

PROGRAMME NATIONAL
" Processus biogéochimiques dans
l'océan et flux "

DEMANDE DE FINANCEMENT 2000
formulaire détaillé

Rappel : *une demande de financement comprend la fiche abrégée et le formulaire détaillé et en cas de financements précédents, la fiche bilan*

Si vous envoyez votre demande de financement par courrier électronique l'envoyer en format RTF ou PDF, en document attaché, à : proof@cnrs-dir.fr.

Le document attaché doit être nommé avec les informations minimum suivantes : nom du responsable scientifique-titre du projet,

si vous choisissez le courrier postal : envoyer **la fiche abrégée et bilan en 1 exemplaire et le formulaire détaillé en 15 exemplaires** à Martine Révillon INSU -BP 287-16-75766 Paris cedex 16

N.B.: Un exemplaire signé du Directeur du Laboratoire doit parvenir à cette même adresse

THEME (S) CONCERNÉ(S) : 2 1 3 4 (souligner le thème principal)

RESPONSABLE SCIENTIFIQUE DU PROJET (nom, prénom et qualité) :

Louis PRIEUR , Directeur de recherches CNRS

LABORATOIRE DU PROPOSANT (intitulé, appartenance, adresse et téléphone, e-mail) :

Observatoire Océanologique de Villefranche sur mer, Laboratoire de Physique et Chimie Marines,
BP 08, 06230 Villefranche sur mer. Tél : 04 93 76 37 14, e-mail : prieur@obs-vlfr.fr.

Indiquer explicitement les nom et prénom du Directeur du Laboratoire, les références de la formation CNRS de rattachement (n° UMR ou UPR, etc...) :

A. POISSON, ESA 7077 Directeur,

L. PRIEUR , ESA 7077, Directeur Adjoint à Villefranche sur mer.

Titre du projet : FRONTAL –ALMOFRONT Exploitation

Résumé du projet :

Voir Rappel en début de texte 1.1

Liste des personnes collaborant au projet (avec indication de leur unité CNRS de rattachement) :

Voir page jointe pour la liste des principaux collaborateurs, et in fine pour la liste détaillée avec pourcentage de temps.

Voir pages 19-20

Durée du contrat demandé : 1 an

Montant demandé : 151.5 kF HT

Projet nouveau

Projet déjà engagé : oui

Visa *obligatoire* du Directeur de formation

Signature du demandeur :

La demande Frontal Almofront de 2000 proprement dite correspond au point 2 et 3 du texte suivant. Comme il s'agit de la poursuite de l'effort commun d'exploitation d'une campagne réalisée fin 1997, le point 1 correspond à un rapport sur les actions passées. Un fascicule de figures est associé à ce rapport de manière à rendre sa lecture plus aisée, compte tenu du nombre de figures présentées.

1. Etat d'avancement du projet d'exploitation des résultats dans le cadre FRONTAL ALMOFRONT.

1.1 Rappel

La campagne ALMOFRONT2 a été réalisée à bord de l'Atalante du 29 Novembre 1997 au 16 Janvier 1998 en mer d'Alboran. Le traitement de cette campagne représente, depuis, l'activité majeure du groupe Frontal, bien que certaines campagnes antérieures (CATCH 1997 et DYNAPROC 1995) continuent d'être exploitées par des travaux de publication notamment. Dans le cadre de France Jgofs, Frontal a déjà réalisé la campagne Almofront 1 en 1991 sur la même région au printemps. La comparaison des deux périodes d'observation reste un objectif important pour les enseignements qu'elle pourra apporter sur la persistance du système observé. Le thème retenu pour Almofront 2 a été de documenter en détail la structure interne et les circulations secondaires du système jet-front géostrophique et tourbillon de la mer d'Alboran afin de comprendre les origines d'une biomasse et d'une production plus élevée qu'ailleurs en Méditerranée. L'objectif est d'obtenir un bilan, en termes de carbone, de l'influence d'un jet frontal sur la production biologique, sur l'export de carbone et d'autres éléments en profondeur et sur les échanges avec le tourbillon anticyclonique associé au méandre du jet.

1.2 Rappel des objectifs détaillés et équipes participantes

Objectif 1 : maîtrise des paramètres physiques et dynamiques qui entretiennent le front de manière à déterminer la structure interne du jet frontal. Ces paramètres sont : champ de densité et champ de courant, dans les deux cas selon une résolution permettant le calcul de la vorticité potentielle et des circulations secondaires possibles. Déterminer également l'évolution temporelle à l'échelle de quelques jours de cette structure interne et les effets éventuels d'un méandre.

Personnes impliquées: L. Prieur et Y. Gratton et collaborateurs, (Raunet, Tailliez, Ouellet  tudiants)

Objectif 2 : caractérisation des niveaux primaire et secondaire de l'écosystème et nature de l'export vers la profondeur : Déterminer dans chaque zone du système frontal et dans les zones adjacentes l'importance respective des voies trophiques et relier cette importance aux circulations secondaires et à la structure interne.

Personnes impliquées: Tous participants à Almofront 2 plus particulièrement: L. Prieur, M. Bianchi, R. Sempere, L. Striby, F. vanWambeke, H. Claustre, F. Bruyant., I Vescovali, P. Morin, C. Copin, A. Sciandra, N Leblond, C. Miquel, M. Pujo-Pay, S. Jacquet, P. Geistdoerfert...

Objectif 3 :  valuation des interactions entre l'écosystème profond et l'écosystème frontal de surface. Comment l'export venant de la surface est-il repris par le système profond et rôle de la migration nycth merale sur les voies trophiques de l'écosystème de surface

Personnes impliquées: G. Gorsky, V. Andersen ,D. Lefevre L. Prieur, M. Goutx, L. Striby, J. C. Marty

Objectif 4 (comme produit final) :  valuation cohérente et raisonnée des flux de matière dans la zone frontale et les zones adjacentes entre la couche de surface et les couches sous-jacentes. Rôle d'un front à l'échelle d'une mer pour le bilan de carbone et d'azote.

Personnes impliquées: TOUS en particulier les flux, M. Bianchi, F. VanWambeke, F. Bruyant, L.Prieur, B. Quigeneur, P. Morin, D. Lefevre; C. Copin ...

La réalisation de ces quatre objectifs laisse attendre les "retombées" suivantes :

— production d'un corps de données pluridisciplinaires utilisable ultérieurement pour une modélisation du système frontal ; *Personnes impliquées :TOUS, Responsable : L. Prieur*

— mise au point d'une méthodologie "méso-échelle " exportable à d'autres fronts géostrophiques de l'océan mondial ; *Personnes impliquées: L. Prieur, H. Claustre, C. Copin*

—  valuation des flux méditerranéens entrant et sortant (eau, nutrilites, éléments traces) *Personnes impliquées. C. Copin, L. Prieur, Y. Gratton, P. Morin, R. Riso*

— Comparaison des résultats trouvés en automne (Almofront 2) et en mai (Almofront 1). *Personnes impliquées Tous*

1.3 Etat du traitement des données de la campagne ALMOFRONT 2

La plupart des données est maintenant disponible sous forme de fichiers informatiques ou de graphiques échangeables par le réseau. Ces données sont accessibles au groupe Frontal par e-mail ou par ftp. Les données actuellement disponibles sont les données de base, courants ADCP, données de surface, météo-océaniques, paramètres physiques des CTD, TOWYO, SHET et la majorité des variables biologiques et chimiques. Toutefois certaines opérations et certaines variables (oxygène Towyo, CTD, sels nutritifs SHET) ne sont pas encore totalement traitées.

Construire une base de données pour une campagne interdisciplinaire comme Almofront n'est pas chose aisée, car chaque type de donnée a en général des formats et des contraintes différentes. Nous avons d'abord archivé les données d'intérêt général, comme les données météo-océaniques, (vent, pression, etc ...) en les mettant sous forme de fichier ASCII aisément accessibles. Les différents thermosalinographes et CTD ont été harmonisés et recalés en temps. Une étude a montré que les CTD Rosette ascendantes ne peuvent être utilisées pour des profils de température et de salinité lorsque les prélèvements de la rosette 24 bouteilles étaient trop serrés. Néanmoins, les prélèvements peuvent être comparés aux profils descente. Les données ADCP ont été corrigées de la vitesse du navire en tenant compte de « l'erreur d'angle ». Les deux ADCP ont été réunis en une seule base pour l'exploitation des profils de courant entre 12 et 480 m. Toutes les données issues des prélèvements de la rosette ont été rassemblées en fichiers compatibles. Toutefois, le fichier général n'est pas encore disponible, certaines vérifications restent à faire sur la cohérence des données et les erreurs éventuelles de correspondance. Les différentes bases relativement volumineuses sont actuellement les suivantes :

Données météo, ADCP, thermosalinographes, images infra-rouge

CTD : Rosette, Shet et Towyo. Néanmoins les CTD Towyo doivent être reprises, car, à la fin du traitement, une erreur d'acquisition a été découverte. Les changements seront surtout sensibles sur l'oxygène.

Données Rosette (Sels nutritifs, oxygène, DOC, DIC, NOD, NOP, Alcalinité, pH, biomasses, pigments, biomasse et production bactérienne.

Données de granulométrie (>5000 spectres)

Données de cytométrie

Données multivariées du Shet

Comptage de zooplancton (filets à nappes)

Paramètres de la photosynthèse (10000 mesures)

Profileur Vidéo marin.

Données de respiration, excrétion, ETS, production N, C, O₂, Si,

Données de bioluminescence

Données de pièges à sédiments

L'exploitation de ces différentes bases a déjà commencé. Deux publications sont sous presse (Claustre et al., Grout et al.). Des thèses de DEA ont également exploité ces données (Stemmann, Vidussi, Striby).

M. Ouellet (Rimouski) a entrepris l'extraction des ondes inertielles dans les données de courantométrie ADCP sous coque en s'appuyant sur la théorie et sur les résultats des courantomètres déployés sur ligne de mouillage durant Almofront 2.

Plusieurs communications (EGS, UGGI, Société Canadienne d'océanographie (SCMO), Canigo) ont permis de faire connaître les premiers résultats sur la structure dynamique et biogéochimique de la région.

Une réunion générale du groupe (33 participants, 26 communications) s'est tenue à Marseille dans le but de faire le point sur les traitements des données et sur les différents aspects des structures hydrobiogéochimiques rencontrées.

1.4 Principaux résultats scientifiques

Il n'est guère possible de faire un état simplifié de l'ensemble des résultats déjà obtenus deux ans après la campagne. Deux réunions internes de présentations et d'exploitation des données ont eu lieu (Brest 1998, Marseille 1999). Leurs résumés comportent plus de 50 pages. Néanmoins, il paraît opportun de tenter de broser un premier panorama de la situation physique et biogéochimique rencontrée au cours de la campagne et de fournir quelques résultats intégrés qui permettent de montrer que nous avons les données pour établir un bilan de l'action du système frontal sur les flux biogéochimiques. Certains résultats donc ne seront pas évoqués ici, même s'ils servent les objectifs présentés précédemment et donnent matière à publication par la suite. Le choix des résultats présentés a surtout été guidé par le

souci de montrer que la stratégie utilisée permet de servir les objectifs recherchés sur la compréhension du système jet frontal et tourbillon relativement complexe.

Situation Physique et Dynamique : maîtrise de la position des observations dans la structure mouvante.

Grâce à la très bonne précision du positionnement du navire, les données des ADCP de coque ont pu être utilisées, en temps très peu différé, pour choisir les positions des opérations dans les structures jet et tourbillon. Ainsi la situation du courant de surface et du front en Alboran-Est est présentée figure 1 A, telle qu'elle était disponible à bord le 5 décembre 1997. Les données ont toutefois été traduites en valeurs corrigées depuis. D'autres situations ont été rencontrées par la suite, elles montrent que le système jet- tourbillon a migré vers l'Est. Il est donc établi qu'au début de la campagne, le jet contournait un gros tourbillon trouvé en position habituelle entre le cap Tres Forcas et Oran. Cette situation a perdu (d'après les images satellitaires, les courantomètres placés en début de campagne sur mouillages et les différentes opérations réalisées à bord) jusqu'au 20 décembre. La figure 2 donne la position des deux radiales de stations réalisées à huit jours d'intervalle afin d'obtenir par CTD rosette une information physique et biogéochimique à moyenne échelle. La figure 2 bis montre la correspondance très nette entre la structure de densité (en bas) et les profils de courants à diverses profondeurs lors de la seconde radiale (en haut). Ainsi ces deux radiales, qui pour les variables physiques sont presque identiques, traversent les différentes masses d'eau de la structure à étudier: courant espagnol au Nord, eau méditerranéenne (ACE sur la figure), le front de surface (à 90 km, station 18 et 261), le jet qui a environ 40 km de large (90 à 130km), et qui est faiblement séparé de la partie externe du tourbillon, ensuite parcouru de part en part (130 à 225km). Les couches mélangées sont d'épaisseurs très différentes, dans la partie dense : 30 à 40 m, et dans le cœur du tourbillon :110 à130 m. Le faible déplacement de l'ensemble de ces structures est attesté sur la figure 3 qui représente le contenu halin dans la tranche d'eau 35 à 150 m représentative des couches d'eau concernées par la structure jet – tourbillon. Le tourbillon est en effet constitué d'eau atlantique modifié comme le jet. Les six opérations qui ont traversé la partie Nord Est du système en 14 jours montrent que le système est resté stationnaire dans son ensemble, avec un déplacement du gradient horizontal de salinité inférieur à 5 km. Les gradients de surface se déplacent significativement plus (résultat non montré), sans doute sous l'influence de la dynamique non géostrophique de la couche mélangée directement impliquée par les échanges océan-atmosphère. La très bonne correspondance, image thermique et courants de surface, est visible figure 4, même si les gradients thermiques de surface dans la partie de la mer d'Alboran qui nous intéressait étaient faibles. On notera que le front halin couvre une étendue géographique supérieure à la structure jet- tourbillon, puisqu'il va jusqu'à la côte espagnol.

On se trouve donc en présence, en première partie de campagne, d'un front Almería Oran très développé avec jet contournant un tourbillon anticyclonique lui aussi très développé sur plus de 250 m d'épaisseur. Cette situation a aussi été observée dans le programme Omega en 1996 à la même époque, mais contraste très fortement avec celle observée en mai 1991 lors d'Almofront 1, où le jet contournait un tourbillon anticyclonique confiné à la partie sud de la mer d'Alboran Est et passait au sud d'un vieux tourbillon anticyclonique au sud de Carthagène. Ce tourbillon n'était pas présent en 1997.

Pour la seconde partie d'Almofront 2 , juste après l'escale du 22 décembre, tout le système devient dynamiquement instable comme il est vu sur l'image du 23 décembre (Fig.5) et le système migre vers l'est en présentant un structure thermique en champignon.. On notera que cette structure est décrite en champ de courant (ADCP) grâce au trajet réalisé afin de rechercher la position du premier site de station longue. L'image thermique n'était pas disponible alors à bord, mais les informations des ADCP et du thermosalinographe ont suffi pour réagir immédiatement. Une première analyse des champs de courant à diverses profondeurs a montré que l'instabilité n'est sans doute pas barocline mais d'un statut plus complexe. Son origine n'est pas connue, mais on peut constater que l'ensemble de la mer d'Alboran est concerné puisque le premier tourbillon à l'ouest est très nettement réduit. Les premiers résultats de la simulation 3D haute résolution effectué par F. Olivier donnent des images de température de surface qui ressemblent beaucoup à celle du 23 décembre. La non plus, une analyse détaillée des processus dynamiques en jeu n'est pas encore disponible, mais disposer d'un tel jeu de donnée (ADCP, modèle, informations biogéochimiques) est assez exceptionnel et nous encourage à entreprendre dans les années qui viennent l'étude détaillée de cette instabilité.

Durant toute la seconde partie d'Almofront 2, il a donc fallu suivre le déplacement du front, du jet et du tourbillon tout en réalisant les 8 stations longues prévues, et la section shet à travers la structure. Le résultat de ce positionnement des sites en coordonnées géographiques (Figure 6), n'est pas représentatif de la structure jet-tourbillon pourtant toujours présente. Un site correspond à une station longue du navire et est constitué de plusieurs stations CTD rosette réalisées pour les prélèvements biogéochimiques et pour contrôler le type des masses d'eau explorées. Comme pour Almofront 1, la variabilité physique intra-site est nettement plus faible que la variabilité inter-site au travers du système frontal. Ceci a été contrôlé sur les profils de température, salinité, densité et oxygène. En particulier, la profondeur du gradient de densité entre l'eau de surface et l'eau méditerranéenne (entre 27 et 28 kg/m³) change de 30 à 150 m en passant du côté dense (méditerranéen du système au côté léger (atlantique, tourbillon). La profondeur de cet interface, qui à une signification dynamique, est un premier repère pour se positionner dans la direction transverse au courant du système

jet tourbillon (Figure 7). La dérive moyenne permet de se situer selon la direction longitudinale, une composante Nord indiquant une position avant la crête du méandre ou dans la partie Est du tourbillon et une composante Sud une position après la crête ou à l'Est du tourbillon. Le même principe de positionnement dynamique des travaux a été utilisé pour des études répétitives du Gulf Stream. Ce positionnement est tout à fait indispensable pour interpréter les résultats multidisciplinaires, puisque les positions géographiques ne sont pas représentatives à tout moment des masses d'eau en raison du déplacement du système d'environ 90 km en vingt jours. Ainsi les différents sites peuvent être ordonnés des eaux méditerranéennes (2 et 8), aux eaux plus près du centre du tourbillon (3 et 6), avec un gradient prononcé de propriétés physiques des sites 7, 4,5. Le site 1 ressemble au site 5 mais est situé bien en amont dans le méandre.

Que la dérive de la ligne de pièges en 36 heures suive le courant de surface peut paraître surprenant. Toutefois elle est normale lorsque l'on considère la structure interne du courant, qui change peu de direction avec la profondeur. Toutefois la composante transverse du courant, faible devant la composante axiale et traduisant une confluence/convergence ou une divergence/difffluence, peut amener cette ligne à se rapprocher ou à s'éloigner de l'axe du jet. C'est la raison pour laquelle le site 7 est divisé en deux parties (7a et 7b) car la convergence au niveau de ce site a manifestement fait dévier de manière significative vers l'axe du jet la ligne de piège. Les profondeurs de couche mélangée et les propriétés biogéochimiques ont été trouvées suffisamment dissemblables au cours des 36 heures pour considérer que les stations du site 7 composent en fait deux sites. Toutefois la dérive transverse, même dans ce cas, reste faible en termes géographiques. L'hétérogénéité vient ici des gradients horizontaux très forts, car proches du front de surface.

L'ensemble des résultats du leg 2 en sites peut alors être présenté comme si les données avaient été obtenus sur une section virtuelle analogue (sites 2-8, 7,4,5,6-3) à la radiale 2 du leg1. La correspondance entre sites et stations de cette radiale est d'ailleurs disponible. Toutefois on a pu constater que lors du déplacement vers l'Est Nord-est du tourbillon à 5 cm/s, le tourbillon a diminué de dimension et de profondeur. Si bien que cette présentation offre certaines faiblesses dans la comparaison des résultats de la radiale du leg 1 et de ceux du leg 2. Toutefois les avantages l'emportent sur les faiblesses et par la suite les résultats des sites seront présentés en section virtuelle pour les différentes variables biogéochimiques. La même stratégie s'est révélée performante dans les publications pour la compréhension du système rencontré lors d'Almofront 1.

Ainsi la situation générale physique et dynamique est maintenant comprise dans ses grandes lignes. Une publication (Gratton, Prieur, Lafleur) est en cours de rédaction. Plusieurs présentations en congrès ont été faites (EGS, IUGG 1999, à commencer par les présentations aux réunions Frontal (Brest et Marseille).

Influence des ondes inertielles sur les observations :

Afin de progresser plus avant dans l'objectif 1 de description des champs physiques, une étude spécifique sur les ondes inertielles et la présence des ondes de marée qui brouillent les champs géostrophiques, a été menée sous les directions de L. Prieur et d'Y. Gratton par M. Ouellet. On a trouvé à partir des quatre courantomètres placés à 200 et 400 m sur deux lignes de mouillage, que les ondes inertielles et celle de M2 retiennent l'essentiel de la variance en dessous de 200 m, sauf lorsque le courantomètre était dans le tourbillon en cours de migration. La partition de l'énergie cinétique en quatre bandes de fréquence montre cela en profondeur (figure 8). D'une manière générale il y a une bonne correspondance entre les résultats des courantomètres fixes (points sur la figure) et ceux de l'ADCP qui permettent de disposer de profils de courant même si le navire bouge dans la région. On s'aperçoit toutefois sur les profils d'énergie cinétique ou de proportion d'énergie cinétique dans chaque bande, que les basses fréquences et les hautes fréquences retiennent une énergie rotatoire importante, tant en cyclonique qu'en anticyclonique. Ceci s'explique par le fait que le navire traverse de nombreuses fois le système jet front et que l'énergie du jet beaucoup plus forte que celle des ondes est alors répartie dans les diverses bandes de fréquence, y compris celles correspondant à des traversées du jet en 3 heures (0.15 cph). On voit donc ici la difficulté de filtrer proprement les ondes inertielles et de marée dans les mesures d'ADCP sous coque. Néanmoins cette étude montre que le choix du filtre est possible et que le champ d'onde inertielle peut aussi être étudié, même si la résolution temporelle des variations d'amplitudes de ces ondes est dégradée (quelques jours). Les amplitudes de ces ondes ont été trouvées de l'ordre de 5 à 10 cm/s conformément aux résultats de courantomètres fixes et de l'ordre 5 cm /s pour la marée. Toutefois d'assez fortes variations de ces amplitudes ont été trouvées avec le temps et sans doute avec la position dans le système. Une analyse plus détaillée est en cours.

Stratégie towyo : utilité pour la description des structures hydro-biogéochimiques frontales :

Un investissement important a été fait pour disposer d'un treuil automatique afin d'échantillonner à haute résolution (1 km) la structure interne du jet frontal. L'exploitation en termes de vitesse verticale des trajets towyo est prévue pour l'année prochaine, mais la figure 9 montre le gain considérable d'information sur la relative longue durée des structures petite-moyenne échelle. Ces graphiques présentent la distribution de chlorophylle a (fluorimètre, mg/m³) et donc de biomasse algale. Le graphique du bas représente la section de Chla pour la radiale 2 du leg 1, la même que sur la figure 2 bis. Le logiciel de tracé utilisé interpole selon les axes (profondeur et distance) et non selon les isopycnes. Une

interpolation selon les isopycnes conduirait à une meilleure représentation, mais ne donnerait pas une information aussi claire que les trajets towyo (partie haute de la figure) où, pour les trois sections réalisées en 1 jour et demi, les images obtenues sont très semblables et les structures de fortes ou faibles biomasses apparaissent pour les mêmes valeurs d'isopycnes, et au même endroit de la structure frontale. Les deux graphiques de gauche sont obtenus pour deux sections sur le même axe géographique que la radiale. Le graphique central (tw2pass2) est à la même position et la même échelle que la partie correspondante de la radiale de station. Les traits verticaux correspondent aux positions des profils verticaux. Seulement quelques jours séparent la radiale et le towyo 2. La troisième radiale du towyo 2 est décalée de 5 milles vers le Sud Est et échantillonne plus dans le tourbillon. La persistance sur plusieurs jours du détail des structures rencontrées est ainsi montrée. Même lors du leg 2 plusieurs semaines plus tard, les mêmes motifs sur la biomasse et sur l'oxygène ont été trouvés. Ces structures sont en fait allongées dans la direction axiale. Ici elles apparaissent comme des tâches sur ces sections transverses au courant. L'évidence de la persistance ne peut être obtenue que si la stratégie d'échantillonnage et la haute résolution est conforme à la structure filamenteuse recherchée. Ainsi, bien que ces filaments aient une dimension transverse nettement submoyenne échelle elles ne sont pas aléatoires et de courtes durée. C'était une hypothèse fondamentale de notre stratégie qui se trouve ainsi vérifiée. Ces structures sont très certainement entretenues par la circulation secondaire géostrophique transverse.

Changement de population algale dans le système frontal.

Malheureusement la plupart des variables biogéochimiques pertinentes pour comprendre le fonctionnement de l'écosystème ne peuvent être mesurées en continu et donc en towyo. On voit cependant une différence de composition dans les différentes parties de la radiale 2 sur la figure 10 où la section de chlorophylle tracée cette fois avec les mesures HPLC de Chla sur les prélèvements. Cette section est donc très similaire à la section précédente. Trois principaux pigments diagnostiques donnent respectivement l'information sur les groupes d'algues responsables de la distribution de Chlorophylle a. Les diatomées (fucoxanthine) sont surtout abondantes dans la partie dense du système frontal et peu abondantes dans le tourbillon. Les petits flagellés (19'HF et 19'BF) sont repartis à peu près uniformément dans les couches de surface avec toutefois une plus grande abondance dans le tourbillon. Les cyanobactéries présentent comme les diatomées de grandes variations d'abondance et sont parfois absentes de la couche euphotique dans les zones plus influencées par les advections verticales. C'est une situation classique maintenant et la nouveauté vient surtout de la grande épaisseur de concentrations relativement élevées de nanoplancton dans le tourbillon. La figure 11 porte sur les rapports respectifs de ces pigments diagnostics en termes de pourcentage de leur total. Les deux groupes dominant, diatomée et prymnésiophytes ont alors une image inverse normale, mais l'occupation dominante du tourbillon par les derniers est bien mise en évidence par opposition à l'occupation de la partie dense du système frontal par les diatomées. Surtout il ressort une séparation très nette sur le graphique du haut entre les tâches à 50 m avant le front et dans le gradient de densité. La tâche dans le gradient ne peut être expliquée par la subduction des eaux méditerranéennes sous le tourbillon. Elle est sans doute une marque de la circulation secondaire ainsi que l'est la zone pauvre en zeaxanthine sur le bord léger du jet.. La différence des peuplements renseigne assez précisément sur l'influence de mouvements verticaux. En effet on sait que les grosses algues (microphytoplancton), diatomées ont une demande en NO₃ importantes et sont rencontrées dans le temps ou l'espace près des sources de nitrates dans la couche euphotique. Ce n'est pas le cas des petits flagellés qui occupent plutôt les régions où la boucle microbienne domine dans le cycle du carbone.

Evidence de production algale en décembre :

Sur la même radiale parcourue deux fois à huit jours d'intervalle, les contenus intégrés de Chla dans les couches de surface sont présentés figure 12. Le contenu 0-200 m est dans le front (80 km) similaire (60-70 mg/m²) dans les deux sections et proche des valeurs trouvées (65 mg/m²) en termes de chla HPLC en 1991 en mai. Pourtant ici nous sommes en décembre avec donc une faible irradiation journalière. Nous avons donc encore une information sur la persistance de la production dans le jet frontal. Les eaux méditerranéennes sont oligotrophes (30-40 mg/m²), mais les eaux du tourbillon passent d'une manière surprenante de 40-50 mg/m² à 60-80, soit une augmentation de 50% en huit jours. Comme ce sont les mêmes eaux, puisque la structure ne s'est pas encore déplacée, il y a eu une production nette très marquée au sein du tourbillon, malgré une épaisseur de couche homogène dépassant 80 m, c'est dire 40 %, plus épaisse que la couche euphotique.

Nous devons nous attacher à mieux comprendre comment cette production peut exister et sur quel support, puisque la concentration en NO₃ reste faible (< à 1 µmole) dans cette couche homogène, mais coupée des mélanges profonds par l'interface eaux méditerranéennes - eaux atlantiques. Noter que la couche 100 - 200 m contient dans la partie jet tourbillon légèrement plus de Chla. Les 8 mg/m² trouvés ailleurs correspondent sans doute au bruit de fond. On notera également que limiter les mesures du contenu algal à la seule couche euphotique (0-50 m) sous estime grandement la biomasse présente effectivement dans le système front-tourbillon.

D'autres anomalies sont rencontrées dans l'examen d'un des paramètres physiologiques de la photosynthèse, le 'Ek' ou éclaircissement de saturation de la courbe intensité photosynthèse (Fig. 13). Ce Ek traduit l'adaptation des algues aux forts ou aux faibles éclaircissements et varie naturellement de 20 Ein/m²/jour pour les forts éclaircissements à 2-3 pour les faibles. Les valeurs des isolignes sont à diviser par 10 pour les convertir dans l'unité précédente. Cette section de Ek représente en fait un travail de mesure colossal et original dans le système frontal ; en effet, 140 points ont servi, chacun représentant une courbe intensité photosynthèse nécessitant 6 à 8 incubations de la même eau à des éclaircissements différents, le tout réalisé en moins de 3 jours. Normalement Ek est distribué selon la profondeur avec les fortes valeurs en surface et les faibles en profondeur lorsqu'il n'y a pas de mouvement verticaux. Cette situation est effectivement trouvée sur les bord du graphique, c'est à dire dans les eaux méditerranéens et dans l'extrémité sud du tourbillon. Des très faibles valeurs sont trouvées dans le cœur du tourbillon (175 km) et proche du front, sans doute pour des raisons différentes. Dans le tourbillon les algues sont entraînées par la turbulence de la couche homogène proches de 100 mètres d'épaisseurs et sont donc adaptées à de faibles éclaircissements moyens. Dans la partie dense du front ce n'est pas le cas et donc les faibles valeurs signalent une advection ascendante significative. Les fortes valeurs dans le front sont aussi anormales car les conditions d'éclaircissement ne changent pas et elles montrent une population adaptée aux eaux de surface (cyanobactéries ou effets de la circulation secondaire). A la base de la couche mélangée du tourbillon (100 m) , il est surprenant de trouver des algues adaptées à des éclaircissements des couches de surface par ailleurs. L'interprétation de ce graphique doit être poursuivi en affinant la technique de tracé des isolignes et en confrontant avec les données des peuplements, et d'autres variables biogéochimiques. Néanmoins ces signatures d'adaptation aux éclaircissements faibles en surface et à l'inverse en profondeur était un résultat attendu qui nous avait motivé pour effectuer les efforts financiers nécessaires et y consacrer un temps de mesure à bord et à terre conséquent.

Répartition de différentes classes de taille dans l'écosystème frontal

Pour montrer la persistance du système de production et de biomasse, la section Shet réalisée à la fin du leg 2 avec des stations espacées de 3 milles est présentée. La partie dense du système est trouvée aux extrémités car la section coupe le tourbillon et le jet selon une corde à travers un méandre très prononcé et non selon un diamètre. Le centre du tourbillon est approché aux stations 562 et 563 où la couche homogène atteint 80 m. L'équivalent du site 7 est à la station 555 où les fortes biomasses algales sont rencontrées (2 mg/m³). Une analyse des données de granulométrie (compteur optique Hiac) sur échantillon prélevé sur l'eau pompée (une première !) montre que la classe de taille qui comprend des diatomées d'environ 16 microns domine dans la partie Nord Est de la zone et est soumise à une advection verticale descendante en se rapprochant du jet. Curieusement l'augmentation relative de Chla dans le centre du tourbillon à 80-90m sous la couche mélangée est constituée plutôt de microplancton alors que la profondeur, par manque de lumière, exclut la production sur place de ces diatomées. Ces algues ont donc été entraînées là par une circulation secondaire. Il y a bonne correspondance entre la répartition de la Chla et le microplancton. Le nanoplancton (1-10 microns) se trouve être relativement abondant dans la traîne du tourbillon, c'est à dire à droite sur la figure. Cette disposition n'est pas du tout retrouvée dans la répartition de la Chla (figure 14, haut). On pense donc que ce qui est vu par le compteur Hiac n'est pas seulement le phytoplancton dans cette gamme de taille, mais aussi le plancton hétérotrophe (et les particules détritiques). L'analyse doit être poursuivie en comparant par exemple avec d'autres variables optiques ou biologiques pour tenter de déterminer la nature de ces particules. Beaucoup de structures rencontrées le 10 et 11 janvier après une migration du système d'une quinzaine de jours sont similaires à celles trouvées lorsque le tourbillon et le jet était en position normale stationnaire. C'est une indication que les processus dynamiques responsables de ces structures biologiques ne sont pas tous liés au déplacement du tourbillon mais correspondent aux processus qui maintiennent la structure interne du jet, laquelle n'est que faiblement modifiée.

Grâce à la mise en œuvre quasi simultanément de plusieurs moyens complémentaires d'analyse de la taille des particules, cytométrie en flux pour le picoplancton, compteur Hiac pour le nano et le microplancton et profileur vidéo marin et analyse d'image pour les macroparticules, nous disposons en chaque site du leg 2 d'un spectre de taille couvrant la gamme 0.5 micron - 1 mm. Un exemple qu'il est rare de trouver dans la littérature est montré figure 15. Il provient de la station 498 d'Almofront 2 site 4 située dans le cœur du jet, à 100 m de profondeur. De tels spectres de taille sont disponibles pour chaque plongée du PVM (2 par sites au moins, et à une vingtaine de profondeurs). Une étude approfondie de ces résultats originaux doit être poursuivie dans l'année qui vient, afin de les transcrire en termes de carbone particulaire si possible.

Pour compléter la description des variables et des communautés rencontrées dans les différentes parties du système tant dans le leg 1 que dans le leg 2 certains résumés sont repris ici, encore une fois sans que l'ensemble de la présentation ne soit exhaustive. Ces résumés utilisent les terminologies déjà présentées ci dessus.

Distribution verticale et horizontale du picoplancton en Mer d'Alboran- (S. Jacquet, D. Marie, D. Vaultot)

Au cours de la campagne ALMOFRONT 2, un effort important a été porté sur l'échantillonnage des populations picoplanctoniques de la mer d'Alboran, soit l'ensemble des cellules auto- et hétérotrophes dans la gamme de taille 0,2-3 µm. Les populations et communautés appartenant à ce groupe sont les deux cyanobactéries *Prochlorococcus* et *Synechococcus*, les picoeucaryotes et les bactéries hétérotrophes. Au total, près de 2000 échantillons ont été prélevés et analysés par cytométrie en flux. Les objectifs sont multiples: i) avoir un schéma précis de la distribution des populations en surface grâce à un échantillonnage haute fréquence (0,5 h), ii) connaître la distribution verticale des populations (incluant celle des bactéries hétérotrophes en profondeur), iii) expliquer les variations intra-sites (périodicité journalière?) et inter-sites (par l'intégration des paramètres environnementaux physiques, chimiques et biologiques).

Une analyse de quelques profils verticaux réalisés lors du leg2 (voir figure 16) révèle que:

- tous les groupes du picoplancton sont représentés
- les ***Prochlorococcus*** sont présents à tous les sites et deux sous-populations ont pu être observées dans certains échantillons. Ces deux populations présentent des caractéristiques pigmentaires (fluorescence de la chlorophylle) clairement différentes et sont probablement issues de masses d'eau différentes. *Prochlorococcus* dominant les autres autotrophes dans les eaux classées méditerranéennes (sites 2 et 8) avec des concentrations atteignant $2,7 \times 10^4$ cellules/ml au maximum profond de chlorophylle. Inversement dans les eaux classées atlantiques leur concentration est plus faible d'un ordre de grandeur (5×10^3 cellules/ml)
- les ***Synechococcus*** constituent le groupe autotrophe dominant à tous les sites classés eaux de type atlantiques (stations 1, 3, 4, 5, 7) à l'exception du site 6. Leur concentration maximale ($3,2 \times 10^4$ cellules/ml) apparaît du même ordre de grandeur que celle enregistrée pour *Prochlorococcus*. Dans les eaux classées méditerranéennes (sites 2 et 8), leur concentration est variable et légèrement moindre, soit entre $3,4 \times 10^3$ et $2,6 \times 10^4$ cellules/ml pour les valeurs maximales enregistrées
- le site 6, dans le tourbillon caractérisé par une couche homogène profonde, ce sont les **picoeucaryotes** (avec $12,5 \times 10^4$ cellules/ml) qui constituent la communauté autotrophe la plus abondante
- les **bactéries hétérotrophes** constituent la fraction la plus abondante du bactérioplancton avec des concentrations variant entre 5×10^5 et 10^6 cellules/ml. Dans la plupart des cas (l'exception venant du site 6), le profil vertical des bactéries hétérotrophes est bien corrélé avec celui des différents groupes d'autotrophes ($0,7 < r^2 < 0,99$).

L'analyse de quelques échantillons de surface montre des différences très nettes entre les sites en terme d'abondance relative de chaque groupe (voir figure 16, bas). Ainsi entre la station (= site) 1 et la station 2, on observe clairement une "succession de populations" entre *Synechococcus* et *Prochlorococcus*, l'inversion de "dominance" se faisant progressivement sur la radiale entre les deux sites. Le site 7 est caractérisée par une concentration importante des *Synechococcus* par comparaison avec les deux autres autotrophes (*Syn.*: $1,8-2,5 \times 10^4$, *Proc.*: $3,6-8 \times 10^3$, *euc.*: $9,3 \times 10^3-1,7 \times 10^4$ cell/ml). La station 8 révèle la faible concentration des picoeucaryotes par comparaison avec les deux procaryotes photosynthétiques (*euc.*: $1,7-6,5 \times 10^3$, *Proc.*: $1,7-2,7 \times 10^4$, *Syn.*: $2,2-3,5 \times 10^4$ cell/ml)...

Les premiers résultats laissent à penser que la structure frontale de la mer d'Alboran et ses abords révèlent de larges différences en terme d'abondance des populations picoplanctoniques. De telles variations ont effectivement été rencontrées pour les mêmes groupes lors de la radiale 2 du leg1 échantillonnée complètement. L'intégration des variables environnementales devrait permettre d'avoir une idée précise de la dynamique de ces populations et de leur réponse (présence/absence, variations des paramètres liés à la taille ou à la fluorescence des cellules) vis à vis de ces variables. Il sera possible i) d'accéder à la dynamique du cycle cellulaire des populations autotrophes et ii) de dénombrer les virus comme suggéré par de récents travaux de l'équipe de Roscoff.

A l'autre extrémité du spectre de taille, un effort important a été accompli pour systématiquement connaître la répartition verticale des grosses particules essentiellement détritiques par l'intermédiaire du profileur vidéo marin (G. Gorsky, L. Stemmann).. Un effort important a aussi porté sur le dénombrement des populations de méso et macrozooplancton prélevées par l'intermédiaire du filet Bioness aux différents sites. L'ensemble des comptages, effectués en coopération avec l'équipe ukrainienne sous la responsabilité de V. Andersen, sont disponibles et sont sous analyse pour l'année qui vient. Un résumé de cette activité a été fourni par V. Andersen .

Abondance, composition et distribution verticale du zooplancton pendant la campagne Almofront-2
(Valérie Andersen¹, Corinne Devey¹, Alexandra Gubanova², Victor Melnikov², Sergey Tsarin² et Marc Picheral¹
¹ ESA 7076, Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer ;² IBSS, Sébastopol, Ukraine)

1 - Principaux résultats

Cette étude concerne les organismes zooplanctoniques de grande taille : copépodes de taille supérieure à 1 mm, macroplancton (siphonophores, chétognathes,...) et micronecton (euphausiacés, poissons,...). Les pêches obliques ont

été réalisées, de jour et de nuit, en chacun des 8 sites de la partie 2 de la campagne, avec le filet à nappes Bioness, la colonne d'eau explorée (0-700 m) étant découpée en 9 tranches.

En ce qui concerne l'abondance et la composition faunistique :

- Les densités d'organismes les plus fortes ont généralement été observées dans les sites du jet et du tourbillon (S1, S5 et S6), les plus faibles dans les eaux méditerranéennes (S2, S8).
- Par contre, les sites méditerranéens présentaient une plus grande diversité spécifique des copépodes que les autres sites, les plus faibles diversités ayant été observées dans le jet.
- Les résultats des deux pêches au site 1 suggèrent l'exploration de deux colonnes d'eau légèrement différentes.
- Les densités étaient environ deux fois plus faibles pendant Almofront-2 que pendant Almofront-1 (copépodes, chétognathes par exemple).

L'examen des distributions verticales conduit aux remarques suivantes :

- Les distributions verticales des organismes présentaient généralement deux pics de jour : un pic dans les eaux de surface, un pic au-dessous de 150 m. De nuit, les organismes étaient concentrés dans les couches superficielles (0-75 m et même 0-25 m).
- Les individus migrateurs représentaient 35 à 60% des copépodes et 20 à 45% du macroplancton de grande taille (> 3 mm).
- La proportion d'individus migrateurs et l'amplitude de migration étaient réduites au site 6. On peut également noter, pour le site 7 (bord gauche du jet), l'existence d'une population profonde de copépodes, entre 450 et 550 m, de jour comme de nuit.
- De jour, les organismes "profonds" (au-dessous de 150 m) avaient tendance à vivre plus en surface au site 6 et plus en profondeur aux sites méditerranéens et montraient des différences de 100 à 200 m pour la même espèce. La nuit, on a également observé, dans les couches de surface, une distribution verticale variable selon les sites. L'influence de différents facteurs (éclairage, distribution de la chlorophylle, profondeur de la cuche mélangée,...) doit être analysée.

Les sites diffèrent donc non seulement par l'abondance des organismes et par la composition spécifique de la communauté, mais aussi par la distribution verticale des organismes et les caractéristiques de migration nyctémérale. La structure du réseau trophique doit donc être définie sur l'horizontale (sites) et sur la dimension verticale.

2 - Perspectives

Le dépouillement taxonomique des échantillons par les chercheurs ukrainiens est terminé. L'analyse des résultats, en termes d'abondance numérique et distribution verticale, est terminée et deux publications sont en cours de rédaction.

La deuxième étape du traitement des échantillons concerne les biomasses avec (1) la mesure du poids sec global pour chaque couche échantillonnée (en cours) et (2) l'estimation du poids sec et du poids en carbone pour les principaux groupes et espèces (à partir de relations allométriques existantes).

L'objectif final est d'établir les relations trophiques dominantes en chaque site, avec estimation des flux (brouillage, excrétion, production de pelotes fécales, ...) à partir de taux physiologiques issus de la littérature ou déterminés à bord par R. Gaudy.

Un modèle uni-dimensionnel physique-biologie sera appliqué à différents sites représentatifs de la région du front Alméria-Oran en utilisant les données pluridisciplinaires acquises pendant Almofront-2 (DEA de C. Devey). Notre objectif est de développer un modèle de réseau trophique suffisamment complexe pour tenir compte des processus essentiels et reproduire les caractéristiques des différents sites, le modèle devant rester cependant suffisamment simple pour pouvoir être couplé ultérieurement à des modèles physiques globaux.

Savoir quelles sont les signatures des processus chimiques et physiques dans le système frontal est une question pertinente. C. Copin a fait le point des premiers résultats.

Distribution de pCO₂ et d'oxygène (C. Copin)

Pendant la campagne Almofront 2 des mesures multiparamétriques continues ont été réalisées en surface le navire étant en route ou en station. De plus des radiales comportant des profils continus verticaux entre 0 et 200 m de nombreux paramètres biogéochimiques ont été réalisées à l'aide du SHET. Ces deux types de mesures se complètent et permettent de préciser la structure des variables biogéochimiques dans le front.

La distribution de la pression partielle de CO₂, qui gouverne les échanges océan-atmosphère de gaz carbonique, a été particulièrement étudiée. Les eaux de surface sont sous-saturées en gaz carbonique dans toute la zone d'étude à l'époque des mesures, mais dans les eaux d'origine atlantique, plus chaudes, pCO₂ est plus élevé que dans les eaux méditerranéennes, d'environ 15 µatm. Le voisinage du front, côté eau légère est marqué par une très forte variabilité de pCO₂, associée à de petites variations de la salinité entre 36.6 et 36.8 sur une largeur d'une trentaine de kilomètres. En moyenne, pCO₂ dans cette zone est plus élevé que dans les zones adjacentes.

L'examen de la structure verticale de $p\text{CO}_2$ obtenue le long de trois radiales SHET permet de comprendre l'origine de cette augmentation de $p\text{CO}_2$ en bordure du front, là où la couche de mélange passe d'une valeur constante d'environ 40 m, côté eaux méditerranéennes, à une profondeur beaucoup plus faible pour augmenter de nouveau côté eaux atlantiques jusqu'à 130 m au centre d'un tourbillon. A titre d'exemple la radiale Shet 1 du leg 1 est choisie (Fig. 17) ; elle a été réalisée juste après la radiale 2 CTD Rosette sur le même axe (voir figure 2 bis, 10, 11)

. La coupe verticale de $p\text{CO}_2$ montre une remontée des isolignes de $p\text{CO}_2$ le long de l'isopycne 27.1 (Fig. 18). Cette remontée est adjacente à un enfoncement des isolignes de $p\text{CO}_2$ correspondant à des excès de masse volumique supérieurs à 27.6. Cette structure s'observe également sur les autres variables impliquées dans les phénomènes biogéochimiques, sels nutritifs et oxygène. L'examen des diagrammes T-S montre qu'il y a une subduction de l'eau méditerranéenne sous l'eau d'origine atlantique composant le jet et le tourbillon. D'autres systèmes de circulation verticale affectent les eaux situées sous le tourbillon, côté eaux atlantiques, et les eaux situées sous la couche de mélange, côté eaux méditerranéennes, mais ils n'entraînent pas de modification visible des variables biogéochimiques en surface.

La forte variabilité spatiale de $p\text{CO}_2$ dans les eaux de surface en bordure du front peut s'expliquer par deux effets opposés. D'une part la remontée d'eau riche en CO_2 est à l'origine des fortes valeurs de $p\text{CO}_2$, d'autre part l'augmentation de production par rapport aux zones adjacentes induite par la remontée des sels nutritifs entraîne des diminutions de $p\text{CO}_2$. Suivant l'intensité locale de la vitesse verticale des eaux, il y a donc des cellules d'eau à fort $p\text{CO}_2$ et des cellules d'eau à faible $p\text{CO}_2$. Ceci se traduit par des variations inverses de $p\text{CO}_2$ et de la fluorescence de la chlorophylle.

On peut observer, avec une constance remarquable, la présence d'un maximum de $p\text{CO}_2$, de sels nutritifs et d'un minimum d'oxygène entre 110 et 160 m de profondeur sous le bord gauche du tourbillon (vers 36,1 – 36,2°N), dans le prolongement de la zone d'advection vers le fond des eaux méditerranéennes. Ces maximums et minimums indiquent la présence d'une zone de minéralisation intense que l'on peut probablement associer à l'entraînement vers le fond des eaux denses au niveau du front.

La compréhension du fonctionnement des écosystèmes rencontrés demande des études de flux entre les différents compartiments biologiques et les différentes régions. Des pièges dérivants ont ainsi été placés en chaque site, mais les résultats ne sont pas encore présentés ici comme d'ailleurs l'ensemble des stocks disponibles pour la plupart des variables. A titre d'exemple un résumé des résultats obtenus par l'équipe de P. Morin est inclus. Il porte sur la production nouvelle et régénérée en termes d'azote. D'autres productions sont aussi soit disponibles soit en calcul (en termes de carbone, Babin, Bruyant, d'oxygène D. Lefèvre et de Silicium, B. Queguiner). Pour terminer ce bref panorama, nous avons choisi de fournir les premiers schémas de fonctionnement en trois sites tels que préparés par M. Bianchi.

Productions nouvelle et régénérée dans la zone du front Almería-Oran
(C. Madec, J.-F. Maguer, S. L'Helguen, P. Morin, P. Le Corre)

Nos objectifs lors de la campagne Almofront 2 (décembre 1997- janvier 1998) dans la zone du front Almería-Oran étaient d'examiner:

- la nutrition azotée du phytoplancton
- l'importance des processus de régénération
- la contribution des productions nouvelle et régénérée à la production primaire en comparaison avec les résultats obtenus lors de la campagne Almofront 1 (mai 1991).

Méthodes

Les taux d'absorption du nitrate et de l'ammonium ont été obtenus en suivant l'incorporation du traceur ^{15}N dans la matière particulaire (1), les taux de régénération de l'ammonium par les microhétérotrophes en utilisant la technique de dilution isotopique (2). La concentration du traceur inoculé dans les échantillons d'eau de mer est de l'ordre de 10% de la concentration initiale du nitrate ou de l'ammonium. Les analyses isotopiques ont été réalisées à l'aide de la spectrométrie d'émission (3).

Aux huit sites* du second leg sept niveaux photométriques ont été échantillonnés dans la zone euphotique (100%, 50%, 22,5%, 14,5%, 8%, 3,5%, 1%) et un dans la couche sous-jacente (à environ 100 m). Les échantillons ont été préfiltrés à 200 μm .

Les productions nouvelle et régénérée ont été obtenues en intégrant sur l'ensemble de la couche superficielle (de 0 à 100 m), respectivement l'absorption du nitrate et de l'ammonium (1).

- sites 2 et 8 : eaux méditerranéennes; sites 1 et 3 : tourbillon atlantique; sites 4, 5, 6 et 7: zone frontale.

Résultats

Les huit sites étudiés se caractérisent en ce qui concerne l'ammonium et le nitrate par:

- des concentrations très faibles en ammonium: de 0,02 à 0,05 $\mu\text{mol.L}^{-1}$ dans la zone euphotique, concentrations jusqu'à dix fois plus faibles que celles mesurées en mai 1991.

- des concentrations de 0 à 5 $\mu\text{mol.L}^{-1}$ en nitrate dans la zone euphotique. Les sites méditerranéens (2 et 8) et le site frontal 7 se caractérisent par un épuisement du nitrate dans la couche de mélange. Par contre aux cinq autres sites les concentrations de nitrate en surface varient de 0,6 à 1,0 $\mu\text{mol.L}^{-1}$. Rappelons qu'en mai 1991 l'isoline de 0,5 $\mu\text{mol.L}^{-1}$ se situait à 30-50 m dans le jet et à 60-70 m aux sites adjacents.

Les taux (en $\text{mmol.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$) d'assimilation du nitrate et de l'ammonium ainsi que le taux de régénération de l'ammonium sont indiqués ci-dessous:

	Méditerranée sites 2 et 8	Front sites 4, 5, 6, 7	Tourbillon sites 1 et 3
Absorption totale	0,33	0,30 à 0,73	0,41 à 0,63
Absorption NO_3^-	0,12 à 0,17	0,36 à 0,78	0,27 à 0,41
Absorption NH_4^+	0,16 à 0,21	0,29 à 0,61	0,14 à 0,22
Régénération NH_4^+	0,25 à 0,48	0,30 à 0,73	0,20

Les mesures des flux d'azote montrent une production azotée totale deux à quatre fois plus élevée dans la zone frontale que dans les zones adjacentes. La valeur maximale (1,4 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$) est obtenue au site 6 pour lequel on relève la plus forte biomasse phytoplanctonique présente: 90 mg.m^{-2} de chlorophylle a.

Cette production plus élevée dans la zone frontale correspond à la fois une augmentation de la production nouvelle (absorption NO_3^-) et de la production régénérée (absorption NH_4^+).

Le facteur f, quotient de la production nouvelle sur la production totale (4), ici $\rho\text{NO}_3^-/(\rho\text{NO}_3^- + \rho\text{NH}_4^+)$ est pratiquement toujours supérieur à 0,5 à tous les sites. Sa valeur moyenne dans la zone frontale de 0,6 indique la prépondérance de la production nouvelle.

Les rapports des valeurs intégrées des taux d'absorption et de régénération de l'ammonium varient de 0,9 à 3. Les valeurs maximales correspondent aux sites 2 (Méditerranéen) et 5 (frontal).

Pour tous les sites, la régénération, attribuée à l'activité des microhétérotrophes, est suffisante pour satisfaire la totalité des besoins du phytoplancton en ammonium.

La comparaison des résultats des campagnes Almofront 1 et 2 est en résumé :

- Dans la zone frontale la production nouvelle est trois fois plus élevée en hiver qu'en mai (5) alors que les productions régénérées sont semblables.

- L'évolution du facteur f montre que, quels que soient les sites, la part de la production nouvelle dans la production totale est prépondérante en hiver

Les réseaux microplanctoniques dans les trois principaux écosystèmes de la zone du front Almería-Oran (mission Almofront 2)

(Micheline Bianchi et les tous participants concernés)

De façon très schématique, dans la zone du front Almería-Oran, trois principaux écosystèmes peuvent être définis : l'écosystème méditerranéen (au nord), l'écosystème du tourbillon anticyclonique d'eau atlantique (au sud) et, entre les deux, l'écosystème frontal. La principale caractéristique trophique des deux premiers écosystèmes est l'oligotrophie, alors qu'au niveau du front, dans la partie gauche du jet atlantique correspondant à la remontée des sels nutritifs sous l'effet de la circulation verticale, se développe un système hautement productif. La nature des réseaux microbiens est une composante majeure dans la détermination du devenir du carbone d'origine photosynthétique produit dans chacun de ces trois écosystèmes. Les profondeurs des couches productrices variant de 50 m pour l'eau méditerranéenne à plus de 100 m pour le tourbillon d'eau atlantique, les comparaisons entre les différents écosystèmes seront basées sur les valeurs moyennes des paramètres dans les couches productrices et non pas sur des valeurs intégrées.

L'écosystème méditerranéen (voir schéma correspondant).

L'écosystème méditerranéen est le plus typiquement oligotrophe. La production primaire est essentiellement assurée par des organismes pico-autotrophes de taille inférieure à 5 µm que sont les Cyanobactéries et les *Prochlorococcus*. La biomasse chlorophyllienne moyenne est équivalente à 18,5 µg C l⁻¹, valeur comparable à celle de 15,4 µg C l⁻¹, relevée en Mer Egée Sud en début du printemps. Les producteurs primaires excréteraient, sous forme de carbone organique dissous un peu moins de 20% de leur production carbonée (cf. Almofront 1, Fernandez et col, 1994). La biomasse bactérienne moyenne est de 10 µg C l⁻¹ (12,7 µg C l⁻¹ mesurée en Egée Sud) et la demande carbonée des bactéries (6,3 µg C l⁻¹ h⁻¹) représente 2% du COT semi-labile. La quantité de carbone organique total : COT, est de 933 µg C l⁻¹ en moyenne, dont 7% serait labile, c'est-à-dire utilisée par les bactéries en 4 à 10 jours. Le rendement de croissance des bactéries est de 5%, ce qui signifie que la majeure partie du carbone qui circule à travers le compartiment bactérien est re-émise sous forme de CO₂. Dans les écosystèmes méditerranéens caractérisés, le taux broutage des bactéries par les protozoaires est sensiblement égal au taux de croissance de la population bactérienne (Soto et al, 1993, Christaki et al., 1999). Il s'en suit une minéralisation de matière organique d'origine photosynthétique (azote et sans doute phosphore) soutenant une production primaire de type régénérée. Le mésozooplanton (copépodes) n'exerce pas de pression de prédation (Thibault & Gaudy, 1994). L'exportation particulière liée à cet écosystème méditerranéen est de faible intensité (moins de 0,1% par jour de la biomasse chlorophyllienne, cf. Almofront 1 : Peinert & Miquel, 1994) et les traceurs lipidiques mettent en évidence un matériel organique dégradé (résultats de la mission Almofront 1 : Gérin & Goutx, 1994), celui qui a échappé à la minéralisation dans la couche de surface par le biais des réseaux microplanctoniques hétérotrophes.

L'écosystème lié au front (voir schéma correspondant).

Cet écosystème présente des dimensions particulières : une trentaine de kilomètres de large pour plus de 200 km de long et une épaisseur de 100 à 200 m. La production primaire y est assurée par des algues microplanctoniques, les diatomées, qui utilisent le nitrate et le silicate apportés en surface par la circulation verticale induite par le courant horizontal lié au jet. La biomasse chlorophyllienne est la plus importante de la zone, soit environ 83 µg C l⁻¹. Malgré le déplacement important de la masse d'eau (80 km par jour au cœur du jet), la production est maintenue dans le temps, et ceci quelle que soit la saison (cf. Almofront 1 en Mai et Almofront 2 en Décembre/Janvier). Ces diatomées excrètent environ 5% du carbone photosynthétisé (Fernandez et al, 1994, Malinsky-Rushansky et Legrand, 1996). L'exportation particulière est également forte, supérieure à 1% de la chlorophylle intégrée de la colonne d'eau et cette exportation est à reliée au transport latéral par le courant perpendiculaire à celui du jet et par le transfert isopycnal, le gradient de densité étant à son maximum dans le front (Peinert & Miquel, 1994). Comme le montrent les marqueurs lipidiques cette exportation particulière importante est constituée de matériel frais, non dégradé. Dans cette " culture continue " de diatomées, les bactéries utilisent au maximum une matière organique dissoute dont la valeur moyenne est faible sur le bord gauche du front (904 µg C l⁻¹) mais pouvant atteindre jusqu'à 13000 µg C l⁻¹ sur le bord droit du front. La production bactérienne est la plus élevée des trois écosystèmes (3,4 µg C l⁻¹ h⁻¹). Si, la demande carbonée des bactéries est le reflet du carbone labile présent dans l'écosystème, ce carbone labile représenterait 12% du COT semi labile et il a été montré que 6 à 10% du COT disparaissait en 4 à 10 jours. Le rendement de croissance des bactéries est relativement fort (15%). Curieusement, la biomasse bactérienne reste modeste (13 µg C l⁻¹). Dans la situation d'une floraison due à un apport vertical, par mélange des eaux, de sels nutritifs combinés à une stratification de la couche supérieure sous l'influence d'une thermocline, l'hypothèse la plus courante pour le découplage entre la production et la biomasse bactériennes est la présence de protozoaires qui régularaient (top down control) la population bactérienne par le processus de broutage. Mais, dans le cas de cet écosystème soumis à des déplacements rapides horizontaux (environ 1200 m par jour pour le courant perpendiculaire au jet) et verticaux (4/5 m par jour) des masses d'eau, une autre hypothèse peut être émise qui verrait la biomasse bactérienne produite transférée sur le bord droit du jet (et ou bord gauche du tourbillon atlantique) avant que la pression de prédation n'ait pu s'exercer. Les fortes valeurs de COT et les effectifs élevés de bactéries, mesurés dans le site 4, correspondant à une situation de cœur du jet semblent conforter cette hypothèse. Ainsi, dans l'écosystème frontal, le réseau microbien serait tout à fait atypique car composé majoritairement des micro autotrophes et des bactéries hétérotrophes dont la biomasse serait rapidement exportée vers le tourbillon atlantique. Ce pseudo réseau microbien constitue certainement une des originalités fortes de l'écosystème frontal lié au jet géostrophique. Les deux conséquences importantes de cette originalité sont : 1) cette structure mésoéchelle est un site de piégeage de carbone par une production primaire élevée et une fixation efficace du carbone dissous par les bactéries et 2) une exportation rapide de ce carbone organique particulière et dissous qui va enrichir la structure tourbillonnaire subséquente au jet géostrophique sous forme d'apports "pseudo allochtones".

L'écosystème du tourbillon anticyclonique d'eau atlantique (voir schéma correspondant).

La couche homogène du tourbillon est comprise entre la surface et 120 - 150 m d'eau d'origine atlantique. La biomasse des organismes autotrophes (moyenne de 40,4 µg C l⁻¹) est essentiellement due à des algues de taille supérieure à 5 µm (flagellés - prymnesiophytes) auxquelles s'ajoutent des picoautotrophes sur le bord du tourbillon adjacent au jet. Malgré une production bactérienne relativement peu élevée (1,5 µg C l⁻¹ h⁻¹), moins de la moitié de celle du site frontal, la biomasse des bactéries présente la plus forte valeur des trois écosystèmes (17 µg C l⁻¹). Cette situation est tout à fait

similaire à celle de la campagne Almofront 1, avec des valeurs identiques des paramètres bactériens. La concentration en COT est très variable, avec une valeur moyenne de $252 \mu\text{g C l}^{-1}$, les concentrations les plus fortes étant localisées dans le bord du tourbillon accolé au jet. L'exportation de matière organique particulaire est faible et le matériel exporté est lui-même faiblement dégradé (Peinert & Miquel, 1994, Gérin & Goutx, 1994). La composition taxonomique des producteurs primaires et la proportion de production régénérée suggèrent une minéralisation de matériel organique par le réseau microhétérotrophe. D'une part, le rapport de la production bactérienne à la production primaire augmente entre le site frontal et le site du tourbillon, ce qui montre une contribution plus forte des hétérotrophes à la fourniture de sels nutritifs nécessaires à la production primaire. Par ailleurs, de l'écosystème frontal à l'écosystème du tourbillon, l'activité d'hydrolyse enzymatique des polymères par les bactéries ne décroît que dans un rapport 3 alors que la production bactérienne décroît dans un rapport de 6,5. Cette augmentation relative de l'étape préalable d'hydrolyse des composés organiques pour leur contribution à la production bactérienne montre que la matière organique advectée par le transport latéral est déjà amputée des composés les plus labiles (probablement utilisés dans le système frontal lui-même). Le réseau microbien, à composante hétérotrophe, doit se développer normalement ce qui conduit à une exportation particulaire faible. Cependant, de la possibilité pour les producteurs primaires de fixer du CO_2 dans toute la couche d'eau du tourbillon, résulte une qualité de relative fraîcheur de ce matériel exporté. Le zooplancton gélatineux collecte ce type de matière particulaire.

Une estimation quantitative du fonctionnement de la boucle microbienne, basée sur la conservation de masse, est en cours au sein du groupe Almofront.

2. Intérêt Scientifique.

Deux ans après la fin de la campagne, nous avons maintenant un effort d'intégration des résultats à accomplir pour atteindre nos objectifs rappelés en début de rapport.

Sur le plan dynamique et description physique des structures, la situation rencontrée est à peu près comprise, même si les mécanismes conduisant aux origines et à la fréquence de l'instabilité majeure observée ne sont pas encore déterminés. Il faut noter cependant que ces mécanismes d'instabilité ne concernent l'objectif 1 que dans la mesure où ils modifient les vitesses verticales dans la structure interne. Il faut donc dans la prochaine année séparer ce qui est subduction proprement dite et circulation secondaire permanente, production associée au déplacement du tourbillon et celle trouvée en régime stationnaire. Une comparaison entre les deux legs des répartitions des variables devraient nous conduire sur la voie et peut être réalisée dans l'année. Il faudra néanmoins avoir recours à la modélisation (Thèse de F. Olivier pour les aspects 3d) et modélisation d'écosystèmes 1 D avec advection verticale (Thèse de C. Devey dans différents sites). L'exploitation des towyo sera conduite en 2000 pour les calculs des champs d'ondes inertielles et pour les calculs des champs géostrophiques et agéostrophiques à haute résolution dans les différentes parties du méandre étudier. On devrait disposer d'une idée tant par modélisation que par études diagnostiques du champ de vitesse verticale compatibles avec les distributions des biomasses et des productions observées. Une grande partie de l'objectif 1 sera alors atteint.

Afin de progresser plus vite, il est prévu de confronter nos résultats avec ceux obtenus sur la même région par les équipes d'Omega. Un colloque sera organisé conjointement par L. Prieur et J. T. Allen.

L'objectif 2 sur la description des flux en utilisant les résultats du leg 2 est à atteindre en 2000. L'intégration des résultats est commencée

L'objectif 3 sera avancé par une étude approfondie des peuplements de zooplancton et des espèces migrantes. La distribution verticale de la matière particulaire (macro) sera décrite également en détail (G. Gorsky, V. Andersen).

Une partie de l'objectif 4 est déjà atteint par les premières évaluations de flux. Il reste néanmoins à mieux détailler site par site les flux dans les différents compartiments de l'écosystème. Ceci se fera sous la responsabilité de M. Bianchi et de L. Prieur. Une comparaison des diverses productions en termes de carbone, d'azote et d'oxygène sera menée, car accessible pour la première fois sans doute dans un système frontal. L'incidence sur les flux de CO₂ sera recherchée (C. Copin). En fin le rôle de l'instabilité dans les échanges entre jet et tourbillon qui se déplace est aussi à notre portée dans le courant de l'année 2000.

Les données seront disponibles à la communauté internationale courant 2000 après avoir accompli l'effort indispensable d'harmonisation et de description des fichiers. L. Prieur)

Ainsi, l'année 2000 est la dernière année où l'effort de coordination sur le programme Frontal et plus spécifiquement sur l'exploitation de la campagne Almofront 2 sera accompli. A la fin de cette année, le bilan sera dressé, mais les participants au groupe Frontal seront engagés dans les autres actions de PROOF, Pomme, en particulier et Prosopé. Ceci ne veut pas dire que l'exploitation en termes de publication sera terminée. En cas de nécessité, des petits projets spécifiques seront proposés, qui augmenteront l'exploitation des résultats obtenus sur les fronts mais seront circonscrits à des petites actions, (synthèse, modélisation ou études spécifiques multivariées non encore achevées). Ce plan est conforme aux souhaits exprimés par l'INSU.

3. Plan de recherche

La volonté générale du groupe Frontal est de poursuivre l'effort d'intégration des résultats selon les objectifs annoncés au début du programme. Une partie des résultats majeurs déjà obtenus a été présentée dans le compte rendu, relativement succinct de notre activité. Un effort important de publication pour finaliser la présentation des résultats reste à accomplir et c'est l'axe principal de la demande.

En résumé donc :

La présente demande reste sous l'égide du groupe Frontal afin d'assurer la cohésion de l'exploitation des campagnes antérieures et surtout de cette campagne Almofront 2, qui commence maintenant en termes de publications 2 ans après la fin des travaux à la mer.

Néanmoins une première tâche reste à achever en 2000, celle de la mise à disposition des données. La plupart des données sont maintenant disponibles sous forme de fichiers informatiques ou de graphiques échangeables par le réseau.

Ces données sont accessibles au groupe Frontal par e-mail ou par ftp. Un site ftp spécialisé a en effet été mis en place. (ccrv.obs-vlfr.fr ; anonymous ; e-mail ; cd/pub/prieur). Le travail consistera à les transmettre à la base de données JGOFS (M. P. Labaied) et à les rendre disponibles en parallèle sur un site web (html) dédié, ce qui paraît maintenant la forme de stockage la plus lisible à la fois pour Frontal et pour la communauté internationale. A terme, le bilan de Frontal sera par ce moyen plus clair que si les données étaient seulement envoyées à la base. Les données actuellement disponibles sont les données 'de base', courants ADCP, données de surface, variables météo-océaniques, paramètres physiques des CTD, TOWYO, SHET et la majorité des variables biologiques et chimiques. Toutefois certaines opérations et certaines variables (oxygène Towyo, CTD, sels nutritifs SHET) sont encore à contrôler pour étalonnage, à la suite de certains problèmes apparus au traitement. Il reste donc un travail significatif de traitement pour ces variables ou opérations. Un autre travail consiste à réunir sous forme conviviale, les différentes bases de données quelquefois disparates (ADCP sous matlab, Hiac sous excel, CTD sous ascii, Shet multivariable sous matlab, Rosette sous excel ou matlab, Cytométrie, PVM, dénombrement des populations planctoniques, etc..)

Les deux réunions générales de Brest et de Marseille en 1998 et 1999 ont permis d'échanger les premiers résultats, même avant l'achèvement de traitements. Il se dégage un certain nombre d'axes pour exploiter les résultats. Le premier axe consiste à décrire la structure physique et dynamique rencontrée et à placer les mesures chimiques et biologiques dans cette structure mouvante. Un travail important de concertation entre physiciens, chimistes et biologistes est à accomplir, car certaines variables biologiques (production, biomasse, paramètres physiologiques) renseignent sur les mouvements verticaux probables. Des moyens de mission doivent donc être mis à disposition pour que ce travail essentiel de publication commune puisse aboutir dans le courant 2000.

Durant l'année 2000, un autre axe concerne l'effort de synthèse sur les différents types d'écosystème rencontrés en divers endroits spécifiques de la structure jet tourbillon d'Alboran. Cet effort ne pourra être vraiment accentué que si la cohésion du groupe est assurée par un financement. D'autres axes sont apparus plus spécifiques : Sur le plan dynamique, il est prévu de rédiger une publication donnant les grandes lignes de la structure complexe rencontrée et de commencer l'interprétation des towyo, réalisés pour évaluer les mouvements verticaux. La modélisation 3D devrait également aboutir au moins sur le plan dynamique. Des publications sont déjà commencées sur le fonctionnement des écosystèmes et devront être finalisées courant 2000. Elles porteront sur les divers types de population qui occupent les différentes parties du système frontal, sur les variations de production en termes d'oxygène, de carbone, d'azote et de silice, sur l'export en profondeur et sur les rôles respectifs de la boucle microbienne et des brouteurs macroplanctoniques dans le bilan de carbone.

A la suite des symposia EGS et UGGI, nous avons convenu avec J. T. Allen (SOC), qui dans le cadre de projets européens dont Omega a travaillé sur la même zone qu'Almofront, de tenir un colloque commun au printemps à Marseille ou à Villefranche. Nous devons donc disposer de moyens pour faire venir les participants français.

L'essentiel du budget demandé correspond aux besoins de réunir les participants, de présenter les résultats au colloque EGS et au colloque sur les fronts en mer d'Alboran. Bien que les analyses biologiques et chimiques soient à très peu près terminées, certains matériels (CHN, Iatroscan, compteur à scintillation) ont été très sollicités et Frontal doit participer à d'éventuelles remises en état. Pour cette raison, un petit budget de matériel est demandé. Le fonctionnement comporte une part importante de frais de publication, logiques dans un tel programme.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques du responsable et de l'équipe, en particulier sur le sujet de la demande (trois dernières années)

BIBLIOGRAPHIE FRONTAL

Cette liste fait suite à celle fournie dans les rapports précédents. Les travaux non frontologiques des participants de FRONTAL sont exclus. De même les travaux frontologiques hors du groupe FRONTAL ne sont pas mentionnés. La liste est divisée en plusieurs groupes :

A. Publications internationales (avec "review" et de diffusion internationale, 1996 - 1999)

CANIAUX, G., PRIEUR, L., GIORDANI, H. and F. HERNANDEZ, 1999. Observation of the winter circulation in the Newfoundland basin. In revision to J. P. O., June 1999

CLAUSTRE, H., FELL, F., OUBELKHEIR, K., PRIEUR, L., SCIANDRA, A. and M. BABIN, 1999. Continuous monitoring of surface optical properties across a geostrophic front : biogeochemical inferences. Accepted to Limnol. and Oceanogr, Sept 1999

CONNAN, O; LE CORRE, P. AND MORIN, P. 1996. Analyse des composés halocarbonés volatils dans l'eau de mer: extraction par un système de 'purge and trap". Analusis, 24, 55-59.

CONNAN, O. CHAUMERY, C. LABASQUE, T. LE CORRE, P. and MARTY, Y. 1996. Analyse des chlorofluorocarbones (CFC) dans l'eau de mer. Application aux masses d'eaux du Golfe de Gascogne. Ann. Hydro., 20, 59-73.

EYMARD, L., S. Planton, P. Durand, C. Le Visage, P.Y. Le Traon, L. PRIEUR, . Weill, D. Hauser, J. Rolland, J. Pelon, F. Baudin, B. Bénech, J.L. Brenguier, G. Caniaux, P. De Mey, E. Dombrowski, A. Druilhet, H. Dupuis, B. Ferret, C. Flamant, P. Flamant, F. Hernandez, D. Jourdan, K. Katsaros, D. Lambert, J.M. Lefèvre, P. Le Borgne, B. Le Squire, A. Marsoin, H. Roquet, J. Tournadre, V. Trouillet, A. Tychensky, B. Zakardjian, 1996. Study of the air - sea interactions at the mesoscale : the SEMAPHORE experiment. Annalae Geophysicae. 14, 986-1015.

EYMARD L., G. CANIAUX, H. DUPUIS, L. PRIEUR, H. GIORDANI, R. TROADEC, D. BOURRAS, C. GUERIN, P. LE BORGNE, A. BRISSON, and A. MARSOIN, 1998. Surface fluxes in the North Atlantic Current during the CATH/FASTEX Experiment. In revision to the Q. J. R. M. S.

GROUT, H., SEMPERE, R., THILL, A., CALAFAT, A., PRIEUR, L. and M. CANALS, 1999. Morphological and chemical variability of colloids in the Almeria-Oran front in the eastern Alboran Sea (SW Mediterranean Sea) : evidence by means of Analytical Electron Microscopy. . Submitted to Limnol. and Oceanogr. June 1999

LE CORRE, P; WAFAR, M. V. M., L'HELGUEN, S. ET MAGUER, J. F., 1996. Ammonium assimilation and regeneration by size-fractionated plankton in permanently well mixed temperate waters. J. Plankt. Res, 18, 355-370.

LEFEVRE, D., M. DENIS, C. E. LAMBERT, J. -C. MIQUEL 1996. Is the DOC the main source of organic matter remineralization in the ocean water column? J. Mar. Systems, 7, 281-291.

L'HELGUEN, S. MADEC, C. & LE CORRE, P. 1996. Nitrogen uptake in permanently well-mixed temperate coastal waters. Est. Coast. Shelf Sci., 42, 803-818.

MAGUER, J. -F., LE CORRE, P. and MADEC, C. 1996. Variations saisonnières de l'absorption de l'azote dans un système brassé peu profond (Manche Occidentale). Oceanol. Acta, 19, 529-537.

ZAKARDJIAN, B. & PRIEUR, L. 1998. Biological and chemical signs of upward motions in permanent geostrophic fronts of the Western Mediterranean. J. Geophys. Res., 103, C12, 27849 – 27866.

B. Publications (Rang A) du groupe FRONTAL dans le programme DYNAPROC

Avant la campagne Almofront 2, le groupe frontal a participé dans l'esprit et en groupe à la réalisation de la campagne Dynaproc (1995) au point Dyfamed en gardant une stratégie d'observation du type frontal. Il a paru légitime que cette activité des membres de l'équipe frontal soit signalée ici:

Andersen, V. and L. Prieur. High-frequency time series observations in the open Northwestern Mediterranean Sea and effects of wind events (DYNAPROC study, May 1995). Deep-Sea Res. I, accepted, 47/3

Bianchi, M., Fosset, C. and P. Conan. Nitrification rates in the NW Mediterranean Sea. Limnol. Oceanogr. (en révision).

Copin-Montégut, C. Consumption and production on scales of a few days of inorganic carbon, nitrate and oxygen by the planktonic community. Results of continuous measurements at the Dyfamed Station in the northwestern Mediterranean Sea (May 1995). Deep-Sea Res. I, accepted, 47/3

Goutx, M., Momzikoff, A., Striby, L., Marty, J.-C. and I. Vescovali. High frequency fluxes of labile compounds in the central Ligurian Sea, northwestern Mediterranean. Deep-Sea Res. I, accepted, 47/3

Stemmann, L., Picheral, M. and G. Gorsky. Diel changes in the vertical distribution of suspended particulate matter in the NW Mediterranean Sea investigated with the Underwater Video Profiler. Deep-Sea Res. I, accepted, 47/3

Vidussi, F., Marty, J.-C. and J. Chiavérini. Short-term evolution of phytoplankton pigment distributions during the transition from spring bloom to oligotrophy in the Mediterranean Sea. Deep-Sea Res. I, accepted, 47/3

C. Publications à sélection moins sévère et (ou) de diffusion plutôt nationale (1996-1999)

ANDERSEN, V. *et al.*, 1996. Dynamique des processus rapides dans la colonne d'eau. Premiers résultats de la campagne DYNAPROC. Atelier Modélisation JGOFS-France et PNEDC-CO2, Paris, 5-7 juin 1996. Rapport JGOFS-France N°24, 35-38.

ANDERSEN, V., L. PRIEUR et P. NIVAL 1997. Observations à haute fréquence pendant un mois en méditerranée nord-occidentale et effets de coups de vent: Campagne DYNAPROC, mai 1995. Atelier JGOFS France de modélisation, 6-8 Oct.97, Paris, Rapport Jgofs France n°25, N. Metz ed. 15-22.

ANDERSEN, V. & L. PRIEUR, 1998. Observations à haute fréquence en Méditerranée nord-occidentale et effets des coups de vent (étude DYNAPROC, mai 1995). Atelier DYFAMED, Villefranche, 12-13 octobre.

BIANCHI M., PRIEUR L., GOUTX M. Physical and biological processes coupling at mesoscale. Conclusions from Almofront in the Alboran Sea. Keynote conference au CANIGO Conference - Las Palmas de Gran Canaria (12 - 16 septembre 1999), Books of Abstracts, p. 42.

CHIFFLET, M., PRIEUR, L. & V. ANDERSEN, 1997. Modèle 1-D de la dynamique de l'écosystème pélagique. Effets des coups de vent. Atelier Modélisation JGOFS-France et PNEDC-CO2, Paris, 6-8 octobre 1997 (poster)

CHIFFLET, M., PRIEUR, L. & V. ANDERSEN, 1998. Modélisation 1-D de la dynamique de l'écosystème pélagique. Effets des coups de vent (campagne Dynaproc). Atelier DYFAMED, Villefranche, 12-13 octobre.

CLAUSTRE, H., FELL, F. K. OUBELKHEIR and L. PRIEUR, 1998. Multivariate, bio-optical investigation of a frontal system in the Mediterranean Sea. LASLO, November 1998, Hawaï.

GROUPE CATCH 1998. (dont L. PRIEUR). CATCH 97, Données météoOcéaniques . CNRM, MeteoFrance, Février 1998.

GROUT, H., R. SEMPERE, A. CALAFAT, M. CANALS & L. PRIEUR, 1999. Occurrence of colloids in the Alboran Sea (SW Mediterranean Sea), M T P Newsletter, n°7.

PRIEUR, L., DUPUIS, H., CANIAUX, G. and EYMARD, L. 1996. Etude du couplage océan -atmosphère au point M. DOC SEMAPHORE n°10, Atelier de Villefranche Sur Mer 4-5 Dec 1995, CETP ed. ,75-79.

STEMMAN, L. PRIEUR, L. & GORSKY, G. 1996. Vertical distribution of particulate matter across an open sea frontal system. OS22M-13, ASLO meeting , San Diego, Feb. 1996.

ZAKARDJIAN, B. A., GRATTON, Y., PRIEUR, L., RUNGE J. A. AND VEZINA, A. F., 1997. Coupling of physical and biological processes in the Ocean. Workshop Data assimilative modelling of the coastal Ocean, K. Thompson org., Dalhousie University, Canada, July 17-18 1997.

ANDERSEN, V. and L. PRIEUR, 1999. Short term changes in the dynamics of the pelagic ecosystem end effect of wind events. 1 . The Dynaproc study. EGS Geophysical abstracts, 24th General Assembly, hydrology, Oceans and atmosphere Vol 1, (2), 406.

PRIEUR, L., 1999. Almofront 2, an interdisciplinary experiment on the internal structure of the frontal jet of the Eastern Alboran Sea. EGS Geophysical abstracts, 24th General Assembly, hydrology, Oceans and atmosphere Vol 1, (2), 405.

- CHIFFLET, M., ANDERSEN, V. and L. PRIEUR, 1999 Short term changes in the dynamics of the pelagic ecosystem and effect of wind events. 2. A One-dimensional model. EGS Geophysical abstracts, 24th General Assembly, hydrology, Oceans and atmosphere Vol 1, (2), 410.
- CANIAUX, G. PRIEUR, L., GIORDANI, H. and F. HERNANDEZ, 1999. Analysis of a deep eddy in the North Atlantic current. EGS Geophysical abstracts, 24th General Assembly, hydrology, Oceans and atmosphere Vol 1, (2), 386.
- OUELLET, M., GRATTON, Y. and L. PRIEUR, 1999. Characterization of inertial oscillations in the Eastern Alboran Sea during ALMOFRONT 2, SCMO Symposium, June 1999.
- GRATTON, Y., PRIEUR L. and C. LAFLEUR, 1999. Mesoscale variability in the eastern Alboran Sea in december 1997 – January 1998. IUGG 99 general assembly, Birmingham July 1999, P11.

MOYENS DONT DISPOSE LE PROPOSANT ET QUI SERONT AFFECTÉS À LA RÉALISATION DU PROJET

1. Chercheurs et laboratoires impliqués (établir une liste nominative avec indication précise du rôle de chacun et du pourcentage de temps qu'il consacrerà au projet)

Liste du personnel scientifique : **le temps consacré est compté en % annuel.**

Nom	Titre	Appartenance	Spécialité/ Temps sur Frontal	Thématique
Louis PRIEUR	DR2	LPCM-OOV	P 60%	Chef de projet
Pascal MORIN	CR1	OORoscoff	C 30%	Nutritifs/Régénér
Christian MADEC	MC1 UBO	UBO/LOC	C 30%	Flux N15
J. Franç MAGUER	Ctr UBO	UBO/LOC	C 20%	Flux N15
Ricardo RISO	MC1 UBO	UBO/LOC	C 20%	Metaux
Jacques PRUVOST	Thes MRT	UBO/LOC	C 40%	Freons
Domi LEFEVRE	CR1	COM Mars	C 30%	FluxO2/ETS
G. GREGORI	Thès MEN	COM Mars	C 50%	ETS/cyto
Stephan JACQUET	Thès MEN	OORoscoff	B 30%	Cytométrie
Micheline BIANCHI	DR2	Microbi Mars	B 30%	Microbiol
Madeleine GOUTX	CR1	Microbi Mars	B 30%	Microbiol
Richard SEMPERE	CR1	Microbi Mars	B 20%	Microbiol
Fr. VANWAMBEKE	CR1	Microbi Mars	B 30%	Microbiol
Laurent STRIBY	Thè	Microbi Mars	B 40%	Microbiol
Hélène GROUT	Postdoc	U. Barcelone	B 10%	Microbiol
Jean RAUNET	IE2	LPCM-OOV	P 100%	CTD/traitements
Yves GRATTON	Pr Canada	INRS/Quebec	P 30%	CTD/ADCP
Mathieu OUELLET	Etud.	Rimouski	P 30%	Courantométrie
Jean Claude MARTY	DR1	LPCM-OOV	C 10%	Pigments
Isa. VESCOVALI	Thè	LPCM-OOV	C 30%	Pigments
Hervé CLAUSTRE	CR1	LPCM-OOV	C 10%	Pigments
Kadi.OUBELKHEIR	Thè	LPCM-OOV	C 30%	Pigments
Mireille PUJO-PAY	CR2	Banyuls	C 30%	NOD/Selsnut
Nathalie LEBLOND	AI	OOV	C 20%	Pièges/CHN
Antoine SCIANDRA	CR1	LEBPM OOV	B 20%	Spect taille
Claire COPIN	CR1	LPCM-OOV	C 30%	CO2/Alc/O2
Milena BEGOVIC	Thès	LPCM-OOV	C 20%	CO2/Alc/O2
Silvio PANTOJA	Pdoc USA	WHOI	C 30%	15N flux
Flavienne BRUYANT	Thès	LPCM-OOV	C 30%	Flux C
Anne-Sophie CUSSATLEGRAS	Thès	Ecole Navale	B 30%	CTD Bioluminesce.
P. GEISTDOERFER	DR1	Ec Nav Brest	B 10%	Bioluminesc
Valérie ANDERSEN	CR1	LEBPM OOV	B 30%	Bioness/Modèl.
M. SCOTTO	AJT CNRS	LEBPM OOV	B 60%	Ech Bioness
C. DEVEY	thès	LEBPM OOV	B 100%	Modèle 1D
G. GORSKY	CR1	LEBPM OOV	B 20%	Part/macroplanct.
Faical YOUSARA	Thès	COM Mars E.	B 50%	Flux respiration
Raymond GAUDY	CR1	COM Mars. E	B 30%	Flux Respiration
Frank OLIVIER	thèse	LODYC	P 100%	Modélisation 3D
Bernard QUEGUINER	Pr.	COM Luminy	C 15%	Flux Silice
TOTAL			océanographes. 1345%	toutes disciplines

Conseillers : les temps de ces personnes souvent responsables d'équipes ne sont pas évalués ; Les temps des stagiaires dont le nombre n'est pas négligeable dans les laboratoires n'est pas non plus compté. Les thèses font souvent appel à des Directeurs de thèse qui ne participent pas ou plus directement au programme, mais dont les compétences sont sollicitées :

Daniel VAULOT, Station Roscoff
Laurent MEMERY LODYC
Marcel BABIN, LPCM OOV LPCM
Michel. DENIS, COM

picoplancton/Bio mol.
Modélisation 3D
Production/Optique
cytométrie

L'évaluation en pourcentage, faite individu par individu, donne environ 13 personne temps plein sur le projet, en ne considérant que le travail de permanents et thésards. En réalité, la masse laborieuse est plus grande puisque des stagiaires passent de 2 à 6 mois dans les laboratoires (voir liste des rapports de stage) et travaillent sur des sujets d'analyse ou de traitements des données concernant au moins pour partie le projet. D'ailleurs un point essentiel du projet est d'obtenir les moyens pour réunir tous ces acteurs de la recherche.

La liste suivante est établie pour indiquer les principaux responsables sur lesquels repose en fait l'opération d'exploitation des campagnes FRONTAL. Souvent ces responsables donnent des sujets de stage à des étudiants. Comme le groupe frontal exploite également la campagne Catch, les collaborations pour ce programme sont aussi indiquées :

L. Prieur (toutes campagnes, chef de projet), ESA 7077
V. Andersen (Almofront, macroplancton et modélisation), ESA 7076
M. Babin (Almofront, Production primaire) ESA7077
M. Bianchi (Almofront, microbiologie, MOD), LMM Marseille
H. Claustre (Almofront - Catch, pigments, Optique, et granulométrie) ESA 7077
C. Copin (Almofront - Catch, CO₂, O₂) ESA 7077
R. Gaudy (Almofront, mesozooplancton) COM
P. Geistdoerfer (Almofront, bioluminescence), Ecole navale
G. Gorsky (Almofront, Grosses particules), ESA 7076
Y. Gratton (Almofront, Dynamique); INRS Quebec, Canada.
D. Lefèvre (Almofront, DIC, production O₂) COM
L. Memery (Almofront, Modélisation) LODYC
P. Morin (Almofront - Catch, Sels nutritifs) Observatoire Roscoff/UBO
G. Caniaux (Catch, flux O - A) Météo France, Toulouse

2. Equipement disponible pour la réalisation du projet (préciser dans quel laboratoire)

sans objet

Autres financements attribués (en cours) ou demandés dans le cadre des programmes INSU (Equipements mi-lourds INSU, autre Programme National). Bien préciser les financements obtenus dans le cadre européen.

Sans objets

BUDGET

1. FONCTIONNEMENT

A détailler et justifier

Fonctionnement général :	10 kF
Entretien logiciels (matlab, Adobe pour gestion et traitement de données :	10 kF
Frais de publication (1 à JGR, à L&O.)	30 kF

Total fonctionnement :	50 kF

2. MISSIONS :

A détailler et justifier

Missions V. Andersen (Villefranche)

35th European Marine Biology Symposium (EMBS) Sebastopol et séances de travail avec les collaborateurs ukrainiens zooplanctonologues et

mission à Brest pour travail avec A. S. Cussat Legras (Bioluminescence) 15 kF

Missions L. Prieur (Villefranche)

Canada, travail de publications avec M. Ouellet et Y. Gratton 15 kF

EGS Nice (frais d'inscription) 1.5kF

Total mission individuelles 31.5 kF

Réunion générale (à Villefranche ou marseille avec collègues anglais et espagnols)

Location de salle, missions des français (30 participants) 45 kF

3. ÉQUIPEMENT SPÉCIFIQUE

A détailler et justifier

Achat de support de sauvegarde (disque jazz et zip) : 5 kF

Réparations de analyseur CHN (Villefranche) et Iatroscan (Marseille) 20 kF

Total petit matériel 25 kF

TOTAL GÉNÉRAL DES CRÉDITS DEMANDÉS (HT) : 151.5 kF

Projet PROOF

FRONTAL ALMOFRONT Exploitation

Année 2000

L. Prieur

LPCM Villefranche sur mer

Fascicule de figures associées au rapport inclus dans la demande

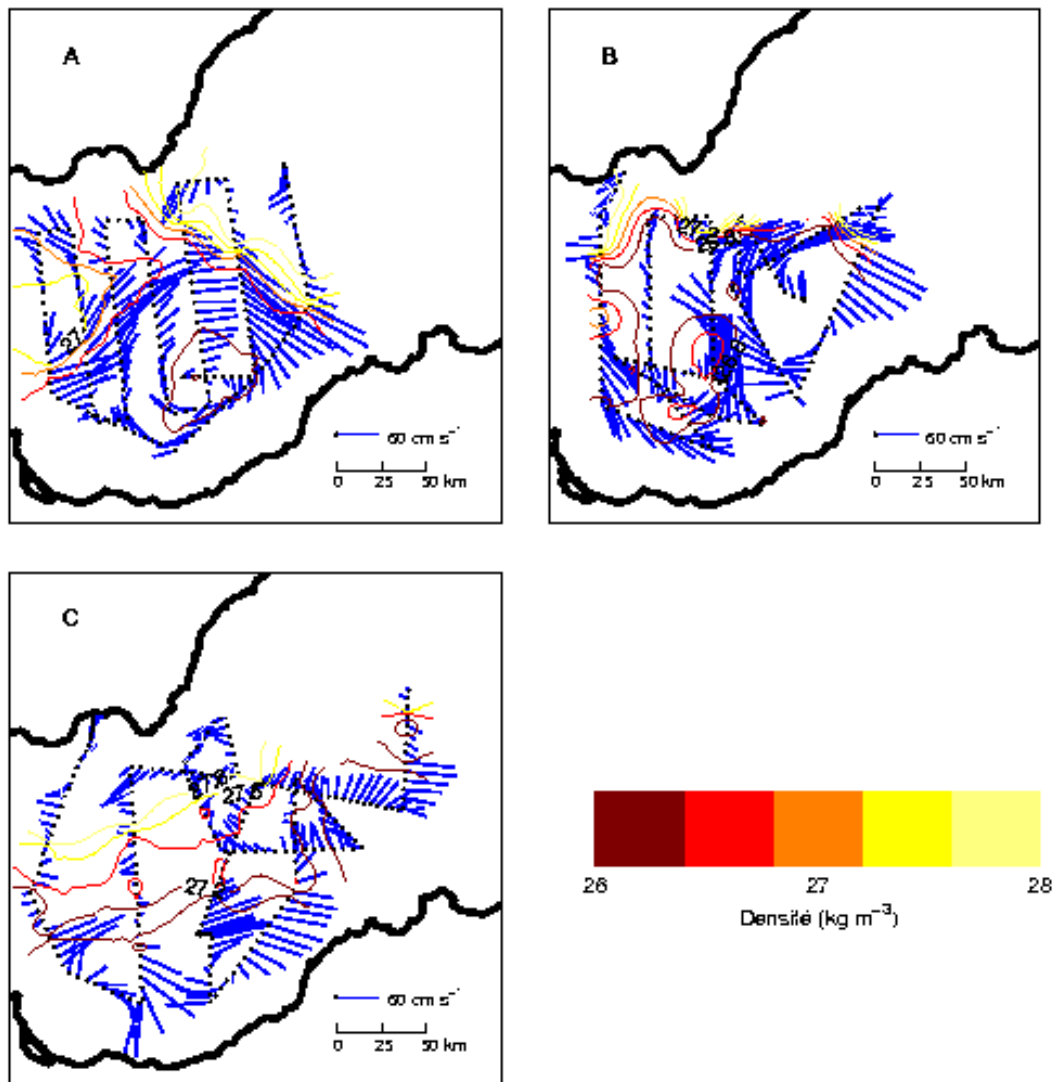


Figure 1 : courants de surface ADCP de coque avec isolignes de densité pour diverses périodes d'Almofront 2.

- A : début du leg 1 : 3/12 au 4/12 1997
- B : début du leg 2 : 23/12 au 28/12 1997
- C : fin du leg 2 : 13/01 au 15/01 1998

(Gratton, Prieur, Lafleur)

ALMOFRONT 1997 - 1998 - LEG 1



Figure 2 : Positions géographiques des stations CTD Rosette (points rouges) , durant le Leg 1 d'Almofront 2. Les numéros de stations sont portés en petits caractères. La radiale traversant la mer d'Alboran en ligne brisée a été réalisée deux fois à 8 jours d'intervalle en traversant successivement le courant près de la côte espagnole, puis le jet frontal (St 261-267) puis le tourbillon anticyclonique de part en part.

(Prieur, Raunet)

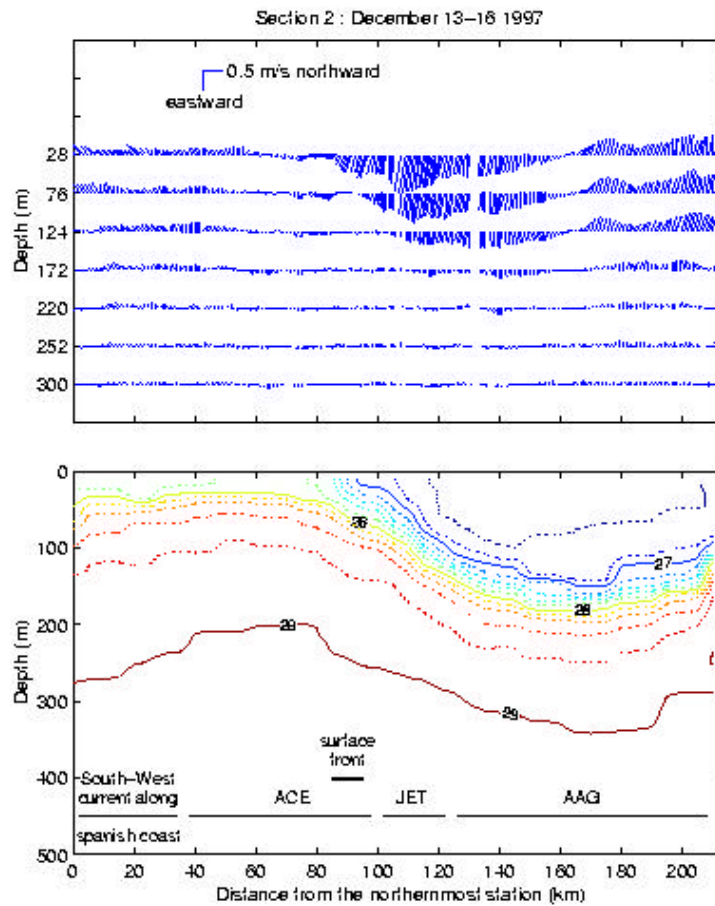


Figure 2bis : Profils horizontaux de courants à 8 profondeurs entre 28 et 300 m le long de la radiale 2, entre les stations 252 et 275 (positions en figure 2). L'échelle et la direction des courants sont repérées en haut du graphique. En bas, section verticale de densité avec isolignes tous les 0.2 kg/m³ entre 26.6 et 29 kg/m³. Les repères des structures moyenne échelle sont portés sur le graphique du bas. Le faible courant espagnol porte au Sud-Ouest, puis le front et le jet est caractérisé par un fort courant Est-Sud-Est entre 85 et 120 km, puis le bord Nord-Est du tourbillon est rencontré avec un courant de même direction assez profond. Dans le cœur, à 155km, le courant s'annule et change de direction pour porter à l'Ouest Nord-Ouest, et à nouveau s'affaiblit près de la côte algérienne. (Gratton, Prieur, Lafleur)

(Gratton, Prieur, Raunet)

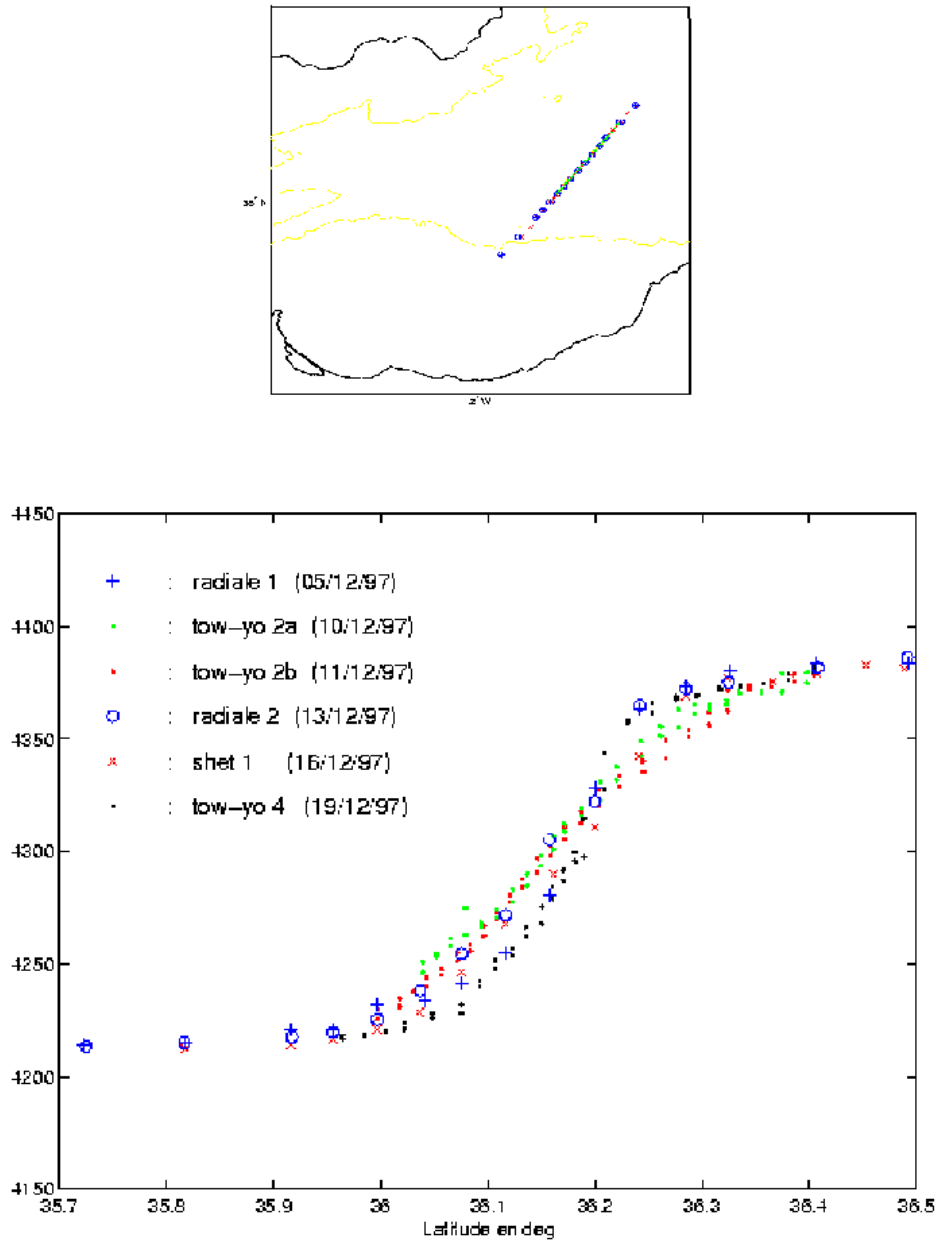


Figure 3: Contenus halins (m) pour la couche comprise entre 35 et 150 m. Les valeurs de contenu de 4400, 4300, 4200 m correspondent respectivement à une salinité moyenne de la couche de 38.261, 37.391, 36.522. La même section a été réalisée selon le même axe (graphique du haut) en 15 jours au travers du système jet frontal tourbillon. On note seulement de faibles changements de la position du gradient de salinité moyenne (inférieurs à 5 km), sans dérive systématique.

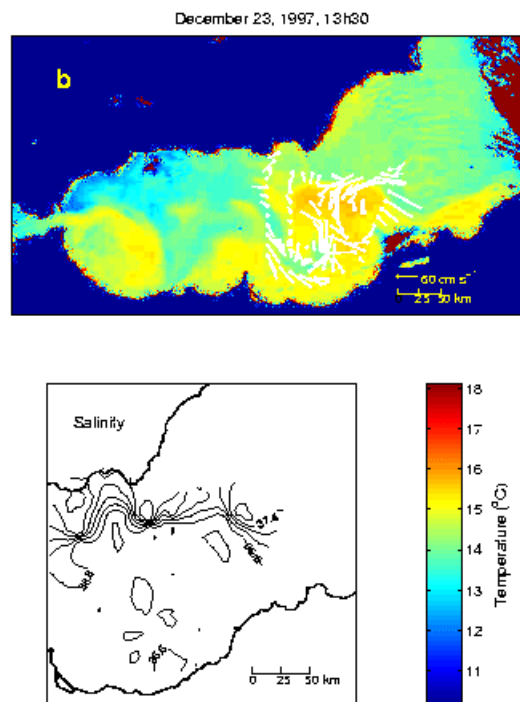


Figure 5 : Image thermique du 23 décembre 1997 et, superposés, les courants de surface tels que mesurés par l'ADCP de coque entre le 23 et le 26 décembre. En bas sont représentées les isolignes de salinité pour les mêmes trajets du navire, obtenues à partir du thermosalinographe.

(Gratton, Prieur, Lafleur)

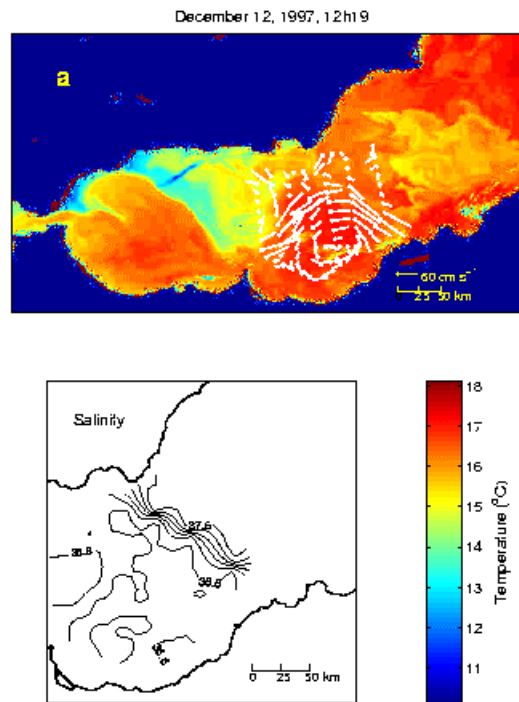


Figure 4 : Image thermique du 2 décembre 1997 et, superposés, les courants de surface tels que mesurés par l'ADCP de coque pendant les 3 et 4 décembre. En bas, sont représentées les isolignes de salinité pour les mêmes trajets du navire, obtenues à partir du thermosalinographe.

(Gratton, Prieur, Lafleur)

(Gratton, Prieur, Lafleur)

ALMOFRONT 1997 - 1998 - LEG 2

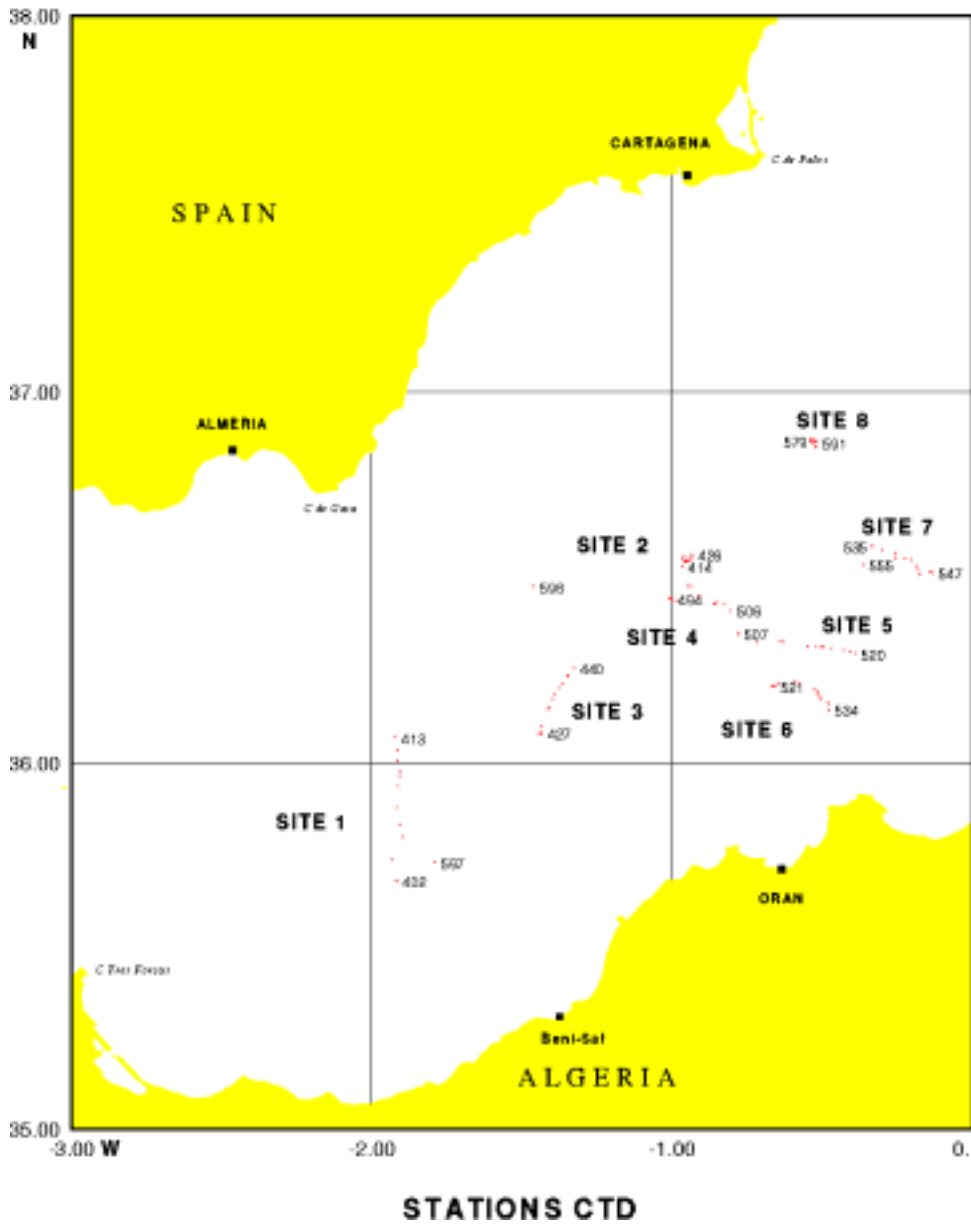


Figure 6 : Positions géographiques des stations CTD Rosette (points rouges) , durant les 36 heures de suivi de la ligne de pièges aux différents sites du Leg 2 d'Almofront 2. Les numéros de stations du début et de la fin de chaque site sont portés en petits caractères. Les sites ont été numérotés dans l'ordre chronologique de réalisation.

Positions schématiques des sites dans Jet - Tourbillon

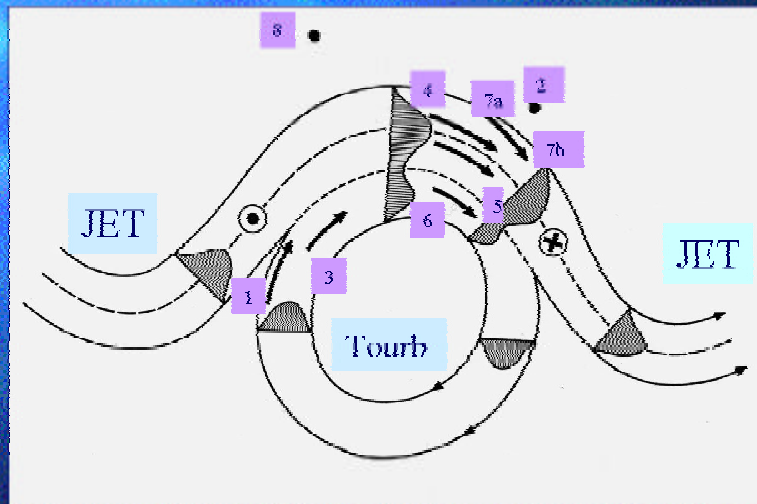
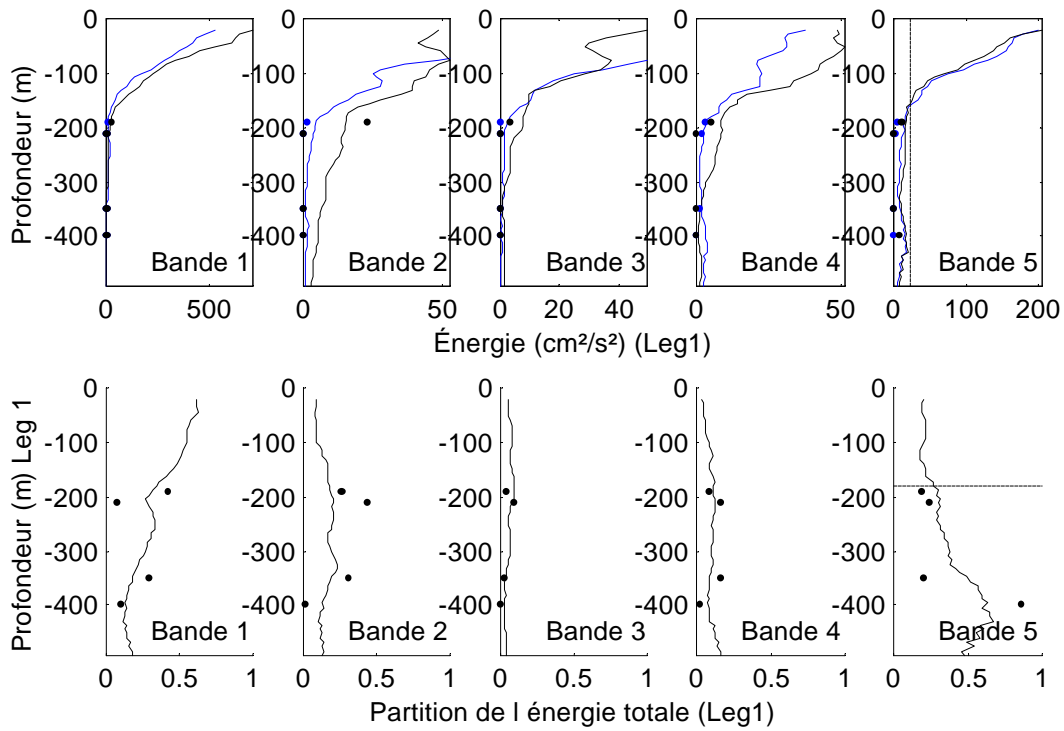


Figure 7 : Positions schématiques des sites du système jet-front-tourbillon, exploré durant le leg 2 d'Almofront 2. Le schéma du jet et du tourbillon est établi sur la base des observations réalisées durant le leg 1 au moyen des ADCP de coque, du thermosalinographe, des towyo, du shet et des radiales CTD rosette. Comme le tourbillon s'est déplacé vers l'Est durant les 21 jours du leg 2, les positions schématiques ne sont pas les positions géographiques. Pour trouver les positions schématiques, on a fait intervenir les profils moyens de densité avec la profondeur, comparés à ceux des stations de la radiale CTD du leg 1. On obtient ainsi la position transverse au courant dans le système jet tourbillon. Les directions et intensités moyennes du courant donnent les positions longitudinales dans ce système. Les flèches indiquent les dérives durant les 36 heures d'observation de chaque site. Les courbes hachurées représentent les sections schématisées des courants de surface. L'axe du jet est matérialisé par un trait tireté. Le point et la croix encerclés rappellent que la vitesse verticale dans les couches de surface est respectivement ascendante et descendante, avant et après la crête du méandre.
Schéma L. Prieur et J. Raunet.



(noir : partie anticyclonique . bleu : cyclonique),

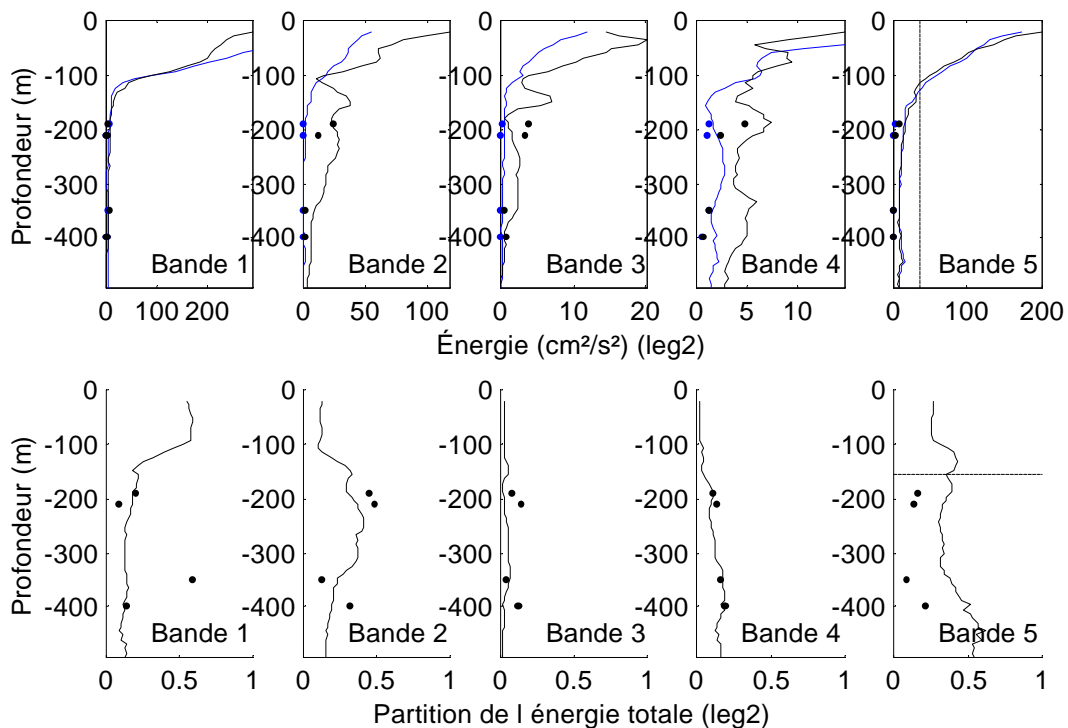
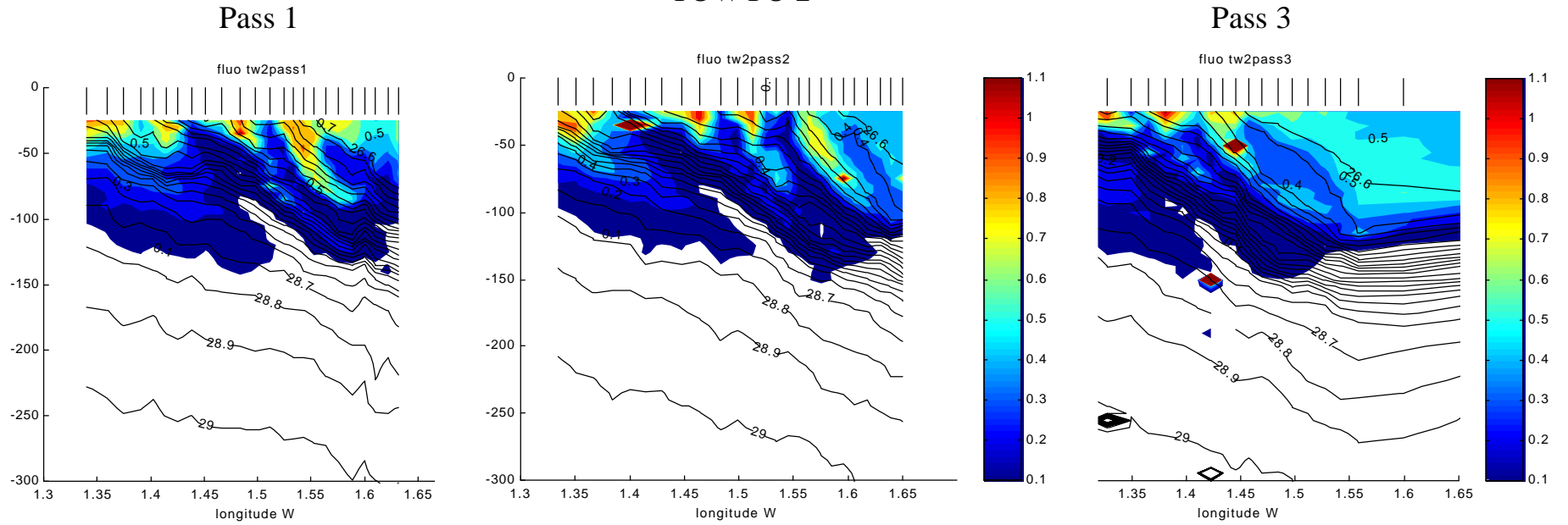


Figure 8. Résultats de l'analyse harmonique rotatoire en énergie (cm²s⁻²) et en proportion dans chaque bande de fréquence qui sont respectivement : Bande 1 : 0.002-0.04 cph , Bande 2 : 0.04-0.06 cph (inertielle), Bande 3 : 0.06-0.07 cph, Bande 4 : 0.07-0.09 cph (marée M2), Bande 5 : 0.09-3.00 cph.

Pour les hautes fréquences, bande 5, les parties des profils en dessous des tiretés correspondent à des énergies où le rapport signal/bruit est trop faible pour avoir des résultats significatifs.

TOWYO 2



section 2 CTD Almofront 2

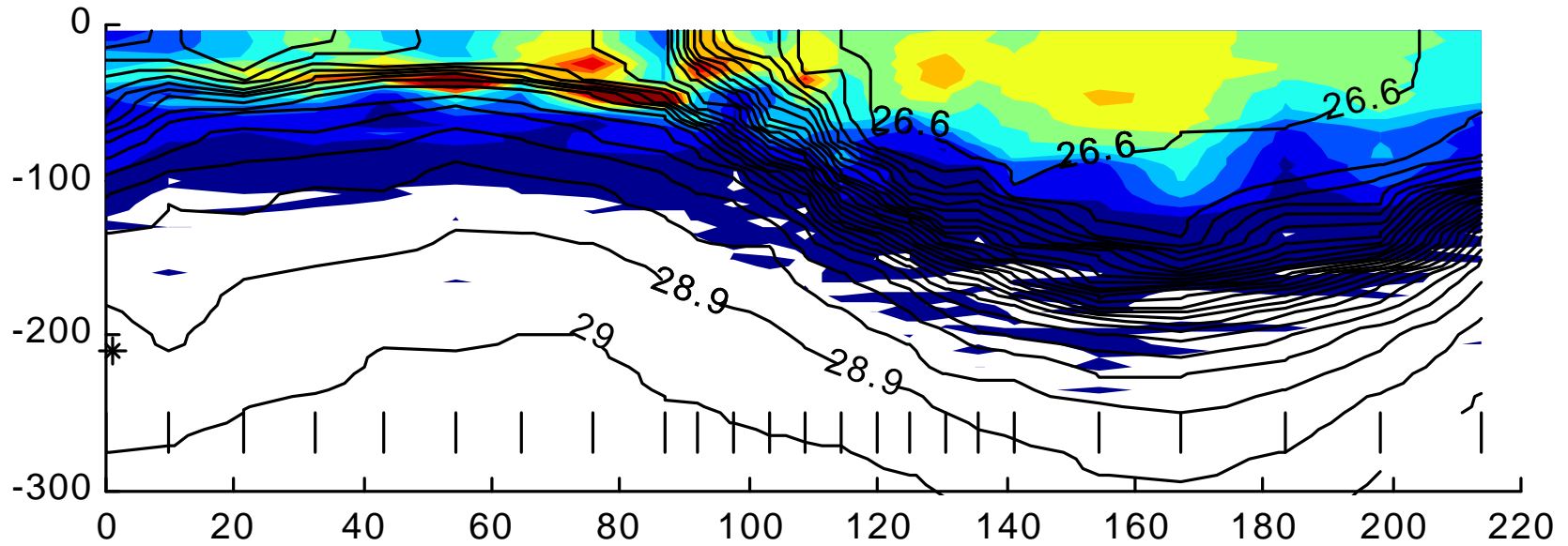
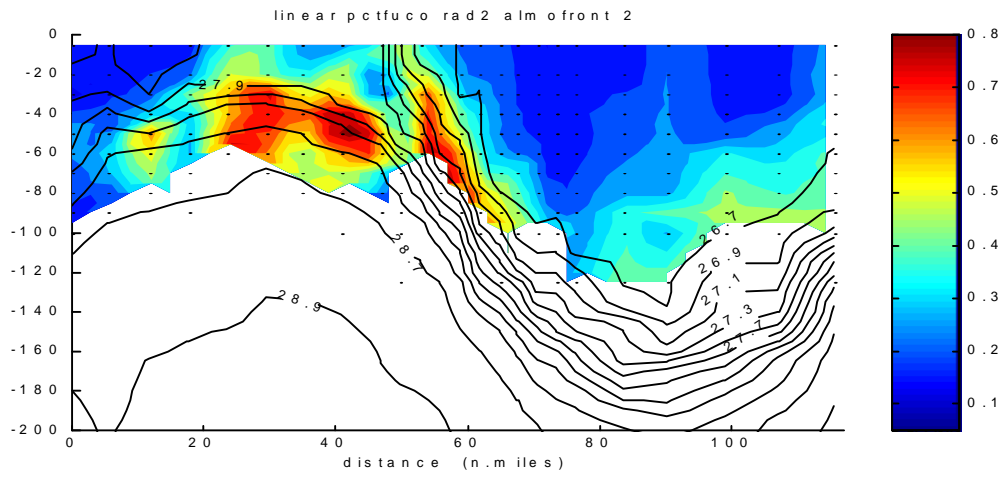
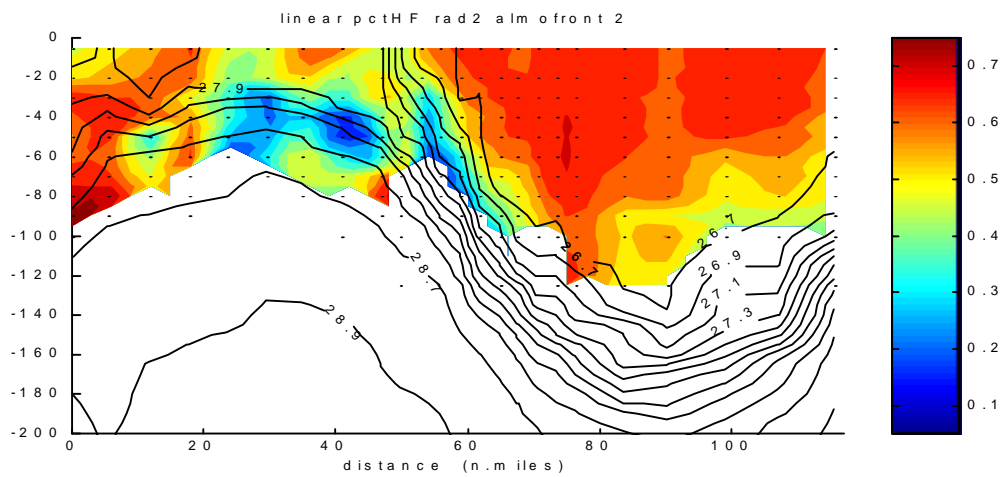


Figure 9 Chla et densités (Prieur, Raunet)

Fuco/Tot



19 'HF/
Tot



Zea/Tot

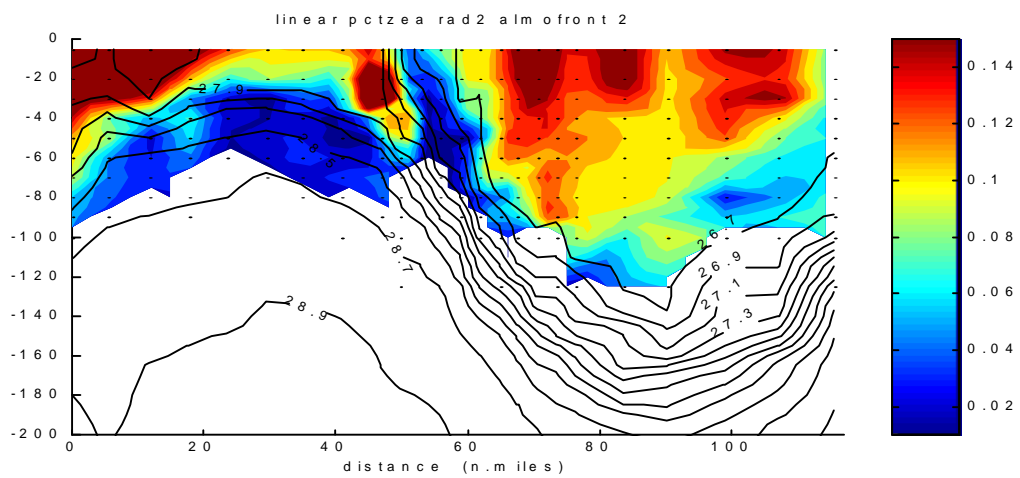
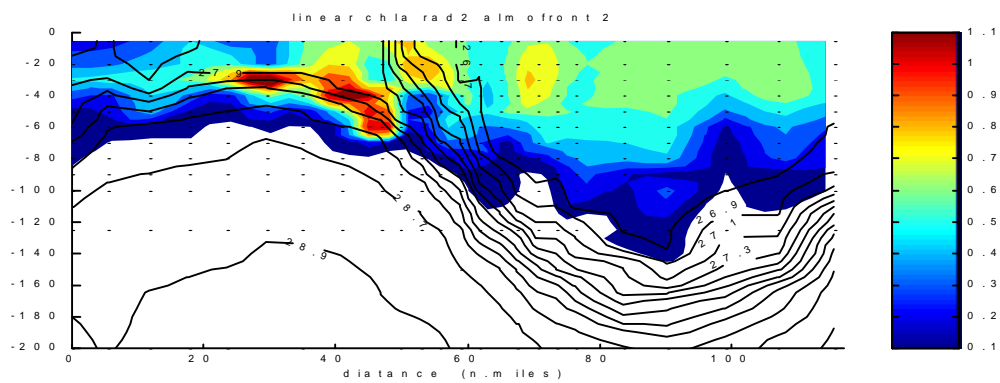
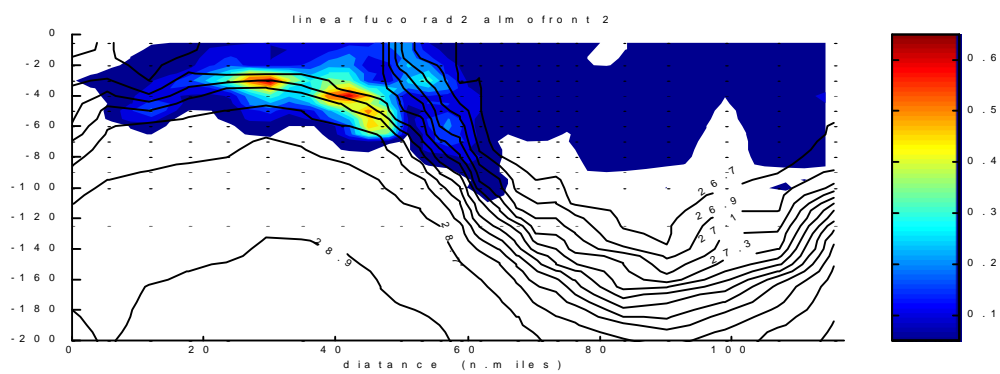


Figure 11: Rapports pigments radiale 2 (Vesvovali, Marty, Prieur)

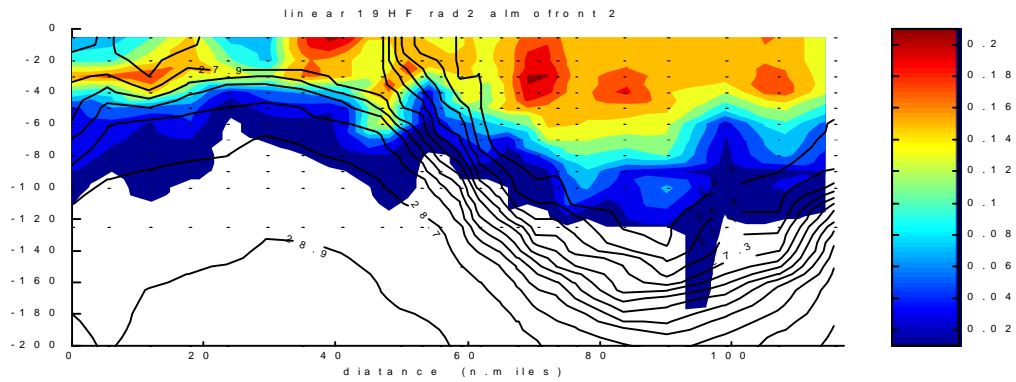
Chla



Fuco



19 'HF



Zea

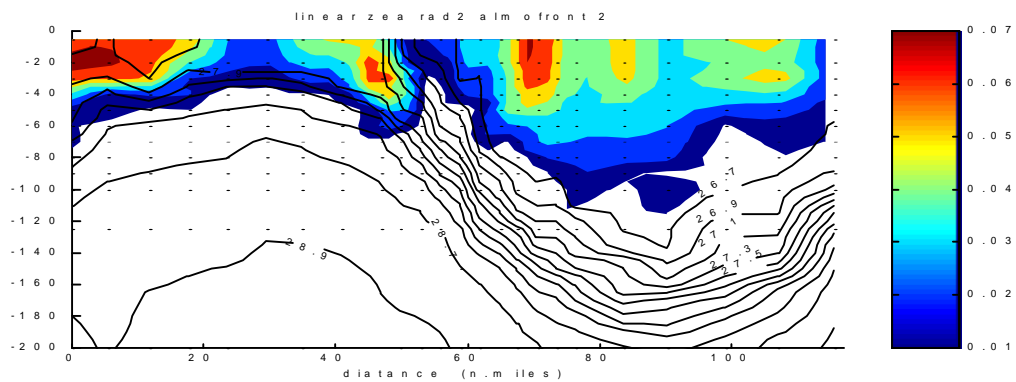


Figure 10: pigments (mg/m³), radiale 2. (Vescovali, Marty, Prieur)

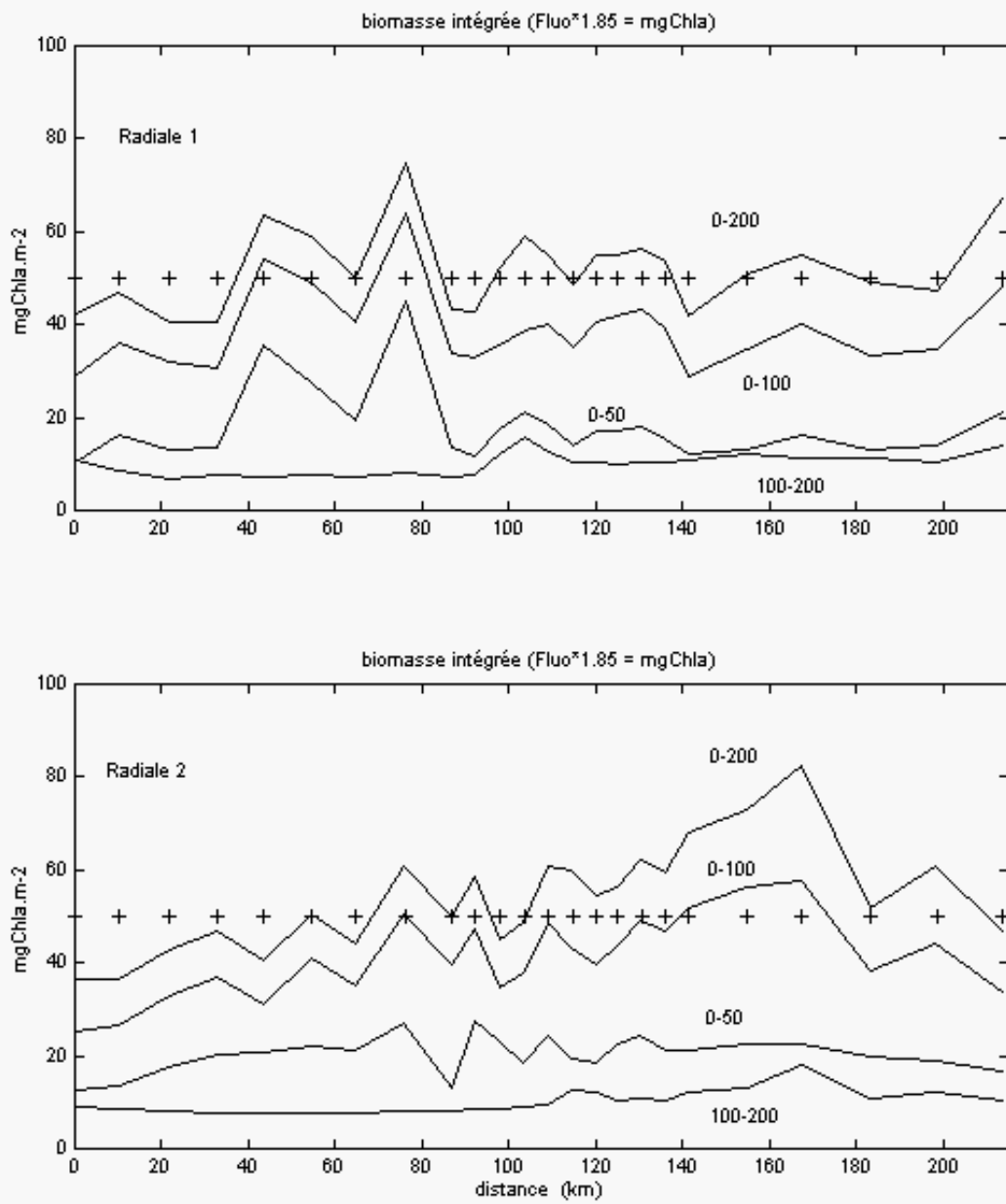


Figure 12 : Biomasses intégrées en termes de Chla pour les deux radiales de stations exécutées au travers de la mer d'Alboran durant le leg 1 d'Almofront 2. La position des stations est indiquée par un '+'. Les distances sont comptées à partir de la première station près de la côte espagnole. Les courbes diffèrent par l'intervalle d'intégration porté en mètres près de chaque courbe.

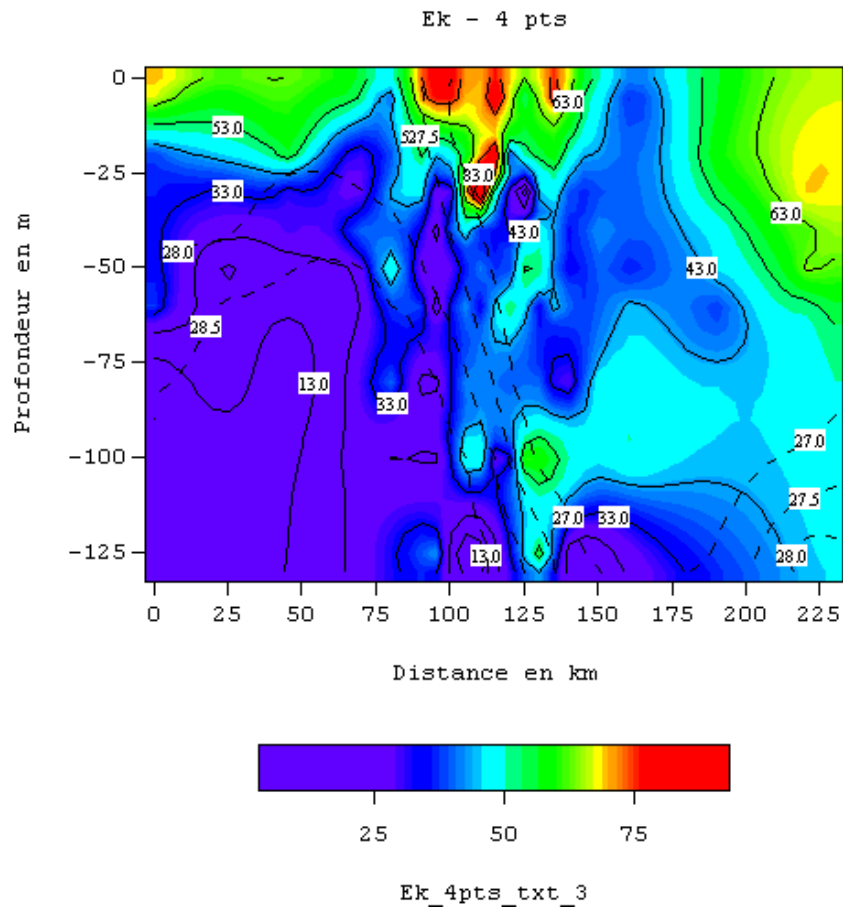
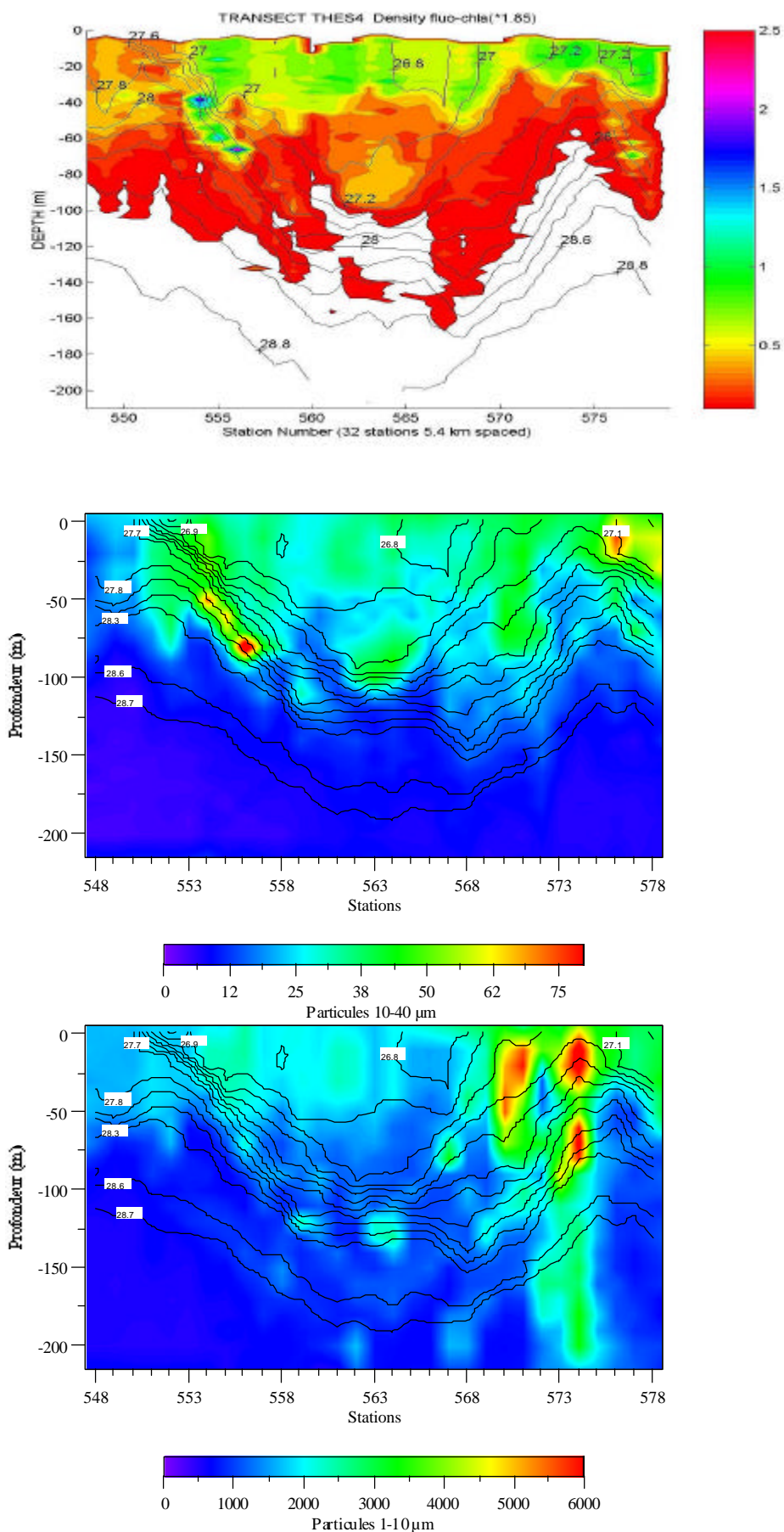


Figure 13 : Répartition verticale des valeurs de Ek en micro Einstein.m-2.s-1 pour la radiale 2 du leg1 d'Almofront 2. Les isolignes de densité, 27.0, 27.5, 28.0, 28.5 kg/m³ sont superposées en traits tiretés. Les distances sont comptées à partir de la première station de la radiale.
(résultats obtenus par F. Bruyant, M. Babin)

Figure 14 : Répartitions verticales de la Chla (mg/m³) en haut, de la concentration en particules de la classe 4 microphytoplancton, au milieu et des classes 2 et 3 nanoplancton additionnées en bas, trouvées pendant la section Shet 4 du leg 2 d'Almofront 2. Cette section traverse le jet et le tourbillon selon un corde. Les eaux méditerranéennes sont à l'extrémité gauche, les eaux du tourbillon au centre, et les eaux denses rencontrées à l'ouest du tourbillon à l'extrémité droite. Les isolignes de densité sont superposées aux distributions des variables en couleur. Cette section a été réalisée les 10 et 11 janvier 1998. La figure est issue du rapport de Marion Francoual (1999). (Sciandra, Francoual).



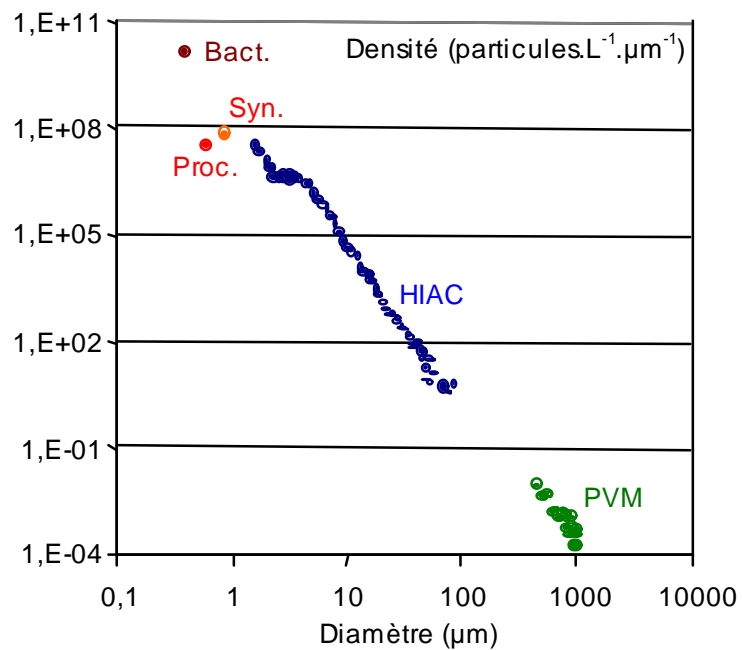
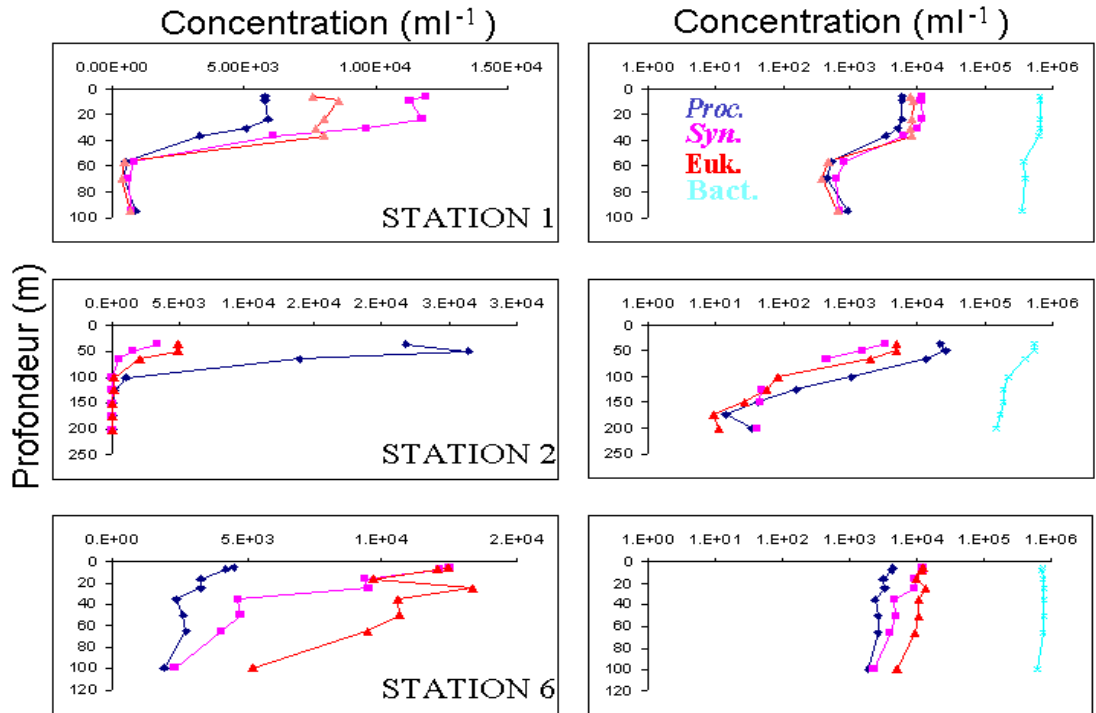


Fig. 15. Spectre de taille des particules comprises entre $0,4$ et $1000 \mu\text{m}$ acquis lors de la campagne Almofront II. Données de cytomètre en flux (S. Jacquet : **Bact.** : bactéries hétérotrophes, **Proc.** : Prochlorococcus, **Syn.** : Synechococcus.), du HIAC utilisé de $1,7$ à $100 \mu\text{m}$, et du PVM (G. Gorsky)

(Sciandra, Francoual,)



Concentration (ml⁻¹) des échantillons de surface

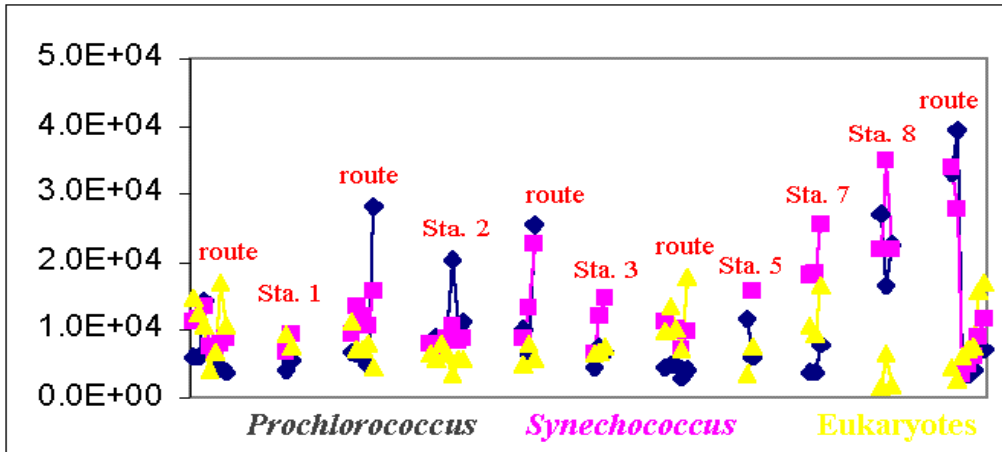


Figure 16 : Quelques résultats concernant les distributions du picoplancton pendant le leg 2 d'Almofront 2. En haut : profils verticaux des concentrations de différents groupes en nombre de cellules par millilitre ; à gauche en échelle linéaire et à droite en échelle logarithmique. Ici station correspond à site. En bas : résumé des mesures de surface durant le leg 2 par ordre chronologique en séparant les mesures en route et les mesures en site. S. Jacquet, D. Marie et D. Vaulot (octobre 1998) .

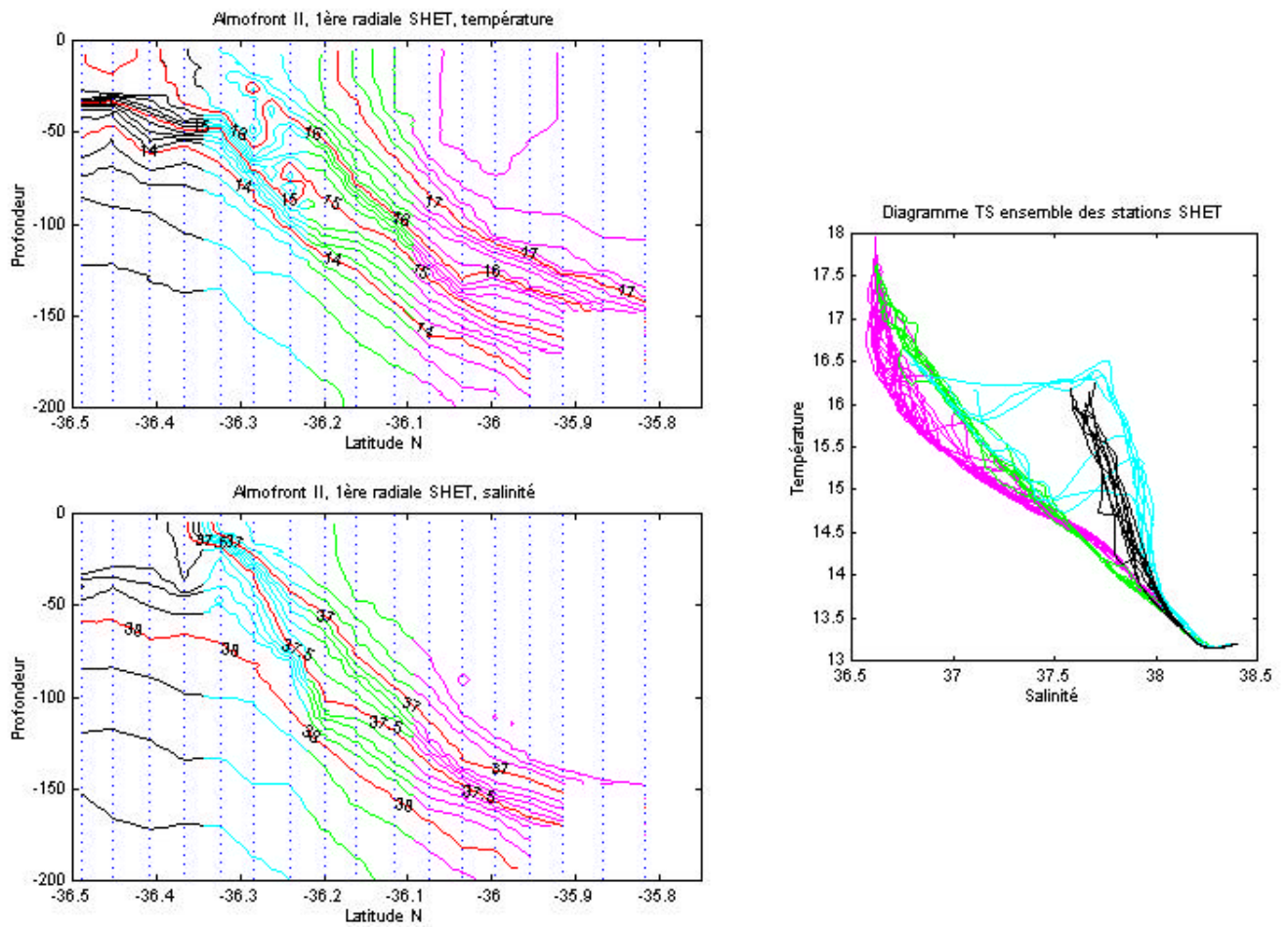


Fig.17 Coupes verticales de température et de salinité le long de la première radiale SHET (16-17 décembre 1997). Le diagramme TS de l'ensemble des stations SHET de la première partie d'Almofront 2 montre que l'on peut classer les stations en 4 catégories : les stations "méditerranéennes", en noir, les stations avec subduction, couleur cyan, les stations du bord du tourbillon, en vert et les stations du tourbillon, en magenta. Sur les coupes verticales, les isolignes sont colorées avec ces mêmes quatre couleurs pour montrer l'emplacement des 4 catégories de stations.

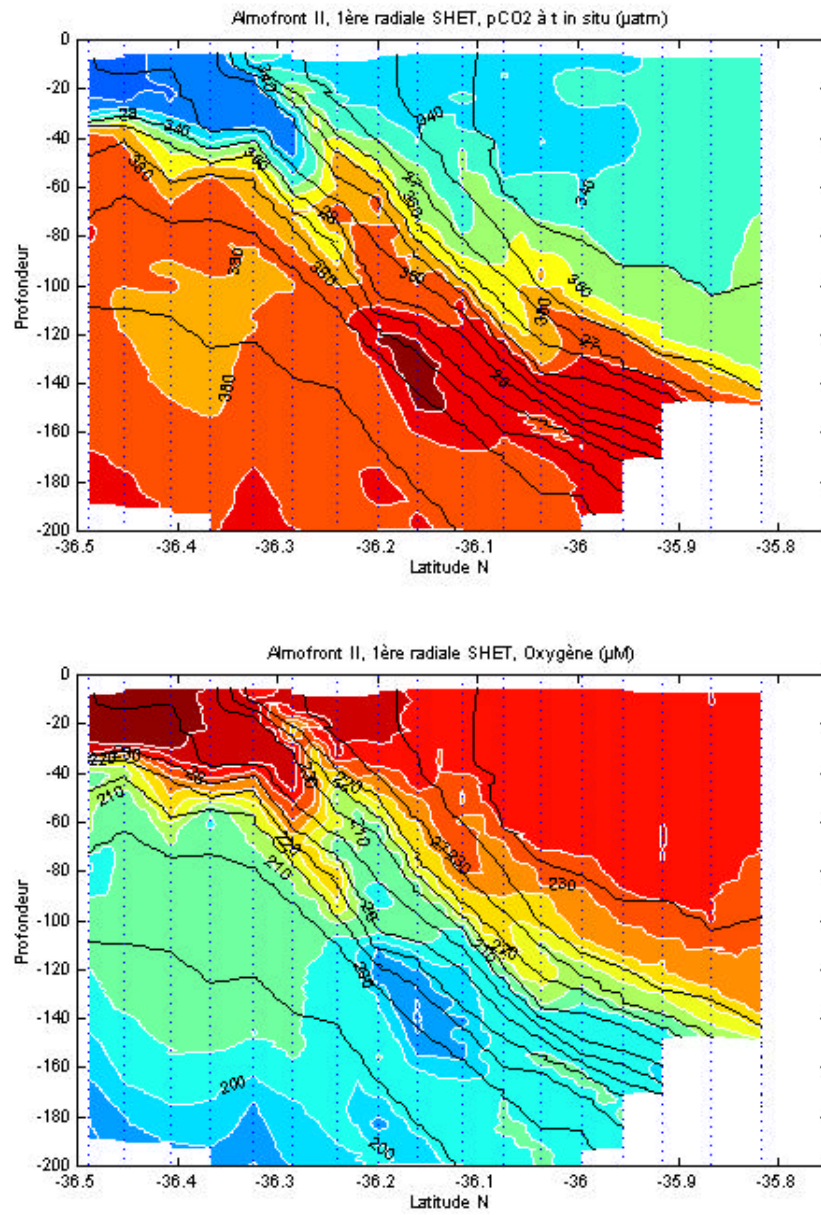
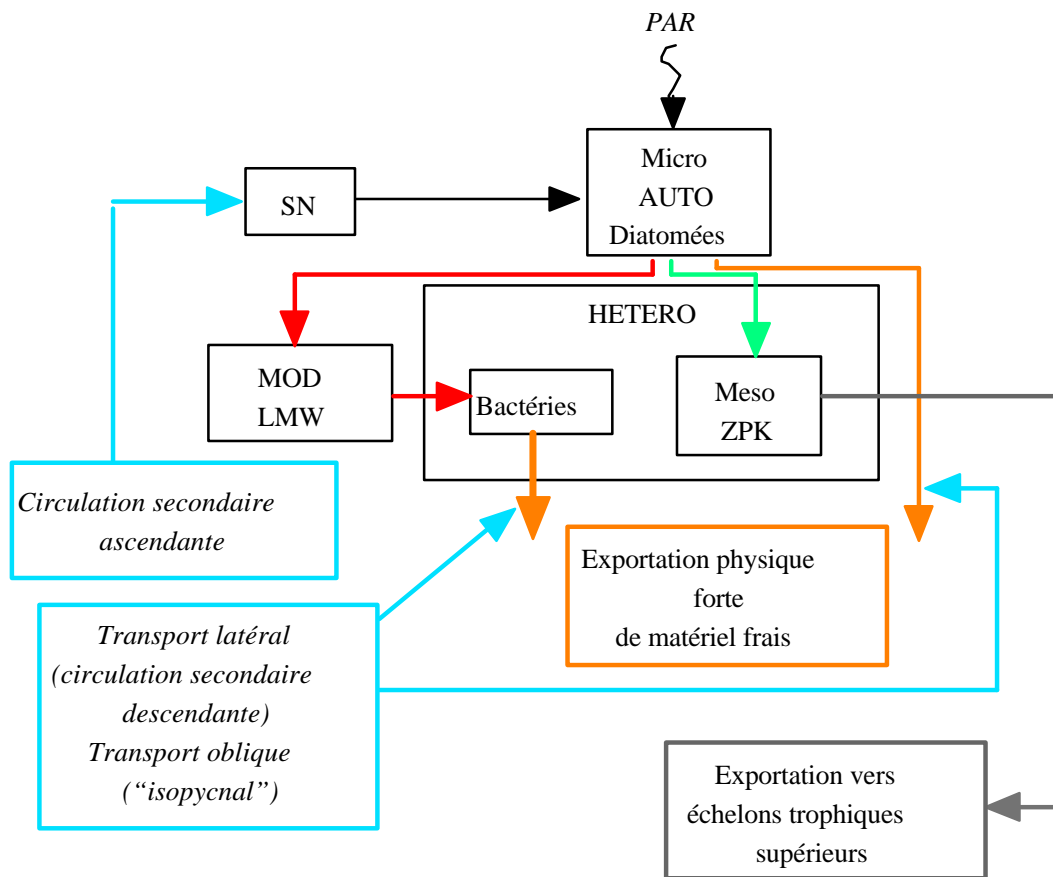


Fig. 18 Coupes verticales de la pression partielle de CO₂ et de l'oxygène, le long de la première radiale SHET (16-17 décembre 1997). Les isopycnés sont indiquées par des traits noirs.

ECOSYSTÈME FRONTAL
(bord gauche du jet)



Système productif :

Production primaire nouvelle forte +

Production bactérienne forte

= piègeage du carbone exporté physiquement

et biologiquement

Rupture du "Réseau microbien" hétérotrophe

SN : Sels nutritifs

Micro AUTO : microautotrophes

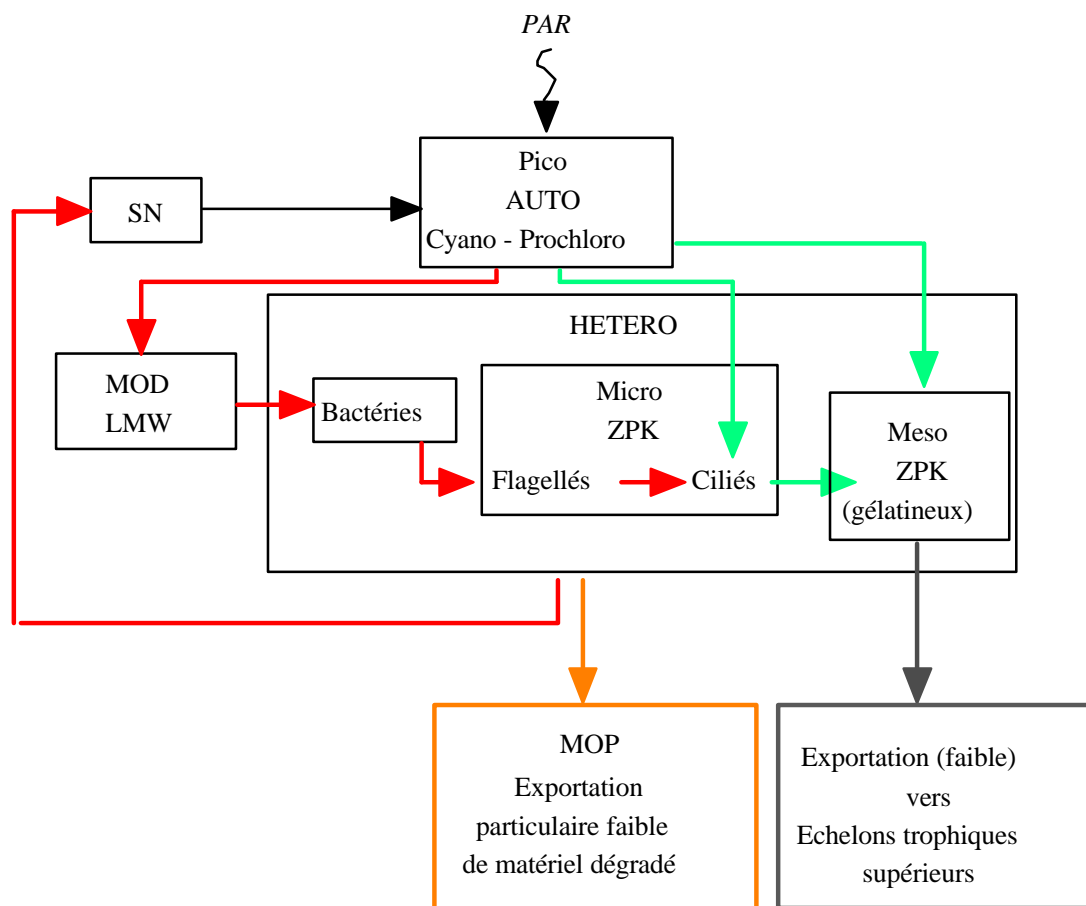
MOD : matière organique dissoute

LMW : Low Molecular Weight

HETERO : hétérotrophes

Meso ZPK : mésozooplancton (copépodes)

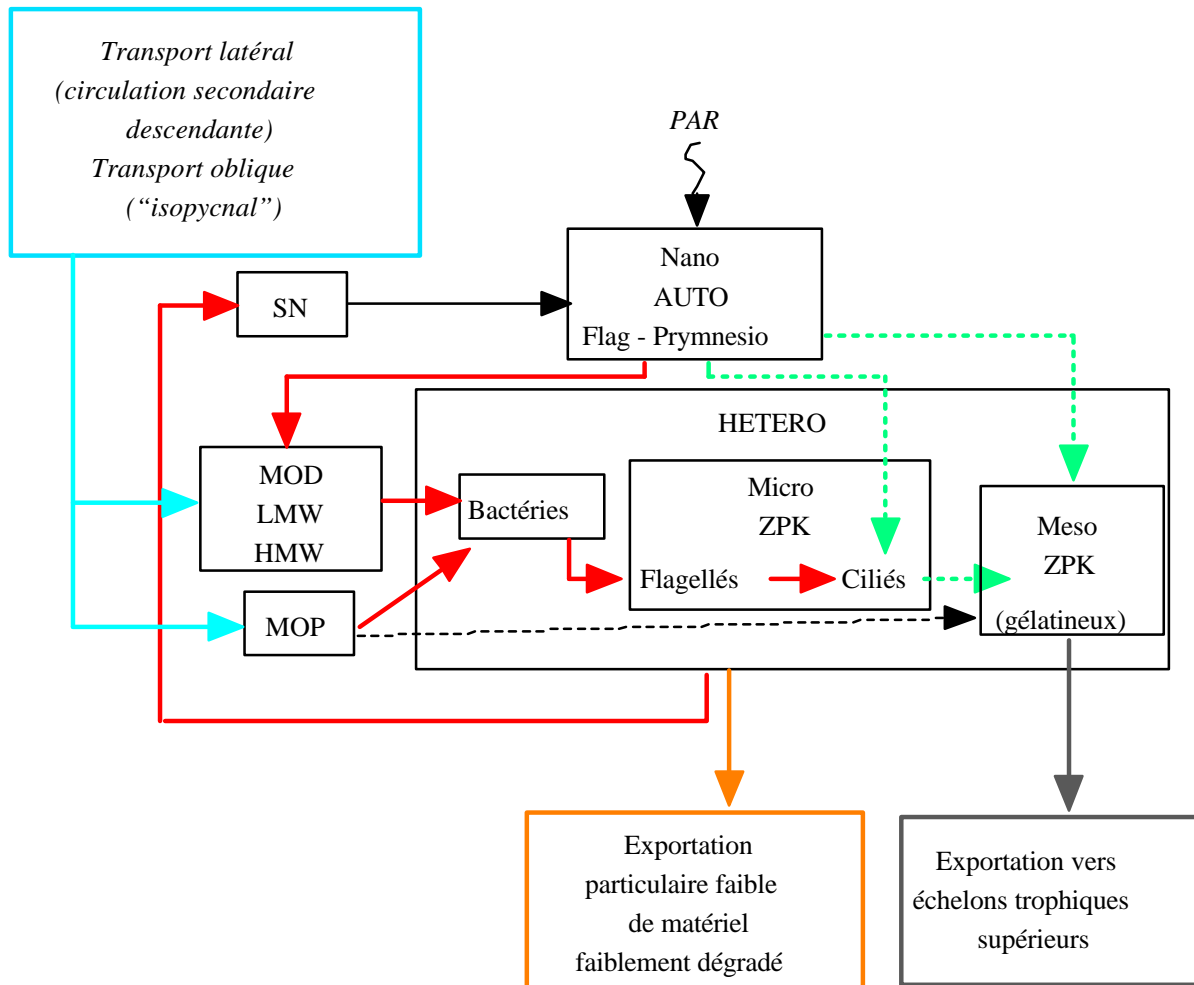
ECOSYSTÈME MÉDITERRANÉEN



Ecosystème typiquement oligotrophe
“Réseau microbien “ en place

- SN : Sels nutritifs
- Micro AUTO : microautotrophes
- MOD : matière organique dissoute
- LMW : Low Molecular Weight
- HETERO : hétérotrophes
- Meso ZPK : mésozooplancton (copépodes)

ECOSYSTÈME TOURBILLON
ANTICYCLONIQUE ATLANTIQUE



Ecosystème “oligotrophe” (?) MAIS
sur une couche d’eau épaisse (100 m)
Production bactérienne soutenue par
apports latéraux en provenance du front

- SN : Sels nutritifs
- Micro AUTO : microautotrophes
- MOD : matière organique dissoute
- LMW : Low Molecular Weight
- HETERO : hétérotrophes
- Meso ZPK : mésozooplancton (copépodes)