + nitrites (μM) et de silicates (μM) le long de la radiale Calvi - Nice, depuis la côte corse (station 1) jusqu'à 22,5 milles au large (station 8).

Début avril, les teneurs en éléments nutritifs des couches superficielles montrent une forte diminution par rapport au mois précédent (fig. 8), associée au développement printanier du phytoplancton. Le gradient côte-large de nitrates et de silicates, associé au système frontal, se maintient cependant. Dans la Zone Centrale, l'Eau Intermédiaire présente un déficit en éléments nutritifs jusqu'à l'isobathe de 100 m. Au-delà, les concentrations en nutriments sont proches des valeurs hivernales ($\text{NO}_3^- > 5 \mu\text{M}$, $\text{Si}(\text{OH})_4 > 3 \mu\text{M}$). Le long du front, la présence à de faibles profondeurs de veines d'eau riches en sels nutritifs ($\text{NO}_3^- > 5 \mu\text{M}$, $\text{Si}(\text{OH})_4 > 3 \mu\text{M}$) met en évidence l'existence d'advections obliques d'Eau Intermédiaire fertilisant la couche euphotique.

La distribution de la chlorophylle a, début de mars, montre des teneurs très faibles tout le long de toute la radiale ($\text{chl } a < 0.2 \mu\text{g l}^{-1}$) et réparties de façon homogène sur la colonne d'eau.

En surface, à partir de la mi-mars, les concentrations en chlorophylle a sont élevées dans une bande de 7 à 10 milles de large située de part et d'autre de la Zone Frontale (fig. 7). Les maxima de chlorophylle a sont associés au gradient de salinité ou situés à proximité immédiate de celui-ci, côté large. Ils peuvent atteindre des concentrations très élevées, de l'ordre de 4 à 5 $\mu\text{g chl } a \text{ l}^{-1}$, comme en avril 1988. A cette période de l'année, le phytoplancton associé à la zone frontale présente une distribution verticale typique, en forme de plume: de la chlorophylle a est trouvée en quantité

significative jusqu'à au moins 100 m de profondeur, c'est-à-dire nettement sous la couche euphotique (1% de l'éclairement en surface), dont la profondeur en mars varie de 35 m à la côte à 45 m à la station 10.

De part et d'autre du front, les teneurs en chlorophylle a sont faibles et limitées aux premiers mètres de la colonne d'eau.

2.3.2. La situation en mai

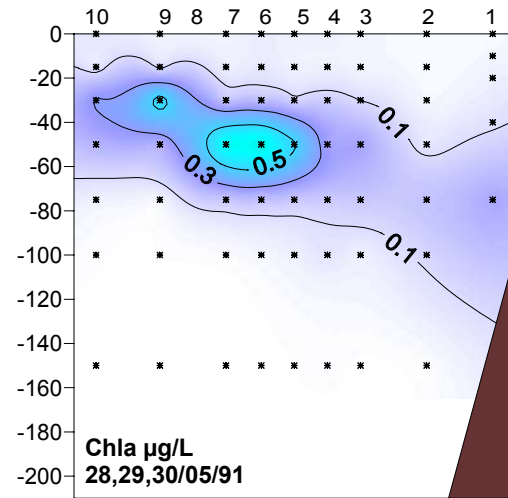
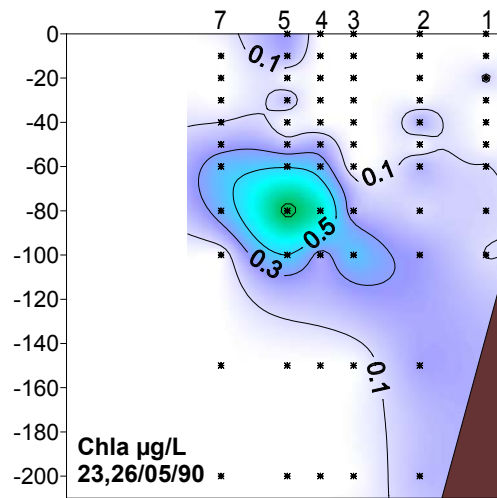
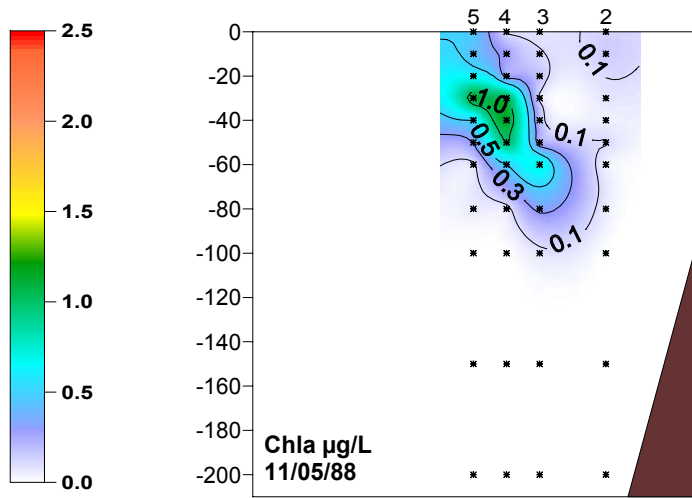
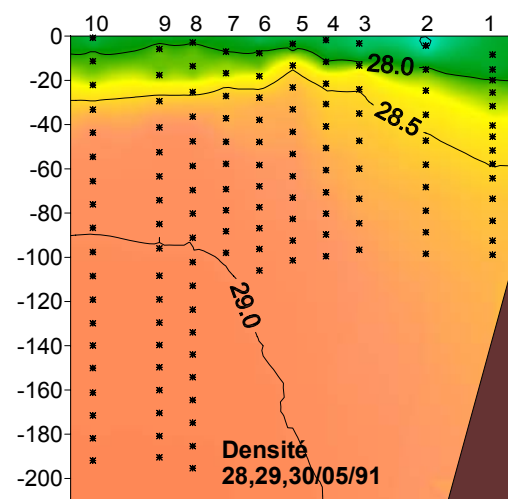
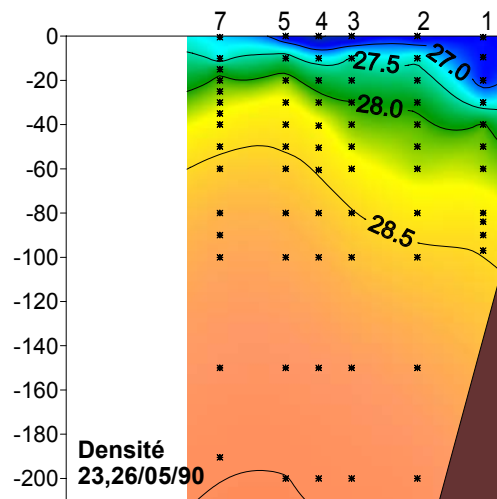
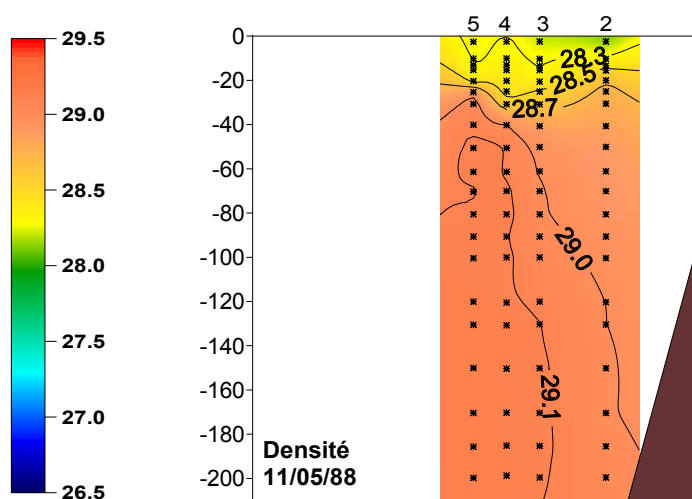
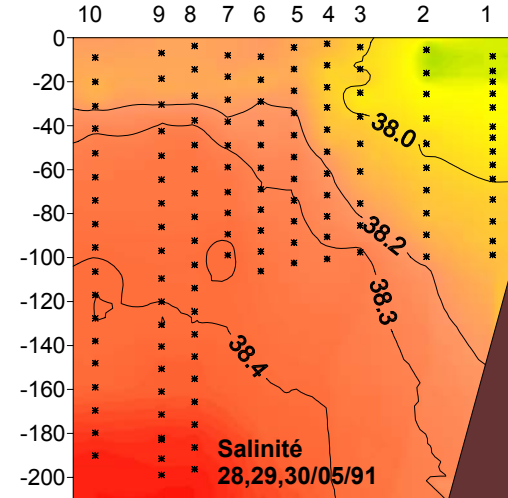
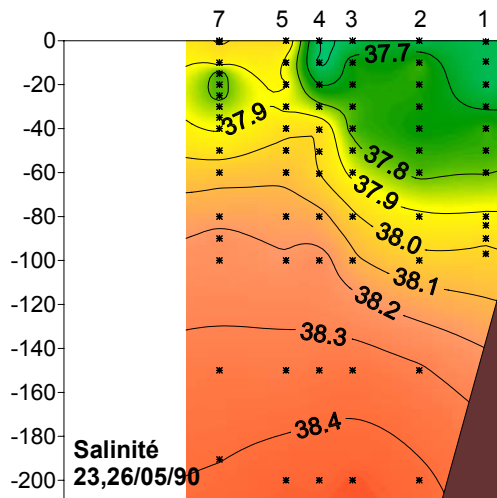
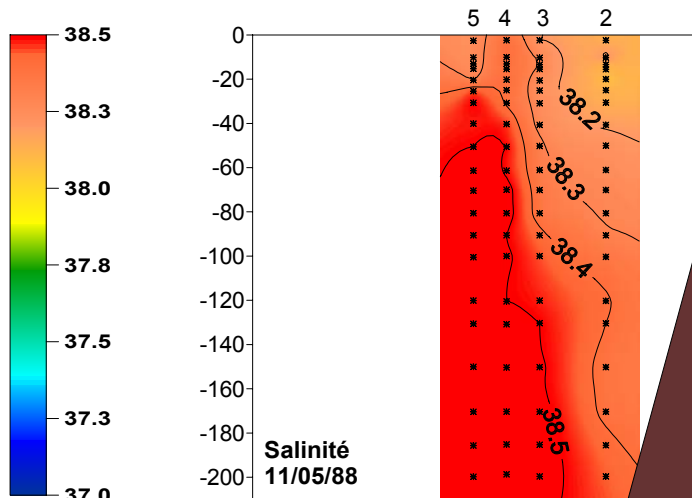
Le mois de mai constitue une période de transition au cours de laquelle les structures hydrologiques du bassin Ligure évoluent rapidement sous l'effet de l'ensoleillement. Les structures halines observées en mars - avril se maintiennent, et en surface, le front halin est toujours observé entre 10 et 20 milles de la côte (fig. 9).

Le réchauffement thermique des couches de surface, amorcé en avril, s'intensifie et aboutit à l'établissement de la thermocline estivale. Dans la couche superficielle réchauffée, l'allure des isopycnes est essentiellement déterminée par celle des isothermes. Le front de densité, masqué par le réchauffement thermique superficiel, y est moins marqué qu'au début du printemps. Sous la thermocline, il s'identifie clairement, mais la pente des isopycnes est plus faible qu'en mars - avril.

En mai, le gradient croissant côte - large de lconcentration en sels nutritifs est observé uniquement sous la pycnocline (fig. 10). La couche superficielle réchauffée, isolée des eaux froides sous-jacentes par la thermocline, est pratiquement épuisée en nitrates.

Figure 9 (page suivante)

Situation en mai: Sections verticales (0 - 200 m) de salinité, de densité (σ_t) et de chlorophylle a ($\mu\text{g l}^{-1}$) le long de la radiale Calvi - Nice, depuis la côte corse (à droite) jusqu'à 30 milles au large (station 10). Chl a 1988 et 1990: méthode spectrophotométrique (Scor Unesco 1966); chl a 1991: HPLC (Mantoura et Llewellyn 1983).



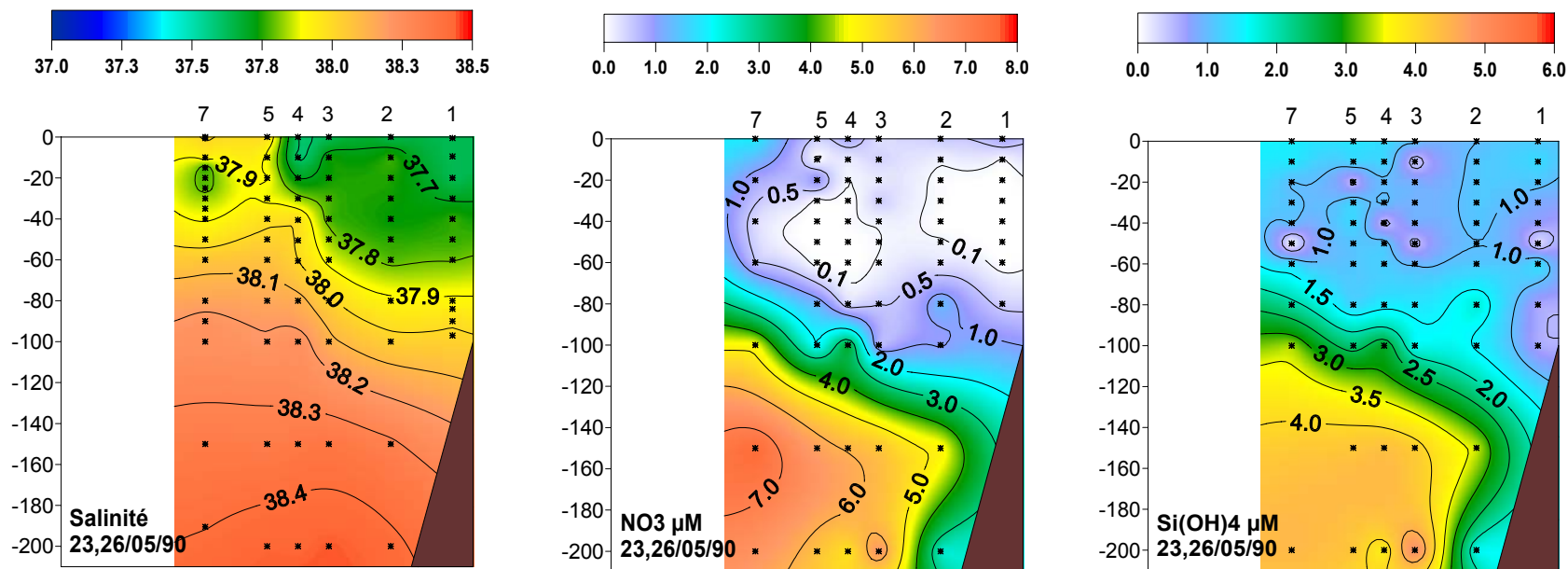


Figure 10

Sections verticales (0 - 200 m) de salinité, de nitrates (μ M) et de silicates (μ M) en mai 1990 le long de la radiale Calvi - Nice, depuis la côte corse (station 1) jusqu'à 20 milles au large (station 7).

La nitracline, matérialisée par l'isoligne de $1 \mu\text{M}$ de NO_3 , est située nettement sous la zone de gradient thermique maximum et s'enfonce progressivement depuis le large vers la côte. Sous l'isotherme de 13.5°C , les eaux de la Zone Centrale conservent des teneurs en sels nutritifs proches des valeurs de début mars ($\text{NO}_3 > 5 \mu\text{M}$, $\text{Si(OH)}_4 > 4 \mu\text{M}$).

En mai, l'Eau Superficielle réchauffée présente un caractère oligotrophe marqué et sont pratiquement épuisées en phytoplancton ($\text{chl } a < 0.1 \mu\text{g l}^{-1}$ (fig. 9) le long de toute la radiale.

Le maximum de chlorophylle a (0.5 à $1.3 \mu\text{g chl } a \text{ l}^{-1}$) est systématiquement associé à la rupture de pente des isohalines et des isopycnes, caractéristique de la présence du bord du front en période stratifiée. Sa profondeur est déterminée par celle de la nitracline (isoligne de $1 \mu\text{M}$ de NO_3), avec laquelle il coïncide.

2.3.3. La situation en juin

En juin, les structures halines observées lors des périodes précédentes persistent (fig. 11). En surface, le front halin est toujours observé entre 10 et 15 milles de la côte. Il sépare les eaux très dessalées du Courant Ligure, des eaux de salinité élevée de la Zone Centrale. En profondeur, le dôme d'Eau intermédiaire est rencontré sous 150 mètres dans la Zone Centrale.

Sur l'ensemble de la radiale, la stratification thermique estivale est bien établie et concerne au moins les 50

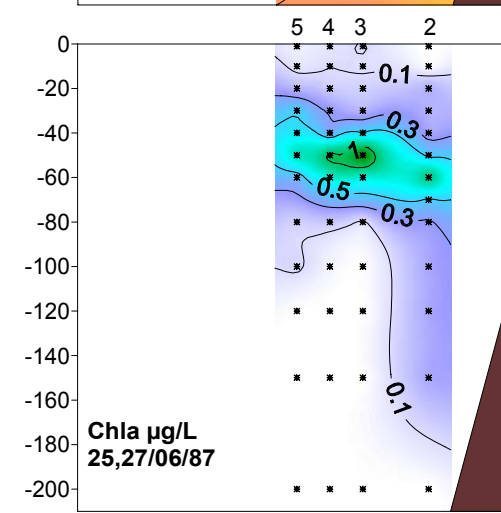
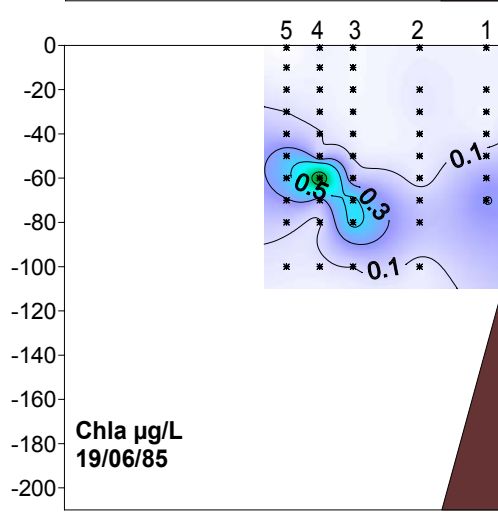
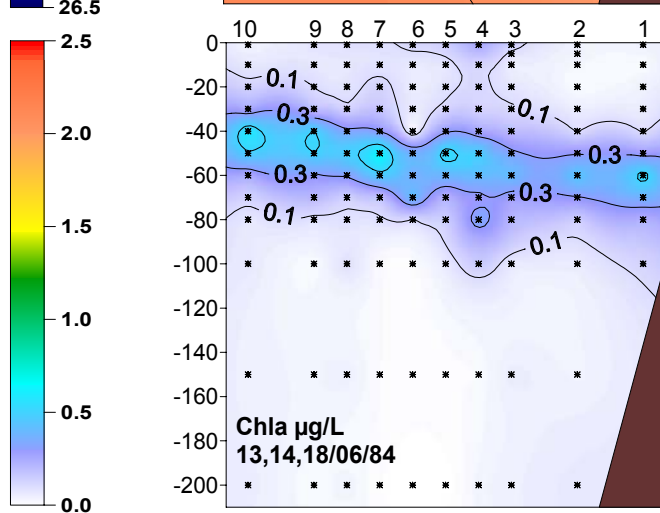
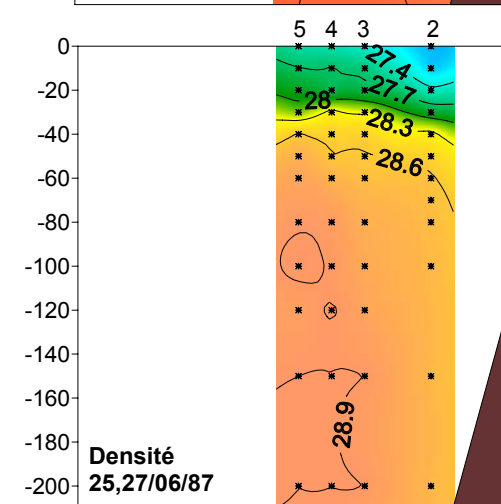
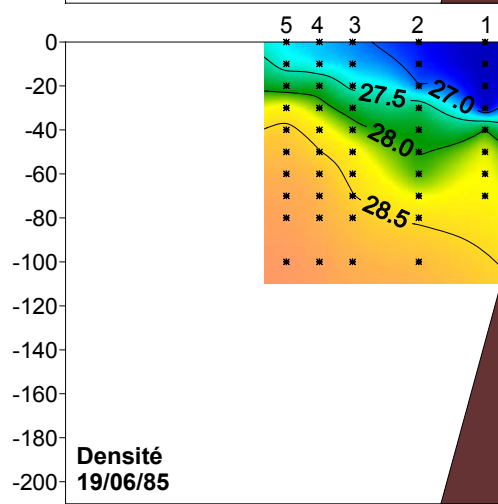
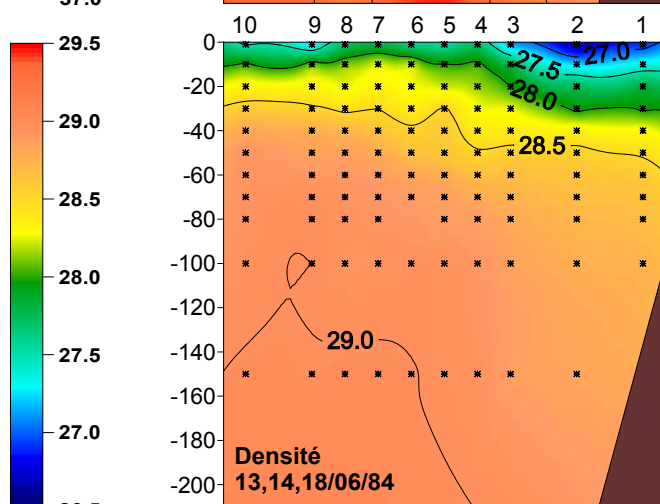
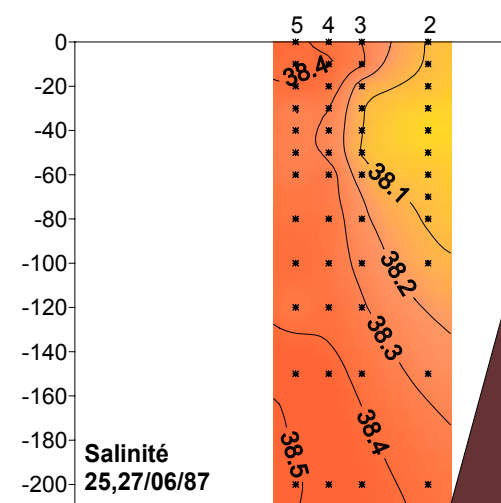
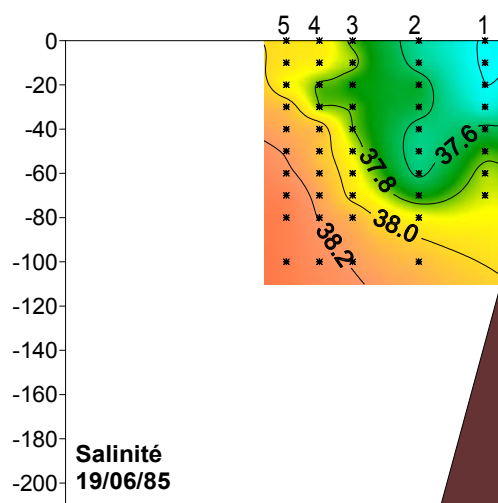
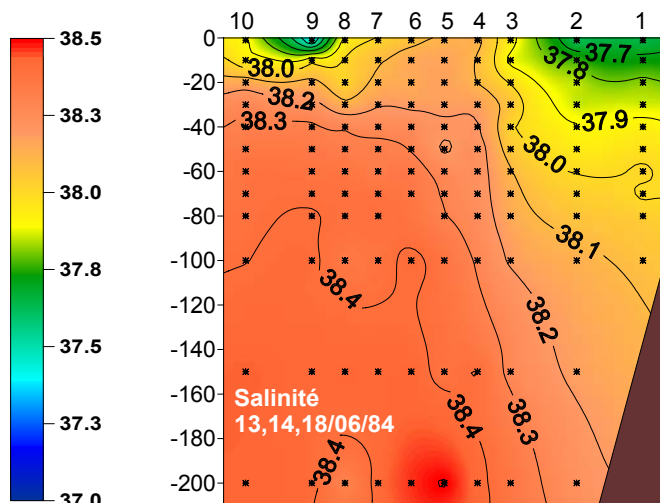
premiers mètres de la colonne d'eau. En surface, un petit front thermique sépare les eaux du Courant Ligure, plus chaudes, des eaux de la Zone Centrale. Dans la couche superficielle réchauffée, la distribution des isopycnes est essentiellement contrôlée par celle des isothermes. Au-dessus de la thermocline, les isopycnes s'enfoncent lentement et progressivement depuis le large vers la côte. Sous la couche de mélange, le front de densité, associé au front halin, est bien marqué.

Partout, les eaux situées au-dessus de la thermocline sont complètement épuisées en éléments nutritifs. Les concentrations en nitrates et en silicates y sont inférieures à $0.1 \mu\text{M}$. En profondeur, des teneurs en silice supérieures à $4 \mu\text{M}$ sont associées à l'Eau Intermédiaire ($\sigma_t > 29$) (Goffart, 1992).

De très faibles biomasses phytoplanctoniques ($< 0.1 \mu\text{g chl } a \text{ l}^{-1}$) sont observées dans toute la couche réchauffée, aussi bien en Zone Frontale que dans les régions adjacentes (fig. 11). Une couche plus riche en chlorophylle a ($> 0.3 \mu\text{g chl } a \text{ l}^{-1}$) est observée dans le bas de la couche euphotique, dont l'immersion varie de 50 mètres dans la Zone Centrale à 60 - 70 mètres au niveau du Courant Ligure. D'une épaisseur de 10 à 50 mètres, le maximum profond de chlorophylle a est relativement continu entre les différentes zones hydrologiques et s'enfonce progressivement depuis le large vers la côte. Les teneurs en chlorophylle a les plus élevées sont rencontrées entre le Front et la Zone Centrale.

Figure 11 (page suivante)

Situation en juin: Sections verticales (0 - 200 m) de salinité, de densité (σ_t) et de chlorophylle a ($\mu\text{g l}^{-1}$) le long de la radiale Calvi - Nice, depuis la côte corse (station 1) jusqu'à 30 milles au large (station 10). Chl a: méthode spectrophotométrique (Scor Unesco 1966)



2.4. La variabilité interannuelle de la distribution du phytoplancton en relation avec le Front Liguro-Provençal

Les sections de température, salinité et densité réalisées entre 1983 et 1995 montrent la permanence du Front Liguro-Provençal (secteur Corse) et la stabilité interannuelle de ses caractéristiques hydrologiques. Les valeurs absolues des paramètres, par exemple la salinité, présentent cependant certaines fluctuations probablement liées aux variations des facteurs climatiques (e.g. périodes de sécheresse prolongée, hivers particuliers modifiant l'intensité du mélange hivernal).

Au large de la côte occidentale corse, la stabilité interannuelle des caractéristiques physiques du Front Liguro-Provençal contrôle de manière reproductible la dynamique saisonnière des communautés phytoplanctoniques.

Les variations interannuelles observées dans les valeurs absolues des variables phytoplanctoniques dépendent essentiellement:

- de l'intensité des événements fertilisants (une remontée d'eau d'origine plus profonde apportera d'avantage de sels nutritifs);
- de l'intensité de l'éclairement;
- du stade de croissance des populations phytoplanctoniques;
- de l'importance de la pression du broutage;
- des pertes par transport physique, qu'il soit actif (convergence, mélange turbulent) ou passif (sédimentation).

3. Le rôle du Front Liguro-Provençal dans l'accroissement de la biomasse phytoplanctonique du bassin Liguro-Provençal (secteur corse)

Les fronts constituent des zones riches en matière organique, qu'elle soit néoformée ou accumulée passivement (Frontier, 1985, 1986). L'importance d'un front en tant que facteur stimulant de la production locale dépend d'abord de la quantité d'eau profonde riche en sels nutritifs injectée dans la couche euphotique par unité de temps (Estrada et Margalef, 1988). Elle dépend ensuite de la réponse du système qui permettra ou non une augmentation de la production primaire.

Les concentrations en chlorophylle a intégrées de 0 à 100 mètres constituent un bon indicateur de la production phytoplanctonique des différentes zones du bassin Liguro-Provençal (secteur corse). Elles permettent aussi de caractériser la séquence temporelle de déclenchement et de déroulement du bloom printanier dans les principales masses d'eau (fig. 12):

1. Début mars, les concentrations en chlorophylle a intégrées de 0 à 100 mètres sont très faibles (ordre de grandeur: $10 \text{ mg chl a m}^{-2}$) dans toutes les zones (Courant Ligure, Front Liguro-Provençal et Zone Centrale).
2. Le bloom phytoplanctonique printanier débute généralement à partir de la mi-mars au niveau du Courant Ligure et en Zone Frontale. Dans la Zone Centrale, qui se stabilise plus lentement, la poussée phytoplanctonique se déclenche plus tard, en avril. Au printemps, les biomasses intégrées sont maximales au niveau du front où elles atteignent des valeurs très élevées pour un écosystème méditerranéen non perturbé (ordre de

grandeur: 150 mg chl a m⁻² fin mars;
175 mg chl a m⁻² en avril).

3. En mai, après la poussée printanière, les concentrations en chlorophylle a intégrées sont très basses, voire inférieures aux valeurs hivernales dans le Courant Ligure et la Zone Centrale (ordre de grandeur: 10 mg chl a m⁻²). En Zone Frontale, les concentrations en

phytoplancton, bien que beaucoup plus basses qu'en mars – avril (ordre de grandeur: 30 mg chl a m⁻²), sont 3 à 5 fois plus élevées que dans les régions adjacentes (fig. 9, fig. 12).

4. En période stratifiée (de juin à octobre), la différence entre le front et les autres régions est moins marquée.

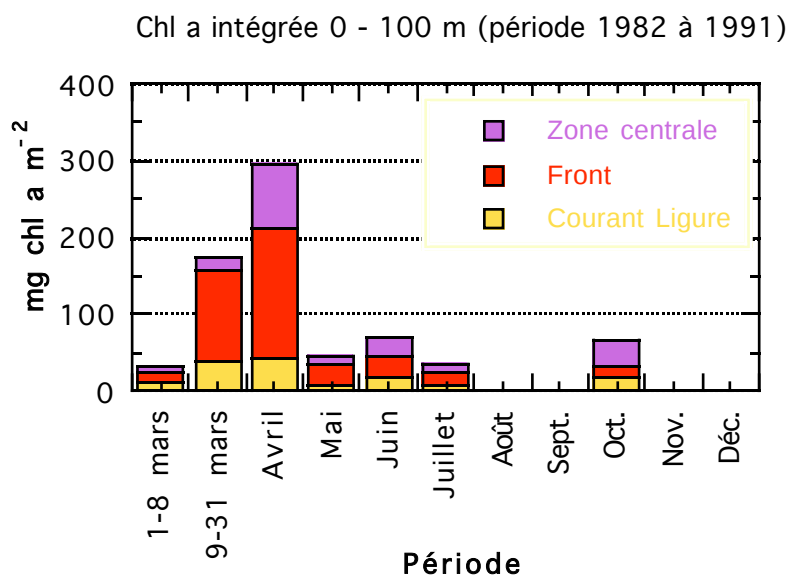


Figure 12

Evolution annuelle des biomasses phytoplanctoniques intégrées (mg chl a m⁻²) entre 0 et 100 mètres au niveau de la Zone Centrale, du Front Liguro-Provençal et du Courant Ligure.

Données acquises entre 1982 et 1991, le long de la radiale Calvi - Nice, depuis la côte corse jusqu'à 30 milles au large. Chl a: méthode spectrophotométrique (Scor Unesco 1966).

Bien que cette première approche de bilan du rôle du Front Liguro-Provençal dans l'accroissement de la production phytoplanctonique soit à considérer avec prudence en raison du nombre limité de données, des éléments marquants peuvent être soulignés:

- Pendant les périodes printanière et post-printanière (de la seconde partie de mars au mois de mai), la supériorité productrice du front sur les autres régions est très marquée.
- En mars et en avril, l'enrichissement en phytoplancton observé au niveau du front a sans aucun doute une signification écologique importante, mais survient dans un contexte de

production généralisée.

- En mai, le rôle écologique du front en tant que « zone refuge » paraît maximum, puisqu'il constitue la seule région où du phytoplancton est disponible pour les consommateurs. Il semble qu'à cette période, les mécanismes de fertilisation qui entretiennent la production phytoplanctonique en zone frontale contrôlent l'organisation spatiale de l'ensemble de la chaîne trophique, jusqu'aux niveaux supérieurs. Il est probable que la présence fréquente de Cétacés (dauphins communs, dauphins blanc et bleu, rorquals, globicéphales) au niveau du front en mai soit largement

conditionnée par la concentration à ce niveau des proies dont ils se nourrissent.

- En période stratifiée, on observe une tendance généralisée à l'uniformisation des concentrations en chlorophylle de toutes les zones. Les biomasses intégrées au niveau du front, si elles font toujours partie des valeurs élevées, ne sont plus systématiquement supérieures à celles des autres régions.

4. Première approche de la diversité fonctionnelle du phytoplancton associé au Front Liguro-Provençal

4.1. La composition spécifique et la dynamique des groupes fonctionnels

La composition spécifique du phytoplancton associé au secteur Corse du Front Liguro-Provençal n'a jamais fait l'objet d'études approfondies.

Par contre, l'étude de la dynamique des communautés phytoplanctoniques au large de la côte occidentale corse, basée sur la notion de groupes fonctionnels¹, montre que:

- les diatomées dominent dans les zones riches en sels nutritifs, à condition que la stabilité verticale de la colonne d'eau soit suffisante. Elles constituent alors l'essentiel de la biomasse chlorophyllienne totale (jusqu'à 76 %; Claustre et al., 1994). Il s'agit le plus souvent d'espèces microplanctoniques

(> 20 µm, e.g. *Thalassionema* sp., Gomez et Gorsky, 2003) ou nanoplanctoniques (comprises entre 2 et 20 µm, e.g. *Thalassiosira* sp., Estrada et Margalef, 1988).

- les flagellés nanoplanctoniques (taille comprise entre 2 et 20 µm) dominent dans les zones où la disponibilité en sels nutritifs est limitée. Il s'agit essentiellement d'espèces souvent difficiles à identifier appartenant aux groupes des Prymnesiophytes, des Chrysophytes et des Cryptophytes. En Méditerranée, les flagellés nanoplanctoniques, relativement indifférents à la diversité des conditions hydrologiques, représentent environ 60 % de la biomasse chlorophyllienne totale et 70 % de la production annuelle (Ibarra, 1981; Vidussi et al., 2001).
- le picophytoplancton (taille inférieure à 2 µm), identifié sur base pigmentaire (zéaxanthine) est présent toute l'année, en concentration faible (< 0,05 µg chl a + divinyl chl a l⁻¹), mais relativement constante. Les cyanobactéries (e.g. *Synechococcus*) dominent les communautés picophytoplanctoniques dans les couches de surface bien éclairées, alors que les prochlorophytes (e.g. *Prochlorococcus*) dominent au niveau du maximum profond de chlorophylle.

De façon générale, l'augmentation du caractère oligotrophe des masses d'eau s'accompagne d'une augmentation de l'importance relative des communautés picophytoplanctoniques. Au large de la côte occidentale corse, lorsque la chlorophylle intégrée entre 0 et 150 m est inférieure à 10 mg chl a m⁻², le picophytoplancton représente environ 40 % de la biomasse chlorophyllienne totale, mais les biomasses concernées sont toujours faibles ou très faibles.

¹ Par groupe fonctionnel, on entend un groupe d'espèces possédant des caractéristiques physiologiques proches et des fonctionnalités communes, qui s'expriment en termes d'organisation trophique et/ou de flux biogéochimique.

Au sein du picophytoplancton, les contributions respectives des principaux groupes (procaryotes: cyanobactéries et prochlorophytes) et eucaryotes (e.g. algues vertes) ne sont connues que très partiellement.

4.2. La composition pigmentaire par HPLC

Au cours des vingt dernières années, l'analyse des pigments phytoplanctoniques par chromatographie liquide à haute performance (HPLC) s'est imposée en océanographie (e.g. Jeffrey et al., 1997). Cette technique permet à la fois:

- d'identifier les grands groupes taxonomiques sur base de pigments spécifiques;
- d'apporter des informations sur l'écophysiologie (e.g. photoadaptation) et le devenir du phytoplancton (e.g. grazing).

Parallèlement aux progrès des techniques de séparation et de quantification des pigments, des méthodes de régression multiple (e.g. CHEMTAX) sont développées par la communauté scientifique internationale. Elles permettent de poursuivre l'interprétation des mesures de pigments et d'estimer la biomasse des différents groupes phytoplanctoniques, exprimée en équivalents chlorophylle a.

En mai 1991, les caractéristiques pigmentaires du phytoplancton ont été analysées pour la première fois par HPLC au large de la côte occidentale corse, le long de la radiale Calvi – Nice. Un premier set de données (fig. 13) illustre la distribution spatiale des communautés phytoplanctoniques et met en évidence, qu'en mai:

- les pigments typiques des flagellés nanophytoplanctoniques (19'-HF² et

Buta³) sont de loin les caroténoïdes les plus abondants. Ils présentent une distribution verticale comparable à celle de la chlorophylle a, maximale en zone frontale (fig. 9), et prédominent dans toutes les régions;

- les concentrations en fucoxanthine, signalant la présence de Diatomées, présentent une distribution analogue à celles en (19'-HF + Buta), mais sont nettement inférieures;
- la zéaxanthine et la péridinine, caractéristiques respectivement des Cyanobactéries et des Dinoflagellés microphytoplanctoniques, sont limitées à la Zone Centrale et au front Liguro-Provençal. Les concentrations mesurées sont faibles et montrent que ces groupes sont peu importants à cette période de l'année;
- les phaeophorbides a, traceurs du broutage zooplanctonique, sont présents en concentrations élevées ($> 0,2 \mu\text{g l}^{-1}$) au niveau du Front et dans la Zone Centrale. La distribution de ces produits de dégradation de la chlorophylle a contribue à mettre en évidence les zones soumises à un broutage zooplanctonique important en début de période de stratification thermique.

² 19'-HF: 19'-hexanoyloxyfucoxanthine

³ Buta: butanoyloxyfucoxanthine

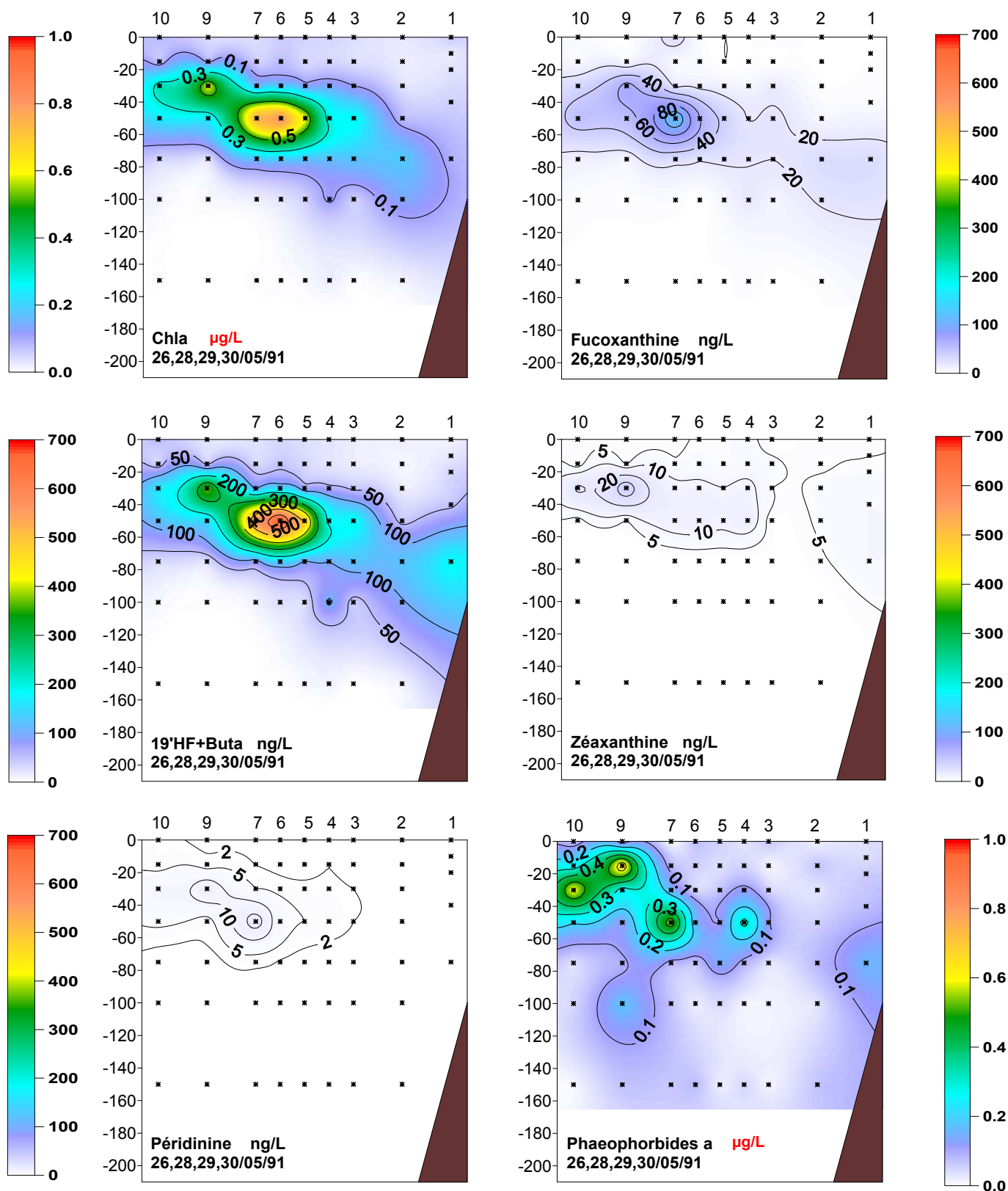


Figure 13

Distribution des pigments phytoplanctoniques mesurés par HPLC (technique: Mantoura et Llewellyn 1983) le long de la radiale Calvi - Nice, depuis la côte corse (à droite) jusqu'à 30 milles au large (station 10): situation en mai. Sections verticales (0 - 200 m) de chlorophylle a (chl a, $\mu\text{g l}^{-1}$), de fucoxanthine (ng l⁻¹), de 19'-hexanoyloxyfucoxanthine et de butanoyloxyfucoxanthine (19'-HF+Buta, ng l⁻¹), de zéaxanthine (ng l⁻¹), de pérédinine (ng l⁻¹) et de phaeophorbides ($\mu\text{g l}^{-1}$).

5. Synthèse de l'influence du Front Liguro-Provençal sur l'écologie des populations phytoplanctoniques: la distribution et les facteurs de contrôle prioritaires

Les mesures réalisées entre 1982 et 1995 au large de la côte occidentale Corse mettent en évidence la permanence du Front Liguro-Provençal, la stabilité interannuelle de ses caractéristiques hydrologiques et la reproductibilité des cartes de distribution saisonnière de la chlorophylle a.

Pendant les périodes printanière (15 mars au 8 avril) et post-printanière (en mai), le front génère systématiquement les plus fortes biomasses phytoplanctoniques. En mars - avril, en Zone Frontale, les concentrations chlorophylle a intégrées entre 0 et 100 m atteignent des valeurs très élevées ($175 \text{ mg chl a m}^{-2}$), nettement supérieures à celles généralement rapportées pour l'ensemble de la Méditerranée Occidentale ($25 \text{ mg (chl a + phaeopigments a) m}^{-2}$; Morel et André, 1991). En mai, la plus forte production de la Zone Frontale survient dans un environnement où les Eaux du

Courant Ligure sont particulièrement pauvres en phytoplancton. En juin, les concentrations en chlorophylle a de toutes les zones hydrologiques étudiées tendent à s'uniformiser. Les biomasses intégrées du front font toujours partie des valeurs élevées mais ne sont plus très différentes de celles des autres régions.

Peu de travaux théoriques existent actuellement sur la modélisation océanique des écoulements géostrophiques frontaux et surtout sur celle de la circulation secondaire associée (Sournia et al., 1990). Aussi, des schémas de synthèse du fonctionnement de l'écosystème phytoplanctonique du Bassin Ligure sont-ils présentés (fig. 14). Ils reposent sur l'ensemble des mesures exposées précédemment, qui ont permis d'identifier les processus physiques et biologiques impliqués dans le contrôle du développement du phytoplancton et de préciser leurs échelles spatiales et temporelles. Pour chaque période caractéristique, un graphique présente la position du front de même que la distribution verticale de la chlorophylle a. En abscisse figurent le ou les processus contrôlant prioritairement la distribution du phytoplancton lors de la période considérée.

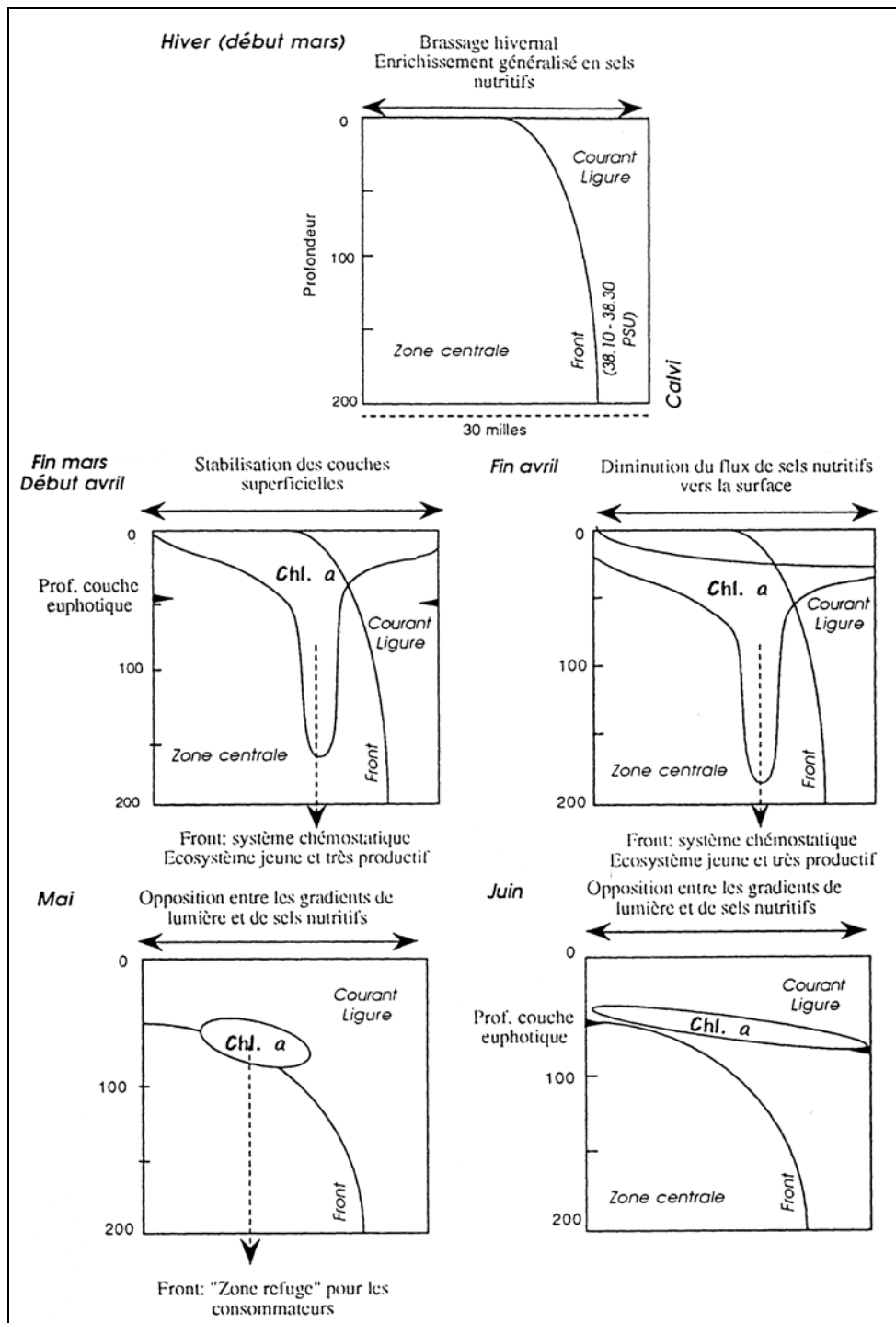


Figure 14

Schémas de synthèse du fonctionnement de l'écosystème phytoplanctonique du Bassin Ligure (secteur Corse), basé les processus physiques et biologiques impliqués dans la Zone Frontale et identifiés à partir de l'ensemble des données exposées précédemment. En raison de la nature conceptuelle des schémas, ni l'échelle ni les proportions ne sont respectées. La longueur totale de la section est de 30 milles. D'après Goffart et al., 1995.

5. Références

- Allain C., 1960. Topographie dynamique et courants généraux dans le bassin occidental de la Méditerranée. *Rev. Trav. Inst. Pêches Marit.*, 4: 27-42.
- Béthoux J.P., 1979. Budgets of the Mediterranean Sea. Their dependance on the local climate and on the characteristics of the Atlantic waters. *Oceanol. Acta*, 2: 157-163.
- Béthoux J.P., Prieur L., 1979. Evaluation des flux d'eau de la circulation du Nord-Est du bassin occidental. *Rapp. Comm. int. Mer Médit.* 25-26 (7): 67-68.
- Béthoux J.P., Prieur L., 1983. Hydrologie et circulation en Méditerranée nord-occidentale. *Pétrole et technique*, 299: 25-34.
- Béthoux J.P., Prieur L., Nyffeler F., 1981. Utilisation de moyennes hydrologiques pour le calcul des flux d'eaux dans le bassin Liguro-Provençal. *Rapp. Comm. int. Mer Médit.*, 27, 6: 193-196.
- Boucher J., Ibanez F., Prieur L., 1987. Daily and seasonal variations in the spatial distribution of zooplankton populations in relation to the physical structure in the Ligurian Sea. *Front. J. Mar. Res.*, 45: 133-173.
- Claustre H, Kerhervé P, Marty JC, Prieur L, Videau C, Hecq J.H., 1994. Phytoplankton dynamics associated with a geostrophic front: Ecological and biogeochemical implications. *J Mar Res* 52: 711-742.
- Coste B., Gostan J., Minas H.J., 1972. Influence des conditions hivernales sur les productions phyto- et zooplanctoniques en Méditerranée Nord-Occidentale. 1. Structures hydrologiques et distribution des sels nutritifs. *Mar. Biol.*, 16: 320-348.
- Da Costa J.A., Martin J.M., Meybeck M., 1980. Les apports fluviaux dans les pays du bassin méditerranéen. *L'Eau Pure*, 56: 1-25.
- Estrada M., Margalef R., 1988. Supply of nutrients to the Mediterranean photic zone along a persistent front. *Oceanol. Acta*, 9 (Spec. Issue): 133-142.
- Fellous J.L., Morel A., 1987. French activities in ocean colour observations. In « Ocean Colour », European Space Agency, ESA SP-1083: 59-69.
- Frontier S., 1985. Les fronts hydrologiques: écosystèmes de contact. Dans *Aspects interdisciplinaires de l'océanographie Méditerranéenne dans le domaine pélagique*. Abstracts du Colloque international du CNRS, Villefranche-sur-Mer, 16-20/09/1985.
- Frontier S., 1986. Studying fronts as contact ecosystems. In J.C.J. Nihoul (Ed): *Marine Interfaces Ecohydrodynamics*. Elsevier Oceanography Series, Amsterdam, 42: 55-66.
- Gascard J.C., 1978. Mediterranean deep water formation. Baroclinic instability and oceanic eddies, *Oceanologica Acta*, 4: 315-330.
- Goffart A., 1992. Influence des contraintes hydrodynamiques sur la structure des communautés phytoplanctoniques du bassin Liguro-Provençal (secteur Corse). Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, 163 pp.
- Goffart A., Hecq J.H., 1985. Influence du front Liguro-provençal - secteur corse - sur la production planctonique. *Rapp. Comm. Int. Mer Médit.*, 29: 133-134.
- Goffart A., Hecq J.H., 1990. Stabilité interannuelle de la distribution de la production planctonique associée au front Liguro-Provençal (secteur Corse). *Rapp. Comm. Int. Mer Médit.*, 32: 113.
- Goffart A, Hecq J.H., 1993. Control of phytoplankton development by nitrate availability in the Liguro-provençal basin (Western Mediterranean). In: *Progress in Belgian Oceanography Research* (Brussels, January 21-22 1993), Royal Academy of Belgium, National Committee of Oceanology, pp 251-261.

- Goffart A., Hecq J.H., Prieur, L., 1995. Contrôle du phytoplancton du Bassin Ligure par le Front Liguro-Provençal (secteur corse). *Oceanol. Acta*, 18: 329-342.
- Goffart A., Licot M., Mouchet A., Hecq J.H., 1988. Le système frontal Liguro-Provençal et ses implications biologiques au large de Calvi. *Bull. Soc. r. Sc. Liège*, 17: 346.
- Gómez F., Gorsky G., 2003. Annual microplankton cycles in Villefranche Bay, Ligurian Sea, NW Mediterranean. *J. Plankton Res.*, 25: 323-339.
- Hecq J.H., Goffart A., 1990. Le système frontal Liguro-Provençal et ses implications biologiques sur le plateau continental Corse au large de Calvi. Programme "Flux Océaniques" (France - JGOFS), Frontal, Rapp. n°8: 104-107.
- Hecq J.H., Goffart A., Nihoul J.C.J., 1986. Plankton dynamic at marine frontal interfaces. *Eos Transaction. American Geophysical Union*, 67: 982.
- Hecq J.H., Bouqueneau J.M., Djenidi S., Frankignoulle M., Goffart A., Licot M., 1986. Some aspect of the Liguro-provençal frontal ecohydrodynamics. In J.C.J. Nihoul (Ed): *Marine Interfaces Ecohydrodynamics*. Elsevier Oceanography Series, Amsterdam, 42: 257-271.
- Ibarra S.O., 1981. Contributions relatives du micro- et du nanophytoplancton à la production primaire dans une zone côtière de Méditerranée nord-occidentale. *Vie et Milieu*, 31: 119-128.
- Jacques G., 1988. Flux de carbone en milieu pélagique de Méditerranée Occidentale lors de la floraison printanière. *Oceanol. Acta*, 9 (Spec. Issue): 143-148.
- Jacques G., Tréguer P., 1986. *Ecosystèmes pélagiques marins*. Collection d'écologie, Masson, 243 pp.
- Jeffrey S.W., Mantoura R.F.C., Wright S.W. Editors, 1997. *Phytoplankton pigments in oceanography. Monographs on oceanographic methodology 10*, Unesco Publishing, Paris, 661 pp.
- Licot M., 1985. Etude écohydrodynamique du front Liguro-Provençal au large de la Corse. Relation entre l'hydrodynamique, les paramètres physico-chimiques et la production primaire. Thèse de Doctorat, Université de Liège, Belgique, 131 pp.
- Mantoura R.F.C. and Llewellyn C.A., 1983. The rapid determination of algal chlorophyll and carotenoids pigments and their breakdown products in natural waters by reverse-phase High Performance Liquid Chromatography. *Analytica Chemica Acta*, 151: 297-314.
- Monzikoff A., Dallot S., Pizay M.D., 1992. Blue and yellow fluorescence of filtered seawater in a frontal zone (Ligurian Sea, northwest Mediterranean Sea). *Deep-Sea Res.*, 39: 1481-1498.
- Morel A., André J.M., 1991. Pigment distribution and primary production in the Western Mediterranean as derived and modeled from coastal zone color scanner observations. *J. Geophys. Res.*, 96: 12685-12698.
- Oszoy E., Latif M.A., Unluata U., 1981. On the formation of Levantine intermediate water. *Rapp. Comm. Int. Mer Médit.*, 27: 51-66.
- Philippe M., Hareng L., 1982. Surface temperature fronts in the Mediterranean Sea from infrared satellite imagery. In J.C.J. Nihoul (Ed): *Hydrodynamics of semi-enclosed seas*, Elsevier Oceanography Serie, Amsterdam, 13: 91-128.
- Prieur L., 1981. Hétérogénéité spatio-temporelle dans le bassin Liguro-Provençal. *Rapp. Comm. Int. Mer Médit.*, 27: 177-179.
- Prieur L., 1985. Systèmes frontaux en mer Ligure à partir des mesures multiparamétriques en continu. *Courrier Mediprod*, 2: 2-5.

- Prieur L., Tiberti M., 1985. Identification et échelles des processus physiques et biologiques responsables de l'hétérogénéité spatiale près du front de Mer Ligure. Rapp. Comm. int. Mer Médit., 29: 35-36.
- Savenkoff C., Prieur L., Reys J.P., Lefèvre D., Dallot S., Denis M., 1993. Deep microbial communities evidenced in the Liguro-Provençal front by their ETS activity. Deep-Sea Res., 40: 709-725.
- Scor-Unesco, 1966. Monographs on oceanographic methodology. 1. Determination of photosynthetic pigments in sea water. Unesco, Paris.
- Sournia A., Brylinski J.M., Dallot S., Le Corre P., Leveau M., Prieur L., Froget C., 1990. Fronts hydrologiques au large des côtes françaises: Les sites-ateliers du programme Frontal. Oceanol. Acta, 13: 413-438.
- Tchernia P., 1960. Hydrologie d'hiver en Méditerranée Occidentale. Bull. int. C.O.E.C., XII, 184-198.
- Vidussi F., Claustre H., Manca B., Luchetta A., Marty J.C., 2001. Phytoplankton pigment distribution in relation to the upper thermocline circulation in the Eastern Mediterranean Sea during winter. J. Geophys. Res., 106: 19 939-19 956.