



HAL
open science

Opération **FRONTAL** : interactions physiques, chimiques et biologiques dans les fronts océaniques

- Programme Flux Océaniques

► **To cite this version:**

- Programme Flux Océaniques. Opération **FRONTAL** : interactions physiques, chimiques et biologiques dans les fronts océaniques. [Rapport de recherche] CNRS. 1989, 29 p. hal-02103746

HAL Id: hal-02103746

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02103746>

Submitted on 18 Apr 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RP246 (5)

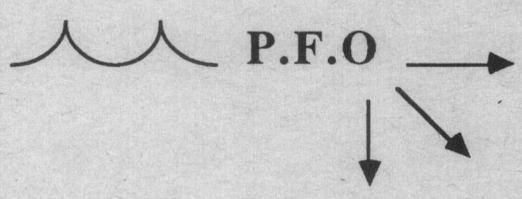
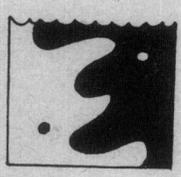
Programme Flux Océaniques



OPERATION FRONTAL

Interactions physiques,
chimiques et biologiques
dans les fronts océaniques

TOE



Rapport N° 5

Opération

Mai 1989

11 AOUT 1989

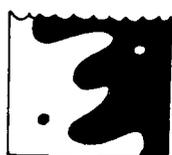
DB 111573

Programme Flux Océaniques

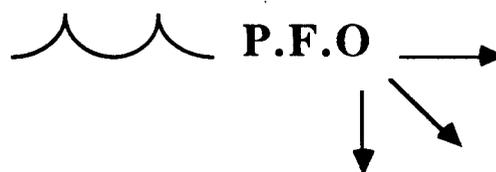


OPERATION FRONTAL

Interactions physiques,
chimiques et biologiques
dans les fronts océaniques



Rapport N° 5



Opération

Mai 1989



FRONTAL

Activités et perspectives

Sommaire

| | |
|---|----|
| Présentation..... | 3 |
| Pourquoi étudier les fronts ? | |
| Historique et stratégie de Frontal | |
| Les sites-ateliers..... | 6 |
| Présentation générale | |
| Les campagnes "Prépot" dans le Pas-de-Calais (1988) | |
| Fronts du plateau continental armoricain | |
| Programme Panache 1988 | 10 |
| Stratégies d'étude et d'échantillonnage | |
| Résultats préliminaires | |
| Conclusions | |
| Programme Tomofront 1988-1990..... | 15 |
| 1988 Tomofront 1 | |
| Les observations nouvelles de Tomofront 1 | |
| 1989 Tomofront 2 | |
| 1990 Tomofront 3 | |
| Programme Almofront 1991-1992 | 23 |
| Rappel du calendrier de l'opération Frontal pour 1988-1992..... | 25 |
| La diffusion de l'information dans Frontal | 26 |
| Publications depuis 1986..... | 27 |

Frontal

Dans le continuum des échelles spatio-temporelles de l'océan, les fronts constituent des "singularités" et posent, à la fois, des problèmes de processus et des problèmes de bilan. Les gradients très accusés qui caractérisent une zone frontale représentent tantôt des barrières, tantôt des lieux d'échange. Une quantité d'énergie, qui peut être localement importante, est dissipée en cascade et structure le milieu. Une certaine confluence des échelles spatio-temporelles crée une résonance entre phénomènes physiques et phénomènes biologiques. Enfin, l'interface, pour des raisons encore obscures, constitue le plus souvent une "anomalie positive" de biomasse et de production biologique.

Frontal s'est assigné, dès l'origine, un double objectif:

- *définir les processus physiques, chimiques et biologiques liés à la rencontre ou la juxtaposition de deux masses d'eau superficielles, et évaluer les effets de ces processus.*
- *établir le bilan des sources et des puits des diverses formes d'énergie et de matière (biomasse incluse) de ces "singularités" locales ou régionales, et confronter ce bilan à celui, plus global, d'une mer ou d'un océan.*

La contribution de Frontal au Programme Flux Océaniques est donc d'étudier d'une part les mécanismes de la production dans des zones privilégiées, et, d'autre part, le devenir de la matière ainsi produite.

Du point de vue logistique, la démarche de Frontal est la suivante:

- *activer les recherches en cours dans divers laboratoires française et stimuler l'échange des idées et la mise en commun des compétences et des moyens.*
- *concentrer progressivement les recherches sur l'un des sites-ateliers (1988: "Panache" sur la panache rhodanien; 1989-90 "Tomofront" sur le front de Mer Ligure).*
- *susciter une opération d'envergure européenne sur un front océanique notoire (1991-92: "Almofront" sur le front Alméria-Oran)*
- *poursuivre cette progression en abordant, ultérieurement, de plus grandes échelles spatiales: front de mer du Nord, convergence antarctique....*

Présentation

Pourquoi étudier le fronts ?

Les fronts hydrologiques ont été longtemps délaissés: les océanographes étudiaient des masses d'eau, des transports et des évolutions de masses d'eau, mais n'accordaient pas d'entité spécifique aux zones de gradient ou de discontinuité qui limitent ces masses d'eau. Cette situation a totalement changé depuis une quinzaine d'années; les fronts font l'objet de colloques nationaux ou internationaux (Bowman & Esaias, 1978; Swallow, 1981), d'opérations interdisciplinaires concertées (Fogg *et al.*, 1985), de "reviews" (Owen, 1981; Denman & Powell, 1984; Le Fèvre, 1986), de livres (Fedorov, 1986), de bibliographies (Gilham *et al.*, 1985), enfin de très nombreuses publications dans les périodiques nationaux ou internationaux, ceux-ci répertoriés dans une rubrique spécifique de l'"océanography literature review" de *Deep-Sea Research*.

Il a, en effet, été reconnu que les fronts, loin d'être des frontières d'épaisseur nulle ou des abstractions, ont une existence, une nature et un fonctionnement propres. Ils se caractérisent comme :

- hautement dynamiques et instables.
- siège d'intenses courants horizontaux ("jets" notamment) et verticaux, ces derniers étant susceptibles d'une part de fertiliser la couche euphotique par apport de nitrates, d'autre part d'entraîner de la matière vers les couches plus profondes.
- assumant dans les deux sens du terme leur rôle de frontière: barrière et aussi (ou: surtout) échange.

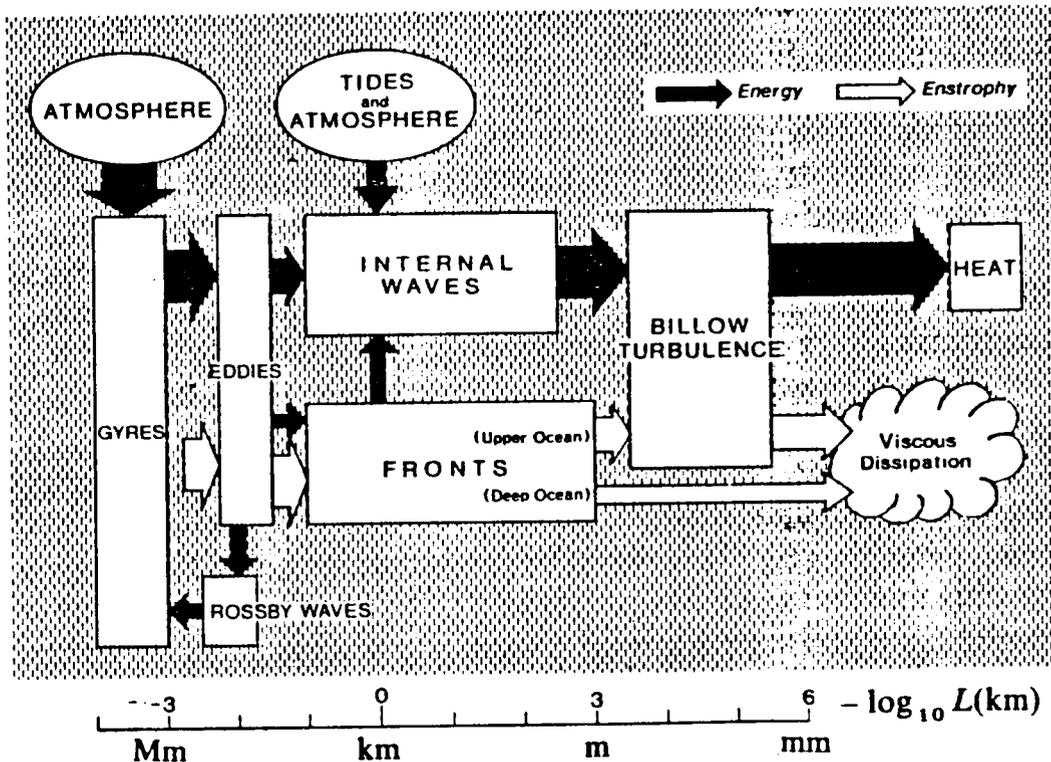


Fig. 1 Diagramme simplifié de la cascade des flux d'énergie turbulente dans l'océan

Parmi le spectre des processus énergétiques qui introduisent de l'hétérogénéité dans l'océan, les fronts occupent une place de premier plan (Fig. 1). On sait que ces "processus énergétiques" impliquent (1) la transformation de l'apport énergétique initial en espèces d'énergie de nature différente, (2) une "cascade" d'échelles de plus en plus petites (on parle aussi de "poupée russe" et de "nested processes"), (3) l'insertion à part entière des réactions biologiques dans ces transformations. En effet, parmi les nouveaux paradigmes de cette fin de siècle, figure celui-ci: les systèmes biologiques ne sont pas indifférents aux formes d'énergie autres que celle qui régit la photosynthèse (l'énergie lumineuse). Les fronts sont la démonstration que, dans ces zones hautement énergétiques, la production biologique bénéficie de mécanismes stimulants dont les effets se font sentir sur l'un ou sur plusieurs des maillons du réseau trophique:

- production primaire (éventuellement, jusqu'au stade d'"eaux colorées").
- production secondaire: zooplancton.
- production tertiaire: stades juvéniles de divers poissons, thon, cétacés, etc...

Les fronts se rencontrent, dans l'océan mondial, à toutes les échelles d'espace entre le mètre et le millier de kilomètres, selon un continuum allant de la cellule de Langmuir à la circulation océanique générale; cependant, l'échelle qu'a choisie Frontal pour ses cinq premières années est la moyenne échelle. Il en est de même des échelles de temps: un très vaste spectre, mais une forte représentation de l'échelle moyenne. Tous les fronts étudiés par les équipes françaises sont, ou bien saisonniers, ou bien permanents avec forte composante saisonnière; des composantes de période beaucoup plus courte peuvent, en outre, être introduites par les marées et les ondes internes.

Les travaux de ces dernières années, tant français qu'étrangers, ont fait ressortir deux propriétés des zones frontales qui viennent renforcer l'intérêt de ces recherches:

- la commensurabilité des échelles spatio-temporelles pour des phénomènes de nature différente (physique, chimique ou biologique). Commensurabilité, donc, selon les cas, coïncidence ou non-coïncidence, comme l'a bien mis en évidence l'étude des fronts du plateau continental armoricain (voir plus loin).
- l'apparente versatilité des différentes formes d'énergie (énergie cinétique, potentielle, chimique, énergie "vivante" stockée dans les biomasses du réseau trophique). Les fronts sont aussi des lieux privilégiés pour l'étude des transitions entre le physique, le chimique et le biologique. D'un point de vue pratique, ceci implique le dialogue des disciplines: l'interdisciplinarité n'est pas ici un bonus, mais une nécessité.

Voilà donc deux raisons d'étudier les fronts. D'une part, ils constituent des anomalies courantes à la surface de l'océan mondial, anomalies dont il convient d'étudier les conséquences, en particulier, biologiques, sur la région océanique qui les inclut: c'est le **où, quand, combien ?** de Frontal. D'autre part, les fronts sont des lieux d'interactions privilégiées entre le physique et le biologique, ce qui demande des études de processus: c'est le **pourquoi, comment ?** de Frontal.

Historique et stratégie de Frontal

"Frontal" a eu trois années de gestation: l'idée de ce programme national étant apparue en 1984 et un "projet de faisabilité" ayant été produit en 1985. Une enquête, puis un colloque préparatoire qui a réuni une quarantaine de participants en septembre 1987 à Luminy ont permis de définir un plan d'action qui a été discuté par le Conseil scientifique de "Frontal", soumis et accepté au printemps 1988 par l'INSU.

Conformément au plan d'action, une opération nationale avait été réalisée en 1988: "**Panache**", étude pluridisciplinaire du front rhodanien dans le golfe du Lion. Parallèlement, des opérations de moindre ampleur ont eu lieu en d'autres sites-ateliers pour préparer des opérations ultérieures. La stratégie de "Frontal" est, en effet, de fédérer progressivement les efforts en stimulant les échanges de toutes sortes entre les équipes jusqu'ici disséminées. Ainsi,

1988 a été la première année d'une opération de plus grande ampleur en mer Ligure, **Tomofront**, qui se déroulera jusqu'en 1990. L'étape suivante sera celle d'**Almofront** (1991-92), opération intégrée d'envergure internationale dans le sud-ouest de la Méditerranée occidentale.

L'annuaire de "Frontal" (2^{ème} édition, juin 1988) dénombreait 68 participants, chiffre très proche du nombre de chercheurs qui ont pris une part effective aux opérations de l'année 1988: ce nombre est de 60 environ.

Références citées dans la présentation

- BOWMAN, M.J. & ESAIAS, W.E. (Eds) 1978. Oceanic fronts in coastal processes. Springer, Berlin, iix-114 p.
- DENMAN K.L. & POWELL, T.M. 1984. Effects of physical processes on planktonic ecosystems in the coastal ocean. *Oceanogr. mar. Biol. Ann. Review* 22: 125-168, 2 pl.
- FEDOROV, K.N. 1986. The physical nature and structure of oceanic fronts. Springer, viii-333 p.
- FOGG, G.E. et coll. (Eds) 1985. Biological studies in the vicinity of a shallow-sea tidal mixing front. *Phil. Trans. R. Soc. London, B*, 310: 407-571, 1 pl.
- GILHAM, L.B.; MIKA, J.J. & WIESENBERG, D.A. 1985. Bibliography on research on ocean fronts. 1964-1984. *NORDA techn. Note* (Mississippi) 303: 1-53.
- LE FEVRE, J. 1986. Aspects of the biology of frontal systems. *Adv. mar. Biol.* 23: 163-299.
- SWALLOW, J.C., CURRIE, R.I., GILL, A.E. & SIMPSON, J.H. (Eds) 1981. Circulation and fronts in continental shelf seas. *Phil. Trans. R. Soc. London, A*, 302: 511-693.

Les sites-ateliers

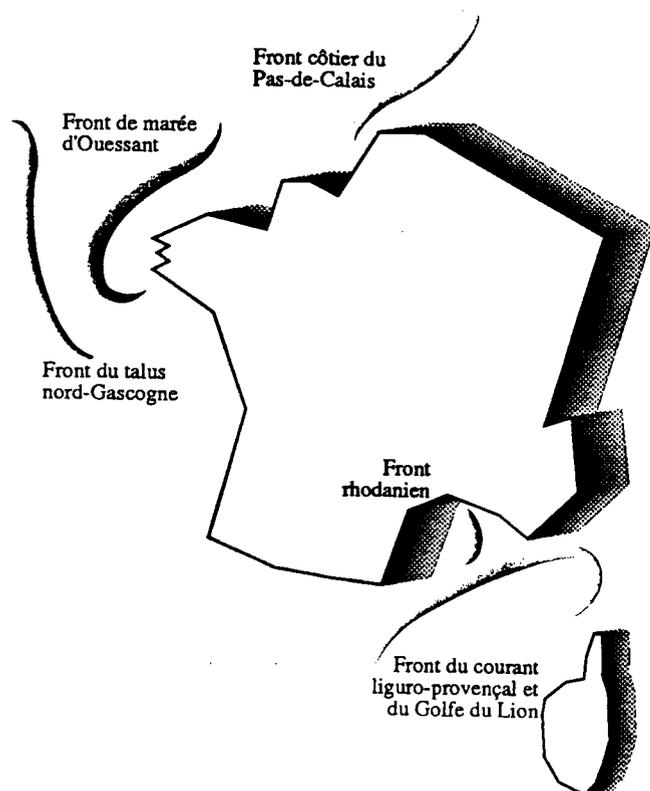
Présentation générale

Les océanographes français ont la chance de disposer, à proximité de leurs côtes, d'un choix de fronts de nature et d'extension diverses parmi les six types de fronts actuellement identifiés (Tabl. 1); des modes différents de dissipation de l'énergie s'y trouvent, notamment, déployés. Chacun de ces fronts a fait l'objet de travaux de la part des laboratoires côtiers proches, avant le lancement de Frontal. L'intérêt pratique de ces sites aisément accessibles, modèles expérimentaux permanents, ne saurait être nié: Frontal en a seulement fait des sites-ateliers pour la communauté.

| SITE-ATELIER | Type physique | Paramètres physiques essentiels | Profondeur (m) | Temps de route d'une Station Marine | Variations temporelles | Principales campagnes à la mer ou séries de campagnes |
|----------------------------|--|--|----------------|-------------------------------------|---|---|
| LIGURO-PROVENÇAL | géostrophique | largeur et rayon interne de déformation | 2 000 | 1 h 30' de Villefranche | permanent avec var. saisonn. | Migrage1 Pretrophos Prolig Pros Trophos |
| GOLFE DU LION | | | 150-1000 | 3 h de Banyuls | | Pelagolion |
| DÉBOUCHÉ DU RHONE | panache | débit et diffusion | 20-90 | 1 h 30' de Marseille | fortes var. saisonn. et var. météo. rapides | Euroghli Leopel Rhonce |
| QUESSANT | marée | énergie potentielle et frottement | 100 | 4 h de Brest ou Roscoff | estival | Iroise Satir |
| NORD-GASCOGNE MER CELTIQUE | "front de talus" | vent et ondes internes | 200 | 8 h de Brest | estival | Envat Ondine Rosimer |
| PAS-DE-CALAIS | écoulement côtier des apports fluviaux | débits fluviaux et dissipation de la marée | 20-40 | 1 h de Wimereux | permanent | Propel FC |

Tableau 1 Les sites ateliers des côtes françaises.

Il s'agit maintenant de mettre à profit cette diversité et d'acquérir, à terme, une vision intégrée des fonctionnements et des bilans comparatifs de ces systèmes. Il a donc été décidé de privilégier successivement l'un ou l'autre site selon les possibilités logistiques, en y concentrant au maximum les moyens et les compétences sur une opération donnée. Dans le présent rapport, chaque site est traité d'une manière inégale, suivant le degré d'actualité que représente le site considéré dans la programmation nationale.



Pas-de-Calais: de découverte récente, ce front est difficile à étudier en raison du peu de chercheurs dans les laboratoires marins concernés. Ce front fera l'objet d'une brève présentation.

Front de marée d'Ouessant et front du talus de Nord Gascogne: comparé aux autres sites-ateliers, les recherches y sont les plus avancées. La phase actuelle privilégie d'ailleurs réflexion et synthèse.

Front rhodanien: il a fait l'objet en 1988 de l'opération "**Panache**" (chapitre suivant).

Front du courant liguro-provençal et du Golfe du Lion: il fait l'objet de l'opération "**Tomofront**" (1988-1990), exposée plus loin.

Les campagnes "Prépot" dans le Pas-de-Calais (1988)

L'opération "Prépot" dans le Pas-de-Calais avait été proposée par "Frontal" comme préparation à une opération "Potamanche" envisagée pour 1989. La proposition n'ayant pas été retenue par l'INSU, cette opération "Potamanche" est, pour l'instant différée. "Prépot" a cependant eu lieu en avril 1988 à bord de trois navires côtiers et a réuni 26 participants originaires de 9 laboratoires. Nous nous contenterons de résumer ici les principales conclusions concernant le front, des rapports plus détaillés pouvant être consultés ("Courier interne" Frontal de mai 1988; Table Ronde "Frontal" de septembre 1988; Rapports d'activité 1988 du GDR "Manche" et de la Station Marine de Wimereux):

- confirmation de la notion d'un "fleuve côtier" s'écoulant vers la Mer du Nord, séparé des eaux du centre de la Manche par une zone frontale.
- interruption de la zone frontale devant la baie de Somme.
- existence de convergences frontales caractérisées.
- effet de barrière exercé par la zone frontale sur les peuplements planctoniques.
- probable effet de fertilisation de la production primaire au niveau du front.
- rôle déterminant du complexe "fleuve côtier + zone frontale" dans le transport vers le nord des larves d'Invertébrés benthiques et des polluants anthropiques, ainsi que dans les dépôts sédimentaires.

Les faibles effectifs de chercheurs de cette façade dans les diverses disciplines nécessaires aux études de l'écosystème pélagique ainsi que la difficulté d'inciter des chercheurs extérieurs à venir y travailler constituent un obstacle majeur. Pour ces raisons, l'étude du front du Pas-de-Calais risque, en dépit de son originalité, d'être ralentie au cours des prochaines années.

Fronts du plateau continental armoricain

Le plateau continental de l'Europe du Nord-Ouest, large et peu profond, est parmi les plus étendus de l'océan mondial. De par sa topographie et aussi en raison de communications directes avec le plein océan, les phénomènes de marée y sont très accentués: environ 10 % de l'énergie dissipée par la marée dans l'océan mondial. Les courants de marée, aux variations spatiales considérables, jouent un rôle essentiel sur la structure de la colonne d'eau et ses variations au cours de l'année. Lorsque l'énergie dissipée par le frottement du courant sur le fond est suffisante pour contrecarrer l'effet de stratification induit, en surface, par le réchauffement estival (ou le transport d'eaux dessalées en hiver), la colonne d'eau reste homogène. A l'inverse, lorsque cette énergie est trop faible, une stratification thermique (ou haline) peut se mettre en place. En été, la frontière entre les secteurs stratifié et brassé est très marquée : les variations de la température superficielle peuvent atteindre 3-4 °C en quelques milles et donnent lieu à de véritables fronts thermiques.

La portion relativement réduite de ce plateau située à l'ouest de la Bretagne rassemble, à elle seule, toutes les particularités qui font l'originalité de l'ensemble. Les courants de marée sont intenses (souvent de l'ordre de 2-3 noeuds) et couvrent sensiblement toute la plage des variations (de 0,5 à 3 noeuds). On trouve, dans ce secteur, un système de fronts de marée aussi diversifié que celui qui existe sur la totalité du plateau continental. Parmi ces fronts, celui d'Ouessant est le plus connu et souvent présenté comme l'exemple-type du **front de marée**. Le front interne de la mer d'Iroise, d'extension plus faible et établi sur des fonds de 30 à 50 m seulement, constitue un **front côtier de marée**.

Autre particularité, le talus continental très marqué; à l'approche de la plaine abyssale, la bathymétrie varie rapidement de 200 à 4 000 m sur une distance horizontale voisine de 50 km. L'interaction entre cet accident topographique et le passage de la marée barotrope engendre une marée interne de forte amplitude; la quantité d'énergie dissipée constitue là un maximum mondial. Ces phénomènes sont, selon toute vraisemblance, à l'origine de la tache froide repérée au voisinage du talus et de la Mer Celtique et représentent un troisième cas-type: celui du **front de talus**.

Ces rappels mettent en évidence la grande diversité hydrologique du plateau continental armoricain et des secteurs adjacents, bien que les trois structures identifiées ci-dessus fassent partie d'un même ensemble et que toutes aient la marée pour élément moteur. Les recherches, favorisées par la proximité de plusieurs centres océanographiques britanniques ou français, ont été intensives ces dernières années; signalons notamment, parmi les travaux récents de notre groupe:

- la synthèse issue de la campagne pluridisciplinaire "Satir-Dynatlant 2" sur le front d'Ouessant (Grepma, 1988b).
- l'utilisation de la télédétection en temps réel pour le repérage d'une poussée planctonique sur le même front (Grepma, 1988a).
- la synthèse sur le cycle annuel du front interne (Birrien, 1987).
- les travaux de modélisation physique du front de talus (Mazé *et al.*, 1986).
- la comparaison du fonctionnement de deux écosystèmes (front d'Ouessant et front de talus) par Le Fèvre & Frontier (1988).
- la mise en évidence de différentes périodicités de fertilisation de la couche euphotique (Morin, thèse et travaux en cours).

Dans leur ensemble, ces systèmes sont donc certainement ceux dont la conceptualisation et la modélisation sont les plus avancées et les mieux intégrées. C'est sans doute pour cette raison que les océanographes concernés se consacrent actuellement à la réflexion et à la synthèse. Deux opérations récentes sont cependant à signaler. L'une est une opération "pointue" portant sur la régénération des sels azotés dans les eaux homogènes ("Azomix"). L'autre est le programme européen "Rosimer", axé sur la nutrition des larves de poissons dans l'Atlantique du Nord-Est; la problématique "frontale" se trouve en partie impliquée (voir Rapp. périodique C.E.E., ST2J-O369-EDB par S. A. Poulet).

Opération Frontal

Actuellement, réflexion et synthèse sont conduites selon les lignes directrices suivantes:

pour le front du talus continental

- modélisation de la formation des ondes internes au voisinage du talus et de leur propagation sur le plateau (modèle "tri-couche").
- modélisation des interactions entre les ondes internes et le mélange dû au vent.
- modélisation des transferts verticaux de sels nutritifs.

pour le front de talus et le front d'Ouessant

- genèse des eaux colorées (en général : Flagellés calcaires sur le front de talus, Dinoflagellés sur le front d'Ouessant).
- fertilisation périodique dans les deux écosystèmes : périodicité morte eau/vive eau (14,7 j) sur le front d'Ouessant), périodicité pleine mer/basse mer (12 h) sur le front de talus.
- interactions entre ces caractéristiques temporelles et la nature du réseau trophique dans les deux cas.

Programme "Panache" 1988

Le Rhône, par son débit, est le plus important des fleuves se déversant en Méditerranée occidentale. Il draine un bassin versant (95 000 km²) sur lequel la densité de population, le développement industriel et agricole ne sont pas sans conséquence sur la qualité et la quantité de matière particulaire et dissoute charriées par le fleuve. L'impact de ces apports telluriques dans une mer sans marée, oligotrophe, fait l'objet, depuis une décennie, de très nombreuses études:

- les effets des apports trophiques rhodaniens, essentiellement les sels minéraux, sur la production primaire dans l'aire soumise à la dilution (Golfe du Lion) ont été appréhendés lors des campagnes "Eurhogli" et "Pélagion".
- la dynamique des polluants minéraux et organiques fut étudiée lors des missions "Dypol" dans la zone proximale du débouché du fleuve.
- la composition des apports telluriques particuliers, tant organiques que minéraux, ainsi que leur devenir spatio-temporel sur la marge continentale, en relation avec l'hydrodynamisme, restent les objectifs de l'opération "Ecomarge".
- l'évolution biogéochimique, en mer, des composés d'origine rhodanienne font également l'objet des recherches dans le cadre du GDR "ICO" et du programme européen "Eros 2000".

L'originalité des missions "Panache" tient à ce qu'elles concernent l'accumulation de matière organique au niveau du front et de l'enveloppe frontale (Fig. 3) et la production bactérienne et secondaire qui en découlent.

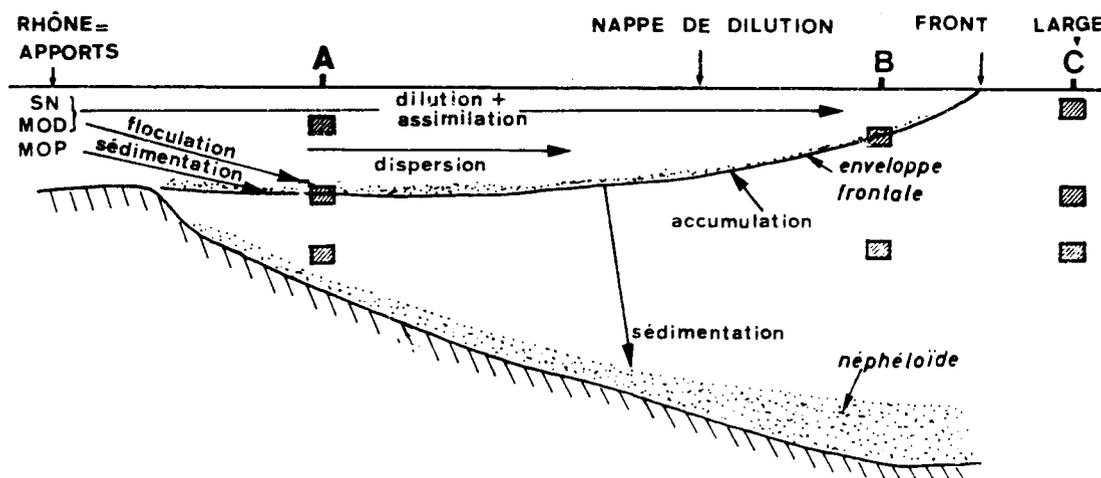


Fig. 3 Coupe du panache rhodanien

Les recherches en biologie visaient donc à répondre aux questions suivantes:

- un front de panache correspond-t-il à une zone d'enrichissement de matière organique sous sa forme particulaire et dissoute?
- s'il en est bien ainsi, cet enrichissement est-il dû à une accumulation (phénomène passif) ou à un accroissement de la production biologique?
- dans quelle mesure et par quel processus cette biomasse est-elle utilisée à l'intérieur de l'enveloppe frontale (recyclage dans une chaîne alimentaire de type classique ou de type boucle microbienne) ou exportée vers l'écosystème environnant?
- les enseignements acquis lors de l'étude du front de panache sont-ils transposables à d'autres types de front?

Parallèlement, des recherches ont été menées en physique afin de renforcer celles des biologistes, en leur fournissant des indications sur la position du front, sa stabilité et son évolution tant spatiale que temporelle. Ces recherches ont pour but de développer un modèle à deux dimensions pour simuler le panache thermique. Le modèle (basé sur la condition de saut sur le front, avec ou sans courant extérieur, sans vent et sans frottement à l'interface) a pour objectif de mettre au point une méthode d'assimilation des données expérimentales (données radar) par contrôle optimal (conductivité, température, courant). Les campagnes de mesures en mer permettent de calibrer les mesures de radar et entrent également dans le modèle.

Stratégie d'étude et d'échantillonnage

Les deux missions de biologie ont été effectuées sur le N.O. "Korotneff" du 9 au 15 mai 1988 et réunissaient 16 participants.

Compte tenu des objectifs, basés surtout sur l'étude des processus à petite échelle, la stratégie d'échantillonnage a été adaptée au type de front étudié, à savoir: extension verticale réduite, très fort gradient halin. Les techniques de prélèvement étaient fondées sur un positionnement rigoureux dans le plan vertical: exploration de la colonne d'eau par une pompe couplée à une CTD pour décrire en temps réel les conditions physiques (température, conductivité, profondeur, néphélométrie, fluorimétrie) correspondant à une masse d'eau aux caractéristiques précises (pigments, sels minéraux, spectre particulaire, phytoplancton, bactéries, CHN, spectre des lipides). Le zooplancton était prélevé également par pompage pour limiter le risque de contamination par du matériel de niveaux différents et obtenir une estimation quantitative précise.

L'étude des processus physiques (détermination des champs de courant par radar hyperfréquence) a été réalisée à la fin de janvier 1989 à bord du N.O. "Georges-Petit". Aux biologistes s'était jointe l'équipe du LSEET de Toulon. Le radar, basé à Port-Saint Louis-du-Rhône, a permis de suivre dans un faisceau de 30 km les fluctuations halines dans le panache et de positionner le front dans le temps et l'espace. Ce radar permet également d'obtenir les vitesses radiales des courants dans le panache, celles-ci variant en fonction des changements de débit du fleuve et des conditions météorologiques. Parallèlement, la "vérité-mer" des paramètres physiques (conductivité, température et courantométrie) était assurée à bord du N.O. "Georges-Petit".

Résultats préliminaires

Structure frontale

La structure frontale est caractérisée aussi bien dans le plan horizontal que vertical par de très forts gradients halins, de turbidité, de nitrates, de matière particulaire en suspension, de C et de N particuliers et d'oxygène dissous.

Ce rôle de barrière apparaît assez bien au niveau des populations bactériennes qui présentent un caractère, soit marin, soit d'eau douce, et à celui du phytoplancton, varié et quantitativement pauvre dans le domaine marin, très abondant par contre à proximité de l'enveloppe frontale où il est largement dominé, en mai, par deux espèces formant des floraisons: la Prasinophycée *Tetraselmis sp.* et le Dinoflagellé *Prorocentrum sp.*

L'effet de barrage est, par contre, relatif pour les populations zooplanctoniques: pour une saison déterminée, l'assemblage faunistique en surface est pratiquement le même qu'en profondeur. En mai, la station proximale du panache est occupée par un zooplancton qualitativement pauvre dominé par le copépode euryhalin *Paracalanus*. Les autres stations ont des populations plus variées; on note en particulier à l'interface et en surface du panache une accumulation de matériel gélatineux à base d'Appendiculaires, de Ptéropodes et de Copépodes *Oithona*, ces différents groupes étant considérés comme des microphages. Dans les eaux plus salées à proximité de l'enveloppe frontale, on remarque aussi une certaine proportion de nauplii et de jeunes copépodites, laissant supposer un accroissement du recrutement zooplanctonique dans la zone influencée par le panache.

Echelon bactérien

Dans le système frontal constitué par le panache rhodanien, les bactéries hétérotrophes sont susceptibles de profiter de deux types de source de matière organique: celle apportée par le Rhône et celle produite par les organismes planctoniques, essentiellement le phytoplancton qui profite de l'enrichissement en sels nutritifs, mais dans l'eau marine.

Les différentes stratégies d'étude mises en oeuvre lors des deux missions ont permis de décrire deux pôles de production hétérotrophe importante :

- dans l'enveloppe elle-même, la production décroît de l'embouchure vers la mer, avec, dans le plan vertical, une augmentation nette mais limitée dans l'espace au niveau de l'interface.
- l'autre pôle de production se situe au bord du front, mais côté marin, et il est probablement en relation avec la production primaire.

Les résultats acquis lors de la dernière mission semblent indiquer un enfoncement oblique de cette production bactérienne, enfoncement visible par l'évolution des effectifs comme par celle de la production elle-même. L'exportation de cette production hétérotrophe vers les échelons supérieurs se ferait via les micro-prédateurs.

Echelon primaire

La biomasse chlorophyllienne est maximale au niveau de l'enveloppe frontale. Après fractionnement par classe de taille, la fraction inférieure à 3 μm (picoplancton) située dans les cinq premiers mètres représente seulement 30% de la biomasse chlorophyllienne totale, alors que dans les eaux marines sous-jacentes, elle est prépondérante. Les valeurs de production montrent également un maximum au niveau de l'enveloppe frontale à toutes les stations; ce maximum s'élève avec l'éloignement de l'embouchure: il est double à la station distale par rapport à la proximale.

Les mesures de production après fractionnement démontrent encore l'importance du picoplancton, aussi bien dans les eaux marines où sa production est supérieure à 60% de la production végétale totale, que dans les eaux dessalées où le pourcentage de carbone fixé par ces petites cellules est supérieur à leur contribution dans la biomasse chlorophyllienne. Cependant dans ces eaux, la production carbonée est assurée essentiellement par des cellules de grande taille. Enfin, une nette augmentation du taux de croissance a été observée au niveau du front.

Echelon secondaire

Au point de vue quantitatif, on ne peut mettre en évidence, alors qu'on l'a fait pour les bactéries et le phytoplancton, une accumulation particulière de biomasse à l'interface: ni sur le plan horizontal où l'on constate, au contraire, un relatif affaiblissement, ni sur la verticale, ceci résultant probablement du caractère mobile d'une grande partie du zooplancton (migrations verticales journalières).

La physiologie fonctionnelle du zooplancton varie par contre selon son niveau de capture:

1) En mai, à toutes les stations de panache, la respiration et l'excrétion d'ammoniaque sont maximales à l'interface, ce qui suggère un maximum d'activité nutritionnelle et reproductrice, précisément dans la couche d'eau où le maximum de biomasse et de production bactérienne, microzooplanctonique et phytoplanctonique ont été mises en évidence.

Les expériences de broutage par le zooplancton sur le seston de son lieu de capture montrent que la totalité du spectre particulaire mesuré au Coulter Counter (1,4 à 160 μm) est utilisable par le zooplancton, aussi bien en surface qu'en profondeur. A l'interface cependant, la gamme de taille des particules broutées est plus étroite et correspond au particulier à celle des micro-prédateurs (Ciliés, Flagellés). Ceci semble indiquer une sélectivité pour ce type de matériel, très abondant à l'interface.

Cependant, l'accroissement des dépenses énergétiques à ce niveau n'est pas contrebalancé par un apport suffisant d'énergie par la nourriture, si l'on tient compte des données de granulométrie. Nous avons donc été amenés à émettre l'hypothèse de l'utilisation d'une autre source de nourriture non prise en compte par la mesure granulométrique, qui pourrait être le matériel bactérien, très abondant à l'interface.

2) En novembre, les taux métaboliques "de base" (zooplancton à jeun) sont, au contraire, minimaux à l'interface. Par contre, chez les animaux nourris, il n'existe pas de différence

particulière entre les différents niveaux. La dépense métabolique liée à l'activité de nutrition est donc plus élevée chez les animaux d'interface, ce qui laisse supposer un accroissement de la ration alimentaire à ce niveau. Les différences de comportement métabolique chez les animaux à jeun par rapport à ceux de l'expérience de mai pourrait s'expliquer par la nature différente de la population automnale, composée d'espèces moins euryhalines à base du copépode *Temora* et présentant probablement des différences dans la régulation osmotique apparaissant dans les valeurs de la dépense énergétique de base.

Les migrations verticales du zooplancton au cours du nyctémère se sont montrées particulièrement actives sur ce site. Divers indices (contenus stomacaux, teneurs en acides aminés dans le milieu) indiquent que ces populations se nourrissent activement de nuit dans la couche de surface. Des transports actifs sont donc à prendre en considération dans l'évaluation des exportations de matière.

Conclusions

Cette étude, dont le dépouillement est loin d'être achevé, a été entreprise sur la base d'un schéma conceptuel proposé comme hypothèse (Fig. 4). Elle montre que le front de panache rhodanien est caractérisée par de forts gradients physiques (salinité, température), chimiques (nutrilites) et biologiques (pigments, bactéries, microzooplancton, phytoplancton). La production organique et l'activité physiologique sont maximales au niveau de l'enveloppe de panache pour l'ensemble des organismes.

Le front halin favorise d'une part une accumulation de matière organique détritique, et d'autre part, grâce à un apport constant de nutrilites, l'accroissement de la biomasse et de la capacité de production dans la plupart des maillons de la chaîne trophique. Cette biomasse serait créée au niveau bactérien par l'utilisation de la matière organique apportée par l'eau rhodanienne (population interne du panache) ou par celle produite par le phytoplancton (bord frontal, côté marin). En effet, ce dernier se développe surtout dans la partie distale du front, là où l'énergie lumineuse est moins limitée par la turbidité. La biomasse bactérienne serait en partie reprise par les microprédateurs dont l'abondance et l'activité sont corrélées à celles des bactéries.

L'analyse des paramètres hydrologiques, des biomasses et des productions bactériennes et phytoplanctoniques suggère qu'une partie de la production de surface à l'extérieur du front serait exportée sous l'enveloppe frontale grâce à un mouvement hydrodynamique de plongée.

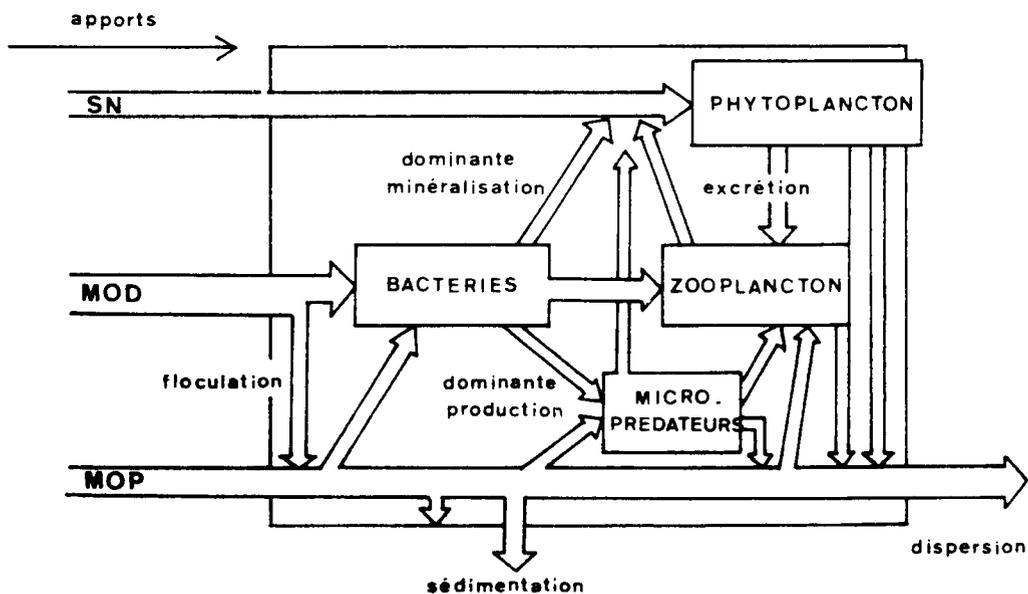


Fig. 4 Schéma provisoire des transferts dans le panache

Opération Frontal

Le microzooplancton, étroitement corrélé en biomasse et production avec les bactéries dont il doit constituer le principal prédateur, et le phytoplancton sont intensément utilisés par le zooplancton, surtout au niveau de l'interface. Le zooplancton présente à ce niveau un surcroît de dépense métabolique probablement lié à une activation de la nutrition et entraînant probablement un accroissement de son potentiel de reproduction.

Contrairement aux autres maillons de la chaîne trophique, le zooplancton est moins lié à la structure hydrologique frontale du fait de sa capacité à migrer verticalement. Cette particularité tend à faire de ce groupe l'un des principaux facteurs d'exportation de la biomasse produite dans ou à proximité immédiate du panache, du fait de son activité de nutrition nocturne dans les couches de surface.

Programme "Tomofront" 1988-1990

Le site-atelier choisi pour cette opération est le front liguro-provençal qui présente des avantages indéniables: il est relativement bien décrit, il est représentatif d'une classe de fronts du large en équilibre géostrophique, il est permanent, il présente une grande diversité de structures dynamiques dans un espace restreint, il est facilement accessible depuis une station marine et les conditions météorologiques qu'on y rencontre sont le plus souvent acceptables. Son inconvénient majeur est pour le moment l'absence d'une modélisation physique restituant les structures observées. Les campagnes de prélèvement avec des navires côtiers ne permettant pas l'approche pluridisciplinaire indispensable, une campagne d'un navire hauturier type Norois sera nécessaire vers la fin du programme (campagne "Tomofront 3").

Le site de la Mer Ligure présente en outre un intérêt particulier. Le programme "Tomofront" avait été essentiellement envisagé au départ, comme l'étude d'un des modes d'exportation de la matière organique produite par un front du large. Les résultats obtenus lors de "Tomofront 1" suggèrent qu'en période eutrophe l'influence de la sédimentation verticale directe de la matière organique est négligeable vis-à-vis des advections descendantes obliques. Il en résulte une profonde influence sur les peuplements intermédiaires, et probablement les peuplements profonds, qui peuvent ainsi recevoir un flux nutritionnel important et peu dégradé. Conformément à cette logique, une communauté animale particulière a été découverte en profondeur lors des plongées des campagnes "Migrigel 1 et 2": certains niveaux néphéloïdes riches en neige planctonique comportent une quantité surprenante de filtreurs très particuliers et fragiles qui ne migrent pas verticalement: Appendiculaires géants des genres *Pelagopleura* et *Bathycordeus* dont les logettes piègent la matière organique, Cténophores lobés prédateurs *Benthocyroe*.

La compréhension de ce type de système passe par une meilleure caractérisation de la dynamique du transport oblique en relation avec la production primaire de surface ou de subsurface, le flux et la qualité de la matière transportée, les effets de la turbulence, les profondeurs atteintes par la circulation, la formation de zones d'accumulation, etc... Le mode d'utilisation en profondeur de la matière organique et son influence sur la régénération et la production secondaire de toute la colonne d'eau sont aussi un aspect essentiel du problème. Il est clair que ce type de phénomène présente un intérêt général pour l'économie de tout système pélagique productif associé à une circulation verticale des masses d'eau.

Les opérations que nous souhaitons mener jusqu'en 1990 doivent être aussi considérées comme des mises au point méthodologiques et conceptuelles en vue des futures opérations d'envergure. Les techniques de mesures multiparamétriques en continu mises en oeuvre ces dernières années seront employées pour la localisation des structures physiques et chimiques du milieu. D'autres méthodes nécessitent encore des choix, des adaptations ou leur déploiement dans de bonnes conditions. Sans être limitatifs, nous pouvons citer :

- la sélection de traceurs chimiques de processus physiques et biologiques.
- le développement d'indicateurs écophysologiques pour le zooplancton et le micronecton.
- les applications de l'acoustique pour la courantométrie et la détection des organismes.

Par ailleurs, l'optimisation des stratégies d'échantillonnage et le choix de méthodes spécifiques d'analyse des données spatiales et temporelles restent un impératif majeur.

1988 Tomofront 1

Les deux campagnes qui se sont déroulées en Mer Ligure en mars et en avril ont réuni 25 participants appartenant à 6 laboratoires différents. Des comptes rendus préliminaires ont été diffusés dès le mois de mai ("Courrier interne" Frontal de mai 1988; Table Ronde Frontal de septembre) et certaines conclusions peuvent être d'ores et déjà dégagées.

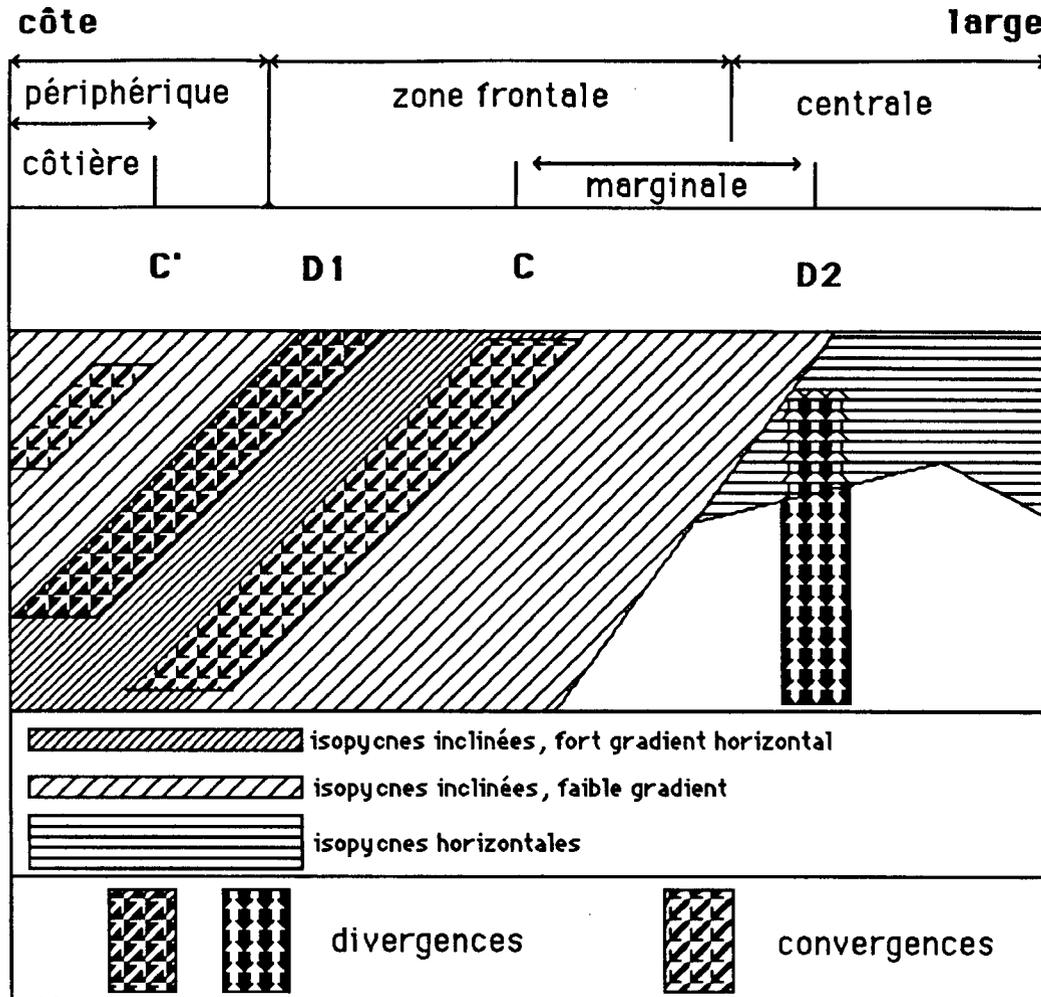


Fig. 5 Structure conceptuelle schématique du front de Mer Ligure (échelles non spécifiées, variables suivant l'époque de l'année)
D'après Boucher *et al.*, 1987

Structure du front liguro-provençal

Entre le 14 et le 24 avril 1988, une structure hydrologique conforme au schéma classique du front liguro-provençal a été observée. D'après L. Prieur (*in* Boucher *et al.*, 1987), ce front est constitué, de la côte vers le large, par trois zones distinctes : la zone périphérique à densité basse et faible gradient horizontal, la zone frontale, à fort gradient, et la zone centrale à densité élevée et peu variable (Fig. 5). La zone périphérique est parcourue par le courant ligure et comporte une petite convergence à son extrémité externe. A partir de la côte, la zone frontale débute par une divergence (D1) puis comporte une convergence (C) située plus au large. La zone centrale commence par une divergence, dite divergence du large (D2). La région située entre C et D2 est nommée zone marginale et est caractérisée par d'amples variations horizontales de la biomasse et des sels nutritifs.

Deux cellules principales de circulation verticale peuvent être reconnues en permanence:

- une cellule frontale avec advection quasi isopycnale, ascendante en D1 et descendante en C.
- une cellule marginale, circulant en sens contraire, avec advection ascendante en D2 et descendante en C, avec éventuellement une autre convergence plus au large.

Sous l'influence des sels nutritifs remontés par advection par D1 et D2, il se développe en surface de la zone frontale une forte biomasse autotrophe. Une partie de cette biomasse est entraînée en profondeur et vers la côte par C.

Les observations nouvelles de Tomofront 1

Suivant les jours, la *zone frontale* commence entre 12 et 14 milles de la côte et la *divergence du large* est située entre 22 et 26 milles. Les zones frontale et marginale apparaissent particulièrement productives: plus de 300 mg de chlorophylle *a* totale par mètre carré dans la couche 0-200 m. Plus de 500 mg. m⁻² avaient été mesurés fin mars près de D2: à cette période de l'année le système est **eutrophe**. Avec un réchauffement encore modéré, le pic principal de biomasse végétale (6,6 mg Chl *a*. m⁻³), constituée surtout de diatomées, est localisé dans les vingt premiers mètres en début de période d'échantillonnage et sur les divergences, entre 30 et 40 m plus tard ou en zone marginale. Dans la convergence, le maximum s'observe vers 50 m avec une diminution très progressive des teneurs en chlorophylle jusqu'à 100 m. Des maximums secondaires atteignant jusqu'à 1,4 mg Chl *a*. m⁻³) ont été observés jusqu'à 200 m en profil continu et jusqu'à 400 m par des prélèvements discrets; ils correspondent l'eau mélangée centrale (t = 13,17 °C, S = 38,47 ‰, d = 29,05). Ils appartiennent donc à la cellule marginale de circulation verticale. La cellule frontale, initiée par la divergence D1, donne également lieu à la plongée du matériel particulaire juste au-dessus de l'eau d'hiver (13,11 °C; 38,28‰, 28,92)(Fig. 6) Les deux "couches" plongeantes vers la côte correspondant à ces deux cellules peuvent apparaître superposées à une même station de la zone périphérique externe. Les stations de la zone marginale externe présentent un seul maximum profond.

Les bouteilles ayant été positionnées dans la colonne d'eau dans les divers maximums successifs, sub-superficiels, intermédiaires et éventuellement profonds, et les minimums qui les séparaient, la réalité de l'entraînement en profondeur est confirmée aisément par les valeurs concordantes des variables affectées par l'activité biologique des peuplements. C'est en particulier le cas pour la biomasse du pico- et du nano-plancton, le pourcentage de chlorophylle *a* active, la saturation en oxygène dissous, l'activité respiratoire, le rapport protéines/glucides, etc..... L'**entraînement** est certainement **rapide**, comme le suggère la composition taxinomique et chimique; la durée écoulée depuis le moment où le peuplement a quitté la profondeur de compensation semble pouvoir être évaluée.

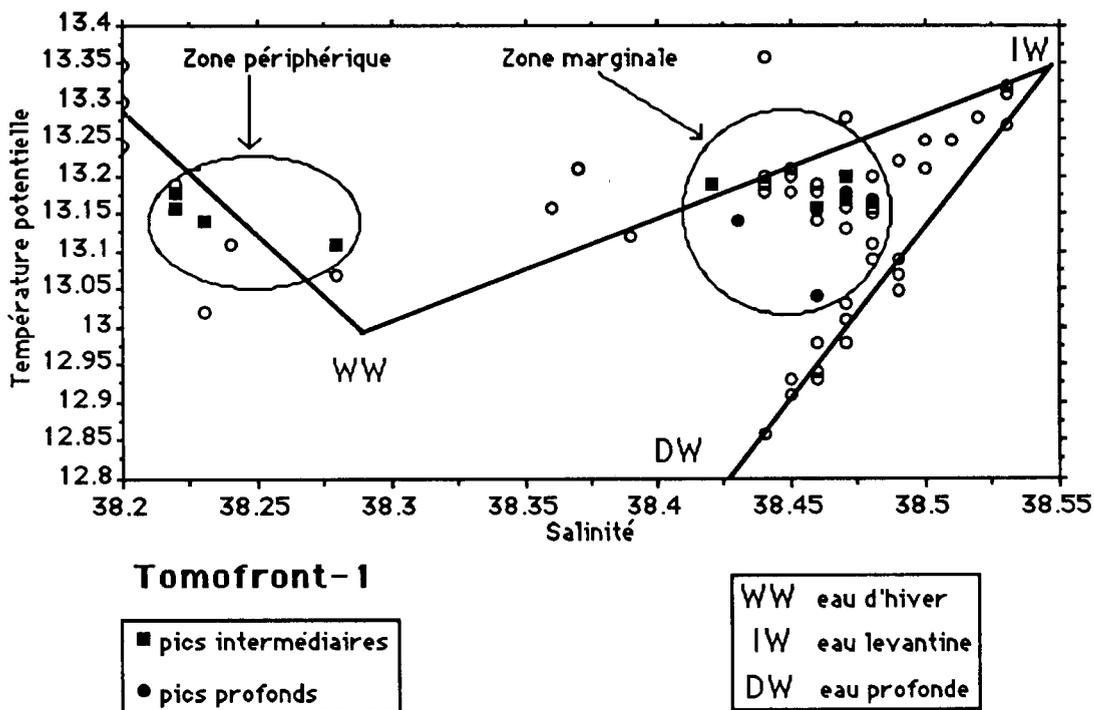


Fig. 6 Diagramme T/S des prélèvements à la bouteille. Les entraînements intermédiaires et profonds de la biomasse appartiennent aux deux cellules de circulation verticale.

Opération Frontal

Conformément à l'hypothèse initiale, les immersions des pics profonds croissent vers la côte en zone marginale mais la visualisation précise de la plongée oblique sur une coupe n'est pas possible dans l'état actuel de l'échantillonnage. En effet, avec les sorties de 10 heures imposées par l'utilisation des navires côtiers, la réunion d'un ensemble de stations échantillonnées des jours différents se heurte à l'effet des oscillations de la position du front par rapport à la côte. Ceci imposera à l'avenir des opérations spécifiques de cartographie au moyen de profils verticaux rapides en des stations très rapprochées (500 m), ou l'utilisation en continu du système hydro-électrique tracté (SHET) déployé à bord de plus grands navires.

Heureusement un résultat très encourageant a été obtenu par sondage acoustique à la fréquence de 50 KHz, continu entre 4 et 28 milles de la côte, et répété à chaque sortie à l'aller comme au retour. Les coïncidences avec les structures hydrologiques sont évidentes (Fig. 7), bien qu'encore assez imprécises en raison de l'espacement trop grand des stations hydrologiques (1 ou 2 milles, pourtant !). Les épaissements du réflecteur superficiel (0 à 100 m) semblent correspondre très précisément à des convergences (à 28, 16, 12 et 8 milles), avec, dans le cas des convergences les plus côtières, la présence de langues plongeantes vers la côte, conformément au schéma théorique. Des réflecteurs spécifiques intermédiaires (200-300 m) se localisent dans les zones de maximum de biomasse sub-superficielle, près du système D1-C et de D2 ou la faune méso-planctonique et la macrofaune nectonique sont abondantes et variées. Au contraire, l'absence de réflecteur intermédiaire est associée à un seston pauvre et à la rareté des macro-organismes (confirmé par les plongées de la "Cyana" lors de "Migrigel 2"). De plus, le réflecteur profond (350-500 m) est aminci ou interrompu dans les zones pouvant correspondre aux origines profondes des divergences.

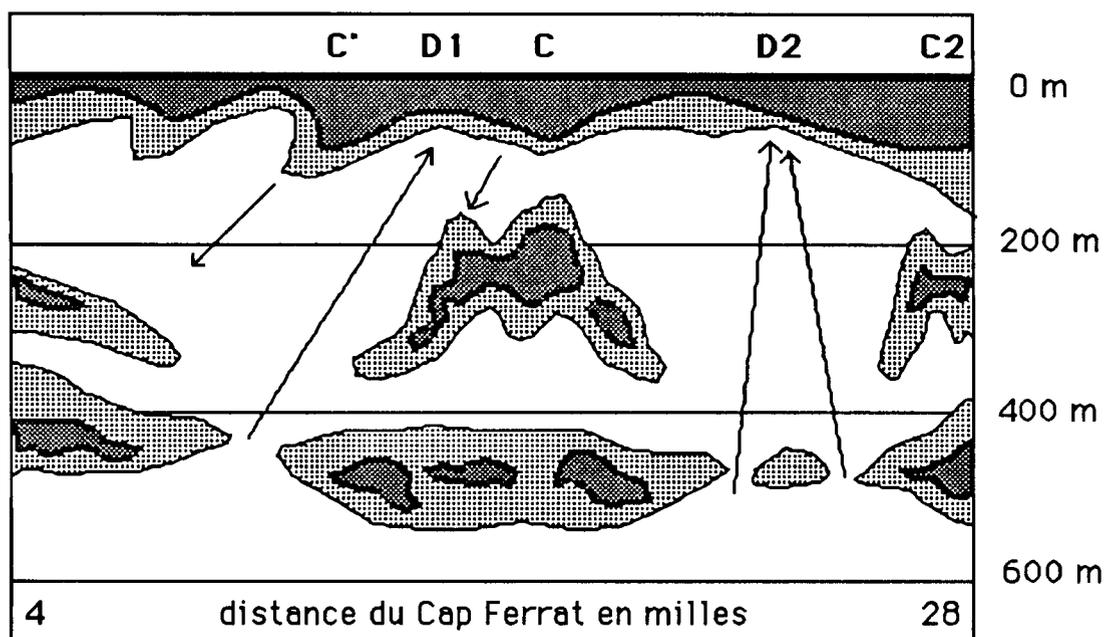


Fig.7 Exemple de coupe acoustique à 50 KHz avec position des divergences et des convergences (Tomofront 1 du 14 avril 1988)
Document non publié, UA 716, Th. Baussant et S. Dallot.

1989 Tomofront 2

Cartographie des structures hydrologiques et acoustiques

La connaissance détaillée de la structure tri-dimensionnelle des fronts est absolument nécessaire pour pouvoir mieux comprendre leur dynamique physique et biologique. Les pas d'échantillonnage suivant des radiales perpendiculaires aux fronts doivent être faibles, compte tenu de la complexité et de la finesse des structures. Par exemple, des travaux récents sur le front polaire utilisent des systèmes ondulants de 400 m de période sur des distances horizontales cent fois supérieures. Compte tenu de l'appareillage dont nous disposons, la description rapide du front liguro-provençal pourra être effectuée jusqu'à 800 m de profondeur pour les paramètres acoustiques et hydrologiques (température, salinité et oxygène), jusqu'à 500 m pour la fluorescence *in vivo* de la chlorophylle *a*. La structure radiale de la zone frontale sera étudiée à petite échelle, la structure tridimensionnelle sur les régions plus étroites de la convergence principale. Dans une première étape, les concordances entre l'hydrologie et les images acoustiques devront être validées avec beaucoup de précision. Une meilleure identification immédiate des zones-clés du point de vue de la circulation verticale doit être obtenue. Un important effort sera fait pour le traitement et la représentation des données en trois dimensions dans un champ de courant fortement anisotrope. Un essai du profileur de courant du LODYC est prévu pour la campagne d'avril et apportera des indications précieuses sur l'apport potentiel de ce type de méthode dans l'étude des fronts.

Traceurs de masses d'eau et de processus

La correspondance entre les structures acoustiques et hydrologiques permet d'envisager une stratégie d'échantillonnage plus efficace, pilotée en temps réel par l'acoustique au même titre que par les autres mesures réalisées en continu à bord. Les stations "typiques" des cellules de circulation verticale pourront ainsi être reconnues et étudiées en détail sur la verticale.

Les traceurs des masses d'eaux advectées et des processus biologiques qui s'y déroulent sont potentiellement très nombreux. Il s'agit surtout ici de sélectionner un certain nombre de substances d'après le degré de facilité et de fiabilité de l'obtention de mesures interprétables sans ambiguïté. Dans les divergences, les flux ascendants sont bien caractérisés par les paramètres (nutrilites et oxygène, notamment) mesurés en continu par le SHET. On abordera le dosage des substances humiques et fulviques remontées dans les divergences, résidus "perdus" de la dégradation bactérienne, mais dont on sait expérimentalement qu'elles produisent en surface par photo-dissociation des composés organiques directement assimilables par les micro-organismes et les algues. D'autres classes de substances fluorescentes déjà testées lors de "Tomofront 1" seront étudiées plus en détail, d'une part comme traceurs de populations phytoplanctoniques et d'autre part comme indice du vieillissement de la matière organique.

L'étude des variations spatiales des substances organiques particulières et dissoutes (pigments, lipides, glucides, acides aminés et vitamines) sera poursuivie à l'aide des techniques modernes de séparation et d'identification, particulièrement en HPLC, par la méthode "Iatroscan" pour les lipides. Des indices spécifiques de la production de certains groupes, de l'utilisation de la matière organique (dégradation bactérienne ou grazing des micro-hétérotrophes et des métazoaires) et de transfert dans tout le réseau trophique peuvent en être déduits.

Utilisation de la matière particulaire par le plancton

Les diverses étapes de l'utilisation du phytoplancton et de la matière particulaire par les décomposeurs, les herbivores et les détritivores seront identifiées en fonction de la profondeur. On analysera en détail les micro-organismes responsables des activités respiratoires par des séparations suivant la taille au moyen de filtrations différentielles. On souhaite aussi connaître la part revenant aux autotrophes par rapport aux hétérotrophes en utilisant un cytomètre de flux.

Le vieillissement de la matière particulaire influençant sa qualité nutritionnelle, on doit s'attendre à des utilisations quantitativement et qualitativement différentes suivant la profondeur et le degré d'activité du système divergence-convergence. Nous utiliserons essentiellement une méthode expérimentale en comparant la matière organique du matériel particulaire ingérable par les filtreurs et la matière organique de leurs fécès obtenus après des incubations brèves (dans le cas des Appendiculaires, cette technique a été mise au point durant "Tomofront 1"). Les comparaisons porteront sur la couche superficielle du maximum de biomasse ainsi que sur les

Opération Frontal

couches profondes des cellules de circulation frontale et marginale. On abordera aussi l'étude de la communauté des filtreurs profonds (Salpes et surtout Appendiculaires géants).

A un autre niveau de la chaîne trophique, les Euphausiacés, en particulier au large *Meganyctiphanes norvegica*, espèce à large répartition géographique, constituent une biomasse migrante importante exploitée par la faune néctonique. Divers indices nutritionnels instantanés telle l'activité des enzymes digestifs, ou intégrateurs des conditions rencontrées à différentes échelles de temps, seront employés: stades de mue et stades de reproduction surtout. Nous continuerons à prendre en compte la présence, constante et avec des densités élevées, des Cétacés en zone frontale comme des indicateurs de biomasse néctonique et micronéctonique subsuperficielle et profonde. L'opération de fixation d'une balise Argos sur un baleinoptère ("Argocet") va être reprise en avril: l'hypothèse testée est que, à moyen terme, les déplacements des Cétacés correspondent à ceux de leurs proies.

Moyens mis en œuvre en 1989

Les opérations prévues en 1989 font appel aux deux navires côtiers de la façade méditerranéenne, le "Korotneff" et le "Georges-Petit". Le premier sera surtout utilisé pour les opérations de cartographie et de mesures en continu, le "Georges-Petit" pour les stations de longue durée avec prélèvements d'eau par bouteilles et pompage, les pêches dans la colonne d'eau et l'échantillonnage par le filet à nappes. Deux types d'opérations sont envisagés:

- des sorties répétitives durant tout ou partie de l'année pour l'étude des évolutions saisonnières (une ou deux fois par mois),
- des opérations intensives permettant la mise en œuvre de l'ensemble des moyens de mesure et de prélèvement.

soit, au total, une centaine de jours de mer dans l'année.

Tomofront 2 rassemble une trentaine de participants, dont 18 de Villefranche, 9 français extérieurs à Villefranche et 4 étrangers. Comparé à "Tomofront 1", certains thèmes sont renforcés: la chimie des lipides (M. Goutx et J.-C. Marty) et l'écophysiologie du zooplancton (S. Poulet, H. Claustre et G. Gorsky).

La venue prochaine d'un électronicien à Villefranche facilitera l'utilisation et la maintenance des principaux appareillages qui seront utilisés à la mer:

- une sonde Seabird avec capteurs de pression, température, fluorescence et conductivité.
- un filet à nappes Bioness avec les mêmes paramètres, 2 flux-mètres et commandes de fermeture.
- un système d'acquisition de données: carte d'acquisition et Compaq 386.
- un sondeur bifréquence Koden à 15 et 50 Khz.
- un sondeur Biosonics à 37 et 120 Khz.
- des enregistreurs, des pompes immergées, etc....

De plus, des prototypes doivent être mis en chantier au cours de l'année:

- ensemble profileur-vidéo immergeable pour le méso-zooplancton (dispositif plus léger et plus performant que la caméra Edgerton).
- sonde acoustique multicanaux pour la détection du zooplancton: 500 Khz à 3 Mhz.

1990 Tomofront 3

Jusqu'ici, l'approche pluridisciplinaire choisie, la diversité et la complexité des engins utilisés nous ont contraints à morceler les sorties sur des navires côtiers. Nous concluons donc le programme "Tomofront" par une campagne intensive qui rassemblera l'essentiel des compétences et des moyens disponibles, ceci à une période de l'année où la poussée phytoplanctonique printanière commence à être exploitée par les maillons supérieurs du réseau trophique. A cette fin, le "Suroît" (13 scientifiques à bord) a été demandé.

Lors de Tomofront 3 sera abordée l'étude de la production, du transport et de l'utilisation de la matière organique dans une cellule de circulation verticale du type divergence-convergence. La cartographie précise de ce système sera réalisée avec diverses stratégies

d'échantillonnage complémentaires : trajets en peignes et en octogones pour les continus de surface, blocs de radiales serrées pour des reconstitutions 3-D.

La disponibilité immédiate à bord de données multiparamétriques facilite le choix des stations les plus caractéristiques du phénomène. On étudiera en détail la répartition sur la verticale de la matière organique produite, de ses changements de composition chimiques et de valeur alimentaire, des transferts intervenant dans le réseau trophique pélagique: autotrophes, boucle microbienne, mésoplancton, filtreurs gélatineux et micronecton.

Les aptitudes de la biomasse autotrophe à fixer photosynthétiquement le carbone, tant dans les zones superficielles les plus productives du front qu'en profondeur dans la convergence principale, seront estimées par la courbe photosynthétique obtenue suivant la méthode du ^{14}C en incubateur sous divers éclairagements. On recherchera les échelles de temps des réponses des populations algales aux variations du milieu (éclairage, sels nutritifs) dans différents contextes hydrodynamiques.

Les stratégies prévues comprennent deux phases complémentaires qui correspondent aux deux parties de la campagne.

Cartographie multiparamétrique suivant des "peignes", des "octogones" et des radiales serrées

La description multiparamétrique en continu sera effectuée à l'aide du SHET opérant à 5 nœuds sous la thermocline, avec adjonction d'une bathysonde supplémentaire pour la mesure du gradient vertical de densité. Des mesures acoustiques simultanées à 37 et 120 KHz permettront d'obtenir des coupes jusqu'à 800 m et 200 m respectivement.

Les trajets seront du type "peigne", bien adapté au repérage des méandres du front, avec des radiales de 15 milles perpendiculaires au front, séparées par des intervalles de 5 milles; l'extension minimale parallèlement à la côte sera de 30 milles pour des continus de 24 heures. Des trajets en pavages octogonaux seront réalisés de la même manière avec capture du zooplancton par filet-pompe pour l'étude de la répartition des peuplements en fonction de la structure physique. Ce procédé permet d'obtenir des densités de mesure voisines dans 8 directions du plan et optimisent ainsi l'emploi des méthodes numériques de cartographie objective en situations fortement anisotropes. La surface utile explorée par unité de temps à l'aide d'octogones est évidemment plus faible que celle des peignes et elle exige la précision maximale dans le pilotage et le positionnement du navire. Peignes et octogones réalisent une description de la zone étudiée qui est bi-dimensionnelle pour les paramètres mesurés par les sondes tractées, mais tri-dimensionnelle pour l'acoustique.

Des radiales parallèles serrées associant profilages verticaux (SHET), vidéo (pour l'étude de la répartition verticale du mésozooplancton) et sondage acoustique étendent l'étude 3-D à un nombre maximal de variables. L'espacement des stations des radiales perpendiculaires aux fronts sera faible (0,5 mille), compte tenu de la complexité et de la finesse des structures. La structure radiale de la zone frontale sera étudiée à petite échelle, la structure 3-D sur des régions plus étroites de la convergence principale. Dans le but de confirmer et de comprendre les concordances entre hydrologie et images acoustiques, on tentera une identification immédiate des zones-clefs du point de vue de la circulation verticale, ce qui permettra aussi le positionnement efficace des stations de prélèvement de la seconde partie de la campagne.

Matière organique et des peuplements associés dans une cellule de circulation verticale

Les stations seront choisies en fonction du stade d'évolution de l'écosystème: peuplement jeune sub-superficiel en zone marginale, peuplements plus âgés de la convergence principale et dans les couches obliques; on tentera de suivre ces derniers jusqu'à 500 m de profondeur par le repérage des maximums relatifs de fluorescence. Les stations seront de 24 heures et comprendront, de nuit et de jour:

- profil bathysonde jusqu'à 1000 m, fluorescence jusqu'à 500 m, éclairage pour les stations de jour.
- profil SHET et vidéo jusqu'à 200 m.
- prélèvements à la bouteille pour la chimie de la matière particulaire et le microplancton; les niveaux les plus profonds seront déterminés par les observations acoustiques.
- série de bouteilles Go-Flo pour les mesures de production primaire en incubateur.

Opération Frontal

- prélèvements complémentaires de grands volumes dans les couches enrichies en matériel particulaire et dans les niveaux encadrants plus pauvres.
- pêches de plancton et de micronecton au filet à nappe; une partie des récoltes sera mise en incubation pour l'étude de la composition chimique des fèces, le reste sera conservé pour la détermination spécifique et la mesure de la biomasse par classe de tailles.

Tabl. 2 Liste des participants à la campagne Tomofront 3

Equipe embarquée

| | |
|---|---------------------------------------|
| Baussant, Th. (Villefranche) | Acoustique |
| Bucholtz, F. (Kiel) | Physiologie micronecton |
| Claustre, H. (Villefranche) | Pigments |
| Copin, C. (Villefranche) | CO ₂ |
| Cuzin-Roudy, J. (Villefranche) | Physiologie micronecton |
| Dallot, S. (Villefranche) | Chef de projet; écologie numérique |
| Denis, M. (Marseille) | E.T.S., O ₂ |
| Gasser, B. (Villefranche) | Profileur vidéo |
| Goffart, A. (Liège) | Nutrilites |
| Gorsky, G. (Villefranche) | Ecophysiologie plancton filtreur |
| Gostan J. (Villefranche) | Production primaire |
| Goutx, M. (Marseille) | Lipides |
| Ibanez, F. (Villefranche) | Filet-pompe, cartographie |
| Picheral, M. (Villefranche) | Appareillage |
| Poulet, S.A. (Roscoff) | Ecophysiologie zooplancton |
| Prieur, L. (Villefranche) | Chef de mission; structures physiques |
| Raunet, J. (Villefranche) | Informatique |
| Tailliez, D (Villefranche) | Electronique, acoustique, etc. |
| X [poste Ingénieur à pourvoir] (Villefranche) | Electronique, acoustique |

Intervenants à terre ou participants potentiels:

| | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Birrien, J.-L. (Roscoff) | Production primaire |
| Carré, C. (Villefranche) | Plancton carnivore |
| Conway, D. (Plymouth) | Nutrition minérale du phytoplancton |
| Etienne, M. (Villefranche) | Informatique |
| Fenaux, L. (Villefranche) | Méropplancton |
| Fenaux, R. (Villefranche) | Taxinomie plancton filtreur |
| Goy, J. (Paris) | Méduses |
| Hecq, J.-H. (Liège) | Pigments |
| Kim (Marseille) | Pico- et nano-plancton |
| Kuntz, S. (Plymouth) | Zooplancton |
| Martin-Jézéquel, V. (Roscoff) | Phytoplancton |
| Marty, J.-C. (Villefranche) | Lipides |
| Momzikoff, A. (Paris) | Traceurs fluorescents, mat. organique |
| Rassoulzadegan, F. (Villefranche) | Boucle microbienne |
| Sardou, J. (Villefranche) B | Micronecton |
| Seguin, G. (Nice) | Copépodes |
| Viale, D. (Corte) | Mégalofaune (Cétacés) |
| Voelksen, R. (Oldenburg) | Larves de Crustacés |
| Williams, B. (Plymouth) | Zooplancton |

Programme "Almofront" 1991-1992

Une nouvelle étape de l'opération Frontal est ici entreprise: étudier un front océanique permanent, en équilibre géostrophique et contrôlant la dynamique du système pélagique d'une vaste région. Le choix s'est porté sur le front Almeria-Oran, dans le sud de la Méditerranée Occidentale.

Le site est constitué par la région située entre Almeria (Espagne) et Oran (Algérie) et les prolongements vers l'est du courant algérien. Ce courant d'origine atlantique a la forme d'un jet géostrophique; il est bordé sur la gauche par un front qui, entre Almeria et Oran, est sensible jusqu'à 300 m de profondeur. Il s'agit donc d'un front où l'écoulement de base est en équilibre géostrophique. Tout permet de penser qu'il est permanent, malgré des variantes dans son tracé géographique. La discontinuité horizontale de densité est au minimum de $0,4 \text{ kg. m}^{-3}$ et peut être supérieure à 1 kg. m^{-3} sur 5 à 10 km. Les deux masses d'eaux qui s'affrontent sont normalement oligotrophes mais peuvent donner lieu à des biomasses chlorophylliennes très élevées ainsi que, probablement, à des anomalies positives de la production primaire.

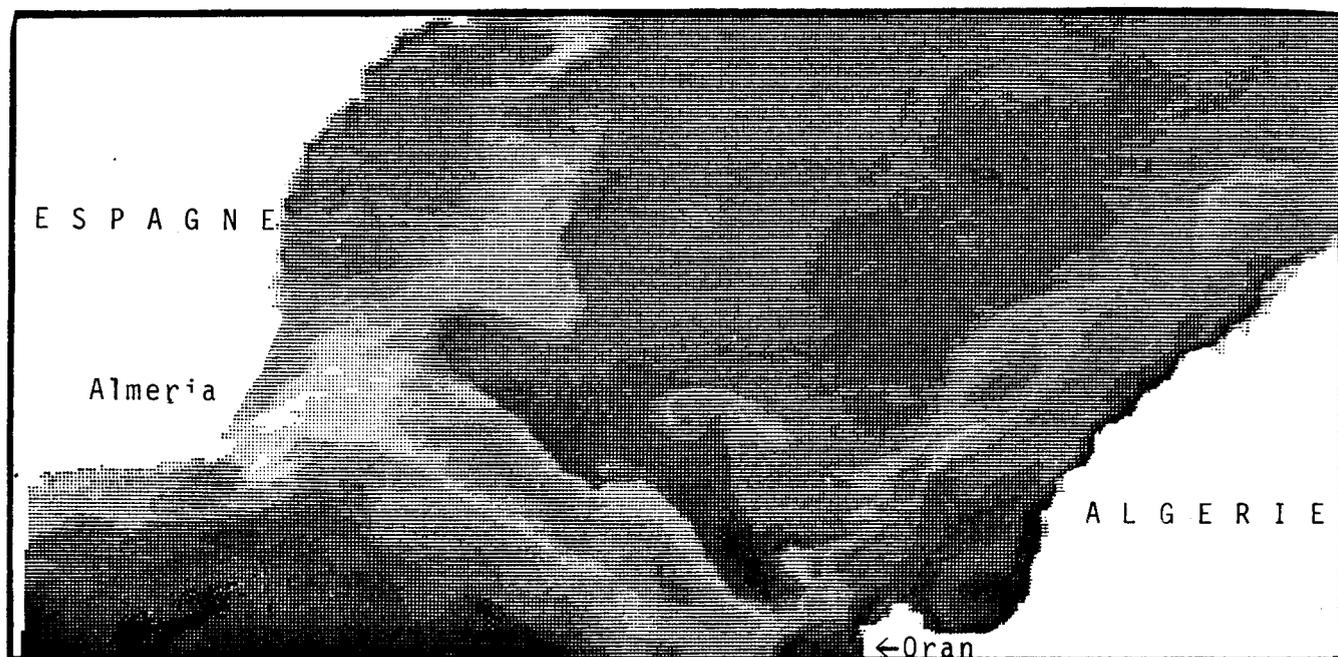


Fig. 8 Cartographie de la température de surface de la Méditerranée montrant, le 1^{er} juin 1984, le front Almería-Oran
Cliché NOAA/AVHRR traité par I. Taupier-Letage

La reconnaissance de ce front date de 1985-86, première année de l'opération internationale WMCE (Western Mediterranean Circulation Experiment) (Falkowski, 1988, *Nature*, 335: 205), (Lohrenz *et al.*, 1988, *Nature*, 335: 245-247; *Deep-Sea Res.* 35: 793-810) et de Tintore *et al.* (*J. phys. Oceanogr.*, 18: 1384-1397). Cependant, l'échantillonnage n'a pas encore été réalisé selon une échelle satisfaisante, les processus physiques (courantologie, entretien du jet, variations saisonnières) sont seulement esquissés, la modélisation reste inadaptée, l'étude des conséquences biologiques demeure ouverte.

Le front Almeria-Oran présente donc actuellement un ensemble d'avantages logistiques :

- son accessibilité laisse envisager une couverture saisonnière satisfaisante.
- il est quasi permanent, malgré quelques vicissitudes dont certaines sont déjà identifiés.

Opération Frontal

- son origine n'est pas ambiguë: l'entrée d'eau atlantique à Gibraltar crée un jet qui traverse la Mer d'Alboran et se trouve en équilibre géostrophique avec un front sur le bord gauche (cyclonique) de l'écoulement.
- il est donc caractéristique des fronts océaniques majeurs, associés à des jets géostrophiques.
- il est "peu connu, mais pas trop", c'est-à-dire qu'un progrès majeur peut être obtenu si l'on met en œuvre de nouveaux moyens d'observation (ADCP, SHET, filet à nappes, télédétection) et une stratégie véritablement adaptée à l'étude des fronts: respect des échelles des processus dans l'observation comme dans la modélisation.
- les variations relatives de température des eaux méditerranéenne et atlantique modifient, au cours de l'année, les gradients de densité (sans changer leur signe), créant ainsi autant de situations hydrodynamiques différentes et, par là, autant d'écosystèmes différents.
- enfin cette région, située aux portes de la Méditerranée, est le site optimal pour l'évaluation des entrées et des sorties. En effet, les écoulements semblent mieux définis et moins turbulents qu'à Gibraltar, se font sous forme de jet et sont identifiables par leurs caractéristiques hydrologiques. Le bilan peut donc être précisé sans qu'il soit besoin de multiplier le nombre des points de mesures.

Le front Almeria-Oran offre donc un cas d'école de même type mais d'accès plus aisé que les grands fronts de l'Atlantique ou de la Méditerranée; mais il débouche aussi sur l'application concrète d'une surveillance de la Méditerranée à l'échelle globale.

Ce programme "Almofront", nécessitant la mise en œuvre de gros moyens pendant une durée minimale de l'ordre de deux années, sera international. A cette fin, Frontal organise un atelier à Paris en juin 1989. Une vingtaine de scientifiques, essentiellement Britanniques, Espagnols et Américains, ont répondu à notre invitation, certaines réponses étant faites au nom d'une équipe; toutes les disciplines sont couvertes, y compris la modélisation. On peut raisonnablement espérer que des navires de différentes nationalités et des équipes pourvues de moyens complémentaires pourront s'engager sur ce site.

Quant à la participation française, elle se fera sur la base de la compétence acquise dans précédemment, ce qui permettra de couvrir les aspects suivants:

- description multiparamétrique des structures à petite échelle, aux fins d'identification de la circulation verticale et de ses effets sur la production.
- devenir de la matière organique en profondeur dans la zone de convergence frontale, celle-ci paraissant jouer le rôle de sillon et de transfert accéléré en profondeur.
- caractérisation du réseau trophique dans la zone frontale et dans les zones adjacentes.
- rôle de la boucle microbienne dans les différentes zones.

La localisation des prélèvements sera assurée grâce au SHET, c'est-à-dire qu'elle est effectuée par rapport aux masses d'eau. Il sera en outre indispensable de disposer d'un profileur de courant à effet Doppler afin de cerner l'environnement dynamique des masses d'eau et associer les structures dynamiques aux structures physique, chimiques et biologiques.

Côté français, deux campagnes d'environ un mois chacune sur un navire apte à accueillir une équipe pluridisciplinaire (type "Charcot" ou NOF) seront nécessaires en 1990-91. Ces deux campagnes devraient couvrir, l'une une situation automnale, l'autre une situation hivernale, ces deux périodes étant celles des contrastes extrêmes. Chaque campagne pourrait être divisée en deux parties: l'une à dominante descriptive et cartographique, privilégiant des sections de front, l'autre mettant l'accent sur le fonctionnement du réseau trophique.

Rappel du calendrier de l'opération FRONTAL pour 1988-1992

| 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 |
|--------------------------------|------------------------|---------------------------------|--------------------|------|
| Front de l'embouchure du Rhône | Front liguro-provençal | | Front Almeria-Oran | |
| "PANACHE" | fin de "Panache" | "TOMOFRONT 3" | "ALMOFRONT" 1 et 2 | |
| "Tomofront 1" | "TOMOFRONT 2" | Appui à "Gyrocyane" | | |
| "Prépot" | | Participation à "Médiproduct 6" | | |
| "Azomix" | | | | |
| Participation à "Ecofront" | | | | |

1988 a été consacré à l'étude du front rhodanien ("Panache"). 1988 était également la première des trois années de recherches sur le front liguro-provençal : "Tomofront 1". Par ailleurs, deux opérations de moindre envergure se sont déroulées: l'une sur le front du Pas-de-Calais ("Prépot"), l'autre au large de Roscoff ("Azomix"). A signaler, au titre des collaborations internationales, la participation de deux membres de Frontal à la campagne belge "Ecofront" en Mer de Norvège.

1989 voit se terminer les opérations à la mer de "Panache". L'essentiel des efforts est porté sur "Tomofront 2".

1990 devrait voir la fin du programme Tomofront avec la réalisation de "Tomofront 3" sur un navire hauturier. Quelques membres de Frontal participeront à la campagne "Médiproduct 6" organisée par le GDR "Production Pélagique et Phénomènes Physiques", ceci au titre de la préparation d'"Almofront" dans la même région. "Gyrocyane", campagne d'étude du plancton par plongée, organisée par la Station Zoologique de Villefranche devrait également se dérouler.

1991 et 1992, verra les efforts se concentrer sur la participation française à l'opération internationale sur le front Almeria-Oran ("Almofront").

Principaux moyens à la mer requis

- 1990 navire type "Suroit": 15 jours en avril.
- 1991 navire de type "Charcot" ou "NOF": 35 jours.
- 1992 navire de type "Charcot" ou "NOF": 35 jours.

La diffusion de l'information dans Frontal

Les chercheurs français qui se sont reconnus comme frontologues sont assez nombreux: 68 "inscrits", 60 "actifs" en 1988. Il importait, pour la première année de l'opération, de leur permettre de se connaître mutuellement et de constituer un pool commun d'informations et de concepts. A cette fin, plusieurs moyens ont été mis en oeuvre dès 1988:

- constitution d'un **Annuaire-Bibliographie**, dont une 3^{ème} édition est en préparation.
- diffusion d'un **Courrier interne**, support de quelques pages et de réalisation rapide, de périodicité irrégulière: 4 numéros parus.
- organisation de **Tables Rondes** suivies de la diffusion du compte-rendu.
 - Paris, mars 1988: Echelles spatio-temporelles pour les phénomènes physiques, chimiques et biologiques dans les zones frontales: 43 participants.
 - Luminy, septembre 1988: Techniques et stratégies d'échantillonnage dans les zones frontales: 40 participants.

La troisième table ronde aura lieu en juin 1989 à Brest sur le thème: Devenir de la production dans les zones frontales: processus physiques, consommation, sédimentation, dégradation, exportation.

Enfin, une **publication de synthèse** intitulée "Les sites-ateliers du programme national FRONTAL" va être soumise à *Oceanologica Acta*.

Une liste des publications produites depuis 1986 termine le présent rapport. Elle se décompose en:

- 24 publications "A" (audience internationale et "référés").
- 11 publications "B" (audience nationale, avec ou sans "référés").
- 13 publications "C" (résumés, rapports, thèses, etc...).

Publications depuis 1986

- "FRONTAL", 1988. Table ronde, Paris, mars 1988 : "Echelles spatio-temporelles pour les phénomènes physiques, chimiques et biologiques dans les zones frontales" (organisateur: P. Morin), 25 p.
- "FRONTAL", 1988. Table ronde, Marseille-Luminy, septembre 1988: "Techniques et stratégies d'échantillonnage en zones frontales" (organisateur : F. Lochet), 22 p.
- "GREPMA" 1988. Satellite (AVHRR/NOAA-9) and ship studies of a coccolithophorid bloom in the western English Channel. *Marine Nature* 1 (1) 1-14.
- "GREPMA" 1988. A physical, chemical and biological characterization of the Ushant tidal front in the summer of 1982. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* 73 (5) 511-536.
- BARILLIER, A. 1988. Distribution de la matière organique au niveau du front liguro-provençal. D.E.A. *Océanogr. Biol., Univ. P&M Curie*, 2 vol., 36 p. + annexe + 37 p.
- BÉTHOUX, J.P., PRIEUR, L. & BONG, J.H. 1988. Le courant ligure au large de Nice. In "Océanographie méditerranéenne", colloque intern. CNRS, H.-J. Minas & P. Nival (Eds), *Oceanol. Acta n° spéc.* 1988 : 59-67.
- BIRRIEN, J.-L. 1987. Cycles des variations des éléments nutritifs et du phytoplancton en baie de Douarnenez et dans les secteurs adjacents : importance du front côtier de l'Iroise. Thèse Univ. Bretagne occid., 160 p.
- BIRRIEN, J.-L., LE CORRE, P. & VIDEAU, C. 1987. Développement de *Gyrodinium aureolum* Hulbert en baie de Douarnenez et en mer d'Iroise pendant l'été 1983. In H. -J. Ceccaldi & G. Champalbert (Edit.), "Actes du colloque pluridisciplinaire franco-japonais d'océanographie" (2 - Eaux colorées), Marseille, 1985, 51-63.
- BOUCHER, J. 1987. Déterminisme et dynamique de la répartition spatiale des populations de Copépodes des zones de résurgence côtière du N.E. Atlantique et du front liguro-provençal. Thèse Univ. Paris VI, 1 : 185 p.; 2 : 274 p.
- 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 front. *J. mar. Res.* 45 (1) 133-173.
- BRYLINSKI, J.-M. 1986. Méthode de détection des gradients faunistiques : les courbes FCT. Répartition du zooplancton au large du cap Gris-Nez (France) : premiers résultats. *Oceanol. Acta* 7 (3) 315-322.
- BRYLINSKI, J.-M., DUPONT, J., QUISTHOUDT, C. & JANQUIN, M.A. 1986. Fronts et courants de marée dans le détroit du Pas-de-Calais (résumé). *J. Rech. océanogr.* 11 (1) 5.
- BRYLINSKI, J.-M. BENTLEY, D. & QUISTHOUDT, C. 1988. Discontinuité écologique et zooplancton (Copépodes) en Manche orientale. *J. Plankton Res.* 10 (3) 503-513.
- DALLOT, S.; GOY, J. & CARRÉ, C. Peuplements carnivores macroplanctoniques et structures productives en Méditerranée occidentale. *Oceanol. Acta* (sous presse).
- DALLOT, S., GOY, J. & DURAND, J. 1988. Biomass spectra and zooplankton assemblages along the Algerian current (Abstract). In P.E. La Violette (Ed.), "Western Mediterranean Circulation Experiment , symposium and workshop, January 1988", p. 67. Bay St. Louis, Mississippi.
- DUPOUY, C., REBERT, J.P. & TOURÉ, D. 1986. Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner pictures of phytoplankton growth on an upwelling front in Senegal. In J.C.J. Nihoul (Edit.), "Marine interfaces ecohydrodynamics", Elsevier oceanogr. Ser. 42 : 619-644.
- FRONTIER, S. Les fronts en tant qu'écosystèmes de contact. In "Colloque international du CNRS sur la Méditerranée" Villefranche 1985 (sous presse).
- FRONTIER, S. 1986. Studying fronts as contact ecosystems. In J.C.J. Nihoul "Marine interfaces ecohydrodynamics", Elsevier oceanogr. Ser. 42 : 55-66.
- GENTILHOMME, V. 1988. Contribution à l'étude de l'interface eaux côtières/eaux du large en Manche orientale : données sur la production primaire. D.E.A. Univ. Aix-Marseille II - Station Mar. Wimereux, 43 p.
- HOLLIGAN, P.M. & VIOLLIER, M. 1986. Celtic Sea, Bay of Biscay. In : W.A. Hovis (Edit.), "Nimbus-7 CZCS Coastal Zone Color Scanner imagery, level II". NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, USA, 75-77.
- IBANEZ, F. & BOUCHER, J. 1987. Anisotropie des populations zooplanctoniques dans la zone frontale de mer Ligure. *Oceanol. Acta* 10 (2) 205-216.
- JACQ, E. 1986. Etude des peuplements bactériens planctoniques dans deux écosystèmes côtiers de Bretagne. La rade de Brest et la zone frontale d'Ouessant. Thèse océanogr. Univ. Bretagne occid. 127 p.
- JACQ, E. & PRIEUR, D. 1986. Les associations bactéries-matière particulaire en milieu pélagique côtier : exemples de variations spatiales et temporelles. In "2ème colloque international de bactériologie marine", Brest 1984. *Publ Ifremer Actes Colloques* 3 : 227-234.

- KIRCHMAN, D., VAN WAMBEKE, F., SOTO, Y. & BIANCHI, M. Bacterial production in the Rhône river plume : effect of mixing on relationships among microbial assemblages. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* (sous presse)
- LE FEVRE. 1986. Aspects of the biology of frontal systems. *Adv. mar. Biol.* 23 : 163-299.
- LE FEVRE, J. & FRONTIER, S. 1988. Influence of temporal characteristics of physical phenomena on plankton dynamics as shown by North-West european marine ecosystems. In B.J. Rothschild (Edit.) "Toward a theory of biological physical interactions in the world ocean", *Bonas 1987*, pp. 245-272. Kluwer Acad. Press).
- LE FEVRE, J., LE CORRE, P. & SERPETTE, A. 1988. Temporal characteristics of hydrodynamic systems as controls of pathways in pelagic food webs (Abstract). *Eos*, 69 : 1113.
- LEGENDRE, L. & LE FEVRE, J. Are hydrodynamical singularities important in the global production of oceans ? In "Productivity of the ocean, present and past". Dahlem Conf. Berlin 1988 (sous presse).
- LOCHET, F. 1987. Etude de la structure frontale du Rhône grâce à la mesure en continu de descripteurs hydrobiologiques. In "Colloque international d'océanologie. Ecosystèmes de marges continentales." Perpignan 1987. CNRS, CEE, CIESM, Monaco, p.27.
- MAILLARD-QUISTHOUDT, C. 1988. Production primaire phytoplanctonique. Variations spatio-temporelles au large de Dunkerque. *J. Rech. océanogr.* 13 (1) 53-54.
- MASSON, M. 1986. Perspectives offertes en mer Ligure par l'exploitation des données des sondeurs acoustiques (Résumé). *J. Rech. océanogr.* 11 (4) 105.
- MAZÉ, R., CAMUS, Y. & LE TAREAU, J.-Y. 1986. Formation de gradients thermiques à la surface de l'océan, au dessus d'un talus, par interaction entre les ondes internes et le mélange dû au vent. *J. Cons. perm. int. Explor. Mer* 42 (3) 221-240.
- MINAS, H.-J. & BONIN, M.-C. 1988. Oxygénation physique et biologique de la Méditerranée nord-occidentale en hiver et au printemps. In H.-J. Minas & P. Nival, "Océanographie pélagique méditerranéenne". *Oceanol. Acta*, n° spéc. "1988": 123-132.
- PRIEUR, L. 1986. Cross-frontal circulation and production in the Ligurian Sea front (abstract). *Eos, Trans. amer. geophys. Union* 67 : 981.
- PRIEUR, L. Flow characteristics in the Ligurian Sea during May-June 1985. *Rapp. P.-v. C.I.E.S.M., Athènes 1988* (sous presse).
- PRIEUR, L. & LEGENDRE, L. 1988. Oceanographic criteria for new phytoplankton production. In B.J. Rothschild (ed.), "Toward a theory on biological-physical interactions in the world ocean", pp. 71-112. NATO conference, Bonas (France) 1987. Kluwer Acad. Publ.
- PRIEUR, L., RAIMBAULT, P. & TAILLEZ, D. 1988. Very high biomass of phytoplankton in a frontal zone near the Algerian coast at 4° 40'E. In P.E. La Violette (Ed.), "Western Mediterranean Circulation Experiment, Symposium and workshop, January 1988", p. 65. Bay St. Louis, Mississippi.
- QUISTHOUDT, C. 1987. Production primaire phyto-planctonique dans le détroit du Pas-de-Calais (France). Variations spatiales et annuelles au large du cap Gris-Nez. *C. R. Acad. Sci Paris III*, 304 (10) 245-250.
- QUISTHOUDT, C., BENTLEY, D. & BRYLINSKI, J.M. 1986. Discontinuité hydrobiologique dans le détroit du Pas-de-Calais (résumé) *J. Rech. océanogr.* 11 (1) 5.
- QUISTHOUDT, C., BENTLEY, D. & BRYLINSKI, J.-M. 1987. Discontinuité hydrobiologique dans le détroit du Pas-de-Calais. *J. Plankton Res.* 9 (5) 995-1002.
- RISO, R.D., QUENTEL, F., MADEC, C., LE CORRE, P. & BIRRIEN, J.-L. 1988. Le cuivre et le cadmium dans le front interne côtier de l'Iroise (Atlantique Nord-Est, côte de Bretagne). *Oceanol. Acta* 11 (3) 221-226.
- VIALE, D. Test d'une méthode synoptique de détection des Cétacés et des zones de front. *Annls Inst. océanogr. Monaco* (sous presse).
- VIALE, D., MORIAZ, C., PALAZZOLI, I. & VIALE, C. 1986. Repérage aérien de Cétacés en mer Ligure. *Rapp. Proc. verb. CIESM* (sous presse).
- VIDEAU, C. 1987. Primary production and physiological state of phytoplankton of the Ushant tidal front (West coast of Brittany, France). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 35 : 141-151.
- VIDEAU, C. 1988. Mesure de la croissance du phytoplancton dans la zone du front thermique d'Ouessant en période estivale. *C. R. Acad. Sci. Paris III*, 306 : 51-56.
- VIOLLIER, M., SOURNIA, A., BIRRIEN, J.-L. & MORIN, P. 1988. Observations satellitaires du phytoplancton dans les zones de discontinuité hydrologique au large de la Bretagne. In "Océanographie spatiale". *Oceanol. Acta* (n° spéc. 1985) : 51-56.
- VIOLLIER, M. 1986. Utilisation des données "visible" de NOAA-9 au cours de la campagne "Iroise" (1-31 juillet 1986). *Bull. mens. Satmer* (Centre Météorol. spatiale Lannion) 35 : 20-23.
- VOISIN, C. 1987. Premiers résultats biologiques d'une campagne pluridisciplinaire en mer Celtique. *D.E.A. Océanog. Biol. Fac. Sci. Univ. Bretagne occid.*, 24 p.

Liste de documents sur l'étude des flux

ECOMARGE (France)

- Colloque international d'Océanologie. ECOSystèmes de MARGES continentales, Perpignan, 23-26 juin 1987. CIESM, 1987: 96 p.

FMO (France)

- Programme F.M.O "Flux de Matière dans les Océans Océans (1986-1991): 67 p.
- Mesure de la "production primaire" dans le cadre du projet Flux de Matière dans l'Océan. Séminaire, Paris, décembre 1985: 26 p.
- Rapport technique "Exercice d'intercomparaison de deux trappes à sédiments en Méditerranée. Avril - Juin 1987", 1988: 20 p.

FRONTAL

- Techniques et stratégie d'échantillonnage en zones frontales. Table ronde, Marseille-Luminy, septembre 1988, 1988: 22 p.
- Echelles spatio-temporelles pour les phénomènes physiques, chimiques et biologiques dans les zones frontales, Paris le 2 mars 1988, 1988: 17 p.

PFO (France)

- Journées "Production primaire en milieu oligotrophe". Marseille, 2 - 3 juin 1988. Le Courrier de Mediproduct n° 5 et PFO, Rapport n° 1, 1988: 80 p.
- Programme Flux Océaniques. Opération Eumeli. Flux de matière dans l'Atlantique tropical en régime eutrophe, mésotrophe et oligotrophe. PFO, Rapport n° 2, 1989: 38 p.
- Programme Flux Océaniques. Opération Antares. Flux de matière dans l'Océan Austral. PFO, Rapport n° 3, 1989: 23 p.
- Programme Flux Océaniques. Fondements, Objectifs, Calendrier, Moyens et Organisation. PFO, Rapport n° 4, 1989: 21 p.
- Programme Flux Océaniques. Opération Eumeli. Flux de matière dans l'Atlantique tropical en régime eutrophe, mésotrophe et oligotrophe. PFO, Rapport n° 2, 2^{ème} éd., 1989: 39 p.
- Programme Flux Océaniques. Opération Frontal. Interactions physiques, chimiques et biologiques dans les fronts océaniques. PFO, Rapport n° 5, 1989: 28 p.

JGOFS (International soutenu par le SCOR)

- The Joint Global Ocean Flux Study: Background, goals, organization, and next steps. Report of the International Scientific Planning and Coordination Meeting for the Global Ocean Flux Studies, sponsored by SCOR. Paris, 17-19 February 1987. SCOR, 1987: 42 p.
- The Joint Global Ocean Flux Study : North Atlantic Planning Workshop. Paris, 7-11 September 1987. SCOR, 1987: 133 p.
- Report of the first Session of the SCOR Committee for the Joint Global Ocean Flux Study. Miami, 25-28 January 1988. SCOR, 1988: 50 p.
- Report of the First Meeting of the JGOFS Pilot Study Cruise Coordinating Committee. Plymouth, 13-15 April 1988. SCOR, 1988: 23 p.
- Report of the Second Meeting of the JGOFS Pilot Study Cruise Coordinating Committee. Den Haag, 16-17 September 1988. SCOR, 1988: 23 p.
- Report of the JGOFS Working Group on Data Management. Bedford Institute of Oceanography, 27-28 September, 1988. SCOR, 1988: 31 p.

- Report of the Third Meeting of the JGOFS Pilot Study Cruise Coordinating Committee. Moss Landing, 3 December 1988. SCOR, 1988: 17 p.

USGOFS (U.S.A)

- A global Ocean flux study. J. H. Steele, 1984, *Eos*, 4: 683-684.
- Global Ocean Flux Study. Proceedings of a Workshop. *Nat. Acad. Press*, Washington D. C., 1984: 360 p.
- U.S. GOFS. Report 1, 1986: 98 p.
- U.S. GOFS. Report 2, 1986: 52 p.
- U.S. GOFS. Report 3, 1986: 141 p.
- U.S. GOFS. Report 4. Modeling in GOFS, 1987: 142 p.
- U.S. GOFS. Report 5. Benthic studies in GOFS, 1987: 149 p.
- U.S. GOFS. Report 6. Ocean margins in GOFS, 1987: 245 p.
- U.S. GOFS. Overview. Towards a science plan for GOFS: program elements, priorities and planning, 1987: 19 p.
- U.S. GOFS. Report 7. Upper ocean processes, 1988: 88 p.
- U.S. GOFS. Report 8. Data management, 1988: 52 p.
- U.S. GOFS. Report 9. Pacific planning report, 1988: 192 p.

DIVERS

- Particulate biogeochemical processes. Report of SCOR Working Group 71, July 1988: 44 p.
- Earth system science. A program for global change. NASA, Washington D.C., 1988.
- Particle flux in the ocean. Proceedings of a workshop held at the Dokuz Eylül University, Izmir, Turkey, 23-28 June 1986. E.T. Degens, E. Izdar & S. Honjo eds. *Mitt. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Hamburg*, 1987: 308 p.